

充填性を有する各種グラウトモルタルの
開発および充填性評価方法に関する研究

清水 進

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	本研究の範囲	4
第2章	本研究と既往の研究の関連性	8
2.1	グラウトモルタルの役割	8
2.1.1	無収縮グラウト材の超速硬技術	8
2.1.2	軽量充填材の起泡技術	8
2.1.3	水中不分離型充填材の軽量化技術	8
2.1.4	半たわみ性舗装用充填材の特殊箇所対応技術	9
2.2	グラウトモルタルの環境負荷低減	9
2.2.1	半たわみ性舗装のCO ₂ 原単位低減技術	9
2.2.2	半たわみ性舗装の資源循環技術	10
2.2.3	保水性舗装用の充填材技術	10
2.3	半たわみ性舗装用充填材の特殊箇所対応の評価試験	10
2.4	流動性の評価方法と充填性	11
2.4.1	半たわみ性舗装用充填材の流動性と充填性評価	13
2.4.2	半たわみ性舗装用充填材の新たな充填性評価装置の提案	13
第3章	グラウトモルタルの開発	18
3.1	開発の方向性	18
3.2	超速硬無収縮グラウト材の開発	19
3.2.1	超速硬無収縮グラウト材の必要性	19
3.2.2	無収縮グラウト材の超速硬化技術の現状	20
3.2.3	既存の技術	21
3.2.4	配合設計	22
3.2.5	評価方法	23
3.2.6	性状・物性値	24
3.2.7	まとめ	25
3.3	地下空洞に充填する気泡型軽量充填材の開発	26
3.3.1	軽量充填材の必要性	26
3.3.2	軽量充填材の現状	26
3.3.3	既存の技術	27
3.3.4	配合設計	27
3.3.5	評価方法	28
3.3.6	性状・物性値	29

3.3.7	まとめ	32
3.4	地下空洞に充填する水中不分離型軽量充填材の開発	33
3.4.1	水中不分離の必要性	33
3.4.2	水中不分離軽量充填材の現状	33
3.4.3	既存技術	33
3.4.4	配合設計	34
3.4.5	評価方法	34
3.4.6	性状・物性値	35
3.4.7	まとめ	37
3.5	特殊箇所対応型半たわみ性舗装用充填材の開発	38
3.5.1	半たわみ性舗装について	38
3.5.2	半たわみ性舗装用充填材の現状	39
3.5.3	特殊箇所対応型充填材の必要性	39
3.5.4	高流動型充填材の開発	41
3.5.4.1	既存の技術	41
3.5.4.2	配合設計	41
3.5.4.3	評価方法	42
3.5.4.4	性状・物性値	42
3.5.4.5	まとめ	44
3.5.5	高強度型充填材の開発	45
3.5.5.1	既存の技術	45
3.5.5.2	配合設計	45
3.5.5.3	評価方法	45
3.5.5.4	性状・物性値	47
3.5.5.5	まとめ	49
3.5.6	急勾配型充填材の開発	50
3.5.6.1	既存の技術	50
3.5.6.2	配合設計	50
3.5.6.3	評価方法	51
3.5.6.4	性状・物性値	51
3.5.6.5	まとめ	52
第4章	環境負荷低減が可能なグラウトモルタルの開発	56
4.1	セメント産業の環境負荷低減の現状	56
4.2	環境負荷低減材料の必要性	56
4.3	低CO ₂ 半たわみ性舗装用充填材の開発	56

4.3.1	セメントの CO ₂ 原単位の現状	56
4.3.2	既存の技術	57
4.3.3	配合設計	57
4.3.4	代表配合・CO ₂ 原単位低減率の比較	57
4.3.5	評価方法	58
4.3.6	性状・物性値	58
4.3.7	まとめ	59
4.4	資源循環型半たわみ性舗装用充填材の開発	60
4.4.1	セメントの資源循環	60
4.4.2	既存の技術	60
4.4.3	配合設計	60
4.4.4	代表配合・資源循環率の比較	61
4.4.5	評価方法	61
4.4.6	性状・物性値	62
4.4.7	まとめ	63
4.5	保水性舗装用充填材の開発	64
4.5.1	舗装における環境対策の現状	64
4.5.2	保水性舗装用充填材の必要性	64
4.5.3	既存の技術	65
4.5.4	配合設計	65
4.5.5	評価方法	66
4.5.6	性状・物性値	66
4.5.7	まとめ	69
第5章	半たわみ性舗装用充填材の特殊箇所への適用評価	72
5.1	評価試験の概要	72
5.2	伸縮装置前後 1m の高機能舗装を半たわみ性舗装にする理由	72
5.3	評価方法	72
5.3.1	充填性	72
5.3.2	開放時間	73
5.3.3	高温充填性と性能	73
5.3.4	使用材料	74
5.4	試験結果	74
5.4.1	P 漏斗の流下時間による充填性	74
5.4.2	高機能舗装への充填率	75
5.4.3	圧縮強度による開放時間と高温性能	76

5.4.4	硬度による開放時間	76
5.4.5	混合物曲げ試験による高温性能	77
5.4.6	高温の高機能舗装への充填率	78
5.4.7	X線回折による高温性能	79
5.4.8	SEM観察による高温性能	79
5.5	まとめ	80
第6章	半たわみ性舗装用充填材の充填性評価	83
6.1	充填性評価の概要	83
6.2	流動性試験と充填性の関係確認実験	84
6.2.1	実験概要	84
6.2.2	充填材の種類と配合	84
6.2.3	評価方法	84
6.2.4	試験結果	87
6.3	各種流動性試験	90
6.3.1	実験概要	90
6.3.2	充填材の種類と配合	90
6.3.3	評価方法	90
6.3.4	試験結果	91
6.4	各種充填材の流動性試験と充填性の関係	92
6.4.1	実験概要	92
6.4.2	充填材の種類と配合	93
6.4.3	評価方法	93
6.4.4	試験結果	93
6.5	まとめ	98
第7章	新しい充填性確認試験方法の検討	101
7.1	新しい充填性確認試験方法の概要	101
7.2	試験装置の充填性評価の確認実験	101
7.2.1	実験概要	101
7.2.2	試験装置-1	101
7.2.3	充填材の種類と配合	107
7.2.4	評価方法	108
7.2.5	試験結果	109
7.2.6	まとめ	120
7.3	試験装置の充填性評価と理論充填率	122

7.3.1	実験概要	122
7.3.2	試験装置-2	122
7.3.3	実際のポーラスアスファルト母体の充填性の確認実験	123
7.3.3.1	実験概要	123
7.3.3.2	充填材の種類と配合	124
7.3.3.3	評価方法	125
7.3.3.4	試験結果	125
7.3.4	試験装置の充填性の確認実験	129
7.3.4.1	実験概要	129
7.3.4.2	充填材の種類と配合	129
7.3.4.3	評価方法	129
7.3.4.4	試験結果	129
7.3.5	降伏値による理論充填率の検討	134
7.3.5.1	検討概要	134
7.3.5.2	テーブルフロー値と降伏値	134
7.3.5.3	仮想再細管理論と充填率理論	135
7.3.5.3.1	鋼球間の仮想細管半径 $r_{\text{理論値}}$	135
7.3.5.3.2	テーブルフロー値と仮想細管半径 $r_{\text{実測値}}$	136
7.3.5.3.3	半径比	137
7.3.5.3.4	理論充填率	138
7.3.5.3.5	9mm 試験機の理論充填率	140
7.3.5.3.6	11mm 試験機の理論充填率	142
7.4	まとめ	145
第8章 総括		147
謝辞		152

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的

建築・土木分野においてセメントは古くから使用され、そのほとんどが、構造物を構成するコンクリート中の骨材を繋ぐ接着剤として使用されている。1824年にイギリスの Joseph Aspdin によって発明されたポルトランドセメントは、19世紀中ごろにヨーロッパやアメリカにおいて工業化され、1848年には日本でも製造が可能となり、需要の増加とともに安価で丈夫な構造材料として現在もなお全世界で不動の地位を築いている。ポルトランドセメントに端を発したセメントの種類は日本工業規格(JIS)で品質規定がなされ、ポルトランドセメント、混合セメント、エコセメント、それ以外のセメントに分類され、これらのセメントを目的に応じて使い分けている^{1),2),3),4),5)}。

セメントは水と接触して固まる性質を持っており、セメントと水だけを混ぜてペースト状にしたものがセメントペーストである。構造材料として使用される場合、セメントペーストに骨材を混ぜた状態で使用される。セメントに細骨材を混ぜた状態のものをモルタルといい、性能や性質、経済性から比較的寸法の薄いものに使用される。このモルタルに、さらに粗骨材を混ぜた状態のものをコンクリートといい、経済性の高い構造材料として、建築物、橋梁、道路、河川護岸、トンネル、ダム、港湾、空港など社会生活に必要な構造物の建設に必要不可欠な材料となっており、セメントの多くはこの構造物の建設に使用するレディーミックスドコンクリートに使用される。構造物の性能を決めるレディーミックスドコンクリートは、セメントと同様に日本工業規格(JIS)において、使用するセメントや骨材等の原料、製造配合の品質規定が詳細に決められており⁶⁾、はっきりとした使用目的や用途の上で成熟した産業となっている。

セメントの使用量から見て少ないが、コンクリートよりも古い歴史を持つモルタルは、セメントの起源とされる BC2600 年頃のエジプトで、気硬性セメントを接着剤としてピラミッドの建設に使用され、その後も石、レンガ、瓦の接着や漆喰等の壁塗り材として古くから幅広い用途に使用されてきた。現在もモルタルはコンクリートでは対応できない様々な用途に使用されており、1755～1759年にはイギリス海峡の三代目エディストン灯台の建設において潮の満潮干潮の 12 時間の間に硬化が必要とされるなど、その当時から現在に至ってもモルタルに対して高度な性能が求められている^{7),8)}。

コンクリートやモルタルの性能を決定する原料として、セメントと骨材の他に、もう一つ重要な材料として混和材料があり、その性能を向上させたり、機能を付与させたりしている。混和材料はそれぞれについて、発明、発見、開発、および製品化等の過程があるが、大きく見ると、コンクリートやモルタルの質的变化、ニーズ、技術レベルの上昇、時代的背景等によって多様な混和材料が開発され、製品化されてきた。混和材料は大別して混和材と混和剤に区別される。混和材は高炉スラグ、フライアッシュ、セメント膨張剤のように多量に使用されるもので、「比較的少量に用いるフライアッシュなどのような混和材料」と定義されており、一般に無機系微粉末を指している。混和剤は薬品的に用いるもので「薬品的に少量用

いるもので、主として、その界面活性作用によって、コンクリートやモルタルの諸性質を改善するために用いる AE 剤などの混和剤」と定義されており、一般に液体または粉末の有機系化学混和剤を指している。古代ローマ時代「獣の血や脂」「乳」等をモルタルに混和したのが起源とされる有機系混和剤は、1932 年アメリカで松ヤニを主成分とした化学混和剤へと発展し、1950 年代には日本に化学混和剤がアメリカから導入された⁹⁾。

化学混和剤は JIS A 6204 でその品質が規定され、AE 剤、減水剤、AE 減水剤および高性能 AE 減水剤に分類されている。AE 剤は、安定した微細な独立気泡を導入でき、起泡性が優れている樹脂酸塩系や非イオン系界面活性剤が、ワーカビリティや凍結融解性の向上を目的として使用される。減水剤や AE 減水剤は、セメント粒子表面に吸着し、高分子の立体障害効果や静電的反発力により、それを分散させるリグニンスルホン酸塩やその誘導体、オキシカルボン酸塩、ポリオール誘導体などが、同様にワーカビリティや凍結融解性の向上を目的として使用される。また、これらより分散性能の優れているナフタレンスルホン酸塩ホルムアルデヒド縮合物(ナフタレン系)やメラミン樹脂スルホン酸塩(メラミン系)が流動化剤や高性能減水剤に利用され、さらに、セメント粒子に吸着し、主にその立体障害効果によりセメントを分散させるポリカルボン酸系と総称される楕形高分子が高性能 AE 減水剤として利用されている。

高性能 AE 減水剤は高い減水性能とスランプ保持性能を兼ね備えた剤であり、1986 年にナフタリン系の高性能減水剤に反応性高分子(徐放性分散剤)を併用した高性能 AE 減水剤が市販されたことに始まり、ポリカルボン酸系へと至っている。その技術的なポイントは優れたスランプ保持性にあり、反応性高分子の配合量を制御することにより夏季であっても長時間のスランプ保持が可能である。また、コンクリートの高耐久化や高強度コンクリート、高流動コンクリートの製造にも、高性能 AE 減水剤が有効であることが認められ、セメントの分散機構に関する基礎研究の急速な進展を背景とし、混和剤業界のみならず、大学、セメント会社、建設会社を巻き込んだ研究開発が盛んに行われ、基礎から応用に至る数多くの研究成果が発表され、高性能 AE 減水剤は急速に普及した^{10),11),12)}。

ポリカルボン酸系は、カルボキシル基を有する吸着部位と種々のポリエチレンオキシドを有する側鎖(グラフト鎖)の楕型高分子であり、それらの種類、量、長さ、組み合わせなどを自由に変えられることから、理論を検証する分子構造を系統的に合成することができる。また、従来の静電反発力による分散機構に加えて、立体反発力やディプレッション効果などによる分散機構の研究も進み、電荷付与による分散剤の構造にとらわれない新しい分散剤の構造を有し、さらに、分散剤の吸着部位と側鎖との組み合わせにより、吸着速度を自由に制御することが可能である。様々な分子構造を有するポリカルボン酸系の特徴は、低使用量で大きな減水効果や流動性が得られ、良好なスランプ保持性や流動保持性が得られ、新たな機能を付与できる化学構造を有しているため、所要の流動性や流動保持性をコントロールすることが可能となるが、多くの異なる分子構造を持つため、安定的な使用方法や品質管理手法の確立には整理が必要とされている^{13),14),15),16),17),18)}。

セメント、細骨材、混和材料からなるモルタルは、コンクリートに比べ比較的薄い施工が可能なことから、コンクリートでは対応できない様々な箇所に使用されるとともに、コンクリート構造体の補強や補修、着色による美観材料としても使用される¹⁹⁾。このように、モルタルの用途や目的は多種多様であり、目的に応じた性能を達成するためには、各種混和材料を使用した複雑な配合設計が必要となるため、現在では、プレミックスタイプが主流(液体以外の全ての材料を予め混合製造)となりつつあり、現場では誰でも安定した高性能モルタルが得られるようになってきている。また、フレッシュ性状を決定する化学混和剤は、モルタルの配合設計において重要な役割を担っており、様々なフレッシュ性状を有するプレミックスマルタルの配合設計を可能としている。粉末のポリカルボン酸系をはじめとした化学混和剤の発展により、モルタルの配合設計において、様々な化学混和剤を組み合わせることで、任意にフレッシュ性状がコントロールできるようになった結果、フレッシュ性状の中でも、流動性を有するモルタルの性能が飛躍的に向上し、さらに目的や用途は拡大していき、要求性能も難しさを増して、さらなる多様化の方向と、プレミックスマルタルの必要性、重要性が明確となってきている。土木分野において流動性を有するモルタルは大小空隙、間隙、密閉空間への充填を目的としたグラウトモルタル(充填材)として利用されている²⁰⁾。インフラ整備の技術や機械の進歩により、土木分野では、施工の新技术、特殊化、時間短縮、簡略化、環境配慮等の新たな性能が求められようになり、対応するためにはグラウトモルタルが重要な手段となる^{21),22),23)}。よって、目的や使用部位によって要求性能は異なり、様々な要求性能を満足する流動性を有するグラウトモルタルを開発する必要がある。

また、実現場では規格では表せない、現場ならではの要求性能が存在するため、新たに開発したグラウトモルタルの性能評価や適用性の検討を行い実証する必要がある。

モルタルの要求性能のひとつにワーカビリティ(作業性)が上げられ、この作業性は流動性の高低により大きく2つ大別される。比較的流動性を必要としないモルタルの作業性評価は、コテ作業性、吹付性、ポンプ圧送性、チキソトロピー性で判断されるが、最終的には施工者の感覚に委ねるところが多いのが現状である^{24),25)}。逆に比較的高い流動性を必要とするモルタルの作業性評価は、評価方法の規格値が作業性に直結しており、性状を評価する方法が目的ごとに確立している。また、作業性の中でも空隙への充填性は施工時における目視確認が難しく、現状では簡易的な流動性試験から充填性を判断して施工を行っている^{26),27),28),29)}。しかしながら、求められる充填性を達成する流動性は多様化しており、今までの流動性評価方法が充填性を適切に評価しているか検証する必要が生じている^{30),31)}。

また、充填性の確認では、実際の施工を模した試験が必要であるとされているが、施工を模した試験体は実施工の再現性が難しく、そのため、常に同一条件での試験の実施は困難である。よって、同一条件で充填性確認が可能な簡便な方法が求められている。

1.2 本研究の範囲

第 1 章の序論では、モルタルにおける各種要求性能の多様化と、関連する混和材料の開発状況より、現状のモルタルにおける問題点と研究の目的を示した。

第 2 章では、研究の背景とグラウトモルタルのフレッシュ性状に関する既往の研究について述べ、本研究の位置づけを示した。

第 3 章では、①比較的大きな空隙に充填する超速硬無収縮グラウト材②地下空洞に充填する軽量充填材③水中不分離軽量充填材④半たわみ性舗装用充填材について、それぞれの要求性能と流動性の関係に着目して配合設計を行い、新規の材料開発に結び付けている。

第 4 章では、環境負荷低減に着目した材料設計、特に半たわみ性舗装のセメント系充填材の配合設計を行った。現状においては環境負荷低減を目的としたセメント系材料は少なく、セメントの CO₂ 原単位は高い。よって、CO₂ 原単位の低減、資源循環型社会、都市部のヒートアイランド抑制に貢献できる充填材の配合設計を行った。

第 5 章では、半たわみ性舗装用に開発した高流動型 1 時間開放タイプが、特殊箇所である高機能舗装の狭小空隙に充填され、早期の交通解放が可能かを検証した。その中で、充填性評価から高温時の充填が可能であり、その時の硬化反応は正常に行われ、今まで以上の早期解放が可能である事を実証した。

第 6 章では、半たわみ性舗装用充填材の充填性と種々の流動性評価試験について相関性を明らかにし、最適な流動性評価方法を提案した。充填材の流動性評価は各機関により規格化され、主流は P 漏斗による流動化時間を用いて 9~14 秒と決められている。舗装の性能を左右する最大の因子である確実な充填性が、P 漏斗の流下時間による流動性評価で適正に評価されているかを検討するとともに、他の流動性評価方法についても検討を行った。実験結果をもとに評価の妥当性をレオロジー的にビンガム流体でモデル化して検証し、降伏値が大きく影響することを明らかとした。

第 7 章では、半たわみ性舗装用充填材の新たな充填性評価が可能な装置を提案し検討を行った。充填性確認は、実際のポーラスアスファルト混合物をその都度作成して行うため、1 枚に対して 1 回であり、空隙率や空隙径の統一が難しく同一条件での評価ができない。よって、繰り返しの試験が可能で、常に同一条件となり、簡易性を有する充填装置を考案した。装置は、六方細密充填の理論をもとに、アクリル製正三角錐に鋼製球体をつめ、空隙率を 26% に統一し、球体径により空隙径の変化を模擬している。この装置に各種充填材を充填し、流動性評価を行いながらポーラスアスファルト混合物への充填性と比較する形で検討を進め、レオロジー的な考えをもとに球径による空隙径と流動性評価による降伏値の相関性を導き出した。

第 8 章では、本研究の成果を総括し、高い要求性状を満足するグラウトモルタルを開発された事、および充填性について適切に評価できる方法が得られたことを述べると共に、今後の課題を示した。

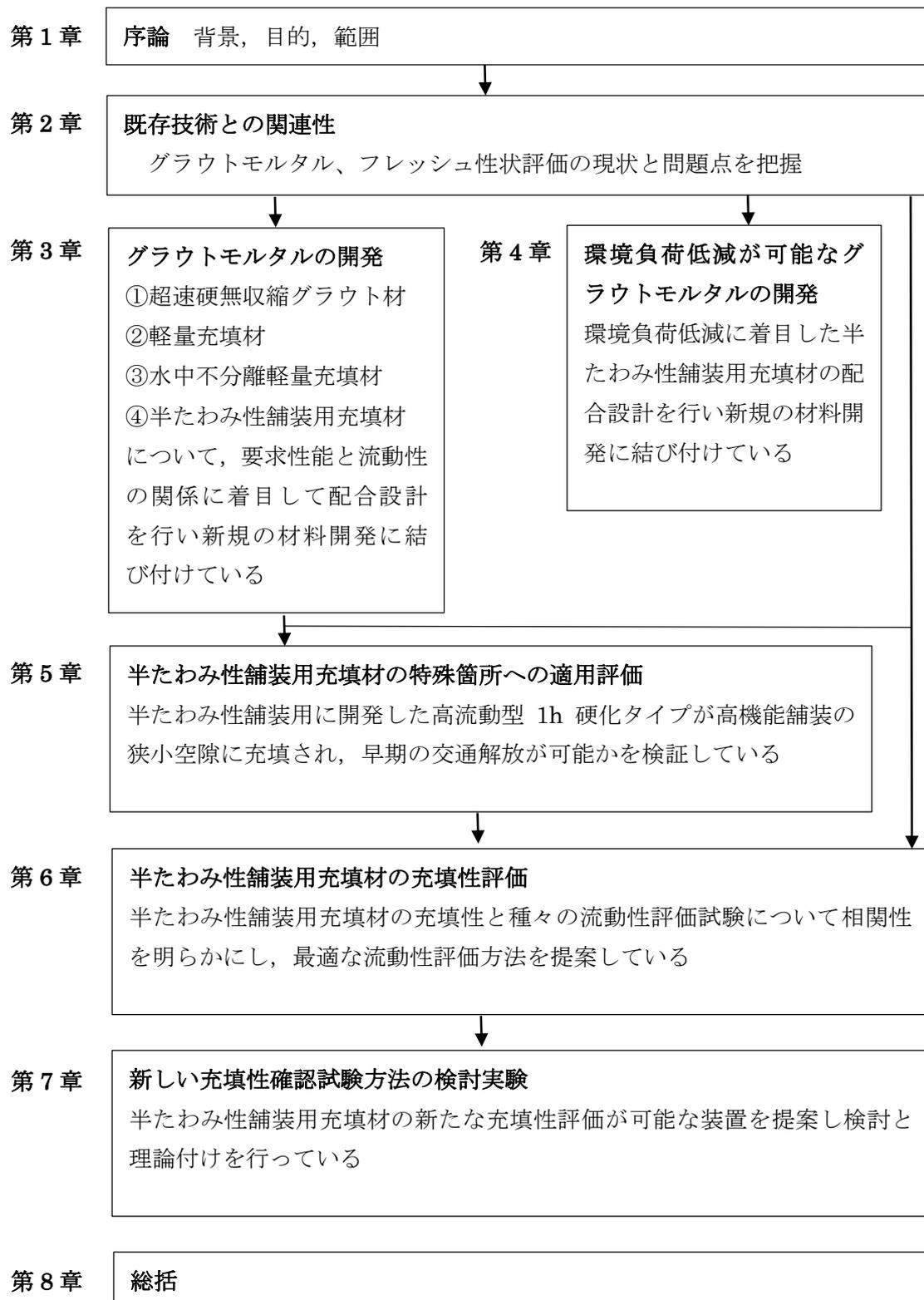


図-1.1 本研究の構成

第1章の参考文献

- 1) 荒井康夫：改訂2版 セメントの材料化学，大日本図書(株)
- 2) (一財)日本規格協会：JIS R 5210 ポルトランドセメント，JIS ハンドブック，pp335-347(2014)
- 3) (一財)日本規格協会：JIS R 5212 高炉セメント，JIS ハンドブック，pp348-355(2014)
- 4) (一財)日本規格協会：JIS R 5213 シリカセメント，JIS ハンドブック，pp356-363(2014)
- 5) (一財)日本規格協会：JIS R 5214 エコセメント，JIS ハンドブック，pp372-381(2014)
- 6) (一財)日本規格協会：JIS A 5308，レディーミクストコンクリート，JIS ハンドブック，pp27-102(2014)
- 7) (一社)セメント協会：セメントの常識(2013.4)
- 8) John Smeaton：A narrative of the building and a description of the construction of the Edystone Lighthouse with stone to which is subjoined, an appendix, giving some account of the lighthouse on the Spurn Point, built upon a sand by John Smeaton.(1813)
- 9) 坂井芳夫：セメント・コンクリート用混和材料，技術書院
- 10) 坂井悦郎ほか：コンクリート用化学混和剤の変遷，コンクリート工学，Vol.37，No.6，pp4-7，(1999.6)
- 11) 水沼達也：高性能減水剤と高性能 AE 減水剤への展開 [ナフタリン系からポリカルボン酸系へ]，高性能洒水剤から高性能 AE 減水剤へ 2，セメント・コンクリート，No 793，pp42-48，セメント協会，(2013)
- 12) (一財)日本規格協会：JIS A 6204 「コンクリート用化学混和剤」
- 13) 太田晃ほか：高性能 AE 減水剤の化学構造とモルタルの流動性に及ぼす作用効果の基礎的研究その(1)，東京大学 生産研究 49 巻 12 号，pp637-640，(1977.12)
- 14) 菅俣匠ほか：セメント粒子の分散性に及ぼすポリカルボン酸ポリマーの分子構造の影響，土木学会論文集，No.662/V-49，pp17-27(2000.11)
- 15) 松澤一輝ほか：分子構造の異なるポリカルボン酸系分散剤を添加したセメントペーストの流動性に及ぼす硫酸イオンとフッ化物イオンの影響，Cement Science and Concrete Technology, Vol.67，pp59-64(2013)
- 16) 飯場栄二ほか：ポリカルボン酸系分散剤の化学構造が流動性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22 No.2，pp151-156(2000)
- 17) 葉賀忠昭：材料-混和剤-，コンクリート工学，Vol.39，No.1 pp66-69，(2001.1)
- 18) 戸田和敏：混和剤の種類・性質の変遷と将来展望，コンクリート工学，Vol.37，No.1 pp57-60，(1999.1)
- 19) (一社)セメント協会：すぐに役立つセメント系補修・補強材料の基礎知識(2006.8)
- 20) (一財)日本規格協会：JIS A 0203 「コンクリート用語」

- 21) 山岸俊一：都市部でのコンクリート高架橋の支承取替工事について，川田技報，Vol.29(2010)
- 22) 池野誠司ほか：防音壁を利用したコンクリート桁振動低減工法の開発概要，JR EAST Technical Review-No.22，pp45-50
- 23) 山岸俊一：道路橋 PC 桁の補修・補強工事，川田技報，Vol.23(2004)
- 24) 青木正行：コンクリート構造物における高チクソトロピー性無収縮断面修復材なおしタルの開発，三井造船技報 No.201(2010.10)
- 25) 谷倉泉ほか：建設材料および 施工の各種性能評価試験，建設の施工企画'12. 10，pp72-76
- 26) 大島義信ほか：鋼材を有するシース管内に充填されたグラウト先端表面の基本特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp499-504，(2011)
- 27) 竹内祐樹ほか：PC グラウトの充填度評価と再注入に関する基礎的研究，プレストレストコンクリート技術協会 第 18 回シンポジウム論文集，pp365-370(2009.10)
- 28) 国枝泰祐ほか：衝撃弾性波による PC グラウトの充填評価手法に関する実験および有限要素解析，土木学会第 56 回年次学術講演会 V-406，pp812-813(2001.10)
- 29) NEXCO：試験法 312 無収縮モルタル品質管理試験，第 3 編 コンクリート関係試験方法(2016.8)
- 30) 野島昭二ほか：PC グラウトの仕様材料が材料分離抵抗性に影響を与える要因，プレストレストコンクリート技術協会 第 18 回シンポジウム論文集，pp357-360(2009.10)
- 31) 宮本一成ほか：PC グラウトの充填性に与える影響要因に関する検討，土木学会第 58 回年次学術講演会 V-632，pp1241-1242(2003)

第2章 本研究と既往の研究の関連性

2.1 グラウトモルタルの役割

モルタルの流動性は、施工箇所により二つの作業性を決定する。オープンな水平面の流動性は、レベリング性やコテ作業性を決定し、密閉空間や空隙への充填（グラウト）の流動性は、充填性を決定する。土木分野ではコンクリートジョイントの充填、耐震等各種補強、半たわみ性舗装、コンクリート構造物周辺や地下空洞の充填のように各種充填により構造物の建設やインフラを保護している。充填に使用するグラウトモルタルの役割は、確実な充填であり、現在では、更に目的や用途の多様化により充填性を含む様々な要求性能が付加されるようになってきている。ゆえに、グラウトモルタルの役割を達成させるため既存技術をもとに新たにグラウトモルタルを開発する必要がある。

2.1.1 無収縮グラウト材の超速硬技術

無収縮グラウト材の概念は、充填可能な流動性を有し、密閉状態において材齢7日で元の体積を下回らないことである^{1),2)}。また、一般的なモルタルの超速硬技術は、超速硬セメント(ジェットセメント)やアルミナセメントと凝結遅延剤で可能である^{3),4),5)}。しかし、流動性や硬化時間が不安定であり、凝結遅延剤を現場で添加し、硬化時間をコントロールする場合もあるため、施工者が限定される場合がある。また、プレミックスとした場合は、在庫期間によるセメントの風化が原因で、凝結時間が設定した目標値より延長し要求性能が達成できなくなったり、超速硬セメントを使用した場合は、無収縮モルタルとして重要な初期膨張のコントロールが難しい⁶⁾。

2.1.2 軽量充填材の起泡技術

地下空洞の充填には気泡を利用した軽量モルタルにて充填を行っている。現在は、現場で起泡剤により予め気泡をつくりモルタルと混合して施工するプレフォーム方式が多く採用されている^{7),8),9)}。しかし、大規模なプラントや計量が必要で小規模充填や緊急な場合には向いていない。また、プレミックスとした場合の起泡混入は、発泡剤による練り混ぜ後の発泡¹⁰⁾か、起泡剤による練り混ぜ時の起泡となる。しかし、発泡剤は安定した気泡量の調整が難しく、起泡剤は、流動性との両立と、普通ポルトランドセメントを使用した場合やセメントのアルカリによる気泡の保持が難しい^{11),12)}。

2.1.3 水中不分離型充填材の軽量化技術

水中不分離コンクリートは様々な研究がなされ研究発表や各種開発が行われ、技術的に確立されている^{13),14)}。モルタルも同様であり、水中不分離性は、高粘度増粘剤の添加や低水/粉体比により付与されるのが一般的である^{15),16)}。しかし、これらを軽量化する技術は乏しく、確実に水中不分離性を有して、高い流動性を付与するのは難しい。また、軽量充填材で最も重要とされる要求性能はコストであり、研究されている軽量骨材等では粉体のコス

トが高くなり、実現が難しい¹⁷⁾。さらに、水と置換しながら充填するため水よりやや重い密度が必要であるため、練り混ぜ時のミキサーの回転で起泡させる気泡混入技術では、ミキサーの能力や練り混ぜ時間、量、投入方法が影響し、目標とする単位容積質量を現場で常に実現させるのは難しい^{18),19)}。

2.1.4 半たわみ性舗装用充填材の特殊箇所対応技術

半たわみ性舗装は、ポーラスアスファルト混合物にセメント系充填材を充填させた表層舗装材であり、塑性変形を防止する舗装として広く普及し、充填材も規格化されている^{20),21),22),23)}。半たわみ性舗装の性能は確実な充填があげられ、充填材の性能に左右される。近年では、適用箇所が多様化しており、今までにはなかった特殊な箇所や条件での施工が増えている^{24),25),26)}。このような場合は、規格に合わせて開発された充填材では、充填不足となる可能性や耐久性の面で対応が難しい。

2.2 グラウトモルタルの環境負荷低減

セメント会社の環境マネジメントは積極的に取り組まれている^{27),28)}。セメントを使用した配合設計を行うモルタルも同様に取り組まなければならない。しかし、要求性能を達成しながら環境負荷低減を可能とする配合設計は難しいため、環境負荷低減を目的としたモルタルは少ない。よって、原料のセメントから見つめなおし、グラウトモルタルの特徴を生かした環境負荷低減を考える必要がある。具体的な方策として、原料であるセメントのCO₂原単位は「692CO₂kg/t(2015年)」²⁹⁾と非常に大きいため、セメントを使ったモルタルのCO₂原単位を低減する検討や、資源循環、ヒートアイランド抑制による環境負荷低減に貢献できるモルタルの検討が可能であると考えられる。

2.2.1 半たわみ性舗装のCO₂原単位低減技術

CO₂原単位が大きいセメントは、様々な取り組みにより低減をはかっているが決して少なくなったとは言えず、世界規模で見れば増加傾向にあり、将来的にも傾向は変わらない³⁰⁾。

一方、コンクリートでは、反応性を有する高炉スラグやフライアッシュ等の副産物を利用してCO₂排出量を低減させる研究が行われ、技術は確立されている^{31),32),33),34)}。国交省では、公共工事におけるポルトランドセメントの使用量を減らし、CO₂発生を抑制するため、高炉スラグを使用したセメントをグリーン購入法の特定調達品目に指定している³⁵⁾。また、バイオマス燃料による発電で焼成されたセメントもコンクリートやモルタルに利用されるようになってきている^{36),37)}。しかし、反応性の副産物をセメントと置き換えた場合、強度発現性は長期を対象としており、また凝結促進には高温養生が必要とされ、モルタルの要求性能を達成するのは難しくなる^{38),39),40),41)}。特に舗装分野では、早期交通開放が重要とされており、凝結促進が必要となる。また、バイオマス燃料を使用したセメントの利用技術は、メーカーや製造工場が限定されており、一般には入手が難しい。

2.2.2 半たわみ性舗装の資源循環技術

セメントは原料として天然の石灰石を主原料としているが、あらゆる産業から排出される廃棄物や副産物をはじめとして、家庭から排出される廃棄物までセメントの製造設備で安全かつ大量にセメントへとリサイクルされている^{42),43)}。その中で、日常生活から多量に発生する都市ゴミの焼却灰や下水汚泥等が石灰石や粘土の成分と類似していることに着目して開発されたのがエコセメントであり、JIS化により一般的なセメントとして拡販が期待されている^{44),45)}。「JIS R 5214 エコセメント」には凝結時間の異なる普通と速硬の2種類が規格化されているが⁴⁶⁾、市場は普通のみとなっているため、早い硬化時間の要求に対応することは難しい⁴⁷⁾。また、塩化物イオン量が普通ポルトランドセメントと比べ高いことから、無筋コンクリートや一部の鉄筋コンクリートに限定されているため、使用箇所は限定される⁴⁸⁾。

2.2.3 保水性舗装用の充填材技術

保水性舗装は、高機能舗装の空隙に保水性を有するセメント充填材を充填した舗装であり、雨や散水により水を保水して、その気化熱により路面温度を低減し、ヒートアイランド抑制に貢献が可能である⁴⁹⁾。充填材の保水機能を付与させる保水材は、シルト、高炉スラグ粉、珪藻土、多孔質炭酸カルシウム、セピオライト、吸水性樹脂が使用される。保水性舗装は、舗装体中に雨水を吸収・浸透させることから、一部は路盤などを通して土壤中に流出する。したがって、環境に対する安全性の観点から、有害な重金属が、環境基準を超えて溶出してはならない⁵⁰⁾。充填材は保水力が重要とされるため、一般の半たわみ性舗装用充填材より低い強度設計となっており、セメント中の重金属が溶出しやすい環境にある。特に六価クロムの溶出を防ぐことは難しく、保水材として高炉スラグ粉を使用することで、還元作用による不溶出化は一般的技術として可能であるが、新たな技術が求められる⁵¹⁾。また、保水材は吸水性の非常に大きな材料であり、流動性付与が難しく、施工はヒートアイランド現象に悩まされる大都市部で行われるため、夜間のみの規制で開放可能な速硬性が求められる。

2.3 半たわみ性舗装用充填材の特殊箇所対応の評価試験

高速道路では、橋梁部ジョイントに接する高機能舗装の段差抑制(伸縮装置前後 1m 区間)として充填材注入工(新設・修繕)が組み入れられている⁵²⁾。使用する充填材は現行の半たわみ性舗装用のプレミックスタイプや場合によっては混和剤等を添加したもので対応しているが、半たわみ性舗装用の充填材の充填性等の性状は、規格をもとに空隙率 21~25%のアスファルト混合物に対して充填するように配合設計がなされている⁵³⁾。一方、高速道路における高機能舗装の空隙率は概ね 17~20%であり⁵⁴⁾、このような空隙率のアスファルト混合物にも容易で確実に充填するものが望まれる。また、充填は、アスファルト舗装工(改良含む)完了後、後日別途交通規制し施工する路面表示工に併せて行うことになっている。し

かし、交通規制の都合や作業時間、工程短縮等の工事に関わる時間的(社会的)損失の最小化を考えた場合、アスファルト舗装工事当日に充填材注入工が行える材料が望ましい。一般的な半たわみ性舗装の充填材の充填作業はアスファルト混合物の温度が 40℃程度になってからであり⁵⁵⁾、例えば温度が 80℃付近で充填可能であれば一連の施工時間の短縮につながる。また、既往の充填材の強度発現は超速硬タイプでも 3 時間程度であり⁵⁶⁾、交通規制に関わる時間を短縮するため、より短時間で強度が発現する充填材が望まれる。

よって、前章で開発した高流動型半たわみ性舗装用充填材 1 時間開放タイプが、このような現場における特殊な要求性能に適応可能かを評価、検討する必要がある。

2.4 流動性の評価方法と充填性

流動性を有するモルタルの流動性評価方法は、その簡易性から漏斗の流下時間^{57),58),59)}や、円柱コーンによる広がり⁶⁰⁾、粘度⁶¹⁾で評価して判断される。土木分野では、流動性が充填性に直結しており流動性評価は重要な充填性の指標となる⁶²⁾。流動性の評価方法は、適用部位によって評価方法や規格が違い、様々な規格が存在し、統一性が無いのが現状である⁶³⁾。

ここで問題とするのは、化学混和剤をはじめとする混和材料が時代とともに変化しており、現在のモルタル流動性も同時に変化していることである。流動性の変化は、従来の評価方法では判断できない可能性があり、規格値を逸脱しても十分に充填が行われる場合もある。逆に、様々な理由により、流動性が規格値内であっても十分に充填されない場合がある⁶⁴⁾。十分に充填されていない構造体は性能を発揮することができない。

よって、流動性評価方法と規格値が作業性や充填性等の重要な要求性能と合致しているかを検証する必要がある。また、確実な充填や作業性の評価が可能な流動性評価方法を見だし、レオロジー的に関連させ実証する必要がある。

写真 - 2.1, 2.2, 2.3 に流動性評価試験器の種類、表 - 2.1 に一般的な規格を示す。

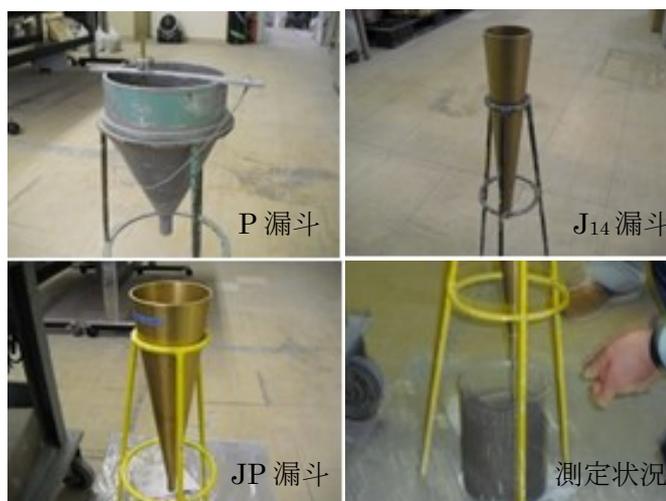


写真 - 2.1 各種漏斗試験器

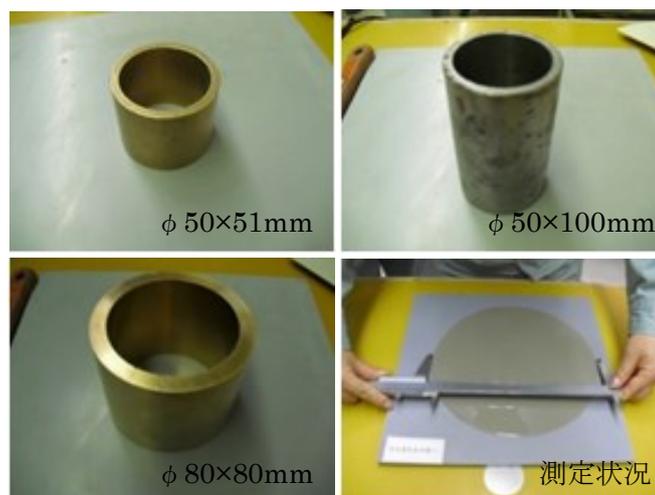


写真 - 2.2 各種テーブルフロー試験機



写真 - 2.3 B型粘度計

表 - 2.1 一般的なモルタルの流動性規格の例

材料の種類	評価方法	主な規格値
半たわみ性舗装用充填材	P 漏斗による流下時間(土木学会)	10～14 秒(国交省) 9～13 秒(NEXCO)
無収縮グラウト材	J ₁₄ 漏斗による流下時間(土木学会)	8±2 秒(NEXCO)
	φ 50×100mm 円柱シリンダー による広がり(JASS 15)	-
狭小部充填グラウト材(PC 等)	JA 漏斗による流下時間(土木学会)	高粘度型 14 秒以上 低粘度型 6～14 秒 超低粘度型 3.5～6 秒 (NEXCO)
セルフレベリング材	φ 50×51mm シリンダー による広がり(JASS 15)	190mm 以上 (JASS 15)

2.4.1 半たわみ性舗装用充填材の流動性と充填性評価

現在、半たわみ性舗装に使用される充填材の規格は NEXCO を始めとする各機関で性能を規定している。流動性は「プレパックドコンクリートにおける注入モルタルのコンシステンシー試験方法(P 漏斗)」にて試験を行い、各種規格値内に収まる充填材が施工に用いられる。

しかしながら、充填材の多様化に伴い、実施工において P 漏斗の流下時間が下限値に近い 10 秒でもポーラスアスファルト母体に確実に充填されない場合や⁶⁵⁾、上限値を超えた充填材が実際に母体に充填される場合も見られる。特に高強度領域の充填材においては上限値を大幅に超えた P 漏斗の流下時間にも関わらず、十分な充填性を示す場合がある⁶⁶⁾。そのため、P 漏斗による流動性評価が実際の母体への充填性の評価方法としての妥当性を評価すると共に、P 漏斗ではない他の流動性試験にて充填性が評価できるのか検討が必要とされる。

2.4.2 半たわみ性舗装用充填材の新たな充填性評価装置の提案

半たわみ性舗装用充填材の充填性については、実際のポーラスアスファルト混合物で実母体を作成し、これに充填材を流し込み、充填率で評価する方法がとられている⁶⁷⁾。しかし、試験体の作成方法が統一しておらず、空隙率等にばらつきも多く、試験体は再利用することが不可能である。そこで実際のポーラスアスファルト母体を模擬し、実母体に近い空隙率を有し、再利用が可能な、簡便で均一な充填性評価ができる、新たな試験装置が望まれている。また、その評価を実際のポーラスアスファルト混合物を用いて比較検討し、相関性を実証するとともに、レオロジー的に相関性を検証する必要がある。

第2章の参考文献

- 1) (一社)公共建築協会：無収縮グラウト材，建築材料等評価名簿 平成 29 年度版，pp20(2017)
- 2) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社：5-2-3 無収縮モルタル，5-2 支承，5 支承及び付属物，構造物施工管理要領，ppⅡ-235-Ⅱ-240
- 3) 小野田ケミコ(株)：Super Jet Cement & Concrete，カタログ
- 4) 浜中明德：速硬性混和剤を用いた速硬コンクリートの製造方法検討，プレストレストコンクリート協会 第 20 回シンポジウム論文集(2011.11)
- 5) 樋口隆行：高強度・超速硬グラウトモルタルの水和解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1(2004)
- 6) 内川浩ほか：ジェットセメントとせっこう(その 2)完，Gypsum & Lime No.118, pp35-42 (1972)
- 7) 小野田ケミコ(株)：FM 工法(エアーモルタル，エアーミルク充填工法)
- 8) BASF ジャパン(株)：マスターセル 707
- 9) ショーボンド建設(株)：エアパック工法
- 10) サンソー技研株式会社，寺村敏史ほか：事後発泡型充填グラウト材の製造方法，特開 2015-189634 号，2015.11.02
- 11) 住友大阪セメント(株)：震災・液状化による空洞充填に最適な新しい軽量充填材 『フィルコンライト All in One プレミクス』を販売開始，Press Information, (2012.3.27)
- 12) 住友大阪セメント株式会社，宮脇賢司ほか：エアミルク、エアーモルタル、それらの製造方法、及びそれらを用いた施工方法，特開 2016-74599 号，2016. 5.12
- 13) 大倉正人ほか：水中不分離性コンクリートの基本性状について，コンクリート工学年次論文報告集，12-1, pp43-48(1990)
- 14) 野口守ほか：各種増粘剤を使用した水中不分離コンクリートの基礎性状実験，トンネル工学報告集第 22 巻，pp89-97(2012.11)
- 15) 野中英ほか：高性能特殊増粘剤を用いたモルタル配合に関する基礎実験 -水セメント比による影響-，土木学会第 60 回年次学術講演会，5-331, pp661-662(2005)
- 16) 野中英ほか：高性能特殊増粘剤を用いたモルタルの基礎物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.1, pp1667-1672(2006)
- 17) 新村亮ほか：水中不分離性軽量コンクリートの配合選定とモデル流動実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1(2002)
- 18) 株式会社奥村組，木下茂樹：エアーモルタルの品質確認管理方法，特開 2011-56682 号，2011.3.24
- 19) 秩父コンクリート工業株式会社：レコキープ 技術資料
- 20) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社：2-3-2

- セメントミルク，2 半たわみ性舗装設計・施工マニュアル，設計要領 第一集 舗装 平成 29 年 7 月，pp 参 2 - 1-参 2 - 16(2017.7)
- 21) 東京都建設局：425 半たわみ性アスファルト混合物，平成 27 年土木材料仕様書，pp420-423(2015)
- 22) (公社)日本道路協会：9-4-1 半たわみ性舗装，舗装施工便覧(平成 18 年版)，pp202-205(2015.6.5)
- 23) 名古屋市緑政土木局：2.2 浸透用セメントミルク，半たわみ性舗装 特記仕様書，平成 29 年 8 月版
- 24) 首都高速道路株式会社：4.5.2 浸透用セメントミルクと半たわみ性舗装，4.5 半たわみ性舗装，第 4 章アスファルト舗装材料の配合と性能，舗装設計施工要領 平成 27 年 4 月，pp154-155 (2015.4)
- 25) 後藤聡：都市内舗装の夜間補修工事に従事して，特集・現場を支える舗装技術者，ASFALT Vol.43, No205, pp8-9(2000)
- 26) 橋本喜正ほか：長期供用舗装および車道透水性舗装の試験施工の追跡調査結果，平 25. 土木技術支援・人材育成センター年報，pp47-58(2013)
- 27) (一社)セメント協会：セメント産業における地球温暖化対策の取り組み，資料 5-1，pp1-38(2013.12.20)
- 28) 小田切康之：静脈産業としてのセメント産業，Mind report, No.75, pp2-5(2006.10)
- 29) 太平洋セメント株式会社：セメント製造工程における取り組み，地球温暖化防止，CSR REPORT 2016, pp38(2016)
- 30) 井上浩隆ほか：世界のセメント需要とその生産に伴う CO₂ 排出量の推計，環境衛生工学研究第 24 巻第 3 号(2010)
- 31) (一社)日本建設業連合会：低炭素型コンクリートの普及促進に向けて - 低炭素社会・循環型社会の構築への貢献 - ，環境委員会 温暖化対策部会，(2016.04)
- 32) 小林利充：二酸化炭素排出量を低減するコンクリート「クリーンクリート®」，生産と技術，第 67 巻，第 1 号，pp58-60(2015)
- 33) 鹿島建設株式会社，新谷彰ほか：環境負荷低減モルタルまたはコンクリート混練物，特開 2010-265166 号，2010.11.25
- 34) 山中量一：鉄鋼スラグ有効利用の変遷，神戸製鋼技報，Vol. 47 , No. 3 (1997.11)
- 35) 本間大策：グリーン購入法と公共工事におけるグリーン調達推進について，特集 調達や工事段階の環境対策，建設マネジメント技術，2013 年 7 月号，pp7-10(2013)
- 36) 飯田裕一：バイオマス発電設備 内部循環流動床ボイラ - 住友大阪セメント(株)栃木工場向け - ，エバラ時報，No.226, pp26-30(2010.1)
- 37) 宇部興産株式会社 双日株式会社：セメント工場へのバイオマス燃料化技術導入，経済産業省「地球温暖化対策技術普及等推進事業（第二次）」調査(FS)報告書(2013)
- 38) 荻野正貴：ポルトランドセメント使用量ゼロの環境配慮コンクリートの開発，大成建設

- 技術センター報, 第 46 号, pp13 - 1-13 - 7(2013)
- 39) 松家武樹: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いた環境負荷低減コンクリートの基本性能, ハザマ研究年報, pp1-6 (2010.12)
- 40) 鐵鋼スラグ協会: 高炉セメントの強度特性, 第 2 章高炉セメントの特性, 高炉セメント百年史, pp20-22(2010)
- 41) 坂井悦郎: 初期水和性状を考慮した高炉スラグ高含有セメントの材料設計, *Cement Science and Concrete Technology*, No.65, pp20-26(2011)
- 42) 電気化学工業株式会社: セメントプラントリサイクルシステム
- 43) 星野清一ほか: セメントのリサイクル資源活用の環境影響評価手法に関する検討, 太平洋セメント研究報告(TAIHEIYO CEMENT KENKYU HOKOKU), 第 172 号, pp3-15(2017) :
- 44) 市原エコセメント株式会社: 循環型社会の未来を支えるセメント工場, セメント・コンクリート, No. 743, pp3-6(2009)
- 45) 東京たま広域資源循環組合: 東京たまエコセメント化施設(2016)
- 46) 日本規格協会: JIS R 5214, エコセメント: 2003
- 47) 太平洋セメント: エコセメント, カタログ
- 48) 棚野博之ほか: エコセメントを使用したコンクリートの長期特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp1759-1764(2009)
- 49) 保水性舗装技術研究会: 暑い道からすずしい道に 保水性舗装(2004.4)
- 50) 神谷清志ほか: 保水性舗装技術の現状と今後の展望, *Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan* 11, pp293-300 (2004)
- 51) 住友大阪セメント株式会社, 佐々木徹ほか: セメント組成物、セメントミルク、保水性舗装及び保水性舗装の施工方法, 特開 2007-176721, 2007.7.12
- 52) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社: 3-6 路面排水対策, 設計要領 第一集 舗装, pp3 - 51-3 - 52(2017.7)
- 53) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社: (2)マーシャル試験基準値, 2-4-1 アスファルト混合物, 2-4 混合物の諸基準, 2 半たわみ性舗装設計・施工マニュアル, 設計要領 第一集 舗装, pp 参 2 - 3(2017.7)
- 54) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社: 3-5-3 高機能舗装用混合物の配合設計, 設計要領 第一集 舗装, pp3-26(2017.7)
- 55) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社: 2-5-5 セメントミルクの施工上に注意, 2-5 施工, 2 半たわみ性舗装設計・施工マニュアル, 設計要領 第一集 舗装, pp 参 2 - 10(2017.7)
- 56) (公社)日本道路協会: 9-4-1 半たわみ性舗装, 舗装施工便覧(平成 18 年度版), pp204(2006.2)
- 57) (公社)土木学会: JFCE-F 521-2013 プレパックドコンクリートの注入モルタルの流動

- 性試験方法(P 漏斗による方法), コンクリート標準示方書, pp278(2013)
- 58) (公社)土木学会 : JFCE-F 521-2013 PC グラウトの流動性試験方法(案), コンクリート標準示方書, pp281-282(2013)
- 59) (公社)土木学会 : JFCE-F 541-2013 充填モルタルの流動性試験方法(案), コンクリート標準示方書, pp296(2013)
- 60) (一社)日本建築学会 : 付属書 3 JASS 15 M-103 セルフレベリング材の品質基準, JASS 15 左官工事, 建築工事標準仕様書・同解説, pp311-313(2007)
- 61) (一財)日本規格協会 : JIS Z 8803 液体の粘度測定方法(2011)
- 62) 国土交通省中部整備局 : 特仕 16-6-18 橋脚鋼板巻立て工(無収縮モルタル), 第 16 章 道路修繕, 第 6 編 道路編, 土木工事特記仕様書
- 63) (一社)セメント協会 : 5.4.1 フレッシュ性状, 第 5 章 グラウト工法と無収縮グラウト材, セメント系補修・補強材料の基礎知識, pp47-48(2006.8)
- 64) 福田圭祐ほか : 亜硝酸リチウム水溶液を用いたグラウト充てん不足部の PC 鋼線への補修におけるカソード分極特性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp1069-1074(2013)
- 65) 八谷好高ほか : 舗装補修工事に用いる半たわみ性材料に関する現場・室内試験の比較, V-109, 土木学会第 56 回年次学術講演会, pp218-219(2001.10)
- 66) ITW ENGINEERD POLYMERS APS : DENSIPHALT-MORTAR, DENSIPHALT-SYSTEM, TECHNICAL DATA SHEET
- 67) 八谷好高ほか : 半たわみ性材料を用いた空港アスファルト舗装の補修・補強, ISSN1346-7328 国総研資料, 第 39 号, pp1-6(2002.6)

第3章 グラウトモルタルの開発

3.1 開発の方向性

近年、カルボキシル基を有する吸着部位と種々のポリエチレンオキシドを有する側鎖(グラフト鎖)の楕型高分子であるポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤が、高強度コンクリートや高流動コンクリートなどのハイパフォーマンスセメントに利用されるようになってきている。高性能 AE 減水剤の種類には、ポリカルボン酸系、ナフタレン系、アミノスルホン酸系及びメラミン系に大別される。その中でも現在最も使用されているのがポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤である。その背景には、所要のスランプを得るための添加量が少なく、分子構造も容易に変えることができ、他の高性能 AE 減水剤に比べ水和反応を阻害しないためである¹⁾。

高性能 AE 減水剤はセメント粒子の表面に吸着することによって分散効果が得られる。その分散効果は主に静電反発力による DLVO 理論や立体障害効果による立体効果理論で説明される。また、セメント粒子に未吸着の高性能 AE 減水剤でも、分散・凝集作用を示すディプレッション効果理論も考えられている。DLVO 理論では、高性能 AE 減水剤がセメント粒子の表面に吸着することによってセメント粒子の表面がマイナスの電荷を帯び、セメント粒子同士が互いに静電反発力によって分散する²⁾。立体障害効果理論では、高性能 AE 減水剤の吸着した粒子同士が近づき、側鎖同士が互いに接触すると、粒子間の高性能 AE 減水剤濃度が高くなったり、側鎖の構造が歪んだりする。前者はバルク濃度と粒子間の高性能 AE 減水剤濃度を均一にするため、接触部に水の浸入を促して浸透圧効果による反発力を生み出す。これは混合効果と呼ばれている。また後者は、歪んだ構造を元に戻そうとするため、エントロピー反発と呼ばれる反発力が発生する。これは弾性効果と呼ばれており、これら両者の作用によって粒子の分散が可能となる³⁾。ディプレッション分散効果は、粒子同士が近づくと、その間に存在する未吸着の高性能 AE 減水剤が粒子間の外(バルク中)に排出され、粒子間とバルク中に生じた濃度差を均一にするために粒子間に斥力が発生する現象とされている⁴⁾。

ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤の分散機構は、ポリマーが水に溶解するとカルボキシル基の解離によってアニオンの部分が現れ、セメント粒子表面の陽イオンと結合してセメント粒子表面に負の電荷を与える。側鎖のエチレンオキシドは、立体障害効果理論によってセメント粒子を分散させ、また凝集を抑制している⁵⁾。

このように、ポリカルボン酸系 AE 減水剤は、その他の高性能 AE 減水剤と分散機構が異なり、また、楕型高分子であるため、吸着部位と側鎖との組み合わせにより、吸着速度を自由に制御することが可能である。そのため、作用時間や作用保持時間が異なる、多くの種類のポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤が開発され商品化されている。

モルタルの流動性の向上は、加水量の要因を排除した場合、化学混和剤に委ねられ、減水剤や AE 減水剤、高性能 AE 減水剤は非常に有効に作用する。すなわち、商品化された多くの種類のポリカルボン酸系 AE 減水剤を組み合わせることで、多種多様な流動性を有する

モルタルの配合設計が可能となり、土木分野において、十分な充填性を有する高性能なグラウトモルタルが得られることとなる。さらに、無機系混和材料⁶⁾やその他の化学混和剤⁷⁾を併用して、新たな観点から既往の技術では開発することができなかった、新しいグラウトモルタルの開発が可能となる。

これらの考えのもと、配合設計を検討し、開発に繋げていった。

3.2 超速硬無収縮グラウト材の開発

3.2.1 超速硬無収縮グラウト材の必要性

スクラップアンドビルドから長寿命化への時代へ移行する社会情勢の中で、日本の建設市場における維持修繕費は、年々増大し現在 20%強を占めるようになり、今後も、維持管理対策が必要なコンクリート構造物はさらに増加すると予想される。その中で、鉄筋コンクリート構造物の維持管理分野において行われる耐震補強工事では、鋼板あるいは鉄骨ブレースおよびコンクリートの間隙に無収縮グラウト材を充填する工法が多く採用されている⁸⁾。無収縮グラウト材は、阪神淡路大震災以降に急速に需要が伸び、耐震補強技術の成熟とともに無収縮グラウト材の技術や種類は充実している。

無収縮グラウト材の耐震補強以外の使用箇所では、機械台座隙間の充填や、マンホール鉄蓋交換時の高さ調整や周囲に充填する場合もある。

ここで、マンホール蓋交換時に使用する無収縮グラウト材に着目すると、上下水道、電気、通信、ガス等のマンホール鉄蓋は全国に約 1300 万個もあると言われている⁹⁾。推定 40 年以上経過しているマンホール蓋は、たわみ・残留たわみ・耐荷重において基準を満たしておらず、30 年以上経過している平受け構造の蓋については、がたつきのリスクも高く、優先的に対応が必要であることが判明している¹⁰⁾。(社)日本下水道協会では「下水道用鋳鉄マンホールふた JSWAS G-4 2005 参考資料 3 高さ調整部材および無収縮流動性モルタル」で無収縮グラウト材の規格を明確にしており¹¹⁾、性能を以下の 3 項目で示している。また規格値を表 - 3.1 に示す。

無収縮流動性モルタルの性能

- (1)無収縮性で、モルタル硬化後も収縮による隙間が発生しない。
- (2)高流動性で、流し込み工法により、枠と斜壁間にすき間なくモルタルが充填できる。
- (3)超早強性で、ふた据付け後短時間での道路復旧が可能である。

表 - 3.1 無収縮流動性モルタルの物性目標値

項目	目標値
J ₁₄ 漏斗流下時間(秒)	6±2
圧縮強度(N/mm ²)	9.8 以上(温度 20℃, 養生時間 1.5 時間)
収縮・膨張性	収縮しないこと

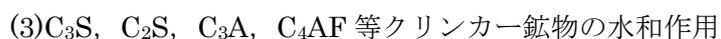
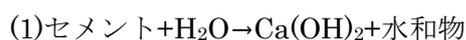
表 - 3.2 化学成分および鉱物組成

セメントの種類	化学成分(%)									
	強熱減量	不揮発残分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O.eq	Total
超速硬セメント	0.99	0.21	14.56	14.09	2.25	54.12	1.27	11.43	0.52	99.58
早強セメント	1.18	0.11	20.53	4.89	2.59	65.12	1.31	3.01	0.56	99.50
普通セメント	1.34	0.22	21.53	5.22	2.94	64.01	1.43	2.03	0.62	99.50
セメントの種類	鉱物組成(%)									
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	C ₃ A ₃ CaSO ₄					
超速硬セメント	27	21	4	6	23					
早強セメント	64	11	9	8	—					
普通セメント	52	23	9	9	—					

3.2.3 既存の技術

前述したように、複雑な配合設計となったモルタルはプレミックス化により施工者に届けられる。そのため、プレミックス後に倉庫貯蔵される。貯蔵期間は様々だが、数か月貯蔵される場合もあり、この貯蔵期間中にセメントは徐々に風化していく。特に超速硬セメントは早い反応性を有しているため風化による凝結時間への影響は大きい¹⁵⁾。

風化現象は、セメントが大気中の H₂O や CO₂ を吸収し、化学作用をうけることであり、セメント微粒子の回りに大気中の H₂O や CO₂ を吸収化合してできた Ca(OH)₂、CaCO₂、セメントバケルス、その他の異粒子やセメントの水和物が集まり、強熱減量を増し、比重を減少させ、セメントの水和作用を妨げる。特に、夏季の高温多湿では、セメントは容易に風化が進み、この作用は、水分と炭酸ガスとの割合でその作用も異なる¹⁶⁾。下記に風化の段階を示す。



超速硬セメント等を使用して超速硬無収縮グラウト材の配合設計を行う場合、凝結遅延剤にて硬化時間を設定する。セメントと水が接触して凝結が完了するまでの期間は、C₃S, C₃A, 石膏の加水分解および水和反応の段階であり、セメント成分は、水に溶解して飽和ないし過飽和状態に達したのちに、水和生成物を生成し析出してくる水和過程をたどる。この時期に液相中のカルシウムイオン(Ca²⁺)濃度が最高になることが認められ、Ca²⁺濃度がピークになるまでの時間を遅らせ、Ca²⁺濃度そのものを低く抑えることで、セメントの凝結を遅延させることができる。超速硬セメントに使用する凝結遅延剤は、オキシンカルボン酸塩であり、これは、強力なイオン封鎖作用を持ち、Ca²⁺とも錯化合物を形成して、水和反応に必要な Ca²⁺を封鎖する働きにより凝結を遅延させている¹⁷⁾。

このように、超速硬化セメントの凝結時間を凝結遅延剤にて調整されたプレミックス製

造品は、倉庫貯蔵中に超速硬セメントの風化により凝結遅延となった場合、凝結遅延剤による過剰なイオン封鎖作用となり配合設計とは全く違う性状を示し、目標値を達成することができなくなる。これは、交通開放の遅延につながると同時に、減水剤の分散効果が過剰となる場合もあり、材料分離にもつながる。

また、無収縮グラウト材は、初期膨張により無収縮としており、初期膨張には一般的にアルミ粉末による発泡が利用される^{18),19)}。石灰系や石膏系の膨張剤も使用されるが、ある程度の初期膨張を確保するための必要量を添加した場合、硬化後の膨張が大きくなり、特に水中で崩壊する恐れがある²⁰⁾。アルミ粉末の発泡は液相中のCaイオンと反応してH(水素ガス)が生じることを利用している。反応式を下記に示す。



しかし、超速硬セメントを使用したモルタルではアルミ粉末による膨張が期待できない。これは、超速硬セメントは、鉱物組成で分かるように、 $\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4$ (アウイン)が多く、 C_2S や C_3S は普通や早強ポルトランドセメントに比べて少ない。また、反応式で分かるように、 $\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4$ (アウイン)は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を使って $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ となる。よって液相中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (フリーライム)も普通や早強ポルトランドセメントに比べて非常に少なくなるのが原因と考えられる。また、凝結遅延剤により、Caイオン(Ca^{2+})は初期に封鎖されるため、さらに少なくなる。そのため、アルミ粉末は反応することができないと考えられる。

以上から、超速硬セメントを使用した超速硬無収縮グラウト材を開発するうえで、風化対策、初期膨張を解決することが課題となる。

3.2.4 配合設計

一般的に、無収縮グラウト材は、セメントと骨材の割合が1:1で配合設計を行う。水/試料比は約18%である。これをもとに、配合設計では、流動性と風化対策、初期膨張を付与していく。

風化対策として用いた処方は、無機塩系混和剤によるセメントの水和促進である。これは、フレッシュな状態のセメントの水和を促進するのはもちろんだが、風化したセメントにも有効に働くことが分かった。しかし、流動性が極端に低減するため、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤の標準型と遅延型を組み合わせることで解決できる。

また、初期膨張の付与に用いた処方、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の微量添加である。アルミ粉末の反応による発泡にのみ使われる量を決定するには時間を要したが、適切な量を把握することができた。少量では反応量が少なくなり、過剰に添加した場合は、Caイオンの封鎖が崩れ瞬結するとともに、セメントの反応が正しく行われぬ。

このような検討のもと、貯蔵期間が長くても安定した凝結時間、流動性、初期膨張を有する超速硬無収縮グラウト材の配合設計が可能となった。無機塩系混和剤や $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の考えが基本となっているが、2種類のポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤が2つの混和剤添加による弊害である流動性や流動性保持時間の低下を改善しており、大きな役割を果たしている。表 - 3.3 に代表配合の範囲を示す。

表 - 3.3 超速硬無収縮グラウト材の代表配合範囲

成分名	割合(wt%)
ジェットセメント	40.0~50.0
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	0.1~1.0
アルミ粉末	0.01~0.1
カルボン酸系減水剤標準型	0.05~0.1
カルボン酸系減水剤遅延型	0.05~0.1
凝結遅延剤	0.1~0.3
収縮低減剤	0.1~0.4
硬化促進剤	0.1~0.5
その他混和剤	0.2~0.5
珪砂	50.0~60.0
合計	100.0

3.2.5 評価方法

配合設計を行った超速硬無収縮グラウト材の性状・物性確認を行い、目標値を達成しているか、また、耐風化性を有しているかを確認する。

対象とする規格は、(社)日本下水道協会 下水道用鋳鉄製マンホールふた [参考資料 3] 高さ調整部材及び無収縮流動性モルタルであり、目標値は表 - 3.2 に示している。

- ・流動性の評価：JSCE-F541 に準じ、 J_{14} 漏斗による流下時間を測定する。
- ・強度：JIS A 1108 に準じ、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の圧縮強度を測定する。
- ・膨張性：JSCE-F542 に準じ、測定はレーザー変位計にて測定する。
- ・耐風化性：製造直後の製品と温度 30°C 湿度 80%の恒温恒湿室に3か月放置した製品の性状、物性を比較する。

荷姿：厚手のポリ1層クラフト2層クラフト袋とする。

風化対策と初期膨張を付与しない現行タイプも同時に行い比較検討する。

3.2.6 性状・物性値

試験結果を表 - 3.4, 図 - 3.3 に示す。

表 - 3.4 超速硬無収縮グラウト材の試験結果

試験項目		既存タイプ		開発タイプ		試験方法
		プレミックス直後	3か月保存	プレミックス直後	3か月保存	
練混ぜ配合	粉体(kg)	25.0	25.0	25.0	25.0	-
	水(kg)	4.5	4.5	4.5	4.5	
J ₁₄ 漏斗流下時間(秒)		6.6	5.2	7.2	7.0	JSCE-F541
初期膨張量(%)		-0.01	測定不能	0.5~0.9	0.5~0.9	JSCE-F542
ブリーディング率(%)		0.0	0.5	0.0	0.0	JIS A 1123
凝結時間(時間-分)	始発	00-10	00-44	00-11	00-13	JIS R 5201
	終結	00-28	01-24	00-20	00-22	
圧縮強度(N/mm ²)	1.5h	23.3	未硬化	21.4	22.6	JIS A 1108
	3h	25.8	10.4	23.0	24.7	
	24h	35.2	21.8	32.2	30.6	
	7day	44.6	38.6	43.7	45.0	
	28day	50.2	42.8	46.9	47.4	

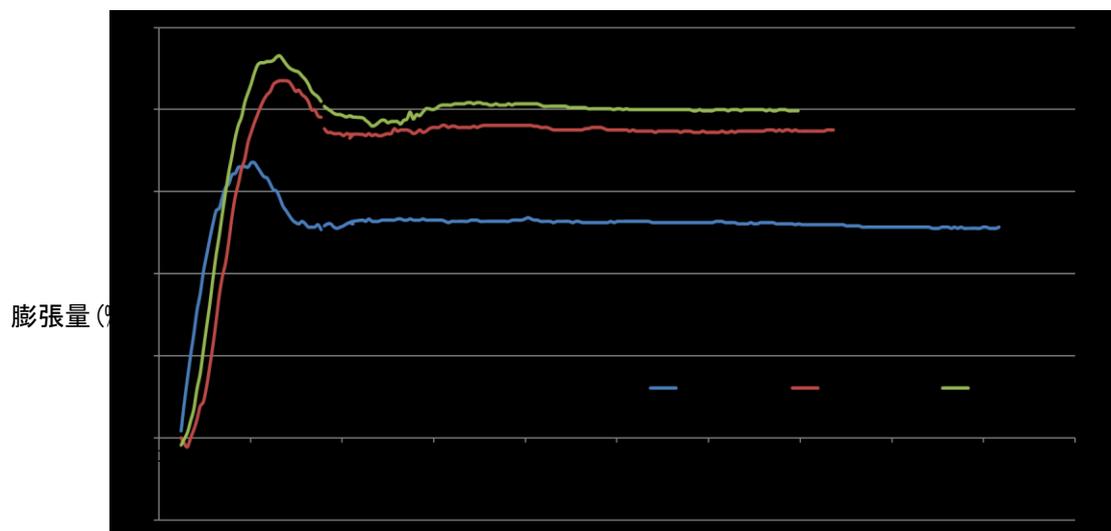


図 - 3.3 各温度におけるレーザー変位計による初期膨張率

試験結果より、開発タイプは、プレミックス直後の流下時間、1.5時間強度、初期膨張とも目標を達成していた。また、温度30℃、湿度80%に3か月間貯蔵した場合でも、プレミックス直後と同様な結果となった。一方、既存タイプは、プレミックス直後の流下時間と1.5時間の圧縮強度は目標を達成しているものの、初期膨張はマイナスであり目標を達成していなかった。また、温度30℃、湿度80%に3か月間貯蔵した場合では、風化により流下時間は早くなり、凝結時間は遅くなった。

3.2.7 まとめ

超速硬無収縮グラウト材の開発を行った結果、以下の結論に至った。

- 1)風化時の水和反応を無機系混和剤により促進することで、温度 30℃湿度 80%の恒温恒湿室内に 3 か月貯蔵してもプレミックス直後と変わらない性状を示しており、耐風化を実証した。
- 2)Ca(OH)₂の適切な添加によりアルミ粉末が反応させることで、初期膨張が確認でき、初期膨張付与を実証した。
- 3)促進による流動性の低下をポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤で改善していることを実証した。

以上から風化による性状変化と凝結遅延を起こさず安定した初期膨張性を有する超速硬無収縮グラウト材の開発に至った。また、下水道用鋳鉄製マンホールふた高さ調整部材及び無収縮流動性モルタル(日本下水道協会)の目標を達成していたため、適用が可能であると判断できる。

3.3 地下空洞に充填する気泡型軽量充填材の開発

3.3.1 軽量充填材の必要性

平成 23 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震では、震源地に最も近い政令指定都市であった仙台市の道路においても、多くの路面下空洞や道路陥没等の路面変状が発生した。災害時における道路陥没等の路面変状は、避難、救出、復旧活動などにおいて重大な障害となることが懸念されるため、速やかな充填等の対策が必要である。仙台市では、地震発生後の平成 23 年 7 月から平成 24 年 3 月までに、地中レーダ搭載の空洞探査車による路面下空洞調査を行っている。調査した道路の路線延長は約 90km、測定延長約 370km であり、空洞と推測される異常信号を検出した箇所が約 350 箇所であった。このうち、約 250 箇所については詳細調査を行っており、約 210 箇所の空洞が実際に確認されている²¹⁾。

地下空洞の発生原因は、地下構造物等の人工空洞と水や振動により発生する自然空洞に大別できる。原因は、振動(地震、地下鉄、交通車両)、水の影響(漏水、雨水、地下水)、地下埋設物の破損(老朽化、不当沈下)、地盤のゆるみ(経年での圧密沈下)、水みち等の存在(仮設の H 鋼脇、地下構造物脇)があげられる²²⁾。

3.3.2 軽量充填材の現状

軽量充填材の市場は成熟しており、様々な材料や工法により、地下空洞以外でも様々な空隙・間隙に充填されている。特にシールド工事やトンネル工事の裏込め材としてエアーマルタルが使用されている²³⁾。地下空洞に充填する充填材の種類は大きく 3 種類に大別される。最も多く使用されているエアーマルタルは、予め起泡剤により製造した気泡(プレフォーム)とセメントを現場混合するもので^{24),25),26)}、大型の設備を必要とするため、大規模空洞の充填に適している。セメントとベントナイト、水を合わせたセメント・ベントナイトモルタルは小規模充填用にプレミックス化もされているが、ブリーディングや乾燥による体積収縮が大きい²⁷⁾。現場発生土と固化材をプラントで混合する流動化処理土は、発生土の種類により粘性や強度にばらつきが生じ、その都度配合設計が必要となる^{28),29),30)}。また、プラントを使用するためエアーマルタルと同様に大規模空洞の充填に適している。

これらは、空洞探査によって発見された小規模な地下空洞を速やかに確実に充填するには不向きである。そこで、空洞探査により発見されるような小規模地下空洞を速やかに確実に充填できる材料が求められる。

必要性能をまとめると以下のとおりである。

- (1)簡易性：プレミックス、小型ミキサー練混ぜ可能
- (2)体積安定性：ノンブリーディング、材料分離抵抗性
- (3)充填性：高流動化による作業性向上、細部充填可能
- (4)コスト

3.3.3 既存の技術

大規模充填に使用されるエアームタルは、プレフォームによるものが多い。これは予め起泡装置やミキサーによって起泡剤と水とを混合して丈夫で微細な気泡を造り、その気泡をモルタルに混入する方法である。しかし、専用の装置や細かな液体の計量が伴うため簡易性は損なわれる。小規模充填を対象とした場合、セメントと粉末起泡剤を含む各種混和材料をプレミックスした充填材が最も適していると考えられる。このプレミックスした充填材を小型高速回転ミキサーにより起泡させる方法である。しかし、プレフォームと違いセメント粒子が存在し、高アルカリ下でもあることから、均一な微細な気泡を作ることは難しい。

起泡剤の種類として以下のものがある。

- (1)ポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸エステル塩等の炭化水素系界面活性剤主成分とし、気泡安定剤として各種セルロース誘導体やポリビニルアルコール、脂肪族アルコール、水溶性高分子等を併用
- (2)ケラチン加水分解蛋白質等の蛋白質系界面活性剤を主成分として、これに鉄塩や水溶性高分子等を併用
- (3)ラウリル硫酸ナトリウム
- (4)高級アルコール硫酸ナトリウム
- (5) α -オレフィンスルホン酸ナトリウム塩
- (6)その他

また、流動性を有する充填材中で、非常に軽い気泡を保持させるのは難しく、超速硬セメントの速硬性を利用する場合もある³¹⁾。しかし、コストが高くなり一般的な充填には不向きと考えられる。そのため、安価なポルトランドセメントを用いて配合設計を行う必要があり、気泡の分離防止が重要となる。分離防止の一般的な処方ではセルロース系の増粘力を利用するものだが、温度依存性が大きいため低温において増粘力が低下や、攪拌力が増粘に影響するためミキサーが限定され、加水量の影響を受けやすいため、現場において気泡を安定させるのは難しい。

よって、小規模地下空洞対応が可能なプレミックスされた、微細で均一な気泡を有し、気泡保持力が安定した安価な起泡型軽量充填材が望まれている。

3.3.4 配合設計

配合設計を行う上で、目標となる単位容積質量の基準を水/試料比=100%において1.0 kg/Lと決め、水量変化により単位容積質量がコントロール可能な流動性を有する充填材を目標として検討を行った。最も重要な起泡剤の選定では、ラウリル硫酸ナトリウムもしくは α -オレフィンスルホン酸ナトリウム塩にて、微細な気泡が混入可能となる。気泡の保持では、無機系微粒子混和材料による増粘と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と無機塩系混和材料によるセメントの偽凝結を利用して、気泡が保持され、ブリーディングが無く体積変化がほとんどない硬化体を作る

ことができる。また、水/試料比が多いため強度発現性が非常に遅くなるため、早強セメントを利用している。充填性はポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤遅延型を添加し、適切な流動性を付与している。起泡剤も重要な役割を担っているが、無機系微粒子混和材料と無機塩系混和材料による気泡の安定が重要である。表 - 3.5 に代表配合の範囲を示す。

表 - 3.5 気泡型軽量充填材の代表配合の範囲

成分名	割合(wt%)
早強ポルトランドセメント	50.0～90.0
Ca(OH) ₂	5.0～30.0
無機微粒子粉末	1.0～20.0
カルボン酸系 標準型	0.0
カルボン酸系 遅延型	0.05～0.1
硬化促進剤	0.1～1.0
その他混和剤	0.01～1.0
炭酸カルシウム	10.0～50.0
合計	100

3.3.5 評価方法

起泡型軽量充填材は練り混ぜ水量や練り混ぜ時間によって気泡の分離や体積変化がないことを特徴とするため、水/粉体比を中心である 100%から前後に変化させて、気泡の安定性を評価した。試験方法を以下に示す。

- ・流動性の評価：JAS15 M-103 に準じ、内径φ50×高さ 51mm コーンによるテーブルフロー値で判断する。
充填にはポンプ圧送の他に自重による自然充填も考慮し、空洞内の横への長距離充填も必要となるため、「流動性の評価＝充填性評価」とであると判断した。
 - ・起泡力の評価：単位容積質量(500mL 容器)にて測定する。
 - ・気泡の安定性：硬化体の質量ばらつきと練り混ぜ水量や練り混ぜ時間の変化による単位容積質量と物性を確認する。
 - ・強度：JIS A 1108 に準じ、φ50×100mm の圧縮強度を測定する。
 - ・気泡分離、安定性の評価：内径φ56mm 高さ 1m の塩化ビニルパイプを縦にしてモルタルを流し込み、硬化後に下から 100mm 毎に切断し質量を測定する。
- 試験体寸法を図 - 3.4 に示す。

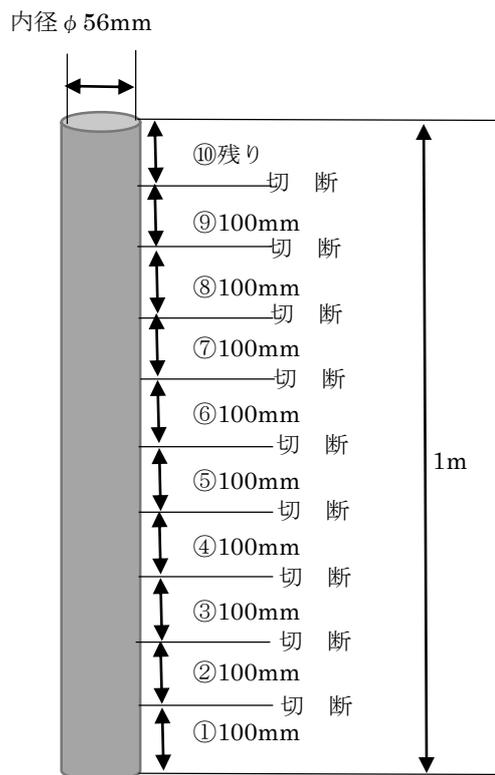


図 - 3.4 気泡分離・安定性評価の試験体寸法

3.3.6 性状・物性値

水/試料比の変化による流動性とブリーディング、圧縮強度を表 - 3.6 に示す。水/試料比の変化と練り混ぜ時間の変化による単位容積質量と圧縮強度を表 - 3.7 に示す。気泡分離・気泡安定性の評価結果を表 - 3.8、写真 - 3.1 に示す

表 - 3.6 水/試料比と性状・物性値

水/試料比(%)		125	100	95	90	85
テーブルフロー値(mm)		162	140	134	132	130
ブリーディング率(%)	3h	0	0	0	0	0
	24h	0	0	0	0	0
圧縮強度 (N/mm ²)	1day	0.18	0.61	0.86	1.06	1.47
	3day	0.40	1.04	1.17	1.34	1.97
	7day	0.91	1.57	1.78	2.13	2.66
	28day	1.51	2.38	2.70	3.51	3.20

表 - 3.7 水/試料比の変化と単位容積質量・物性

水/試料比(%)		125			100		
練り混ぜ時間(分)		1	2	3	1	2	3
単位容積質量(kg/L)		0.89	0.86	0.72	1.04	1.01	0.97
圧縮強度 (N/mm ²)	1day	0.02	0.02	0.01	0.21	0.21	0.20
	3day	0.18	0.17	0.16	0.81	0.72	0.71
	7day	0.44	0.41	0.41	1.09	1.06	1.02
	28day	1.32	1.30	1.26	2.30	2.24	2.20

表 - 3.8 気泡分離・安定性評価試験結果

水/試料比 (%)	切断位置	直径 (mm)	高さ (mm)	塩ビ質量 (g)	試験体質量 (g)	試験体単位 容積質量 (kg/L)	MAX	MIN
100	①	56	67.4	34.7	206.4	1.03	1.03	0.99
	②	56	101.0	52.0	245.5	0.99		
	③	56	101.0	52.0	245.9	0.99		
	④	56	101.2	52.1	249.5	1.00		
	⑤	56	101.0	52.0	245.7	0.99		
	⑥	56	101.0	52.0	250.3	1.01		
	⑦	56	100.6	51.8	247.8	1.00		
	⑧	56	101.2	52.1	245.7	0.99		
	⑨	56	101.1	52.1	247.4	0.99		
	⑩	56	98.0	50.5	249.1	1.03		
125	①	56	65.7	33.9	187.7	0.95	0.98	0.94
	②	56	100.7	51.9	290.7	0.96		
	③	56	101.3	52.2	288.4	0.95		
	④	56	101.0	52.0	288.1	0.95		
	⑤	56	101.1	52.1	290.7	0.96		
	⑥	56	101.0	52.0	295.3	0.98		
	⑦	56	101.3	52.2	294.5	0.97		
	⑧	56	101.3	52.2	290.1	0.95		
	⑨	56	101.1	52.1	286.5	0.94		
	⑩	56	100.0	51.5	282.4	0.94		

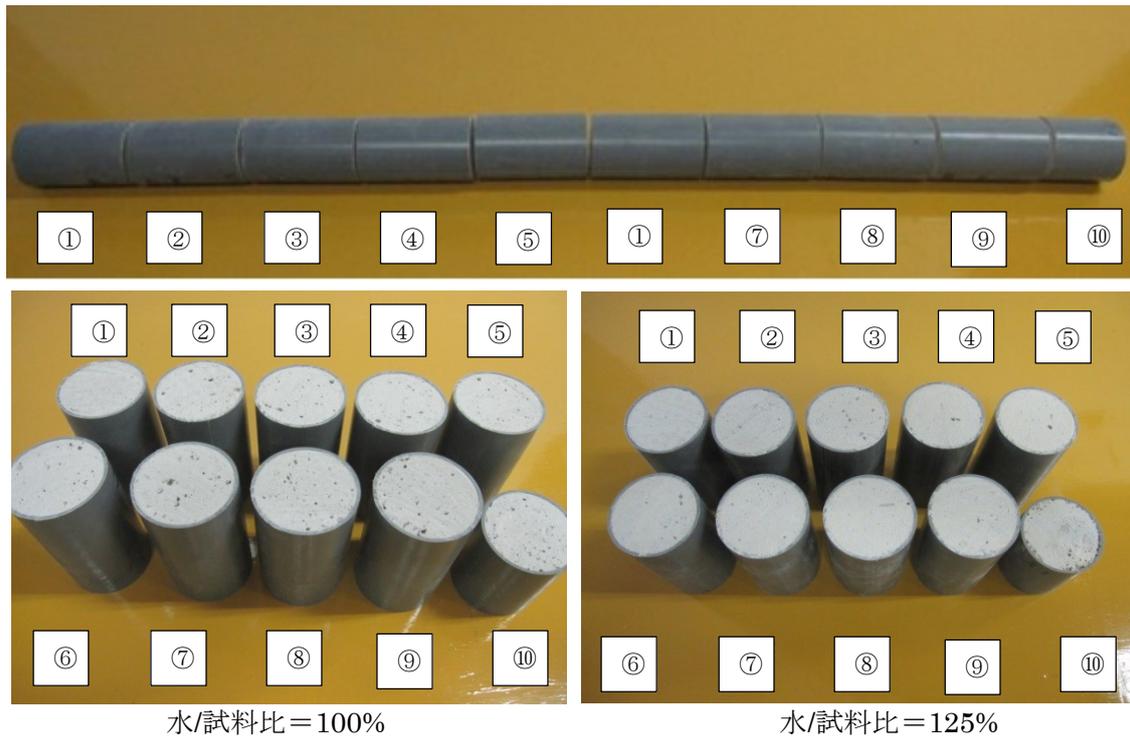


写真 - 3.1 気泡分離・安定性試験の試験体写真

練り混ぜ水量による影響として、水/試料比を、100%を中心に 85%から 125%まで変化させて性状と物性を確認した結果、テーブルフロー値は水/試料比=85%において 130mm であったが、十分な充填性を有していると判断できる。水/試料比=125%では 162mm とセルフレベリング材に近い値であった。ブリーディングは全てにおいて発生しなかった。圧縮強度については規格がなく判断が難しいが、水/試料比=125%では最低の 1.51N/mm^2 だった。土壌の強度を考えれば十分な強度と推定できる。

次に、練り混ぜ時間の影響を 1分～3分まで確認した結果、中心の水/試料比=100%では、単位容積質量にほとんど変化はなく、圧縮強度も一定であった。水/試料比=125%では、練り混ぜ時間とともに単位容積質量は減少していく傾向となった。しかし、圧縮強度試験で破壊された試験体を観察すると気泡の分離は確認できなかった。圧縮強度が 1.51N/mm^2 であるため、前試験同様に土壌の強度を考えれば十分な強度と推定できる。

気泡分離・安定性試験では、水/試料比=100%、125%ともに、1m の高さまで充填しても、ほぼ一定の単位容積質量であり、気泡の分離は全く確認できなかった。切断面からも明らかであった。

3.3.7 まとめ

地下空洞に充填する起泡型軽量充填材の開発を行った結果，以下の結論となった。

- 1)起泡剤，無機系微粒子混和材料，無機塩系混和材料により気泡を安定化させることで，練り混ぜ水量や練り混ぜ条件の変化にも対応可能な，安定した起泡力と気泡保持性を有していることを実証した。
- 2)練り混ぜ水量によって，単位容積質量や圧縮強度が選択可能である。
- 3)高さ 1m まで打設可能であることを実証し，大規模充填にも対応可能であることが示唆された。
- 4)ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤遅延型により流動性はコントロールされ，充填性は良好であると実証した。

以上より，プレミックスによる簡易性を有し，安定した起泡力，気泡安定性を有し，小規模地下空洞に充填可能な流動性を有する起泡型軽量充填材の開発に至った。さらに，大規模充填も可能であることが示唆された。

3.4 地下空洞に充填する水中不分離型軽量充填材の開発

3.4.1 水中不分離の必要性

地下空洞は先に述べたように、地下構造物や埋設物と水が原因としてあげられる。空洞調査では、ほとんどの空洞および陥没の直下・周辺には埋設構造物の存在が確認されており、空洞および陥没の要因は埋設構造物（下水、水道、電気、ガス、鉄道、地下街）であると推定されている。また大型地下構造物が空洞発生原因となっている箇所については、躯体縁直上から外側1m程度以内に大多数の空洞が発生している。空洞の発生には、その発生の元となる空隙が発生し、その後空洞として成長すると考えられている。空洞が成長するケースは大きく2つに分けられ、最初から空洞がある場合は、掘削工事時の転圧不足等で埋戻しが不十分なためであり、後から空洞が発生する場合は、埋設管の損傷により、埋設管内部へ土砂（埋戻し土）を伴った地下水が流入するためであると考えられている³²⁾。

このように、埋設構造物沿いの空洞と地下水は密接な関係にあり、空洞内は滞水していると考えられる。滞水している空洞への充填を目的とした専用の充填材が必要であり、水中不分離性、水との置換性、体積安定性、高流動性を有する軽量充填材が必要とされる。

3.4.2 水中不分離軽量充填材の現状

水中不分離技術の最先端はコンクリートの水中打設技術であり、研究も進み、工法、材料も多く存在する。水中不分離材として使用しているのは、セルローズ系やアクリル系による増粘剤や練り混ぜ水量の低減を利用している^{33),34),35)}。モルタルも同様であり、シールド工事やトンネルの裏込め材として多く用いられており、同様の増粘剤やベントナイトにより水中不分離性を付与し、可塑性が必要な場合は、水ガラス等の無機塩系混和材料を用いている^{36),37),38)}。また、軽量化では起泡剤や発泡剤を用いて気泡を混入する場合や、パーライト等の人工軽量骨材を用いている^{39),40),41),42)}。これらより、水中不分離技術はコンクリートやモルタルでは盛んに用いられているが、安価な軽量充填材となると気泡の利用で留まっている⁴³⁾。

そのため、水中不分離性、水との置換性、体積安定性、高流動性を有する安価な軽量充填材が必要とされる。

3.4.3 既存技術

滞水した空洞への充填で最も重要とされるのは、空洞中の水との置換である。水より軽い場合は、水の上に浮遊してしまい水と置換することができない。そのため、水より重い単位容積質量が要求される。また、コスト面からも軽量化は重要であり、水の密度よりわずかに重い単位容積質量を目指す必要がある。先に開発した起泡型軽量充填材の技術では、練り混ぜ水や練り混ぜ方法により僅かではあるが変化が生じるため、目標としたピンポイントの単位容積質量を得るのは難しい⁴⁴⁾。一般的に用いられている起泡剤は、さらに顕著となると考えられ、軽量骨材では、コスト面で折り合いがつかないことは明白である⁴⁵⁾。

3.4.4 配合設計

配合設計において、水中不分離性と安定した軽量化、コストを両立する考え方で検討を行った。どのような条件においても、軽量であるとともに、水の密度より重くなる必要があるため、コストを最優先として現地の水をセメントで固める方策をとった。エアームタルは、気泡が軽量化と安価な増量材を兼ねており、水中不分離型充填材は安価な水を利用して軽量化と増量材とすれば、必ず水の密度より軽くないという理論である。しかし、水中不分離性を付与や体積安定性、流動性を両立するのは非常に難しい。

このような考えのもと検討を行った結果、セルローズ系高粘度増粘剤による増粘とCa(OH)₂とセメントによる偽凝結で水中不分離性と材料分離をある程度抑え、微小な水の濁りをポリアクリル酸系で補うことで水の利用が可能となった。また、ブリーディングと体積安定化は無機系微粉末の吸水効果とアルミ粉末の初期発泡で無収縮化を実現することができ、ポリアクリル酸系により、施工時の水への六価クロムの溶出はない。

以上から、高水/試料比と水中不分離性、六価クロム無溶出を両立し、水/試料比=150%から200%まで可能な、単位容積質量が1.2~1.5kg/Lの安価な水中不分離型軽量充填材が可能となる。水中不分離型軽量充填材の代表配合の範囲を表-3.9に示す。

表 - 3.9 水中不分離型軽量充填材の代表配合範囲

成分名	割合(wt%)
早強ポルトランドセメント	60.0~98.0
凝集剤	0.01~0.1
無機粉末	0.0~20.0
増粘剤	0.5~2.0
Ca(OH) ₂	0.0~15.0
消泡剤	0.05~0.2
その他混和剤	0.0~1.0
炭酸カルシウム	0.0~10.0
合計	100

3.4.5 評価方法

水中不分離型軽量充填材は、水/試料比=150%から200%において必ず水の密度より重くなり水中不分離性を有することを特徴とするため、水/粉体比を150%と200%で流動性と体積安定性、単位容積質量、圧縮強度を測定して評価した。また、模擬試験装置を使い、水中不分離性と充填性を評価した。試験方法を以下に示す。

・流動性の評価：JAS15 M-103 に準じ、内径φ50×高さ51mm コーンによるテーブルフロー値で判断する。

充填にはポンプ圧送の他に自重による自然充填も考慮し、空洞内の横への長距離充填も必要となるため、「流動性の評価=充填性評価」と判断した。

- ・軽量の評価：単位容積質量 体積の安定性：初期膨張率
- ・強度：JIS A 5201 に準じ、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の試験体は水中採取して圧縮強度を測定する。
- ・水中不分離性：模擬試験装置を使用した充填性・水中不分離性確認試験を行った。
 注入口と排出口を設けた内径 $150\text{mm} \times$ 長さ 1078mm のアクリルパイプ中に水を適量投入し、約 1m の高さから自重にて充填させ、水と置換されながら充填を行い、充填性と排出口から出る置換された水の濁りを判断した。図 - 3.5 に試験装置図を示す。

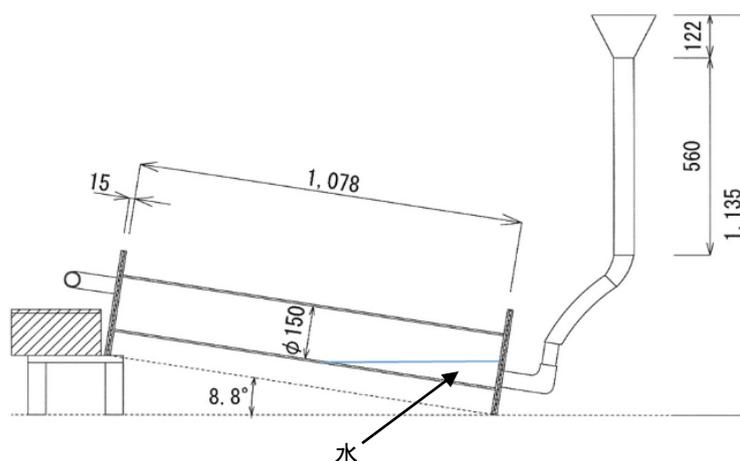


図 - 3.5 模擬試験装置

3.4.6 性状・物性値

試験 No.1 に水/試料比=150%，試験 No.2 に水/試料比=200%の試験結果を表 - 3.10 に示す。また写真 - 3.2 に水中打設模擬の試験状況，写真 - 3.3 に試験結果を示す。

表 - 3.10 水中不分離軽量充填材の水/試料比と性状・物性値

試験項目		測定値		試験方法
練り混ぜ配合	試験 No.	1	2	-
	粉体(kg)	20.0	20.0	
	水(kg)	30.0	40.0	
単位容積質量(kg/L)		1.34	1.20	
テーブルフロー値(秒)		156	182	JASS 15 M103($\phi 50 \times 51$)
ブリーディング率(%)		0.0	0.0	JIS A 1123
初期膨張率(%)		0.2~1.5	0.0~0.3	JSCE-F542
圧縮強度(N/mm ²)	24h	-	-	JIS A 1108
	2day	0.25	0.03	
	3day	0.39	0.05	
	7day	0.88	0.15	
	28day	2.16	0.51	

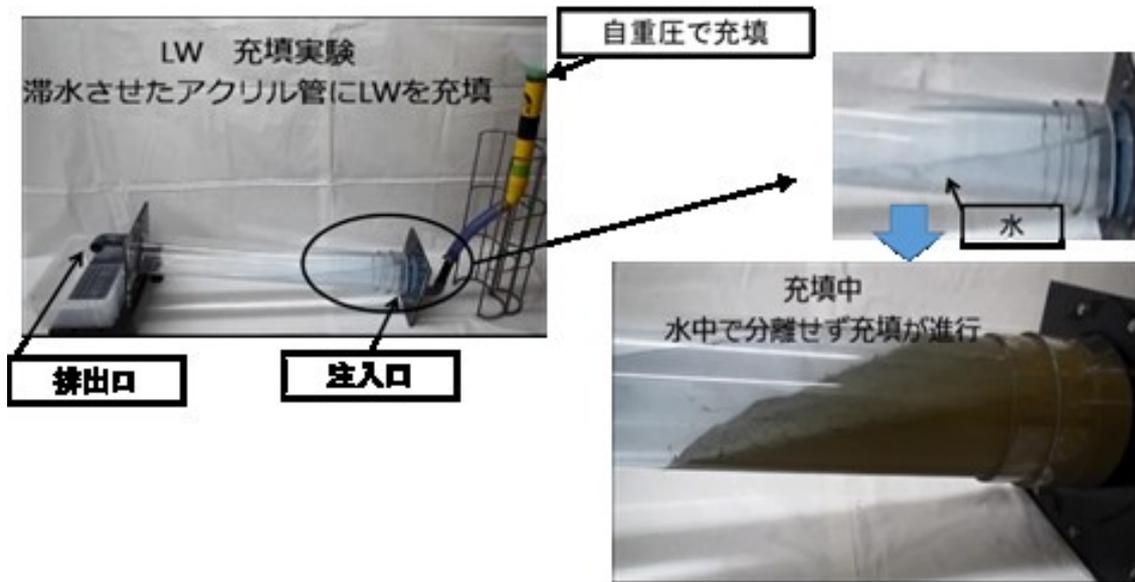


写真 - 3.2 試験装置による試験状況



写真 - 3.3 試験装置の充填後の結果

練り混ぜ水の変化による影響を確認するため、水/試料比が 150%と 200%の 2 種類について性状・物性の確認を行った結果、以下のことが判明した。単位容積質量は、150%が 1.34 kg/L、200%が 1.20 kg/L となりどちらも水の密度より重く、かつ軽量化を両立していた。テーブルフロー値はどちらも大きく、十分な充填性を有しているといえる。どちらも、ブリーディング率は 0%であり、初期膨張性を有しているため体積安定性は十分有しているといえる。圧縮強度は、水/試料比が 150%のものが 0.51N/mm²と低いですが、土壌の強度を考えれば十分な強度である。

3.4.7 まとめ

地下空洞に充填する水中不分離型軽量充填材の開発を行った結果、以下の結論となった。

- 1)セルロース系高粘度増粘剤、ポリアクリル酸塩、Ca(OH)₂により、練り混ぜ水量や練り混ぜ条件の変化にも対応可能な、軽量化と水中不分離性を有していることを実証した。
- 2)無機粉末、アルミ粉末により無収縮性を有し体積安定性に優れていることを実証した。
- 3)水中充填の模擬試験から水中不分離性と充填性を有していることを実証した。

以上から安価であり、高水/試料比と水中不分離性を両立しノンブリーディング、無収縮性を有する水中不分離型軽量充填材の開発に至った。

3.5 特殊箇所対応型半たわみ性舗装用充填材の開発

3.5.1 半たわみ性舗装について

半たわみ性舗装は昭和 29 年にフランスで開発されたサルビアシム工法が発祥であり、日本への技術導入は昭和 36 年末と長い歴史を有する舗装工法である。昭和 50 年代中期より急速に多くの類似工法が開発され、日本の道路でも実際に施工されるようになり、現在に至っている。半たわみ性舗装は空隙率 20～25%のポーラスアスファルト混合物に浸透用セメント系充填材を充填させたものである。構成は、追従性やたわみ性を有するアスファルト混合物と剛性を有する充填材からなっており、アスファルト舗装の路盤追従性を利用し、表面にクラックを発生せず、剛性舗装を製造する事が可能となる。そのため半たわみ性舗装や半剛性舗装と呼ばれている⁴⁶⁾。断面写真を写真 - 3.4 に示す。特徴はアスファルト舗装が有する荷重や温度による塑性変形からの流動を抑制する事が可能であり、重交通路の交差点手前、駅前ロータリー、バス停、サービスエリア駐車場等の流動防止策として使用されている。最近では民間の工場や倉庫の外溝や港湾施設の舗装にも広く普及している。施工事例を写真 - 3.5 に示す。



写真 - 3.4 半たわみ性舗装の断面



埠頭

駅前ロータリー

写真 - 3.5 半たわみ性舗装の施工例

3.5.2 半たわみ性舗装用充填材の現状

昭和 36 年末に日本に導入された半たわみ性舗装は、その舗装が持つ耐塑性変形性から広く日本に普及し、現在では一般的な舗装となっている。当時は特殊舗装の位置づけであり、施工現場において、セメントやフライアッシュ(増量材)、液体エマルジョン、水をバッチごとに計量して施工を行っていたため、非常に煩雑な施工となっていた⁴⁷⁾。流動性は水に依存していたため、流動性不足で充填されなかったり、流動性を向上させる目的で水量を増加し強度不足となり、舗装本来の性能が発揮できないこともあった。セメント系充填材の各機関の規格を表 - 3.11 に示す。この規格は古くから決められており、P 漏斗の流下時間と圧縮強度には下限値と上限値が設けられている。推定によるものだが、P 漏斗の流動性に下限値を設けたのは、練り混ぜ水の過多を防ぐ目的で、高流動性と練り混ぜ水の過多を関連付け、圧縮強度の上限値を設けたのは、練り混ぜ水が少ないために流動性が不足し充填不足となることを防ぐため、低水/セメント比による高強度と充填性を関連付けていたといわれている⁴⁸⁾。現在は、セメントと各種混和剤、骨材をプレミックスした材料が主流となっており、現場では、水の計量のみで施工が可能となっている。さらに、ヨーロッパの技術を導入し、プレミックスされた粉体と水が自動計量されながら運ばれ、その先でスクリーにより混合されて、出来上がった充填材が排出されるミキサー技術や、大きな現場用として、プラントで予め練り混ぜた充填材をトラックアジテータで搬送する技術も存在する⁴⁹⁾。しかし、最も確実なプレミックスの現場混合が圧倒的に多い。

今まで、表 - 3.11 に規定され一般的に使用される普通タイプ、早強タイプ、超速硬タイプの 3 種類を、規格値を達成するよう開発してきた。

しかし、近年の施工環境は変化し、施工箇所や要求性能が多様化しており、施工箇所に合った特殊充填材が必要となっている。

表 - 3.11 半たわみ性舗装用充填材の規格値

機関名	NEXCO			国土交通省			東京都		
	設計要領第一集舗装編			舗装施工便覧			東京都土木材料仕様書		
タイプ	普通	早強	超速硬	普通	早強	超速硬	普通	早強	超速硬
流動性	9~13 秒			10~14 秒			10~14 秒		
試験材齢	7day			7day			28day	7day	3day
曲げ強度	規格無し			2.0N/mm ² 以上			4.0N/mm ² 以上		
圧縮強度	15.0~36.0N/mm ²			9.8~29.4N/mm ²			規格無し		

3.5.3 特殊箇所対応型充填材の必要性

1)高流動型充填材の必要性

近年、アスファルトバインダーの進歩や排水や吸音機能による安全・快適性から、路面表層の舗装は、高機能舗装とする場合が増えている^{50),51)}。高機能舗装は高速道路や都心部の

幹線道路で広く施工され、施工や改修は夜間行われる。一方、幹線路のバス停は半たわみ性舗装により塑性変形を防いでいる。そのため、高機能舗装の施工場所にバス停が存在した場合は、バス停のみを半たわみ性舗装用ポーラスアスファルト混合物として施工しなければならない。このような工事は、非常に効率が悪く、時間を要し、コストも上昇するため、改善が望まれている⁵²⁾。一般的な半たわみ性舗装充填材は空隙率21～25%のポーラスアスファルト混合物に充填できるように設計されているため、目標空隙率が20%であり⁵³⁾、実際は空隙率15～20%である、空隙率や空隙径の小さい高機能舗装に充填することは難しい。

同様に、高速道路の走行路表層は、安全性と快適性から高機能舗装が一般的となっている。しかし、高速道路は高架橋が多いため、伸縮目地が表層まで存在する 경우가多く、伸縮目地前後は転圧が不十分となり表層骨材が飛びやすく対処が必要とされ、対策として前後1mにセメント充填材を充填し半たわみ性舗装としている⁵⁷⁾。そのため、同様の理由で、一般的な半たわみ性舗装充填材では確実な充填が難しい。

また、高速道路のサービスエリア(SA)、パーキングエリア(PA)の大型駐車帯では表層50mmの半たわみ性舗装では耐えられない事例がある。特に大型車の駐車帯で顕著となっている。これは、車から漏れる油の浸透によるアスファルトバイイダーのカットバックと長時間のアイドリングによる振動と荷重による複合作用であると考えられている⁵⁴⁾。そのため、大型車の駐車帯の耐久性向上のために、半たわみ性舗装の表層厚みを通常の50mmから100mmとする場合がある。一般的な半たわみ性舗装充填材は50mmのポーラスアスファルト混合物に充填できるように設計されているため、100mmのポーラスアスファルト混合物に充填することは難しい⁵⁵⁾。

さらに、半たわみ性舗装の施工では振動ローラーによる振動の充填補助が規定されている⁵⁶⁾。しかし、住宅街や商店街の施工では騒音により振動の付与ができない場合がある。振動が皆無の場合、一般的な半たわみ性舗装充填材では確実な充填が難しい。

2)高強度型充填材の必要性

コンテナヤードや飛行場の駐機場の打ち替えやコンクリート舗装のオーバーレイとして、半たわみ性舗装が有効であると考えられている。しかし、耐久性はコンクリート舗装より劣るため、更なる耐塑性変形性を向上させる必要がある⁵⁸⁾。海外では高強度型充填材を充填する事例もあり、充填材の高強度化は荷重に対する耐力の向上に寄与すると考えられる。

3)急勾配対応型充填材の必要性

山道の登坂車線や高速道路インターチェンジ(IC)取り付け道路等の10%以上の勾配を有する道路の耐塑性変形性を目的として半たわみ性舗装とする場合がある。しかし、高流動性であるがゆえに、一般型では施工時に舗装表面において、勾配の下部へ流れてしまい施工が難しい。

3.5.4 高流動型充填材の開発

3.5.4.1 既存の技術

現状の一般型半たわみ性舗装用充填材は、P漏斗の流下時間を10～11秒とした配合設計で十分である。しかし、空隙率や空隙径の小さい高機能舗装や100mm厚み、無振動下で充填させるのは難しい。しかし、現状の配合の流動性を向上させた場合は、材料分離が発生し、舗装体としての性能が得られない。そのため、P漏斗の流下時間を、9～10秒を目標とした専用の配合設計が必要である。

3.5.4.2 配合設計

配合設計の考え方は、過剰な流動性を充填材に与え、生じるであろう材料の分離を増粘剤で防止しながら、お互いのバランスを調整することとした。高流動性と材料分離抵抗性の両立である。このような考えのもと、検討した結果、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤標準型と遅延型の組み合わせと、無機系微粒子混和材の添加と量により、流動性を損なうことなく材料分離抵抗性を付与することが可能となった。同時に硬化時間が異なる4種類の高流動型充填材の配合設計を行った。表-3.12に種類、表-3.13に代表配合の範囲を示す。

表 - 3.12 高流動型半たわみ性舗装用充填材の種類

種 類	適用箇所
1時間開放タイプ	橋梁部伸縮装置前後 1m 区間
3時間開放タイプ	高機能舗装の夜間工事, 100 mm厚み, 無振動
24時間開放タイプ	高機能舗装, 100 mm厚み, 無振動
72時間開放タイプ	高機能舗装, 100 mm厚み, 無振動

表 - 3.13 高流動型半たわみ性舗装用充填材の代表配合と範囲

成 分 名	割 合(wt%)			
	1時間解放タイプ	3時間解放タイプ (超速硬タイプ)	24時間解放タイプ (早強タイプ)	72時間解放タイプ (普通タイプ)
普通ポルトランドセメント	0.0～20.0	0.0～40.0	-	50.0～80.0
早強ポルトランドセメント	0.0～20.0	0.0～40.0	50.0～80.0	-
超速硬セメント	40.0～70.0	30.0～50.0	-	0.0～10.0
その他セメント	0.0～10.0	0.0～10.0	-	0.0～10.0
ポリカルボン酸系 標準型	0.05～0.2	0.0～0.1	0.01～0.1	0.01～0.1
ポリカルボン酸系 遅延型	0.0～0.1	0.05～0.2	0.01～0.1	0.01～0.1
無機超微粒子混和材	0.0～3.0	0.1～5.0	0.0～3.0	0.0～3.0
消泡剤	0.05～0.3	0.05～0.3	0.05～0.3	0.05～0.3
再乳化型粉末樹脂	1.5～5.0	1.5～5.0	1.5～5.0	1.5～5.0
その他混和剤	0.02～0.2	0.02～0.5	0.0～0.3	0.0～0.3
骨材	20.0～40.0	20.0～40.0	20.0～40.0	20.0～40.0
合計	100.0	100.0	100.0	100.0
水/試料比	46%	46%	46%	46%

3.5.4.3 評価方法

半たわみ性舗装用充填材の規格に沿って試験を行った。また、充填性確認として厚み100mmのポーラスアスファルト混合物を作成して、一般型と高流動型の3時間開放タイプの充填材を実際に充填して確認を行い比較検討した。試験方法を表-3.14に示す。また充填性確認試験の状況を写真-3.6に示す。

表 - 3.14 高流動型半たわみ性舗装用充填材の評価方法

項目	試験方法	目標値
流下時間	P漏斗により流下時間を測定	初期：9～10秒
強度	JIS R 5201 に準じ 40×40×160mm 試験体にて 圧縮・曲げ強度を材齢毎に測定	1h：5MPa 以上 7day：15～36MPa
充填性	一般型と高流動型 3時間開放タイプを空隙率 23% 縦 150×横 300×厚み 100mm の母体に充填し充填率を測定 縦 50mm おきに切断し目視観察	充填率 90%以上 目視で下部まで充填



写真 - 3.6 高流動型半たわみ性舗装用充填材の充填状況

3.5.4.4 性状・物性値

4種類の硬化時間が異なる高流動型半たわみ性舗装用充填材の性状・物性値を表-3.15に示す。また、3時間開放タイプの100mmポーラスアスファルト混合物への充填試験結果を表-3.16と切断断面を表-3.17に示す。

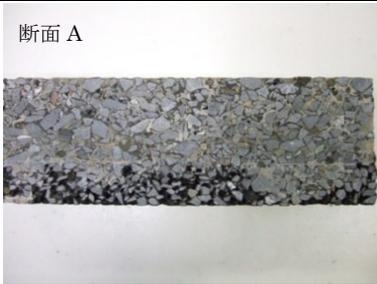
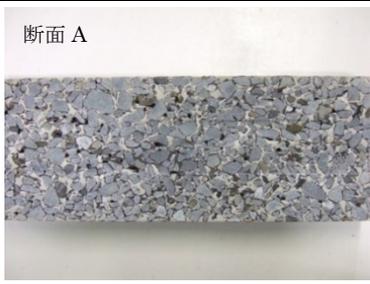
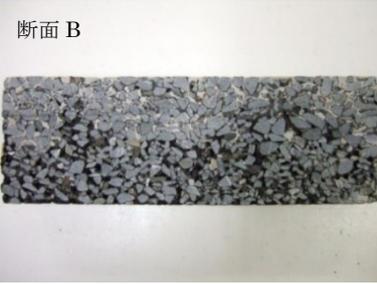
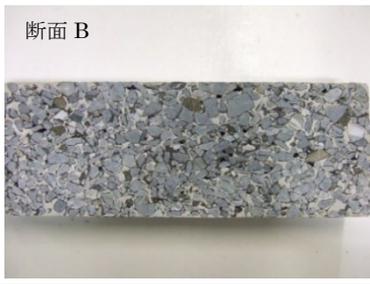
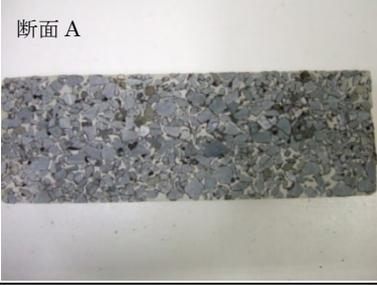
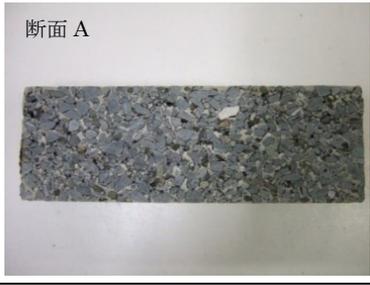
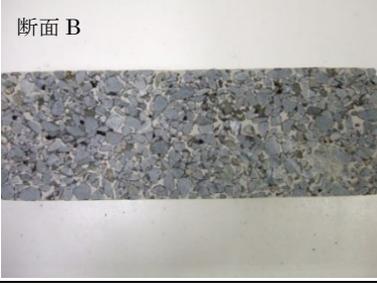
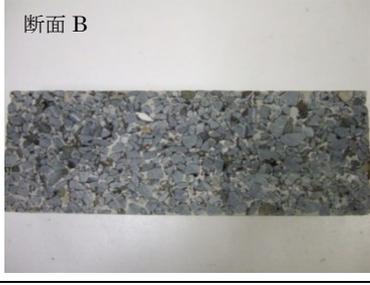
表 - 3.15 高流動型半たわみ性舗装用充填材の性状・物性値

項目	1時間解放タイプ	3時間解放タイプ (超速硬タイプ)	24時間解放タイプ (早強タイプ)	72時間解放タイプ (普通タイプ)
P漏斗流下時間(秒)	9.2	9.1	9.1	9.3
曲げ強度 (N/mm ²)	1h	2.0	-	-
	3h	2.4	2.1	-
	24h	3.3	3.5	1.4
	72h	4.9	4.5	3.7
	7day	5.8	5.7	4.8
圧縮強度 (N/mm ²)	1h	5.9	-	-
	3h	7.7	6.3	-
	24h	15.9	14.7	7.4
	72h	21.4	19.6	16.0
	7day	26.2	27.8	23.8

表 - 3.16 充填性比較確認結果

試験項目	一般型 3 時間開放タイプ		高流動型 3 時間開放タイプ		
	1	2	1	2	
P 漏斗流下時間(秒)	10.2		9.3		
充填率(%)	静置下	63.90	58.78	90.13	92.04
	振動 5 秒	-	72.20	-	93.21
	振動 10 秒	-	80.42	-	93.24
	振動 15 秒	-	90.09	-	93.92

表 - 3.17 充填性比較確認結果の断面

振動時間	一般型 3 時間開放タイプ	高流動型 3 時間開放タイプ
静置下	断面 A 	断面 A 
	断面 B 	断面 B 
15 秒	断面 A 	断面 A 
	断面 B 	断面 B 

硬化時間の異なる 4 種類の高流動型半たわみ性舗装用充填材について、規格に沿った試験を行い評価した結果、以下のことが判明した。全てのタイプにおいて、P 漏斗の流下時間は目標とする 9 秒から 10 秒であった。また、曲げ強度と圧縮強度も規格を達成していた。充填材の交通解放時間は、NEXCO が規定する圧縮強度 $5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上から判断し、目標を達成していた。

3 時間開放タイプの一般型と高流動型を 100mm 厚みのポーラスアスファルト混合物へ実際に充填して評価した結果、一般型は無振動で 63.90%、58.78%と低い充填率であり、振動付与により充填率は向上し、15 秒の振動で 90%を上回る充填率となった。一方、高流動型は、無振動でも 90.13%、92.04%と非常に高い充填率となった。また、振動により充填率はほぼ変わらない結果であり、無振動で充填が完了していたと考えられる。2 か所の断面写真でも、高流動型は無振動で下まで充填されていることが分かる。

3.5.4.5 まとめ

半たわみ性舗装用の高流動型充填材の開発を行った結果、以下の結論となった。

- 1)ポリカルボン酸系高性能減水剤標準型、遅延型と無機系微粒子混和材の添加と添加量により、流動性を損なうことなく材料分離抵抗性を有する事が実証された。
- 2)4 種類の硬化時間が異なる高流動型充填材は、全て目標の時間に開放が可能であることが実証された。
- 3)厚み 100mm のポーラスアスファルト混合物に無振動で最下部まで充填可能であることが実証された。

以上より、100mm 厚さの半たわみ性舗装用ポーラスアスファルト混合物に充填可能な硬化時間が異なる 4 種類の高流動型半たわみ性舗装用充填材の開発に至った。充填性試験からも現場適用が可能である事を示した。

また、高機能舗装への充填性評価は 5 章で行う。

3.5.5 高強度型充填材の開発

3.5.5.1 既存の技術

前述のとおり、半たわみ性舗装用充填材には明確な規格が存在し、圧縮強度や P 漏斗の流下時間において範囲が設けられている。NEXCO では、圧縮強度が 15.0~36.0N/mm²(材齢 7 日)であり、国土交通省では 9.8~29.4N/mm²(材齢 7 日)である。よって、一般的な半たわみ性舗装用充填材は、この規格の範囲内で配合設計を行うことが重要であると考えられている。また、高強度化するためには、水/セメント比の低減であるが、流動性は低下し、P 漏斗の流下時間が規格の範囲を外れてしまう。このような理由から、日本において、40N/mm²(材齢 7 日)の充填材は存在するが、50N/mm²(材齢 7 日)を超える充填材は存在しない。海外では、セメントとスラグの組み合わせと、減水剤による低水/セメント比により高強度化する技術がある。

3.5.5.2 配合設計

配合設計の考え方は、材齢 7 日において 50N/mm²以上とし、普通ポルトランドセメントに絞り、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤によるセメント粒子分散効果と無機微粒子混和材料のベアリング効果と細密充填、ポゾラン反応を利用して、高強度化と充填性を確保することとした。このような考えのもと、検討した結果、無機微粒子混和材料とポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤の標準型と遅延型の組み合わせにより、流動性を有し、材齢 7 日で 50N/mm²以上の圧縮強度を有し、材料分離抵抗性を有する高強度型半たわみ性舗装用充填材の配合設計が可能となった。表 - 3.18 に配合の範囲を示す。

表 - 3.18 高強度型半たわみ性舗装用充填材の配合範囲

成分名	代表割合(wt%)
普通ポルトランドセメント	40.0~70.0
ポリカルボン酸系 標準型	0.0~0.3
ポリカルボン酸系 遅延型	0.1~0.5
無機微粒子混和材	5.0~20.0
消泡材	0.1~0.4
骨材	30.0~60.0
水/試料比	16~24%

3.5.5.3 評価方法

一般型早強タイプと超高強度型半たわみ性充填材の水/試料比を変化させて比較試験で評価した。試験は、半たわみ性舗装用充填材の規格に沿って行った。また、ポーラスアスファルト混合物に充填材を充填した混合物の曲げ試験、HWT(ハンバーガーホイールトラッキング試験)、曲げクリープ試験も優位性を判断するために行った。また、充填性確認として厚み 50mm のポーラスアスファルト混合物を作成して、実際に充填して確認を行い比較検討した。試験方法を表 - 3.19 に示す。また HWT、曲げクリープ試験を写真 - 3.7 に示す。

表 - 3.19 高強度型半たわみ性舗装用充填材の試験方法

項目	試験方法	
充填材の評価	流下時間	P 漏斗により流下時間を測定
(一般型早強と 比較)	強度	JIS R 5201 に準じ 40×40×160mm 試験体にて曲げ強度を測定
	充填性	空隙率 25%縦 3000×横 300×厚み 50mm の母体に充填し充填率を測定(振動)
半たわみ性 混合物の評価 (一般型早強と 比較)	曲げ強度	NEXCO 試験方法 第 2 編アスファルト舗装試験方法 C043-2007 半たわみ性舗装混合物の曲げ試験方法に準ずる 厚み 50mm×幅 50mm×長さ 300mm、スパン 200mm、載荷速度 10mm/min 材齢 7 日(規格値：曲げ強度 2.5N/mm ² 以上、破断ひずみ：3×10 ⁻³ 以上)
	塑性変形 抵抗性	HWT(ハンバーガーホイールトラッキング)試験 試験温度 60℃、載荷速度 50 回/分、載荷荷重 705±4.5、走行サイクル 10000、 試験輪 鉄、養生条件 気中・水中 変形量を測定
	曲げ クリープ	曲げ強度 5N/mm ² 、発生応力 0.5N/mm ² (曲げ強度×10%)、スパン 200mm 幅 100mm×厚み 50mm、載荷荷重 408.7N、試験温度 20℃ 破壊までの時間測定

※ 半たわみ性混合物の評価にはポリマー改質Ⅱ型のアスファルトを使用



写真 - 3.7 HWT と曲げクリープ試験

3.5.5.4 性状・物性値

一般型早強タイプと水/試料比の異なる高強度型半たわみ性舗装用充填材の性状・物性値と混合物の物性値を表 - 3.20 に示す。また、図 - 3.6 に曲げクリープ試験の時間と変位量の関係、WHT の試験後の表面状態を写真-3.8, 曲げクリープの破壊状況を写真 - 3.9 に示す。

表 - 3.20 高強度型半たわみ性舗装用充填材の性状・物性値と混合物の物性値

項目		高強度型			一般型早強	
水/試料比		16%	20%	24%	46%	
P 漏斗流下時間(秒)		136.7	19.1	13.6	10.3	
圧縮強度(N/mm ²)	7day	90.4	74.6	53.3	24.1	
曲げ強度(N/mm ²)		14.2	9.1	7.5	5.6	
充填率(%)		33.2	9.09	99.3	93.4	
混合物曲げ試験強度(N/mm ²)		-	4.13	-	2.63	
HWT 変形量 (mm)	気中	サイクル数	-	10000	-	10000
		変形量	-	1.12	-	1.42
	水中	サイクル数	-	10000	-	5548
		変形量	-	1.50	-	3.21
曲げクリープ破壊時間(時間)		-	4.8	-	1.5	

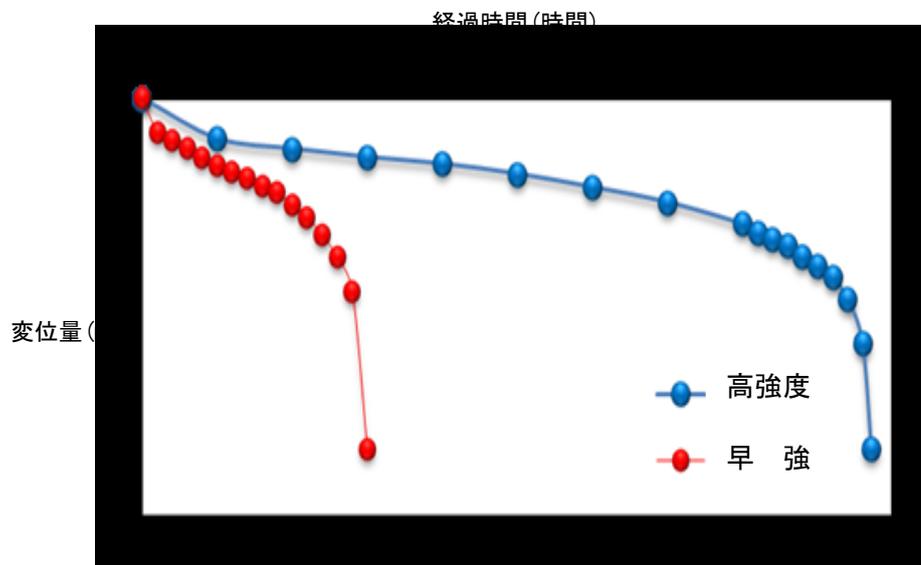


図 - 3.6 クリープ試験による経過時間と変位量の関係

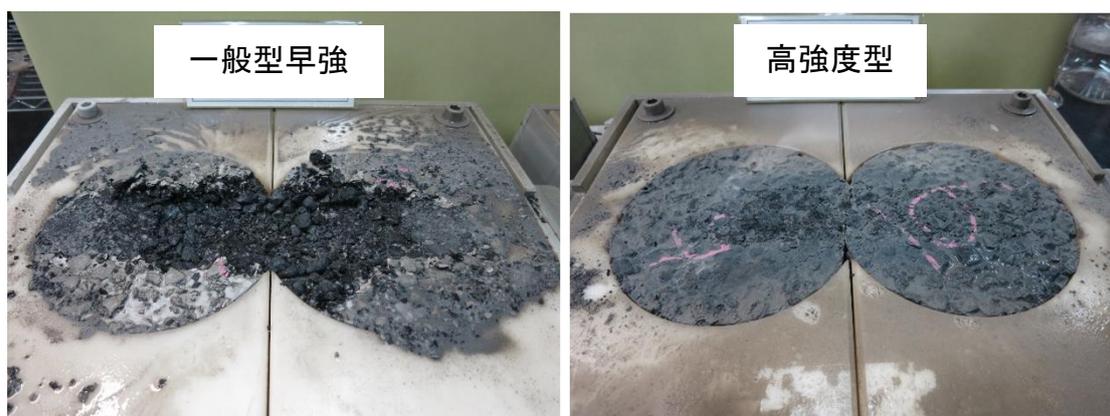


写真 - 3.8 WHT 試験後の表面状態



写真 - 3.9 曲げクリープ試験の破壊状況

水/試料比を変化させた高強度型半たわみ性舗装用充填材について、規格に沿った試験を行い評価した結果、以下のことが判明した。P 漏斗の流下時間は、全て規格の範囲から外れていた。しかし、充填率から判断すると水/試料比=20%以上で十分な充填性が確認できた。圧縮強度は、水/試料比=20%で 74.6N/mm^2 、最も充填性に優れる水/試料比=24%においても 53.3N/mm^2 と目標とした 50N/mm^2 を達成していた。これは一般型早強タイプの 2~3 倍の強度となる。また、混合物とした場合、曲げ試験においても、規格値以上であり舗装用コンクリートの曲げ強度に近い値となった。WHT では 10000 サイクルまで気中、水中において表面に異常はなく、10000 サイクルの変形量は、気中において 1.12mm 、水中において 1.50mm であった。一般型早強タイプでは水中において 5548 サイクルで表面異常が激しく試験を中止した。その時の変形量は 3.21mm と高強度型に比べると 2 倍以上の変形量であった。曲げクリープ試験では破壊時間が 4.8 時間であり、一般型と早強タイプの 3 倍となった。

3.5.5.5 まとめ

半たわみ性舗装用の高強度型充填材の開発を行った結果、以下の結論となった。

- 1)無機微粒子混和材料の添加と添加量，ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤により P 漏斗の規格は外れるが十分な充填性を有した充填材であることが実証された。
- 2)無機微粒子混和材料の細密充填とポゾラン反応，ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤の分散能力により，目標とした圧縮強度 50N/mm^2 以上が可能であることが実証された。
- 3)混合物としたときに，充填材の強度を増加させることで，曲げ強度では舗装用コンクリートに近い値となり，また，一般型早強タイプと比較して，WHT 試験では変形量が非常に少なく，曲げクリープ試験では破壊時間が 3 倍となったことから，耐久性や耐塑性変形性が向上していることが実証された。

以上より，十分な充填性と 50N/mm^2 以上の強度を有する高強度型半たわみ性舗装用充填材の開発に至った。WHT 試験や曲げクリープ試験から耐久性が向上しており，過度な荷重が作用する箇所への適応が可能であることを示した。

3.5.6 急勾配型充填材の開発

3.5.6.1 既存の技術

一般的に舗装道路では、必ず横断勾配や縦断勾配が存在する。横断勾配は2%程度であるが、山道や取り付け道路等では縦断勾配が5~10%の急な勾配となり、このような急勾配の箇所を半たわみ性舗装とする場合がある。しかし、一般型の充填材は、充填性を優先した配合設計となっているため、横断勾配の2%程度であれば問題は生じないが、5%を超えた場合、施工時に舗装表面やポーラスアスファルト混合物の内部空隙を伝わり充填材が勾配の上部から下部へ流出する状況となる。

3.5.6.2 配合設計

配合設計の考え方は、舗装施工時に必ず使用する振動ローラーによる、振動を利用した充填性の確保を基本とし、無機微粒子混和材料とポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を組み合わせることとし、充填材に無機微粒子混和材料による適切なチキソトロピック性を与えることで、無振動では充填材を散布した箇所に留まって充填は行われず、振動を付与することで速やかに充填が行われ、充填後に振動を停止すれば充填箇所に留まるような充填材を目標として配合設計の検討を行った。その結果、無機微粒子混和材料とポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤の標準型と遅延型の組み合わせにより、適切なチキソトロピック性と振動による充填性を有する急勾配型半たわみ性舗装用充填材の配合設計が可能となった。同時に硬化時間が異なる3時間、24時間、72時間開放タイプの3種類の急勾配型充填材の配合設計を行った。表 - 3.21 に代表配合の範囲を示す。

表 - 3.21 急勾配型半たわみ性舗装用充填材の配合範囲

成分名	割合(wt%)		
	3h 解放	24h 解放	72h 解放
普通ポルトランドセメント	0.0~40.0	-	50.0~80.0
早強ポルトランドセメント	0.0~40.0	50.0~80.0	-
超速硬セメント	30.0~50.0	-	0.0~10.0
その他セメント	0.0~10.0	-	0.0~10.0
ポリカルボン酸系 標準型	0.0~0.1	0.01~0.1	0.01~0.1
ポリカルボン酸系 遅延型	0.05~0.2	0.01~0.1	0.01~0.1
無機超微粒子混和材	3.0~10.0	3.0~10.0	3.0~10.0
消泡剤	0.05~0.3	0.05~0.3	0.05~0.3
再乳化型粉末樹脂	1.5~5.0	1.5~5.0	1.5~5.0
その他混和剤	0.02~0.5	0.0~0.3	0.0~0.3
骨材	20.0~40.0	20.0~40.0	20.0~40.0
合計	100.0	100.0	100.0
水/試料比	46%	46%	46%

3.5.6.3 評価方法

一般型普通タイプと3種類の急勾配型半たわみ性充填材を比較試験で評価した。試験は、半たわみ性舗装用充填材の規格に沿って行った。また、チキソトロピック性の評価として、テーブルフロー値も評価に加えた。充填性確認は、厚み50mmのポーラスアスファルト混合物を作成して、実際に充填して確認を行い比較検討した。試験方法を表-3.22に示す。

表 - 3.22 急勾配型半たわみ性充填材の評価方法

項目	試験方法	
充填材の評価	流下時間	P漏斗により流下時間を測定
	テーブルフロー値	JASS 15 M103 に準じ φ50×100mm の円柱コーンによる横の広がりを測定
	強度	JIS R 5201 に準じ 40×40×160mm 試験体にて曲げ強度を測定
	充填性	空隙率 24%縦 300×横 300×厚み 50mm の母体に充填し充填率を測定

3.5.6.4 性状・物性値

一般型普通タイプと硬化時間の異なる3種類の急勾配型半たわみ性舗装用充填材の性状・物性値と充填率を表-3.23に示す。

表 - 3.23 急勾配型半たわみ性充填材の性状・物性値と充填率

項目	急勾配型			一般型 普通タイプ
	3時間解放タイプ (超速硬タイプ)	24時間解放タイプ (早強タイプ)	72時間解放タイプ (普通タイプ)	
水/試料比(%)	46			
P漏斗流下時間(秒)	12.3	12.4	12.7	10.4
テーブルフロー値(mm)	220	228	225	302
曲げ強度 (N/mm ²)	3h	2.1	-	-
	24h	3.2	1.6	-
	72h	4.7	3.9	2.5
	7day	5.9	5.1	4.9
圧縮強度 (N/mm ²)	3h	6.8	-	-
	24h	14.0	7.8	-
	72h	19.1	15.1	9.1
	7day	29.2	27.2	23.4
充填率(%)	静置下	14.3	10.1	18.3
	振動5秒	79.0	89.8	83.6
	振動10秒	94.6	95.1	94.4

硬化時間が異なる3種類の急勾配型半たわみ性舗装用充填材について、規格に沿った試験とテーブルフロー試験を行い評価した結果、以下のことが判明した。P漏斗の流下時間は、一般型普通タイプと比べ遅いが規格値の範囲内であった。テーブルフロー値では220～

228mm と一般型普通タイプと比べ約 80mm 小さな値となった。圧縮強度から目標とする開放時間は達成しており、材齢 7 日規格値内であった。充填性の確認試験では、一般型普通タイプは無振動において 76.2%まで充填されていたが、急勾配型はどれも 20%以下とほとんど充填されていなかった。しかし、振動を 5 秒付与すると、79～89.8%まで充填されおり、10 秒付与では 90%を超え、一般型普通タイプと同等となった。

3.5.6.5 まとめ

半たわみ性舗装用の急勾配型充填材の開発を行った結果、以下の結論となった。

- 1)無機微粒子混和材料の添加と添加量，ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤により半たわみ性舗装の規格内であり，目標とする開放強度を達成していることが実証された。
- 2)無機微粒子混和材料によるチキソトロピック性付与と，ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤の分散能力により，テーブルフロー値が小さく，無振動では充填されず，振動により速やかに充填されることが実証された。
- 3)テーブルフロー値から判断すると勾配が 10%程度であれば，下部への流出はないと考えられる。

以上より，適切なチキソトロピック性と振動による速やかな充填が可能な急勾配型半たわみ性舗装用充填材の開発に至った。

第3章 参考文献

- 1) セメント協会：セメント・コンクリート化学の基礎解説，エンサイクロペディア(1996)
- 2) 田澤榮一ほか：コンクリート工学－微視構造と材料特性，技報堂出版,(1998)
- 3) 倭 富士桜ほか：新規高性能 AE 減水剤の構造と特性，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17 No.1 pp375-380,(1995)
- 4) 菅侯匠：セメント粒子の状態変化に着目したポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤の粒子分散作用，東京大学学位論文(1999)
- 5) 中山知大：外力によるセメントの凝集・分散と高性能 AE 減水剤の吸着，高知工科大学大学院 2009 年度修士論文(2009)
- 6) 笠井芳夫ほか：I 混和材，セメント・コンクリート用混和材料，技術書院，pp17-242
- 7) 笠井芳夫ほか：II 混和剤，セメント・コンクリート用混和材料，技術書院，pp243-479
- 8) (社)セメント協会：5.1 グラウト工法，第5章 グラウト工法と無収縮グラウト材，セメント系補修・補強材料の基礎知識，pp45(2006.8)
- 9) 全国パラボラ工法協会：開発の要旨，パラボラ工法とは，<http://www.parabola-system.jp/parabola/index.html>
- 10) 小団扇浩ほか：下水道マンホールふたの健全度評価に基づく維持管理方針に関する検討調査(F市)，2013 年度 下水道新技術研究所年報(2013)
- 11) (社)日本下水道協会：高さ調整部材および無収縮流動性モルタル，JSWAS G-4 2005 下水道用鋳鉄マンホールふた 参考資料 3，pp30(2005)
- 12) 小野田ケミコ株式会社：スーパージェットセメント 技術資料
- 13) 笠井芳夫ほか：9 急結剤，セメント・コンクリート用混和材料，技術書院，pp361-362
- 14) 小野田ケミコ株式会社：スーパージェットセメント 技術資料，pp2
- 15) 内川浩ほか：ジェットセメントとせっこう(その2)完，Gypsum & Lime, No.118, pp35-42 (1972)
- 16) 松永稔ほか：セメント風化によるコンクリートの変化，コンクリート・ジャーナル, Vo1. 5, No. 5, pp15-24(1967)
- 17) 笠井芳夫ほか：5 遅延剤，セメント・コンクリート用混和材料，技術書院，pp367-370
- 18) 小宮山正文：アルミニウム粉末の混入がモルタルおよびコンクリートの強度におよぼす影響，港湾技術研究所報告，第1巻1号，pp35-45(1963.2)
- 19) 郭度連ほか：膨張材による超高強度コンクリートの収縮低減，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.1, pp471-476(2008)
- 20) 神代泰道：膨張性高流動コンクリートによる沈下補償に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.1, pp153-158(2008)

- 21) 迫間マキほか：災害時における路面下空洞や道路陥没の発生状況調査について，平 25. 都土木技術支援・人材育成センター年報，Annual Report, C.E.S.T.C., TMG 2013, pp137-143(2013)
- 22) 内山博文ほか：路面下空洞の開削状況調査結果，平 24.都土木技術支援・人材育成センター年報，Annual Report, C.E.S.T.C., TMG 2012, pp227-230(2012)
- 23) 山室穂高：新規特殊増粘剤を用いたエアーモルタルおよび可塑性注入材の基礎物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp2073-2078(2004)
- 24) 株式会社フローリック：フローリック FA100, カタログ
- 25) 株式会社立花マテリアル：エアーボール Q, カタログ
- 26) 三興コロイド化学株式会社：サンコーネオゾール, カタログ
- 27) 橋大介ほか：トンネル覆工背面新充填材料の開発，清水建設研究報告 第 73 号(2001.4)
- 28) 木幡行宏：流動化処理土の力学特性と今後の課題，土木学会論文集 F, Vol.62, No.4, pp618-627(2006.10)
- 29) 久野悟郎ほか：流動化処理土の配合設計の簡略化に関する考察，第 37 回地盤工学研究発表会(大阪), pp863-864(2002.7)
- 30) 田中邦博ほか：流動化処理土の強度性状について，九州共立大学研究報告，工学部(25号), pp139-143(2001. 1)
- 31) 住友大阪セメント株式会社，宮脇賢司ほか：エアミルク、エアモルタル、それらの製造方法、及びそれらを用いた施工方法，特開 2016-74599 号，2016. 5.12
- 32) 黒山泰弘ほか：路面下空洞が発生する素因に関する検討，土木学会第 56 回年次学術講演会，V-067, pp134-135(2001.10)
- 33) 大倉正人ほか：水中不分離性コンクリートの基本性状について，コンクリート工学年次論文報告集，12-1, pp43-48(1990)
- 34) 電気化学工業株式会社 ダブリュー・アール・グレイス・アンド・カンパニー-コネチカット，木田勉：水中不分離性増粘剤組成物，特開 2013-14479 号，2013.1.24
- 35) 電気化学工業株式会社 ダブリュー・アール・グレイス・アンド・カンパニー-コネチカット，木田勉：水中不分離性高流動セメント組成物，特開 2013-14480 号，2013.1.24
- 36) 小西真治：トンネル空洞充填工法(アクアグラウト工法)，鉄道総研パテントシリーズ 110, RRR2009.6, pp36-37(2009)
- 37) 中田雅夫ほか：水ガラス系材料による山岳トンネル背面空洞充填材の開発，土木学会第 58 回年次学術講演会：VI-150, pp299-300(2003.9)
- 38) ジェトムズ協会：ジェトムズ工法，カタログ
- 39) 新村亮ほか：水中不分離性軽量コンクリートの配合選定とモデル流動実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1(2002)
- 40) 吉川和行ほか：トンネル覆工背面空洞用裏込め材の充填性能，土木学会第 60 回年次学術講演会，6-173, pp345-346(2005.9)

- 41) 笠井浩, 軽量コンクリート : 技術書院(2002.11)
- 42) 太平洋セメント株式会社 : 比重 0.85 の軽量骨材-骨材 アサノスーパーライト, 日経コンストラクション, 1996.6,11 月号, pp88(1996.6)
- 43) 角広幸ほか : 窯業廃材を用いた水中不分離性気泡モルタルによる亜炭廃坑の充填, 土木学会第 56 回年次学術講演会, V-187, pp374-375(2001.10)
- 44) 秩父コンクリート工業株式会社 : レコキープ 技術資料
- 45) 太平洋マテリアル株式会社 : 太平洋パーライト, カタログ
- 46) 昆布谷竹郎 : アスファルト舗装施工法の変遷, 土木学会論文集, 第 384 号, V-7, pp11-19(1987.8)
- 47) NEXCO : 施工要領 現場混合
- 48) 清水進ほか : 半たわみ性舗装用セメントミルクの諸性状と特殊箇所への適用事例, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 5-047 , pp93-94(2008.9)
- 49) 秩父コンクリート子業株式会社 : 生カラースタッフ, カタログ
- 50) 神谷恵三ほか : 高速道路における高機能舗装の構造評価, 土木学会舗装工学論文集 第 9 巻, pp171-176(2004.12)
- 51) 本松資朗 : ハイブリッド舗装混合物の配合設計に関する研究, 土木学会舗装工学論文集 第 8 巻, pp125-136(2003.12)
- 52) 後藤聡 : 都市内舗装の夜間補修工事に従事して, 特集・現場を支える舗装技術者, ASFALT Vol.43, No205, pp8-9(2000)
- 53) 広島高速道路公社 : 1,標準配合と基準値, 2.3.3-1 表層用混合物, 2.3.3 混合物の基準, 2.3 コンクリート床版上の標準舗装, 舗装設計基準, pp16(2009.8)
- 54) 杉山亮ほか : 高安定性アスファルト混合物の耐油性評価方法と施工事例について, 新技術・新工法部門 : No.02, pp1-5
- 55) 八谷好高 : 空港舗装を対象とした半たわみ性材料の力学特性, 土木学会舗装工学論文集 第 5 巻, pp67-75(2000.12)
- 56) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社 : 2-5-5 セメントミルクの施工上の注意, 2-5 施工, 計要領 第一集 舗装, pp 参 2-10(2017.7)
- 57) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社 : 3-6 路面排水対策, 設計要領 第一集 舗装, pp3 - 51-3 - 52(2017.7)
- 58) 増田康彦 : ヘリポートコンクリート舗装施工方法について, 施工計画, (社)静岡県土木施工管理技士会, 株式会社橋本組, 平成 21 年度

第4章 環境負荷低減が可能なグラウトモルタルの開発

4.1 セメント産業の環境負荷低減の現状

急激に増加した温室効果ガスによる地球温暖化が問題視されるようになり、地球温暖化対策は地球規模で行われている。

一方、温室効果ガスの排出量のうち約80%がCO₂であり、CO₂を排出する主な産業の一つとして、セメント産業があげられる。セメント産業では製品を製造する過程で多くのエネルギーを消費することから、化石燃料由来のCO₂を多く排出する。それと同時に、原料である石灰石の熱分解からCO₂が排出され、2003年には全世界で約1600MtCO₂がセメント産業から排出されており、これは全排出量の約5%に相当する¹⁾。

そのため、セメント産業では、CO₂削減を課題とし、温室効果ガスの排出状況公開や長期定量目標設定、製造工程の安定・効率化、廃熱発電、代替エネルギー・代替原料、輸送等を行っている。また、資源循環の促進として電力会社との資源循環、製鉄会社との資源循環、建設発生土の資源循環等の産業界との資源循環をはじめ、エコセメントシステム、灰水洗システム、AKシステム等の地域社会との資源循環を行っている。さらに、生物多様性の保全、水資源の適正利用、環境汚染防止、廃棄物の削減、化学物質の適正管理といった様々な取り組みも行っている²⁾。

4.2 環境負荷低減材料の必要性

セメントのCO₂原単位は、692kgCO₂/t(2015年)であり、セメントを使用するコンクリートやモルタルも当然ながらCO₂原単位は大きくなる。

セメントの主用途であるコンクリートは、CO₂原単位の大きいセメントを、産業副産物である高炉スラグ微粉末などの混和材に置換することで、コンクリートの低炭素化の取り組みが盛んに行われ、最大80%のCO₂を低減することも可能となっている³⁾。また、エネルギー・CO₂ミニマム(ECM)セメント・コンクリートシステムが、地球温暖化防止活動環境大臣表彰されている^{4),5)}。このように、建築・土木分野においても、温室効果ガスの低減や資源の再利用による環境負荷低減が可能な資材や工法が注目を集めており、CO₂原単位や環境負荷の低減が可能なモルタルの開発を行うべきと考える。

4.3 低CO₂半たわみ性舗装用充填材の開発

4.3.1 セメントのCO₂原単位の現状

セメントは1450℃の高温で焼成され、焼成過程の化学反応により原材料である石灰石が脱炭酸することから、製造過程で多量CO₂が発生する。CO₂削減では、燃焼排ガスからのCO₂を酸化カルシウムにより吸収し、生成した炭酸カルシウムを主要成分とする混合物をセメント原料として有効利用するセメント製造技術⁶⁾や、セメントの製造方法省エネルギー設備の導入やキルン運転の安定効率化によるエネルギー消費削減を推進するとともに、さらに廃棄物やバイオマス由来のエネルギー使用により化石エネルギーの使用量を減らす対

策が進められている⁷⁾。

4.3.2 既存の技術

半たわみ性舗装用充填材は、セメントを結合剤とするため当然ながら CO₂ 原単位は多くなる。CO₂ 原単位の低減には、低 CO₂ 原単位のバイオマス燃料により製造されたセメントを使用するのが近道と考えられるが一般入手は難しい⁸⁾。次に使用するセメントの低減が考えられる。コンクリート分野では盛んに研究されている反応性の副産物をセメントの一部と置換して CO₂ 原単위를低減する方法である^{9),10)}。しかし、半たわみ性舗装用充填材には各機関が設けた規格があり、また夜間工事で超速硬性が求められるため、単純な置換では規格や要求性能を達成できない。

4.3.3 配合設計

配合設計の考え方は、潜在水硬性を有する CO₂ 原単位の低い高炉スラグをセメントの一部と置換して長期強度発現に利用し、高炉スラグにより遅延した凝結時間、硬化時間、初期強度を、残りのセメントの種類や混和材料により促進させることを目標に配合設計の検討を行った。その結果、早強ポルトランドセメント、超速硬セメント、高炉スラグの組み合わせで、CO₂ 原単位が低減可能な硬化時間が異なる 3 時間、24 時間、72 時間開放タイプの一般型半たわみ性舗装用充填材の配合設計が可能となった。

4.3.4 代表配合・CO₂ 原単位低減率の比較

表 - 4.1 に代表配合の範囲と CO₂ 原単位低減率を示す。セメントの CO₂ 原単位は太平洋セメント CSR レポート 2016 中の 2015 年の数値を使用し、高炉スラグ、骨材はコンクリートの環境負荷評価(土木学会)¹¹⁾を参照して行った。

表 - 4.1 低 CO₂ 型半たわみ性舗装用充填材の代表配合と CO₂ 原単位低減率

成分名	CO ₂ 原単位 (kg/t)	割合(wt%)					
		72時間開放タイプ		24時間開放タイプ		3時間開放タイプ	
		現行	CO ₂ 低減	現行	CO ₂ 低減	現行	CO ₂ 低減
普通ポルトランドセメント	692	75.0	22.0	70.0	33.0	75.0	44.0
早強ポルトランドセメント							
超速硬セメント							
高炉スラグ	24.1	0	43.0	0	32.0	0	24.0
ポリカルボン酸系他	-	4.0	2.0	4.0	5.0	5.0	5.0
炭酸カルシウム、珪砂	42.3	21.0	33.0	26.0	30.0	20.0	27.0
合計		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
CO ₂ 原単位合計(kg/t)		528	176	495	243	528	321
現行に対する CO ₂ 原単位の割合(%)		-	33.3	-	49.1	-	60.8
CO ₂ 原単位低減率(%)		-	66.7	-	50.9	-	39.2

低 CO₂ 型半たわみ性舗装用充填材は、CO₂ 原単位が 3 時間開放タイプで現行の 39.2%、24 時間開放タイプが現行の 50.9%、72 時間開放タイプが現行の 66.7% 低減可能である。

4.3.5 評価方法

硬化時間の異なる 3 種類の一般型と低 CO₂ 型半たわみ性充填材を比較試験で評価した。充填性確認は、P 漏斗の流下時間で判断する。試験方法を表 - 4.2 に示す。

表 - 4.2 CO₂ 型半たわみ性充填材の評価方法

項 目		試験方法
充填材 の評価	流下時間	P 漏斗により流下時間を測定
	強 度	JIS R 5201 に準じ 40×40×160mm 試験体にて圧縮・曲げ強度を測定
	充填性	P 漏斗の流下時間から判断

4.3.6 性状・物性値

硬化時間の異なる 3 種類の一般型と低 CO₂ 型半たわみ性充填材の性状・物性値を表 - 4.3 に示す。

表 - 4.3 CO₂ 型半たわみ性充填材の性状・物性値

項 目		72 時間開放タイプ (普通タイプ)		24 時間開放タイプ (早強タイプ)		3 時間開放タイプ (超速硬タイプ)	
		現行	CO ₂ 低減	現行	CO ₂ 低減	現行	CO ₂ 低減
P 漏斗流下時間(秒)		10.2	10.1	10.2	10.1	10.1	10.1
曲げ強度 (N/mm ²)	3h	-	-	-	-	2.3	2.4
	1day	0.7	0.6	2.0	1.7	2.9	2.8
	3day	4.4	3.3	3.9	2.7	4.6	4.4
	7day	6.6	4.2	5.6	4.6	5.1	5.6
圧縮強度 (N/mm ²)	3h	-	-	-	-	7.0	7.1
	1day	1.2	0.9	7.2	6.4	9.1	9.8
	3day	11.0	8.6	16.4	11.4	15.8	13.4
	7day	19.9	21.0	22.8	21.3	22.3	21.8

硬化時間の異なる 3 種類の一般型と低 CO₂ 型半たわみ性充填材について、規格に沿った試験を行い評価した結果、以下のことが判明した。P 漏斗の流下時間は、全て 10 秒前半であり、十分な充填が可能であり、一般型タイプと比べ流下時間は同等である。圧縮強度では 24 時間開放タイプと 72 時間開放タイプが一般型に比べ材齢 1 日、7 日で低い値となっているが、開放に必要な強度は達成されている。材齢 7 日では、ほぼ同じ値となっている。

4.3.7 まとめ

半たわみ性舗装用の低 CO₂ 型充填材の開発を行った結果、以下の結論となった。

- 1) CO₂ 原単位の低い高炉スラグをセメントと置換することで、CO₂ 原単位が現行に比べ 39.2%~66.7%削減可能であることを実証した。
- 2) 潜在水硬性を有する高炉スラグのセメント置換により遅延する強度発現性を、早強セメントと超速硬セメントで促進させて初期強度を補うことで、全てのタイプが規格内となり、充填性も十分であることを実証した
- 3) 24 時間開放タイプと 72 時間開放タイプにおいて、現行と比べ初期強度が低い傾向にあるが、目標とする開放時間に必要な強度は達成されているため支障はないと考えられる。

以上より、適切な充填性と開放時間を有する低 CO₂ 型半たわみ性舗装用充填材の開発に至った。

4.4 資源循環型半たわみ性舗装用充填材の開発

4.4.1 セメントの資源循環

環境負荷低減のためセメント産業は、資源循環に取り組んでおり¹²⁾、大きく産業界と地域社会に分けられる。産業界では副産物の有効活用を電力会社や製鉄会社と行っている。一方、地域社会では都市ゴミをはじめとする焼却灰の有効活用としてエコセメントシステムや灰水洗システムによりセメント原料として利用している¹³⁾。

膨大な量の都市ゴミは焼却場などで焼却灰として 1/10 程度に減容化され、埋め立て処分場で廃棄されるが、処分場の枯渇が問題視されている。このような状況下で、焼却灰中に多量に含まれる塩素分を除いて、セメント原料である石灰石、粘土などとよく似た主成分からなる焼却灰・下水汚泥などのごみ資源をリサイクル化したのがエコセメントである。また、エコセメントの製造技術は、焼却灰に含まれるダイオキシン類等の有害な有機物質を 1300℃以上の高温焼成過程で分解するとともに、鉛(Pb)等の有害な重金属類を回収して再資源化することが可能となるほか、通常のセメントに比べて石灰石原単位が少ないため、CO₂の発生量を抑制できる。エコセメント化技術では 1t のセメント製造に焼却灰を 500kg が使われる¹⁴⁾。

また、2002年には「JIS A 5214 エコセメント」として JIS 化されており、汎用性は広がっているが、塩化物イオン量が普通ポルトランドセメントと比べ高いことから、無筋コンクリートや一部の鉄筋コンクリートに限定されている。また、海岸地帯での屋外暴露試験により、海塩粒子による塩分浸透が確認され、普通コンクリートよりも浸透速度が速いことが確認されているため、使用箇所は限定されている¹⁵⁾。

4.4.2 既存の技術

「JIS R 5214 エコセメント」には凝結時間の異なる普通と速硬の 2 種類が規格化されているが、市場は普通のみとなっているため、低 CO₂ 型充填材と同様に、早い硬化時間の要求に対応することは難しい。

また、重金属類も再生していることから、低材齢における硬化体からの溶出が懸念される。特に普通ポルトランドセメントでも溶出する場合がある六価クロムの低材齢での溶出防止は必要である。塩化物イオンの量も 1000ppm 以下と多く、比表面積も 4100cm²/g と大きいため混和材料の効果をコントロールするのが難しくなる。

4.4.3 配合設計

配合設計の考え方は、資源循環型として都市ゴミの焼却灰を原料とするエコセメントを利用し、高炉スラグにより溶出を防止することを基本とし、硬化促進を超速硬セメントでエコセメントを置換して初期強度を補い、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤で充填性を確保することを目標に配合設計の検討を行った。その結果、エコセメント、超速硬セメント、高炉スラグの組み合わせで、エコセメントを使用した、硬化時間が異なる 3 時間、72 時間

開放タイプの資源循環型半たわみ性舗装用充填材の配合設計が可能となった。

4.4.4 代表配合・資源循環率の比較

表 - 4.4 に代表配合の範囲と資源循環率を示す。資源循環率は単純に JIS R 5214 エコセメントに記載されている焼却灰の使用率(製品 1t につき 500kg)から換算し、ポルトランドセメント等の使用率は 0%とした。

表 - 4.4 資源循環型半たわみ性舗装用充填材の代表配合と資源循環率

成分名	資源循環率	割合(wt%)			
		72 時間開放タイプ (普通タイプ)		3 時間開放タイプ (超速硬タイプ)	
		現行	資源循環型	現行	資源循環型
エコセメント	50%	0	55.0	0	25.0~ 35.0
普通ポルトランドセメント	-	75.0	0	75.0	35.0~ 45.0
超速硬セメント					
高炉スラグ	-	0	10.0	0	0
ポリカルボン酸塩系	-	4.0	1.5~4.0	5.0	2.0~5.0
炭酸カルシウム	-	21.0	31.0~ 33.5	20.0	25.0~ 35.0
合計		100.0	100.0	100.0	100.0
資源循環率(%)		-	27.5	-	12.5~ 17.5

資源循環型半たわみ性舗装用充填材は、資源循環率が 3 時間開放タイプで 27.5%、72 時間開放タイプが 12.5~17.5%である。

4.4.5 評価方法

硬化時間の異なる 2 種類の一般型と資源循環型半たわみ性充填材を比較試験で評価した。充填性確認は、厚み 50mm のポーラスアスファルト混合物を作成して、実際に充填して確認を行い比較検討した。エコセメントは一般的ではないため NEXCO 等の施工要領書に記載がない。よって充填性では高機能舗装を使用した振動下の充填性評価、半たわみ性混合物の曲げ強度の評価により性能の検証を行う。試験方法を表 - 4.5 に示す。

表 - 4.5 資源循環型半たわみ性充填材の評価方法

項 目		試験方法
充填材 の評価	流下時間	P 漏斗により流下時間を測定
	強 度	JIS R 5201 に準じ 40×40×160mm 試験体にて圧縮・曲げ強度を測定
	充填性	空隙率 24%縦 300×横 300 厚み 50mm の母体に充填し充填率を測定 (振動 10 秒)
半たわみ 性混合物 の評価	曲げ強度	NEXCO 試験方法 第 2 編アスファルト舗装試験方法 C043-2007 半たわみ性舗装混合物の曲げ試験方法に準ずる 厚み 50mm×幅 50mm×長さ 300mm、スパン 200mm、載荷速度 10mm/min 材齢 7 日(規格値：曲げ強度 2.5N/mm ² 以上、破断ひずみ：3×10 ⁻³ 以上)

4.4.6 性状・物性値

硬化時間の異なる 2 種類の一般型と資源循環型半たわみ性充填材の性状・物性値を表 - 4.6 に示す。

表 - 4.6 資源循環型半たわみ性充填材の性状・物性値

項 目		72 時間開放タイプ (普通硬化タイプ)		3 時間開放タイプ (超速硬タイプ)	
		現行	資源循環型	現行	資源循環型
P 漏斗流下時間(秒)		10.8	11.0	10.1	10.2
曲げ強度 (N/mm ²)	3h	-	-	2.3	2.2
	1day	1.2	1.0	3.4	3.3
	3day	3.4	3.6	5.0	4.8
	7day	5.4	4.7	5.7	5.2
圧縮強度 (N/mm ²)	3h	-	-	5.9	6.0
	1day	2.3	2.2	12.8	13.3
	3day	10.4	9.9	19.5	18.3
	7day	20.6	21.0	22.3	23.6
充填率(%)		93.9	91.5	92.2	96.1
混合物	曲げ強度(N/mm ²)	3.17	3.47	3.35	3.61
	破断ひずみ	8.9×10 ⁻³	9.2×10 ⁻³	10.4×10 ⁻³	9.8×10 ⁻³

硬化時間の異なる 2 種類の一般型と資源循環型半たわみ性充填材について、規格に沿った試験を行い評価した結果、以下のことが判明した。P 漏斗の流下時間は、72 時間開放タイプが 11 秒、3 時間開放タイプは 10.2 秒であり、一般型タイプと比べ流下時間は同等である。圧縮強度では全て同等の値を示し、規格内であり、開放に必要な強度は達成されている。充填率でも振動により 90%以上であり、十分に充填が行われている。混合物の曲げ試験でも、全て同等の値を示し、NEXCO の混合物曲げ試験規格を達成している。

4.4.7 まとめ

半たわみ性舗装用の資源循環型充填材の開発を行った結果、以下の結論となった。

- 1)エコセメントを使用した 72 時間開放タイプは、27.5%の資源循環率が可能であり、3 時間開放タイプは、12.5～27.5%の資源循環率が可能であることを実証した。
- 2)3 時間開放タイプは、エコセメントを置換することで遅延する強度発現性を、超速硬セメントで促進させ初期強度を補うことで交通開放が規格内であることを実証した。
- 3)P 漏斗の流下時間と充填性から、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤によりエコセメントの流動性が改善されていることを実証した。
- 4)混合物の曲げ試験により、NEXCO 規格を達成しており、十分使用可能なセメントであることを実証した。

以上より、適切な充填性と開放時間を有する 2 種類の資源循環型半たわみ性舗装用充填材の開発に至った。しかし、コンクリートと比較するのは難しいが、エコセメントを使用したコンクリートは普通コンクリートよりも塩分浸透速度が速いことが確認されているため、使用箇所には注意をはかるとともに、今後の課題としたい。

4.5 保水性舗装用充填材の開発

4.5.1 舗装における環境対策の現状

温室効果ガスによる地球温暖化が危惧される中、さらに身近な問題とされるのが、都市部が局地的に高温化するヒートアイランド現象である。ヒートアイランド現象は、人工排熱の増加、道路舗装体への蓄熱や緑地の減少に伴う地表の蒸発散能力の低下、建築物の密集等による熱のよどみや市街地の外延的拡大という都市化の過剰な進展から生ずる都市型の環境問題である¹⁶⁾。アスファルト舗装の夏季の路面温度を低減する方法として、保水性舗装および遮熱性舗装が開発されている。保水性舗装は、ポーラスアスファルト混合物の空隙に保水材を充填し、舗装体内に保水された水分が蒸発し、水の気化熱により路面の温度上昇を抑制する舗装である。路面温度が低下することで舗装表面からの輻射熱が減少し、歩行者空間や沿道の熱環境が緩和されるほか、一般の舗装よりも舗装内部の蓄熱量が低減されるため、ヒートアイランド現象の抑制が期待できる。一方、遮熱性舗装は、表面に近赤外線を高反射する特殊な遮熱性塗料を塗布して舗装表面に配置し、舗装表面に到達する日射エネルギーのうち近赤外線を高効率で反射し、蓄熱を防ぐことによって路面温度の上昇を抑制する舗装である。このようにヒートアイランド現象の抑制のために舗装業界も環境負荷低減を真剣に取り組んでいる^{17,18)}。セメント産業もこの熱環境対策に少しでも貢献できるよう材料を提供すべきであると考える。

4.5.2 保水性舗装用充填材の必要性

一般にアスファルト舗装は、高温・滞水状態で外力が作用し続けると、アスファルトが骨材より剥離し、破損に至る危険性を有している。このため、常に水的作用を受ける保水性舗装には、適用箇所に応じて耐久性を確保できるポリマー改質アスファルトを使用する必要があるとされる¹⁹⁾。そのため、空隙径は小さく、保水性充填材には、保水機能とともに一般の半たわみ性舗装用充填材以上の充填性が必要とされる。また、環境を考慮した材料であり、環境に対する安全性の観点から、有害な重金属が、環境基準を超えて溶出してはならないとされている²⁰⁾。前述でもそうだが、セメントには重金属の中でも土壌に由来するクロムが焼成時に酸化され六価クロムとして微量ながら含まれているため、低強度の硬化体は注意が必要である。図 - 4.1 に保水性舗装の構造と表面状態を示す。

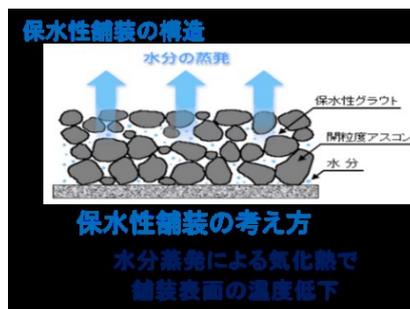


図 - 4.1 保水性舗装の構造

4.5.3 既存の技術

保水性舗装の施工は、ヒートアイランド現象の抑制を一つの目的としているため、大都市を中心とした人口密集箇所で行われる。よって交通の少ない夜間に道路を規制して、朝には開放するため、速硬性が求められる。そのため結合剤として、超速硬セメントを使用すべきだが、保水機能の優先により硬化体の強度は低強度となり、セメント中の重金属が溶出しやすい環境にある。特に六価クロムの溶出を防ぐことは難しく、保水材として多量の高炉スラグ粉末を使用することで、還元作用による不溶出化は一般的技術として可能であるが²¹⁾、新たな技術が求められる。また、充填材の保水機能を付与させる保水材は、シルト、高炉スラグ粉、珪藻土、多孔質炭酸カルシウム、セピオライト、吸水性樹脂が使用される。よって、当然ながら吸水性の非常に大きな材料であり、練り混ぜ直後から練り混ぜ水が吸水され、流動性の制御が難しい。表 - 4.7 に東京都建設局が定める保水性充填材の規格を示す。

表 - 4.7 保水材の標準的な物理性質

項目	標準的性状	試験方法
最大吸水率(%)	40 以上	参照 - 1 第 1 方法
流下時間(秒)	9~13	P 漏斗による流下時間
曲げ強度(N/mm ²)	0.3 以上	JIS R 5201

4.5.4 配合設計

配合設計の考え方は、最も重要な六価クロムの不溶出化である。超速硬セメントの高炉スラグによる不溶出化には限界がある。そこで以前、太平洋セメント株式会社と保水性歩道用ブロックを検討した経緯があり²²⁾、アルミナセメント、白セメント、消石灰、無水石膏の組み合わせと、流動性の付与をポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤で制御し、硬化促進と初期強度安定のため炭酸リチウムを微量添加することで、六価クロムが低材齢で溶出しない、高機能舗装に充填可能な速硬性を有する、最大吸水率が異なる 3 種類の保水性舗装用充填材の配合設計が可能となった。表 - 4.8 に 3 種類の保水性舗装用充填材の代表配合を示す。

表 - 4.8 保水性舗装用充填材の代表配合

成分名	割合(wt%)		
	タイプ - 1	タイプ - 2	タイプ - 3
白セメント	55.0	35.0	30.0
アルミナセメント			
消石灰、無水石膏他	20.0	20.0	20.0
炭酸リチウム ポリカルボン酸塩系他	2.2	2.5	2.3
セピオライト	20.0	20.0	20.0
炭酸カルシウム	2.8	22.5	27.7
合計	100.0	100.0	100.0

4.5.5 評価方法

3種類の保水性舗装用充填材のP漏斗の流下時間、強度、最大吸水率を測定して評価した。また、保水性舗装の評価として、路面温度上昇抑制委員会が規定している方法にて行った。最後に実現場において施工した保水性舗装の表面温度を測定した。表 - 4.9 に試験方法を示す。

表 - 4.9 保水性舗装用充填材の試験方法

項目		試験方法
充填材 の評価	流下時間	P漏斗により流下時間を測定
	強度	JIS R 5201 に準じ 40×40×160mm 試験体にて圧縮・曲げ強度を測定
	充填性	P漏斗の流下時間から判断
	最大 吸水率	路面温度上昇抑制研究会 保水性舗装用技術資料 平成 23 年 7 月 付録 - 2 保水性舗装の保水量試験方法に準じた 保水性充填材を充填した厚み 50mm の保水性舗装試験体から φ100mm コア を採取し、24 時間水中浸漬後、60℃の恒温室で乾燥、重量変化で測定 規格 3.0kg/m ² (50mm 厚)以上
保水性舗 装の評価	表面温度	路面温度上昇抑制研究会 保水性舗装用技術資料 平成 23 年 7 月 付録 - 2 保水性舗装室内照射試験方法に準じた ビームランプ散光型、BRF110V150W または BRF110V120W、東芝ライテック(株)製 試験体 300×300×50mm の保水性舗装(24 時間水浸)と密粒舗装(比較) 規格 密粒 60℃時に比べ 10℃以上の低減
	実現場 表面温度	実現場において散水有無の路面表面温度を測定しサーモグラフィ画像化

4.5.6 性状・物性値

3種類の保水性舗装用充填材の性状・物性値を表 - 4.10, 経過時間による吸水率を表 - 4.11, 表面温度測定結果を表 - 4.12, 表面温度測定状況を写真 - 4.1 に示す。

表 - 4.10 保水性舗装用充填材の性状・物性値

項目		タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3
P 漏斗流下時間(秒)		9.1	9.3	9.4
曲げ強度 (N/mm ²)	3h	-	-	-
	1day	1.0	0.8	0.7
	7day	2.5	1.8	1.4
圧縮強度 (N/mm ²)	3h	1.0	0.8	0.5
	1day	2.5	2.2	1.5
	7day	12.4	6.1	3.2

表 - 4.11 経過時間による吸水率

試験体サイズ	乾燥時間	タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3
保水量 (kg/m ²)	24h	3.2	3.5	3.9
	48h	3.8	4.3	4.6
	72h	4.2	4.9	5.2

表 - 4.12 表面温度測定結果

表面温度(°C)		路面低減温度(°C)
密粒度舗装	保水性舗装	
50	38.5	11.5
55	41.1	13.9
60	43.8	16.2
基準値(対密粒度舗装 60°C)		12°C以上

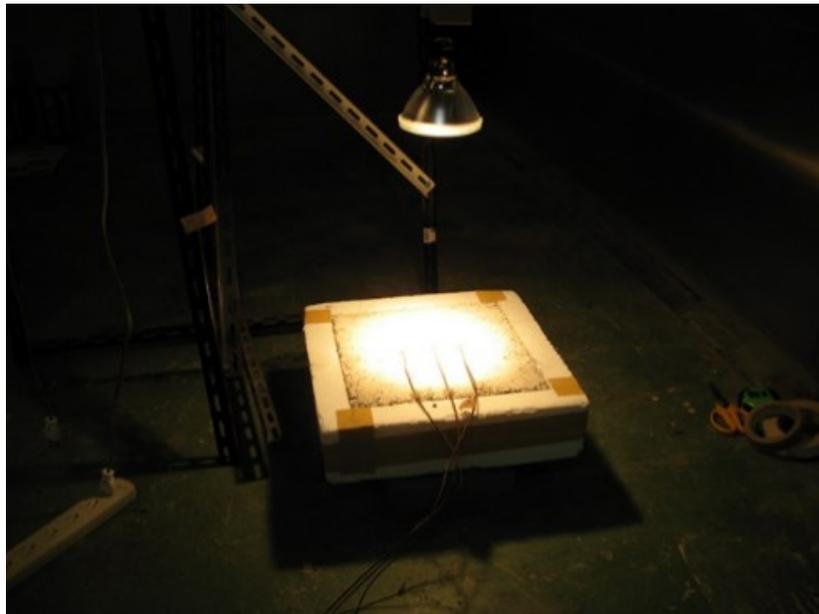


写真 - 4.1 表面温度測定状況

実現場 A における表面温度を表 - 4.13, サーモグラフィー写真を写真 - 4.2 に示す。実現場 B における表面温度を表 - 4.14, サーモグラフィー写真を写真 - 4.3 に示す。

表 - 4.13 実現場 A における表面温度

項目	測定値
使用充填材	タイプ 2
測定箇所(°C)	一般部
気温(°C)	35.0
散水有保水性舗装 路面温度(°C)	42.3
散水無保水性舗装 路面温度(°C)	52.8
散水による路面温度低減効果(°C)	10.5

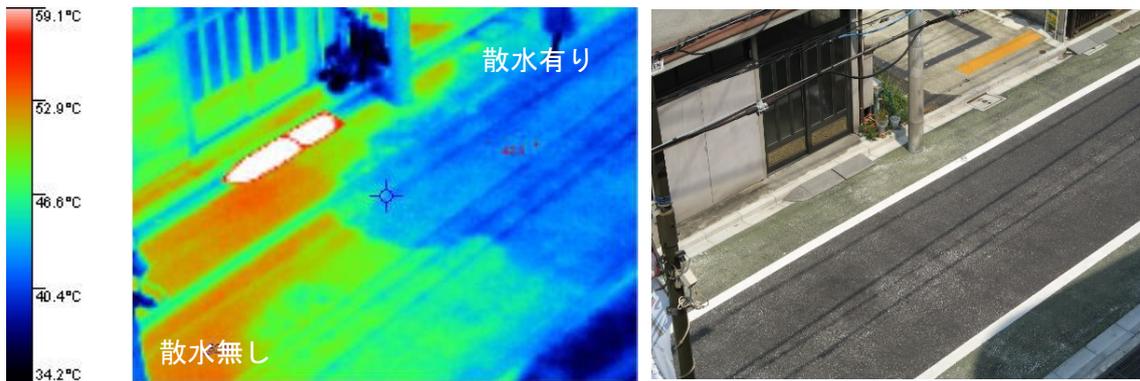


写真 - 4.2 実現場 A におけるサーモグラフィー写真

表 - 4.14 実現場 B における表面温度

項目	測定値
使用充填材	タイプ 2
測定箇所(°C)	一般部
気温(°C)	35.0
散水有保水性舗装 路面温度(°C)	38.3
散水無保水性舗装 路面温度(°C)	49.7
散水による路面温度低減効果(°C)	11.4

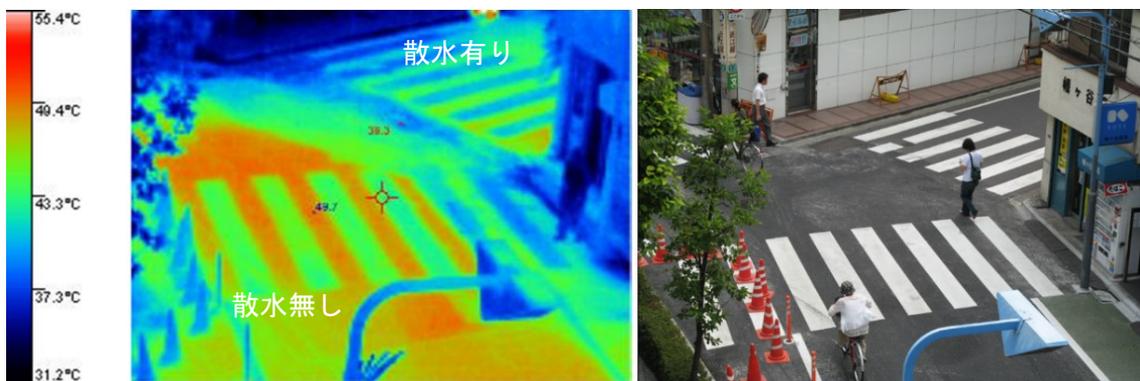


写真 - 4.3 実現場 B におけるサーモグラフィー写真

最大吸水率の異なる 3 種類の一般型と保水性舗装用充填材について試験を行い評価した結果、以下のことが判明した。P 漏斗の流下時間は、全てにおいて 9.1~9.4 秒であり充填性は良好と判断できる。曲げ強度と圧縮強度ともに東京都建設局の規格を達成していた²³⁾。3 時間で全て硬化し圧縮強度が 0.7~1.0N/mm² であり開放強度の規定はないが十分に開放可能であると判断できる。最大吸水率は 4.2~4.9kg/m² であり路面温度上昇抑制委員会が規定する 3.0kg/m² 以上を達成していた。最大吸水率が中間のタイプ 2 において保水性舗装としたときの温度低下が 12.0℃であり路面温度上昇抑制委員会が規定する 10℃以上を達成していた。実現場における散水による温度低下はサーモグラフィーから、どちらも 10℃以上であることを確認した。

4.5.7 まとめ

保水性舗装用充填材の開発を行った結果、以下の結論となった。

- 1) アルミナセメント、白セメント、消石灰、無水石膏、炭酸リチウムの組み合わせで六価クロムが溶出しない最大吸水率が 4.2~4.9kg/m²、3 時間で開放可能な保水性舗装用充填材となることを実証した。
- 2) P 漏斗の流下時間から、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤により十分な充填性が付与されていることを実証した。
- 3) 温度低減効果は規格値以上であり保水効果を有していることを実証した。
- 4) 実現場において散水による温度低減効果が確認でき保水効果を有していることを実証した。

以上より、3 時間で開放可能で、六価クロムの溶出のない、十分に高機能舗装に充填可能な保水性舗装用充填材の開発に至った。

第4章 参考文献

- 1) 井上浩隆ほか：世界のセメント需要とその生産に伴う CO₂ 排出量の推計，環境衛生工学研究第 24 巻第 3 号(2010)
- 2) 太平洋セメント株式会社：CSR REPORT 2016，pp36-45
- 3) 小林利充：二酸化炭素排出量を低減するコンクリート「クリーンクリート®」，生産と技術，第 67 巻，第 1 号，pp58-60(2015)
- 4) 和地 正浩ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp485-490(2010)
- 5) 国立大学法人東京工業大学ほか：エネルギー・CO₂ ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステムによる建設構造物の省 CO₂ の実現，技術開発・製品化部門，平成 27 年度地球温暖化防止活動環境大臣表彰，環境省(2015.12.2)
- 6) 太平洋セメント株式会社，丸田俊久：セメント製造方法，特開 2000-119049 号，2000.4.25
- 7) 太平洋セメント株式会社：津久見工場の木質バイオマス資源利用施設が稼動，ニュースリリース(2012.12.18)
- 8) 株式会社 NIPPO：半たわみ性舗装、環境配慮型を実用化／CO₂ 排出量 5.3% 減，日刊建設工業新聞，2015 年 2 月 18 日 3 面(2015.2.18)
- 9) 鐵鋼スラグ協会：高炉セメントの強度特性，第 2 章高炉セメントの特性，高炉セメント百年史，pp20-22(2010)
- 10) 坂井悦郎：初期水和性状を考慮した高炉スラグ高含有セメントの材料設計，Cement Science and Concrete Technology，No.65，pp20-26(2011)
- 11) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価，コンクリート技術シリーズ，pp I -87
- 12) 星野清一ほか：セメントのリサイクル資源活用の環境影響評価手法に関する検討，太平洋セメント研究報告(TAIHEIYO CEMENT KENKYU HOKOKU)，第 172 号，pp3-15(2017)
- 13) 太平洋セメント株式会社：エコセメントシステム，資源循環の促進，CSR REPORT 2016，pp40 (2016)
- 14) 太平洋セメント株式会社：エコセメント技術資料(2000.12)
- 15) 棚野博之：エコセメントを使用したコンクリートの長期特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp1759-1764(2009)
- 16) 山本桂香：都市におけるヒートアイランド現象の緩和対策，科学技術動向研究，科学技術動向 2005 年 9 月号(2005.9)
- 17) 路面温度上昇抑制舗装研究会 保水部会：帰化潜熱が路面温度を抑制する「保水性舗装」，舗装 50-6，pp3-6(2015)
- 18) 路面温度上昇抑制舗装研究会 遮熱部会：路面温度の上昇抑制・舗装耐久性が向上する「遮熱性舗装」，舗装 50-6，pp7-10(2015)

- 19) 路面温度上昇抑制舗装研究会：保水性舗装技術資料 Ver.3(2011.7)
- 20) 神谷清志ほか：保水性舗装技術の現状と今後の展望, *Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan* 11, pp293-300 (2004)
- 21) 住友大阪セメント株式会社, 佐々木徹：セメント組成物、セメントミルク、保水性舗装及び保水性舗装の施工方法, 特開 2007-176721 号, 2007.7.12
- 22) 太平洋セメント株式会社, 多田克彦ほか：保水性セメント組成物及び舗装構造, 特開 2008-37676 号, 2008.2.21
- 23) 東京都 建設局道路管理部, (2)保水材, 第 3 章材料, 保水性舗装 (車道) 設計・施工要領 (案), pp8(2008.4)

第5章 半たわみ性舗装用充填材の特殊箇所への適用評価

5.1 評価試験の概要

第3章において硬化時間の異なる高流動型半たわみ性舗装用充填材を開発し、3時間開放タイプを100mmのポーラスアスファルト混合物に充填し充填性を確認し、適用可能であることを実証した。第5章では開発した1時間開放タイプを伸縮装置前後1mの高機能舗装に適用可能かを評価・検証していく。

使用する充填材は一般的な半たわみ性舗装用のプレミックスタイプで対応することが多く、半たわみ性舗装用充填材の充填性等の性状は、空隙率21~25%¹⁾(20~28%²⁾のポーラスアスファルト混合物に対して充填するように流動性が調整されている^{3),4)}。一方、高速道路における高機能舗装の空隙率は概ね17~20%^{5),6)}であり、このような空隙率のアスファルト混合物にも容易に充填するものが望まれる。また、充填材注入工は、アスファルト舗装工(改良含む)完了後、後日別途交通規制し施工する路面表示工に併せて行うことになっている。しかし、交通規制の都合や作業時間、工程短縮等の工事に関わる時間的(社会的)損失の最小化を考えた場合、アスファルト舗装工事当日に充填材注入工が行える材料が望ましい。一般的な半たわみ性舗装の充填材の充填作業はアスファルト混合物の温度が40℃以下になってからであり、温度が高い場合には部分的な凝結が生じたり、浸透が不十分となって構造体として強度不足を生じ、ひび割れが発生するとされている⁷⁾。例えば温度80℃付近で充填可能であれば一連の施工時間の短縮につながる。また、一般の充填材の強度発現は超速硬タイプでは3時間であり、交通規制に関わる時間を短縮するため、より短時間で強度が発現する充填材が望まれている⁸⁾。

このような現状を踏まえ、空隙率17%および混合物温度80℃のアスファルト混合物に十分に充填し、硬化状態に悪影響を及ぼさないかを評価し検証する。

5.2 伸縮装置前後1mの高機能舗装を半たわみ性舗装にする理由

NEXCOや首都高速では橋梁部ジョイントに接する高機能舗装の段差抑制として、伸縮装置前後1mの高機能舗装にセメント系充填材を充填し半たわみ性舗装とするよう規格化されている⁹⁾。

5.3 評価方法

5.3.1 充填性

充填性は半たわみ性舗装用充填材の規格に沿って、P漏斗の流下時間による判断と充填性確認を行った。充填性確認として縦300mm×横300mm×厚み50mmの空隙率17%の高機能舗装体を作成して、振動を10秒間与えながら一般型超速硬タイプ(3時間開放タイプ)と高流動型1時間開放タイプを実際に充填して確認を行い比較検討した。試験方法を表5.1に示す。

表 - 5.1 高流動型半たわみ性舗装用充填材 1 時間開放タイプの試験方法

項目	試験方法	目標値
流下時間	P 漏斗により流下時間を測定	初期： 9～10 秒 10 分以上の可使用時間 極端な分離、ブリーディングが無い
充填性	空隙率 17% 厚み 5cm の母体に充填し充填率を測定 切断し目視観察	充填率 90%以上 目視で下部まで充填

5.3.2 開放時間

開放時間は、半たわみ性舗装用充填材の規格に沿って、圧縮強度と硬度計による硬度で確認を行った。硬度による確認は、建設図書：舗装技術の質疑応答、第 7 巻(上)に記載されている 10C 型スプリング式硬度計¹¹⁾により試験を行った。この文献によれば硬度 60 の時に、圧縮強度は開放強度の規定である 5N/mm² であり¹²⁾、現場にて、実際の舗装体の簡易的な日常管理に使用されている。開放時間の確認試験方法を表 - 5.2 に示す。

表 - 5.2 開放時間の確認試験方法

項目	試験方法	目標値
強度	JIS R 5201 に準じ 40×40×160mm 試験体にて圧縮・曲げ強度を材齢毎に測定	1h：5N/mm ² 以上 7day：15～36N/mm ²
硬度	C 型スプリング式硬度計により母体に充填したミルクの表面硬度を測定し、圧縮強度の関係より圧縮強度を測定	1h：60 以上 文献より

5.3.3 高温充填性と性能

高温での充填性確認は、縦 300mm×横 300mm×厚み 50mm の空隙率 17% の高機能舗装体を作成して、80℃の恒温室に 24 時間放置し、舗装体温度が 80℃であることを確認して、一般型超速硬タイプ（3 時間開放タイプ）と高流動型 1 時間開放タイプを、振動を 10 秒与えながら実際に充填して確認を行い比較検討した。強度は、JIS R 5201 に準じ、20℃と 80℃の恒温室(20℃は湿度 65%の恒温室)にて 40×40×160mm の型枠に充填材を採取して 30 分間そのまま放置し、その後 20℃の恒温恒湿室で密封養生を行い各材齢で試験を行う。混合物の曲げ強度は、充填試験と同様の条件で試験体を作成し、強度試験と同様の条件で養生を行った後に、「NEXC 試験方法 C043-2007 半たわみ性舗装混合物の曲げ試験方法」¹¹⁾に準じて、厚み 50mm×幅 50mm×長さ 300mm、スパン 200mm、载荷速度 10mm/min、材齢 7 日（規格値：曲げ強度 2.5 N/mm² 以上、破断ひずみ：3×10⁻³ 以上）にて行う。硬化体の分析では、強度試験に使用した試験体を使用して、X 線回折と SEM 観察を行う。大まかな試験方法を表 - 5.3 に示す。

表 - 5.3 高温充填性と性能の試験方法

項目	試験方法	目標値
充填性	80℃の空隙率 17% 厚み 5cm の母体に充填し充填率を測定 切断し目視観察	充填率：90%以上 目視で下部まで充填
強度	80℃にて 40×40×160mm 試験体を採取し、 圧縮・曲げ強度を材齢毎に測定 養生：80℃30 分その後 20℃密封	1h：5MPa 以上 7day：15～36MPa 20℃採取と比較し強度低下が無い
混合物 曲げ強度	80℃の母体に充填した混合物の曲げ強度の測定 厚 50mm×幅 50mm×長さ 300mm スパン：200mm 載荷速度：10mm/min	曲げ強度 2.5MPa 以上 ひずみ 3×10^{-3} 以上
硬化体の分析	X線回折、SEM 観察により 80℃にて採取した硬化体を分析	反応、生成物の比較検討 20, 80℃の比較

5.3.4 使用材料

使用した材料は 2 種類である。

(1)第 3 章にて開発した「高流動型半たわみ性舗装用充填材 1 時間開放タイプ」

プレミックス粉体品

練り混ぜ配合：水／試料比＝46%

(2)一般型半たわみ舗装用充填材超速硬タイプ（3 時間開放タイプ）

プレミックス粉体品

練り混ぜ配合：水／試料比＝46%

一般型半たわみ舗装用充填材は充填性の確認において比較として使用する。

5.4 試験結果

5.4.1 P 漏斗の流下時間による充填性

各温度における、経過時間と P 漏斗の流下時間の関係を図 - 5.1 に示す。各温度において、目標とする 9～10 秒の流下時間であり、一般的な半たわみ性舗装用充填材より約 1 秒早い結果となった。これは、配合設計の段階で、十分な充填性を得るため、各温度において練り混ぜ直後から 10 分後まで 10 秒以下となるようポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤で調整しているためである。また、9～10 秒の流下時間を維持できる時間は 10 分程度であったため、高温である 30℃においても、充填作業が可能な時間は、約 10 分間といえる。施工面積を考えると、片側 2 車線の高速道路とし、1 車線の幅員が 4m、目地の前後 1m であるため面積は 16m²であり、一般的な半たわみ性舗装の面積と比較すると非常に少ない。よって 10 分間の作業時間は十分と考えられる。

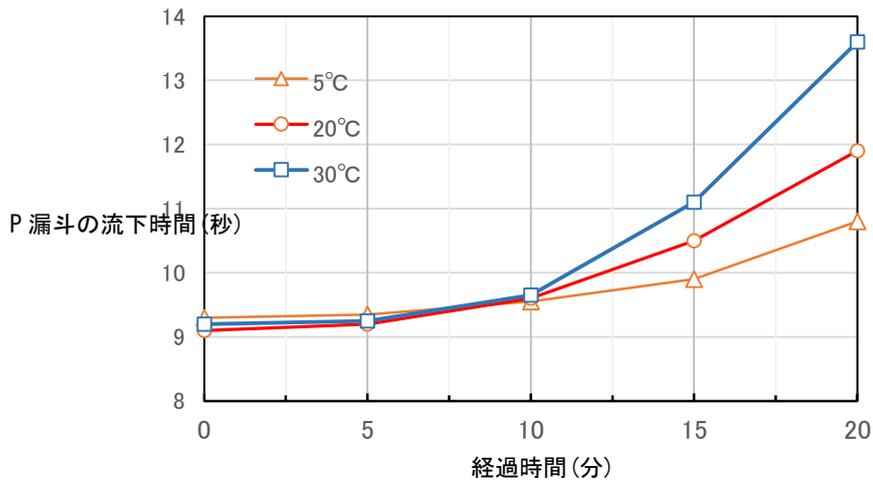


図 - 5.1 経過時間と P 漏斗の流下時間の関係

5.4.2 高機能舗装への充填率

一般型超速硬タイプと高流動型 1 時間開放タイプの充填率と切断した断面写真を表 - 5.4 に示す。どちらも高い充填率を示しているが、特に高流動型 1 時間開放タイプのほうが 93.6%と高い充填率であった。切断断面も下まで十分に充填されていた。

この結果から、高流動型 1 時間開放タイプは、高機能舗装に充填可能な配合設計であったことを実証している。また、P 漏斗の流下時間は 9~10 秒が最適であることがわかる。

表 - 5.4 20°Cにおける充填率と切断した断面写真

項目	一般型超速硬タイプ (3 時間開放タイプ)	高流動型 1 時間開放タイプ
P 漏斗の流下時間(秒)	10.4	9.2
充填率 (%)	87.2	93.6
振動 10 秒		

5.4.3 圧縮強度による開放時間と高温性能

高流動型 1 時間開放タイプの各温度における強度発現性と 80°C で採取した試験体の強度発現性を図 - 5.2 に示す。1 時間で 5N/mm² 以上、7 日で規格内であった。高温採取において強度低下は無かった。

この結果から、1 時間で解放可能であり、80°C の高温充填において性能低下は無いことを実証している。

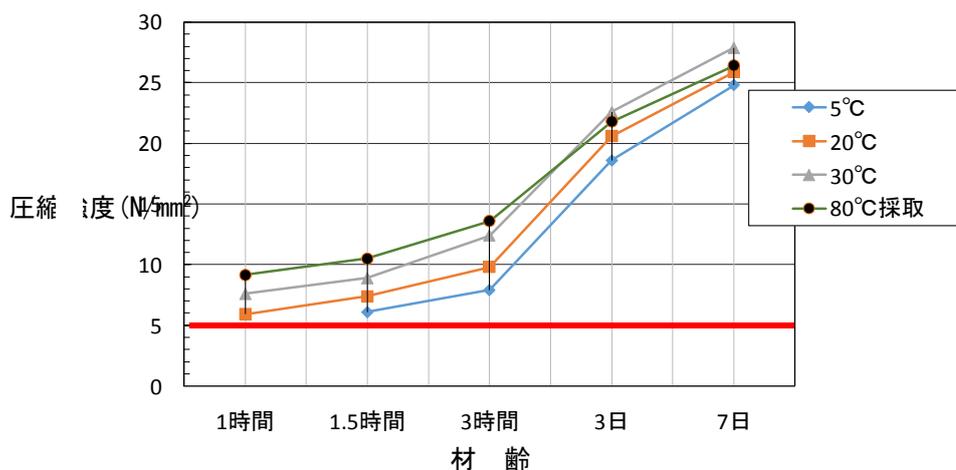


図 - 5.2 各温度における強度発現性と 80°C で採取した試験体の強度発現性

5.4.4 硬度による開放時間

C 型スプリング式硬度計での試験を行う前に、使用する硬度計のキャリブレーションを兼ねて圧縮強度と硬度の関係を調べた。その結果を図 - 5.3 に示す。結果から、使用する C 型スプリング式硬度計は、5N/mm² の圧縮強度の場合、硬度は 65 であった。

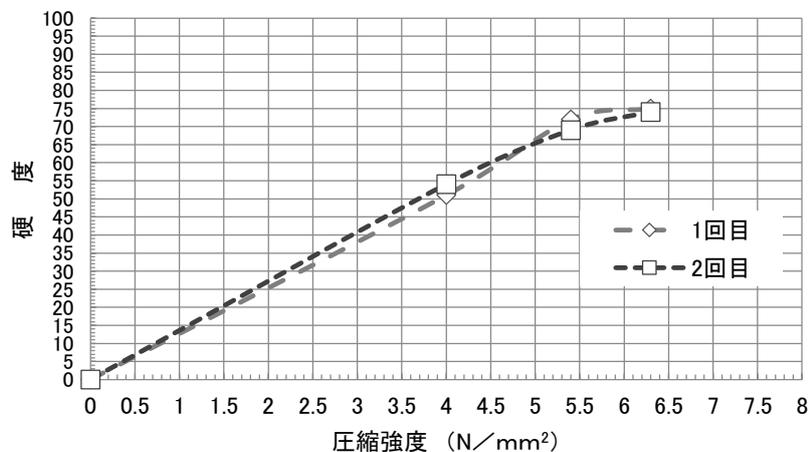


図 - 5.3 圧縮強度と硬度の関係(キャリブレーション)

次に、高流動型 1 時間開放タイプを 80℃の高機能舗装へ充填し、表面の硬度を経過時間とともに C 型スプリング式硬度計により硬度を測定した。試験結果を図 - 5.4 に示す。経過時間 30 分で硬度測定値が 60 となり、50 分で 65 を超えた。

この結果から、1 時間で交通解放が可能であり、80℃の高温充填において性能低下が無いことを実証している。

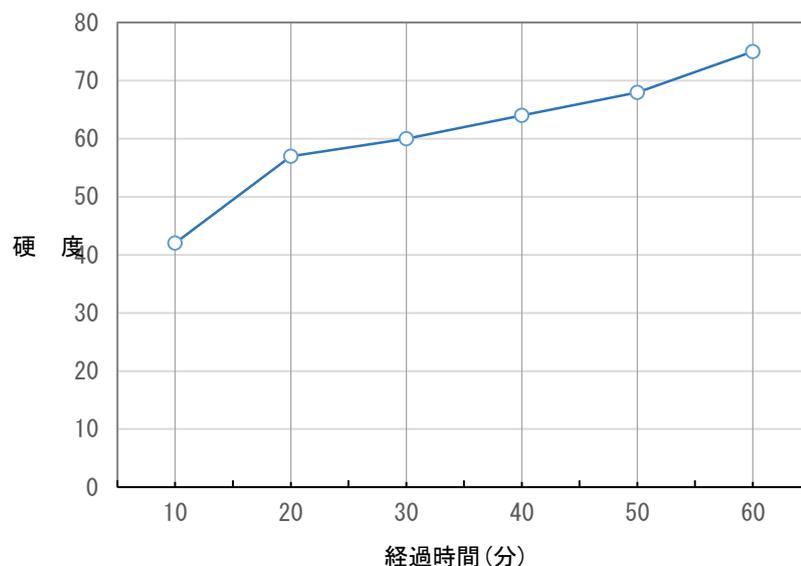


図 - 5.4 経過時間と硬度の測定値

5.4.5 混合物曲げ試験による高温性能

高流動型 1 時間開放タイプを 80℃の高機能舗装へ充填し、養生後の混合物の曲げ試験結果を表 - 5.5 に示す。曲げ強度が 3.7N/mm² であり、曲げひずみは 9.6×10⁻³ であった。どちらも NEXCO の規格値を達成していた。

この結果から、充填材としても十分な性能を有し、80℃の高温充填において性能低下がなく、十分な充填がされていたことを実証している。

表 - 5.5 混合物の曲げ試験結果

項目	曲げ強度	ひずみ
試験値	3.7N/mm ²	9.6×10 ⁻³
規格値 NEXCO	2.5N/mm ² 以上	3.0×10 ⁻³ 以上

5.4.6 高温の高機能舗装への充填率

一般型超速硬タイプ（3時間開放タイプ）と高流動型1時間開放タイプを80℃の高機能舗装へ充填したときの充填率を表-5.6に示す。また、切断断面を表-5.7に示す。充填率は、一般型に比べ高流動型は振動無しで88.4%，振動有りで92.4%と高い充填率であった。切断断面は、一般型には未充填部分が確認できた。高流動型は下部まで充填されていることが確認できた。

この結果から、高流動型1時間開放タイプは高温の高機能舗装に充填可能な配合設計となっていることを実証した。また、P漏斗の流下時間は、9~10秒が最適であることがわかる。

表 - 5.6 80℃の充填率

項目	一般型超速硬タイプ	高流動型1時間開放タイプ
振動なし	76.3%	88.4%
振動10秒	84.8%	92.4%

表 - 5.7 80℃の切断断面

項目	一般型超速硬タイプ(3時間開放タイプ)	高流動型1時間開放タイプ
振動無し		
振動10秒		

5.4.7 X線回折による高温性能

高流動型 1 時間開放タイプを 20℃、80℃で採取し、30 分後に 20℃の恒温室内で密封養生した材齢 7 日の硬化体を X 線回折にて分析した。結果を図 - 5.5 に示す。80℃で採取した試験体は、20℃で採取した試験体と同一ピークを示しており、エトリンガイドと CSH が確認できる。よって、どちらも生成物に違いがみられないことがわかる。この結果から、高流動型 1 時間開放タイプは、高温において、正常な水和反応をしていることがわかり高温充填が可能な配合設計となっていることを実証した。

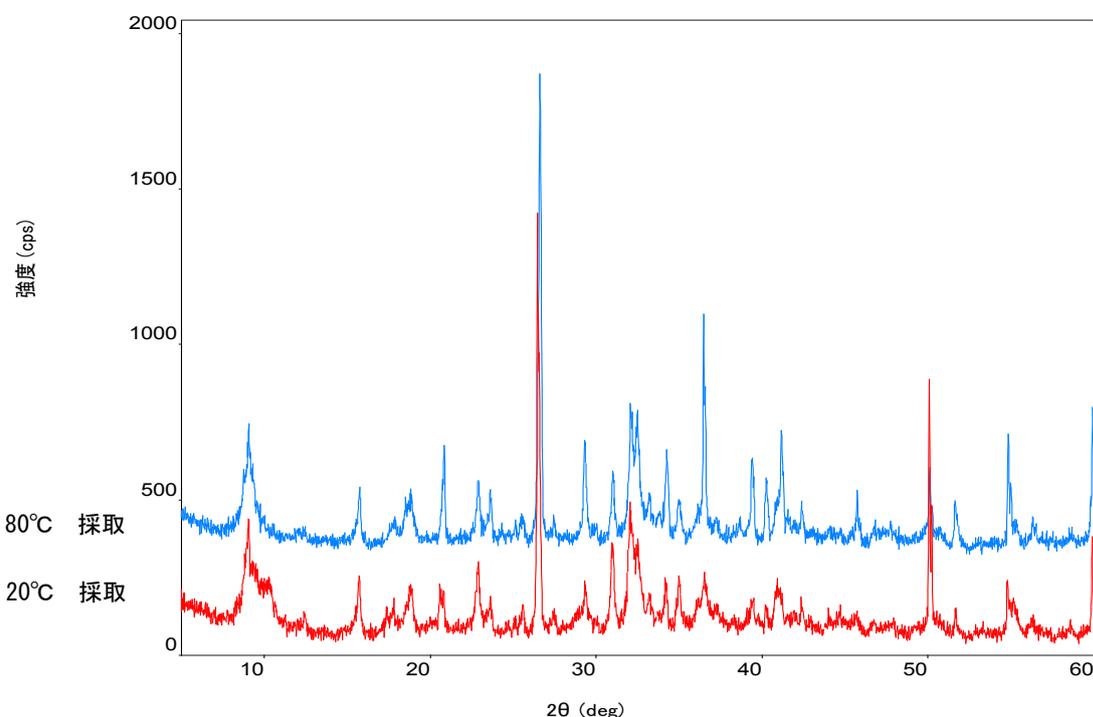


図 - 5.5 80℃で採取した硬化体の X 線回折による分析結果

5.4.8 SEM 観察による高温性能

X 線回折と同様に、高流動型 1 時間開放タイプを 20℃、80℃で採取し、30 分後に 20℃の恒温室内で密封養生した材齢 7 日の硬化体を SEM にて観察した。2000 倍と 5000 倍の観察結果を図 - 5.6 に示す。80℃で採取した試験体は、20℃で採取した試験体と同じように未水和セメント粒子の周りを反応物が覆い、空間にエトリンガイドが生成しているのが確認できる。よって、どちらも生成物に違いがみられないことがわかる。この結果から、前述と同様に、高流動型 1 時間開放タイプは、高温において、正常な水和反応をしていることがわかり高温充填が可能な配合設計となっていることを実証した。

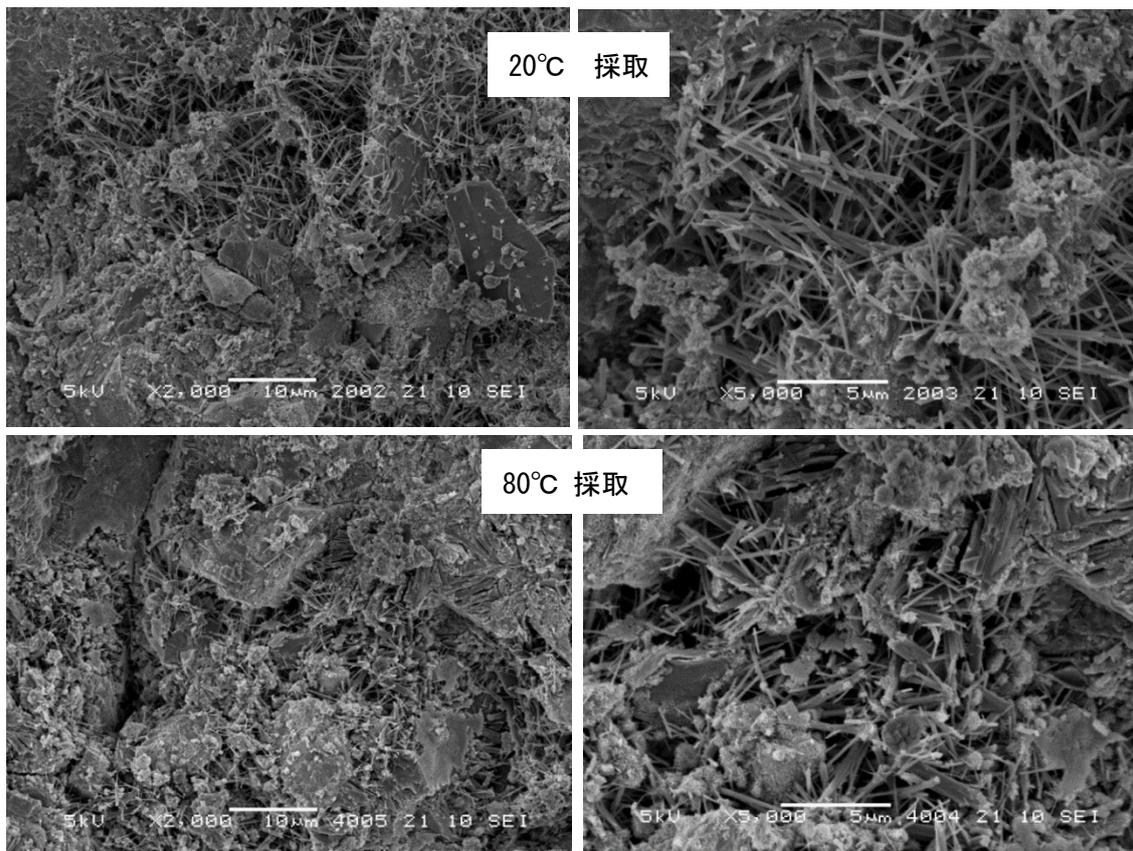


図 - 5.6 20°C, 80°Cで採取した硬化体のSEM観察の写真

5.5 まとめ

各項目の実験結果を下記に整理する。

- 1)フロー値 9~9.5 秒であり，開放時間 1 時間が可能であった。
- 2)物性値は規格値を達成していた。
- 3)高機能舗装への充填が確実であった。その時の充填率は 90%以上であった。
- 4)高温（80°C）への充填が確実であった。その時の充填率は 90%以上であった。
- 5)高温（80°C）採取した試験体の材齢 7 日において，強度低下は見られなかった。
- 6)高温（80°C）採取した試験体の X 線解析において，生成物に差が見られなかった。
- 7)高温（80°C）採取した試験体の SEM 観察において，生成物に差が見られなかった。

開発した高流動型 1 時間開放タイプを伸縮装置前後 1m の高機能舗装に適用可能かを評価・検証した結果，各項目の結果，考察も含めて以下の結論となった。

高流動型 1 時間開放タイプは，空隙率 17%の高機能舗装への充填が可能であり，温度 80°C の領域において，十分に充填が可能であり，1 時間で交通解放可能であることが明らかとな

り、橋梁部伸縮装置前後 1m 区間における高機能舗装への適用可能性であることが実証された。これは、一般型と比較して高い充填性を有しているため、舗装としての性能低下を防止し、舗装温度が 40℃まで下がるのを待たずに、80℃において充填作業が開始でき、なおかつ 1 時間で交通開放が可能なため、作業効率向上と工期短縮となる事を示している。

第5章の参考文献

- 1) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社：2-4-1 アスファルト混合物，2-4 混合物の諸基準，2 半たわみ性舗装・設計施工マニュアル，設計要領 第一集 舗装，pp 参 2 - 1(2017.7)
- 2) (公社)日本道路協会：2)半たわみ性舗装用アスファルト混合物の配合，9-4-1 半たわみ性舗装，9-4 材料別の舗装，第9章各種舗装，舗装施工便覧，pp203-204(2006.2)
- 3) 秩父コンクリート工業株式会社：カラースタッフ 普通タイプ・早強タイプ・超速硬タイプ，カタログ
- 4) 住友大阪セメント株式会社：ニューファンコート 普通タイプ・早強タイプ・超速硬タイプ，カタログ
- 5) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社：3-5-3 高機能舗装用混合物の配合設計，設計要領 第一集 舗装，pp3-26(2017.7)
- 6) (公社)日本道路協会：7-1 概説，第7章ポーラスアスファルト混合物の施工，舗装施工便覧，pp117-118(2006.2)
- 7) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社：2-5-5 セメントミルクの施工上の注意，設計要領 第一集 舗装，pp 参 2 - 10(2017.7)
- 8) 清水進ほか：橋梁部の高機能舗装(伸縮装置 1m 区間)に適用するセメントミルクについて，土木学会第64回年次学術講演会，V-138，pp273-274(2009.9)
- 9) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社：3-6 路面排水対策，設計要領 第一集 舗装，pp3 - 51-3 - 52
- 10) 鈴木徹ほか：半たわみ性舗装における交通開放時期の一管理手法，舗装技術の質疑応答建設図書，第7巻(上)，pp.193-198(1997)
- 11) (一財)日本規格協会：JIS K 6301-1995 加硫ゴム物理試験方法，スプリング式硬さ試験機 C 形
- 12) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社：2-5-6 交通開放，2 半たわみ性舗装・設計施工マニュアル，設計要領 第一集 舗装，pp 参 2-10(2017.7)
- 11) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社：試験便覧 C043-2007-NEXCO 試験条件，半たわみ性舗装混合物の曲げ試験方法，第2編アスファルト舗装関係試験方法，NEXCO 試験方法，pp29-30

第6章 半たわみ性舗装用充填材の充填性評価

6.1 充填性評価の概要

現在、半たわみ性舗装に使用される充填材の規格は、前述のように NEXCO¹⁾、国土交通省²⁾、東京都³⁾、首都高速道路⁴⁾、広島高速道路⁵⁾等の各機関で流動性の性能を規定している。表 - 6.1 に規格値を示す。

この表 - 6.1 に示す流動性は「プレパックドコンクリートにおける注入モルタルのコンシステンシー試験方法(P 漏斗)」⁶⁾にて試験を行い、各種規格値内に収まる充填材が施工に用いられる。

表 - 6.1 半たわみ性舗装用充填材の規格値

機関名	NEXCO 設計要領第一集舗装編	国土交通省 舗装施工便覧	東京都 東京都土木材料仕様書
流動性	9～13 秒	10～14 秒	10～14 秒
機関名	首都高速道路 舗装設計施工要領	広島高速道路 舗装設計基準	
流動性	9～14 秒	10～14 秒	

NEXCO では、充填材に要求する性能として、全層に十分浸透できる流動性としているが、強度を大きくして耐久性を良くし、乾燥収縮によるひびわれを防ぐことを重要とし、水/セメント比を小さくすることを基本に配合設計を行うとしている。また、充填材を構成する材料では、セメントと特殊添加物、水を使用するとしており、流動性は水/セメント比の変化により調整するとなっている。特殊添加物は乾燥収縮の低減を目的としたもので、ゴム系エマルジョン、樹脂系エマルジョン、アスファルト乳剤等である。現在において最も流動性の調整が可能とされる減水剤は、その他の材料として記されているが、目的は水/セメント比の低減による強度増進である。P 漏斗の流下時間は推奨値として 9～11 秒を設定しており、ゴム系(SBR)エマルジョンを使用して、ポーラスアスファルト母体の空隙率を変えて充填性を確認した結果、11 秒以下で無振動により全層に充填されたためである。これは、規格値内である 12～13 秒では無振動で全層に充填されないとも言える。特に国土交通省の規格として使用している舗装施工便覧や東京都の規格として使用している土木材料仕様書では、P 漏斗の流下時間の規格値が 10～14 秒であるため、規格値内であっても実施工において振動が重要な充填手段となる。実際のポーラスアスファルト母体を使用した充填性の評価は、半たわみ性混合物の単純曲げ試験用試験体作成時に確認を行うものとしているが、明確な試験方法の記載はなく、通常は振動器を用いて十分な振動を与えて試験体を作成するため、充填性の評価として不十分と考えられる⁷⁾。

また、実施工において P 漏斗の流下時間が下限値に近い 10 秒でもポーラスアスファルト母体に確実に充填されない場合や、上限値を超えた充填材が実際にポーラスアスファルト母体に充填される場合も見られる。特に高強度領域の充填材においては上限値を大幅に超

えた P 漏斗の流下時間にも関わらず、十分な充填性を示す場合がある^{8),9),10),11)}。これは、P 漏斗の流下時間の規格と、流動性の調整を水/セメント比の調整に依存した充填材の管理、プレミックス化が主流となった現在における様々な高性能 AE 減水剤の種類や添加量、その他混和材料の使用からくるものと考えられる。

そのため、P 漏斗の流下時間による流動性評価と実際のポーラスアスファルト母体への充填性を整理する必要がある。よって、P 漏斗の流下時間と実際のポーラスアスファルト母体への充填性の妥当性を評価するとともに、P 漏斗ではない他の流動性試験にて充填性が評価できるのか検討を行うこととした。

6.2 流動性試験と充填性の関係確認実験

6.2.1 実験概要

超高強度タイプの充填材において、水/粉体比を変えることにより流動性を変化させ、規格となる P 漏斗の流下時間およびその他の流動性試験を実施すると共に、ポーラスアスファルト母体への充填性を評価し、その関係について検討を行った。

6.2.2 充填材の種類と配合

表 - 6.2 に実験に使用した充填材の粉体構成を示す。この充填材はポリカルボン酸系減水剤を 0.2% 添加した超高強度タイプのもので、標準水/粉体比 20% において、圧縮強度 60N/mm² (材齢 28 日) 以上を示す性能を有する。この粉体に対して水/粉体比を 18.0%~24.0% の範囲で 1% 刻みとして実験を行った。充填材の練り混ぜは 1300rpm の高速ハンドミキサーで 2 分間行った。

表 - 6.2 粉体 No. 1 の粉体構成

粉体 No.	普通ポルトランドセメント	超微粒子無機混和材	珪砂	有機混和剤	減水剤
No.1-1	49.8	10.0	39.8	0.3	0.2

wt%

6.2.3 評価方法

流動性試験は塑性粘度が支配的要因となる流動性評価の P 漏斗試験と、漏斗とは異なる試験方法として降伏値が支配的要因となる流動性評価のテーブルフロー試験を行った¹²⁾。それぞれの試験方法を以下に示す。また、これらに加えてさらに、B 型粘度計にて粘度を測定した。

- ・ P 漏斗：プレパックドコンクリートの注入モルタルの流動性試験方法(P 漏斗による方法) JSCE-F 521 に従い、P 漏斗を用い、規格量となる 1725mL の流下時間をストップウォッチにて測定する。P 漏斗の形状および寸法を図 - 6.1 に示す。

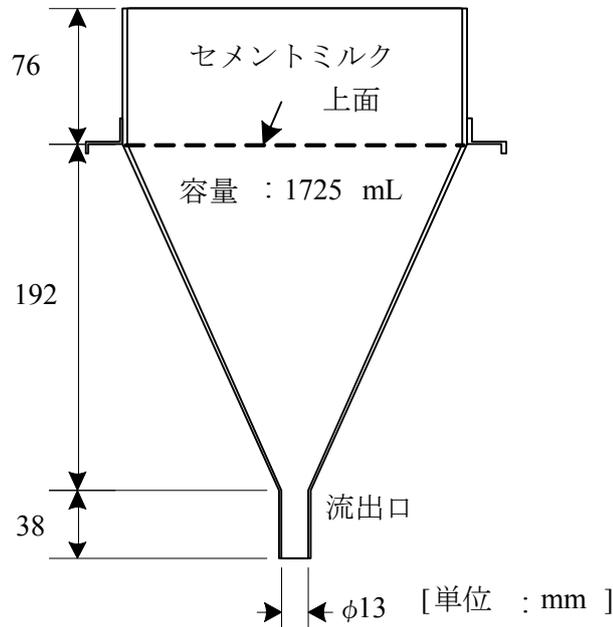


図 - 6.1 P漏斗の形状・寸法

- ・テーブルフロー：JASS15 M-103 セルフレベリング材の品質基準に従い、内径 50mm×高さ 100mm の円柱コーン(内容積約 200mL)に充填材を充填し、円柱を引き上げ横の広がり測定する¹³⁾。
- ・B型粘度計：JIS Z 8803 液体の粘度測定方法に従い、回転粘度計(B型粘度計)にて塑性粘度を測定する¹⁴⁾。

また、ポーラスアスファルト母体への充填は写真 - 6.1 に示す縦 300mm×横 300mm×高さ 50mm、空隙率約 24%のポーラスアスファルト母体を 1/4 にカット(約 150mm×150mm×50mm)したものを使用した。空隙率 24%のポーラスアスファルト母体は、NEXCO で規定している半たわみ性舗装用のアスファルト混合物の粒度範囲から材料構成を決定しており、ストレートアスファルト、6号砕石、細目砂、石粉で構成されている。材料構成を表 - 6.3 に、6号砕石、細目砂、石粉の粒度と合成粒度を表 - 6.4 に示す。このポーラスアスファルト母体の下面と側面を漏出しないようにシールしてから、充填材を上面より浸透させ、質量変化により充填率を求めた。一般的な施工は充填材の散布後に振動ローラーによる振動付与が施工条件となっているが、全てに均一な振動付与は難しいと考えられる。ゆえに、充填率は静置下と振動下で測定した。まず、アスファルト母体の上面から徐々に充填材を散布していき、母体内部への浸透が終わった時点で余剰な充填材を排除して静置下の充填率を求めた。その後、振動数 2850rpm/50 Hz の小型振動モーター (3 相 200V) を振動源と

するテーブルバイブレーター上で振動を 10 秒間与えながら徐々に充填材を散布していき、更なる浸透が終わった時点で振動下の充填率を求めた。半たわみ性舗装の性能を有するために必要な充填率は一般的に 80%以上とされているため¹⁵⁾、静置下で 70%以上、振動下で 80%以上を目標充填率とした。



写真 - 6.1 ポーラスアスファルト母体

表 - 6.3 ポーラスアスファルト母体の材料構成

ストレートアスファルト 60/80	6号砕石	細目砂	石粉
3.5	86	9	5
	100		

(wt%)

表 - 6.4 ポーラスアスファルト母体の骨材粒度・合成粒度

材料名	6号砕石	細目砂	石粉	合成粒度	粒度範囲 (NEXCO)
構成割合	86.0	9.0	5.0		
通貨質量 百分率	19	100.0	100.0	100.0	100.0
	13.2	98.9	100.0	100.0	99.1
	4.75	4.2	100.0	100.0	17.8
	2.36	0.8	81.1	100.0	13.0
	0.6	-	21.3	100.0	6.9
	0.3	-	8.0	99.8	5.7
	0.15	-	1.5	95.2	4.9
	0.075	-	0.8	80.4	4.1

(wt%)

6.2.4 試験結果

試験結果を表 - 6.5 に示す。また、図 - 6.2 に水/粉体比と P 漏斗の流下時間との関係、図 - 6.3 に水/粉体比と塑性粘度の関係、図 - 6.4 に水/粉体比とテーブルフロー値との関係を示す。

この結果、テーブルフロー値は水/粉体比の増加に従い、ほぼ直線的に増大し高い寄与率となった。一方、P 漏斗の流下時間は水/粉体比 21%以上となると減少が緩やかとなり、寄与率も低下した。塑性粘度の結果も同様の結果となった。

図 - 6.5 に P 漏斗の流下時間と充填率の関係、図 - 6.6 にテーブルフロー値と充填率の関係を示す。この結果、充填率は P 漏斗の流下時間の規格値を大幅に上回った場合でも高い充填性を示しており、P 漏斗の規格値が充填性評価となっていないことが分かった。また、テーブルフロー値は 340mm を超えると静置下でも高い充填性を示すことが分かり、これは、充填性評価を目的とした充填材の流動性管理として、テーブルフロー試験でも可能であることを示唆している。

表 - 6.5 粉体 No. 1-1 の試験結果

Sample No.	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	
粉体 No.	1-1							
水/試料比(%)	18	19	20	21	22	23	24	
流下時間(秒)	60.3	33.1	26.1	19.2	16.8	14.7	13.7	
テーブルフロー値(mm)	298	322	338	347	353	366	364	
粘度(mPa・s)	16700	7675	5038	2250	1798	1075	765	
充填率(%)	静置下	27.8	34.2	69.0	80.8	82.0	83.9	88.0
	振動下	71.8	77.3	82.8	84.7	88.1	90.4	90.9

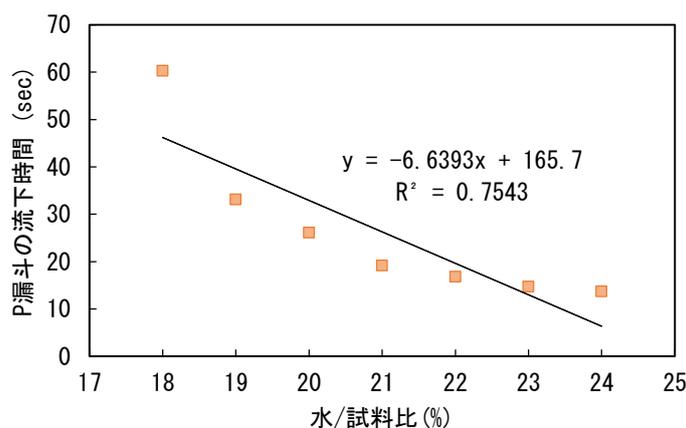


図 - 6.2 水/粉体比と P 漏斗の流下時間との関係

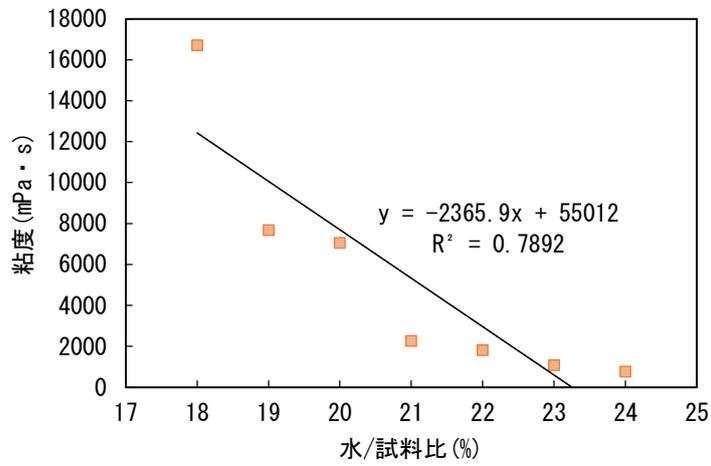


図 - 6.3 水/粉体比と塑性粘度の関係

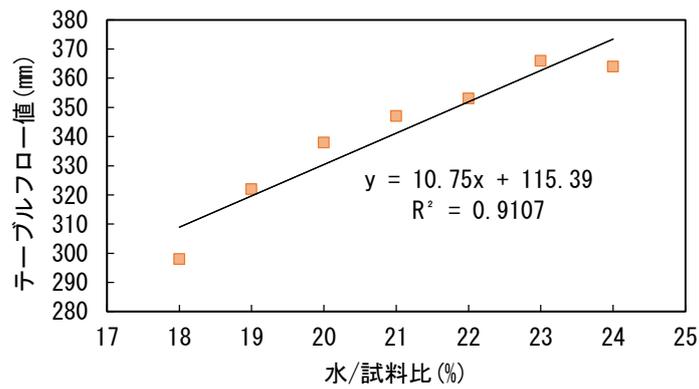


図 - 6.4 水/粉体比とテーブルフロー値との関係

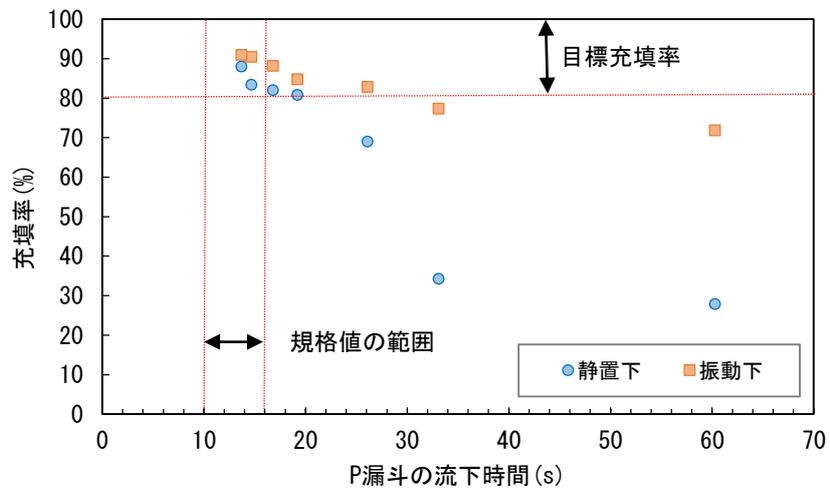


図 - 6.5 P 漏斗の流下時間と充填率の関係

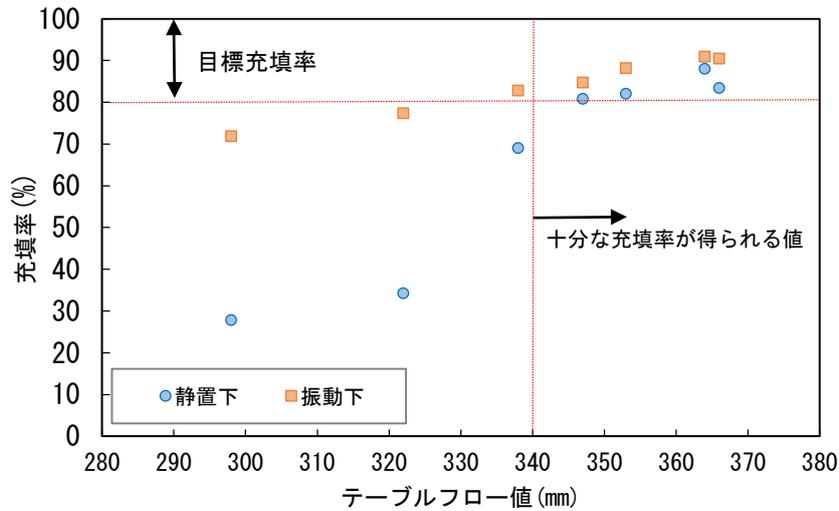


図 - 6.6 テーブルフロー値と充填率の関係

一般に、充填材は粘度と降伏値を有するビンガム体でモデル化される。このビンガム体は管内を流動する際には図 - 6.7 に示すように栓流 (Plugflow) となり、その流れは以下の式で示される。

$$r_0 = \frac{2 \cdot l \cdot \tau_f}{\Delta P} \quad [1]$$

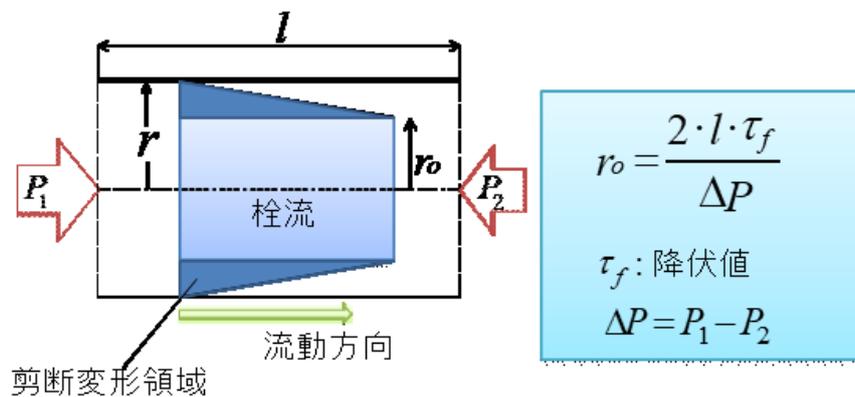


図 - 6.7 管内を流れるビンガム体の栓流モデル

この式中の栓流半径 (r_0) が、管径 (r) を上回った場合には流動しなくなる。本研究においてはポーラスなアスファルト母体の内部空隙構造を、仮想細管として考えた。つまり、アスファルト母体に充填材を流し込んだ際、注入口の高さで与えられる流動圧力と充填材の降伏値で決まる栓流半径が、仮想細管の管径を上回った場合に流動が止まり、それ

以上の充填が行われなくなると仮定した。この仮定によれば充填性に影響を与える要因は降伏値となり、塑性粘度は充填に要する時間を支配する要因となる¹⁶⁾。したがって、充填性を管理するための試験方法はテーブルフロー試験の方がP漏斗試験よりも妥当性が高いと考えられる。

6.3 各種流動性試験

6.3.1 実験概要

超高強度タイプの充填材においては、充填性の評価としてテーブルフロー試験が最も適していることが分かった。ここでは、普通タイプの充填材を用いて、水/粉体比を変えることにより流動性を変化させ、テーブルフロー試験及びP漏斗の流下時間に加え、各種の流動性試験を行いその結果より試験方法の比較評価を行った。

6.3.2 充填材の種類と配合

表 - 6.6 に実験に使用した充填材の粉体構成を示す。この充填材はポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を 0.06% 添加した普通タイプのもので、一般的に広く用いられている。この粉体に対して水/粉体比を 34.0%~50.0% の範囲で 4% 刻みとして実験を行った。充填材の練り混ぜは 1300rpm の高速ハンドミキサーで 2 分間行った。

表 - 6.6 粉体 No. 2 の粉体構成

粉体 No.	普通ポルトランドセメント	炭酸カルシウム	化学混和剤	減水剤
No.1-2	64.7	32.74	2.6	0.06

(wt%)

6.3.3 評価方法

流動性試験は塑性粘度が支配的要素となる流動性評価の P 漏斗, J₁₄ 漏斗, JA 漏斗試験を行った。また漏斗とは異なる試験方法として降伏値が支配的となる流動性評価のテーブルフロー試験を円柱コーンの高さを変えて行った。また, B 型粘度計にて塑性粘度を測定した。J₁₄ 漏斗, JA 漏斗およびテーブルフローの試験方法を以下に示す。

- ・ J₁₄ 漏斗 : 充填モルタルの流動性試験方法 (案) JSCE-F 541 に従い, J₁₄ ロートを用い, 規格量となる約 630mL の流下時間をストップウォッチにて測定する¹⁷⁾。
- ・ JA 漏斗 : PC グラウトの流動性試験方法 (案) JSCE-F 531 に従い, JA ロートを用い, 規格量となる約 1000mL の流下時間をストップウォッチにて測定する¹⁸⁾。
- ・ テーブルフロー : JASS15 M-103 セルフレベリング材の品質基準に従い, 内径 50mm×高さ 100mm の円柱コーン(内容積約 200mL), 内径 50mm×高さ 51mm の円柱コーン(内容積約 100mL)に充填材を充填し, 円柱を引き上げ横の広がり測定する。

6.3.4 試験結果

表 - 6.7 に試験結果を示す。また、図 - 6.8 に水/粉体比と各種漏斗の流下時間との関係、図 - 6.9 に水/粉体比とテーブルフロー値の関係、図 - 6.10 に水/粉体比と塑性粘度の関係を示す。これらの結果、テーブルフロー値はいずれも水/粉体比の増大に伴い、直線的に増大し高い寄与率となった。一方、漏斗の流下時間はいずれの方法においても 42%以上の領域では流下時間の減少が微減となる傾向が認められ寄与率も低くなっている。これらより、いずれの試験結果も前試験と同じ傾向となり、漏斗試験は塑性粘度を測定しており、それらよりも充填性を適切に評価するには、テーブルフロー試験の方が適していると考えられる。また、テーブルフロー試験では内径 50mm×高さ 100mm の円柱コーンを使用した方が、差が大きく、よりセンシティブに性能を評価できると考えられる。

表 - 6.7 粉体 No. 1-2 の試験結果

Sample No.		1-8	1-9	1-10	1-11	1-12
粉体 No.		1-2				
水/試料比(%)		34	38	42	46	50
流下時間(秒)	P ロート	36.6	16.7	11.8	9.9	9.3
	J14 ロート	3.7	2.8	2.5	2.3	2.2
	JA ロート	-	37.2	19.1	15.6	13.3
テーブルフロー値 (mm)	φ 50×51mm	141	179	206	220	245
	φ 50×100mm	182	252	300	356	392
粘度(mPa・s)		6635	3420	2462	1740	1338

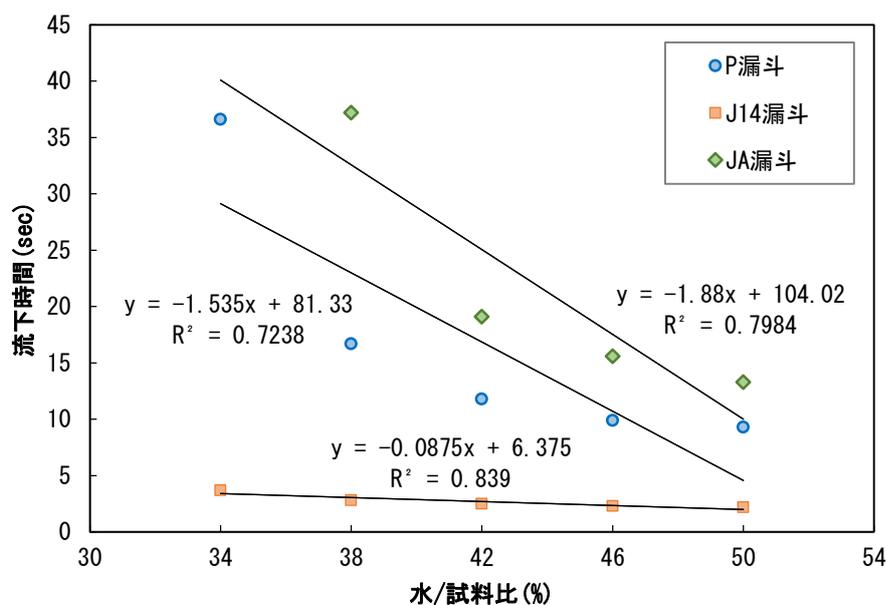


図 - 6.8 水/粉体比と各種漏斗の流下時間との関係

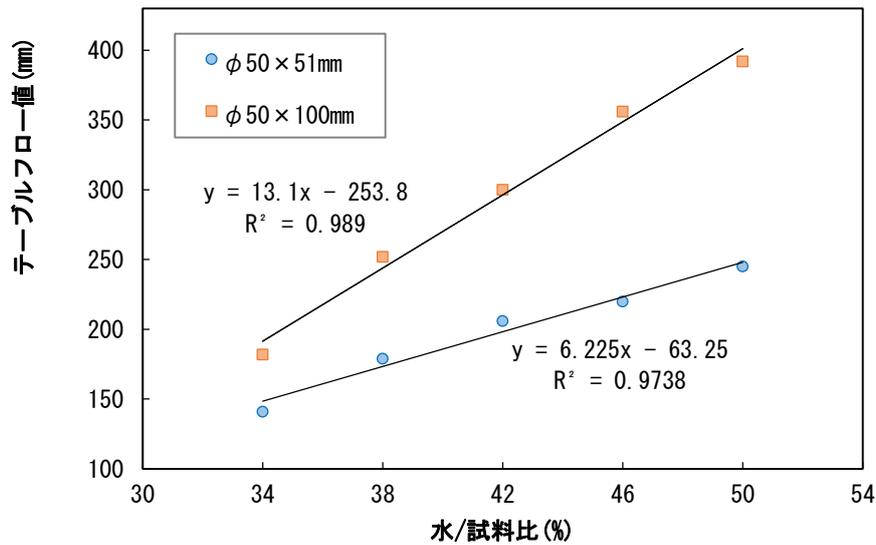


図 - 6.9 水/粉体比とテーブルフロー値の関係

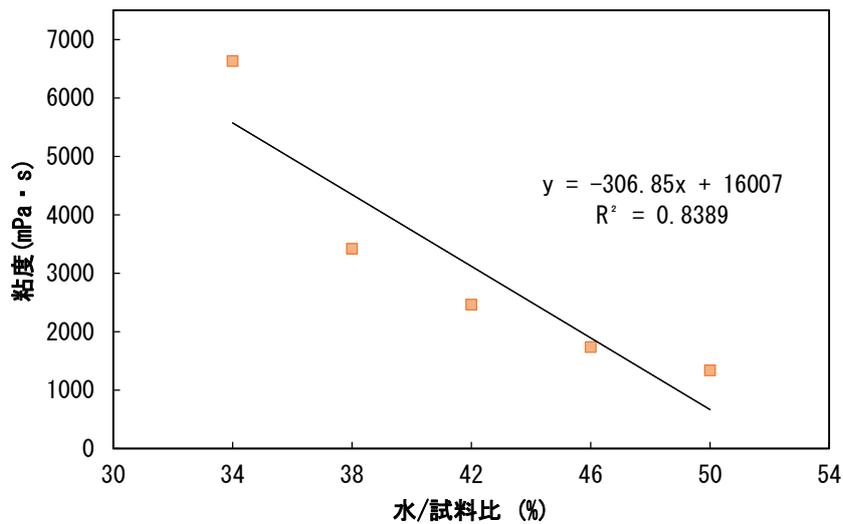


図 - 6.10 水/粉体比と塑性粘度の関係

6.4 各種充填材の流動性試験と充填性の関係

6.4.1 実験概要

高強度タイプの充填性の評価と同様に普通タイプの各種流動性試験においてもテーブルフロー試験が充填性の評価に適していると考えられた。ここでは、各種の充填材を用いて水/粉体比を変えることにより流動性を変化させ、P 漏斗試験とテーブルフロー試験を実施すると共に、アスファルト母材への充填性を評価し、その関係について検討を行った。

6.4.2 充填材の種類と配合

表 - 6.8 に実験に使用した充填材の粉体構成を示す。使用した充填材の粉体は、表 - 6.6 に示す普通タイプ（粉体 No.1-2）と、硬化時間が異なる同様の減水剤を 0.06%添加した早強タイプ（粉体 No.1-3）と 0.06%添加した超速硬タイプ（粉体 No.1-4）、さらに普通タイプの減水剤添加量が 0%（粉体 No.1-5）と 0.1%（粉体 No.1-6）の合計 5 種類とした。これらの粉体に対して水/粉体比を 38.0%~50.0%の範囲で 4%刻みとして実験を行った。充填材の練り混ぜは 1300rpm のハイスピードハンドミキサーで 2 分間行った。

表 - 6.8 粉体 No. 1-3~1-6 の粉体構成

粉体 No.	普通 ポルトランド セメント	早強 ポルトランド セメント	超速硬 セメント	炭酸 カルシ ウム	化学 混和剤	凝結 遅延剤	減水剤
No.1-3	0	64.7	0	32.74	2.6	0	0.06
No.1-4	0	0	64.7	32.74	2.6	0.3	0.06
No.1-5	64.7	0	0	32.74	2.6	0	0
No.1-6	64.7	0	0	32.74	2.6	0	0.1

(wt%)

6.4.3 評価方法

流動性試験は、実際に測定されている P 漏斗による流下時間と、各種流動性試験の結果から流動性評価に適していると考えた内径 50mm×高さ 100mm の円柱コーンを使用したテーブルフロー試験を行った。アスファルト母体への充填は前述と同様の空隙率の母体を使用し、同様の方法で充填率を測定した。

6.4.4 試験結果

表 - 6.9 に試験結果を示す。本試験の結果も同様に同一粉体配合では水/粉体比が高くなるにつれ P 漏斗の流下時間は早くなり、テーブルフロー値は大きくなる事が分かる。充填率では、静置下において Sample No.1-13, 1-21, 1-22, では、P 漏斗の流下時間は規格値内ではあるが、アスファルト母体への充填率が 20%以下と低く、表層からほとんど充填していないことが分かる。振動下では、充填率は改善されるものの、Sample No.1-13, 1-14, 1-21, 1-22 では、P 漏斗の流下時間は同様に規格値内ではあるが、アスファルト母体への充填率は 80%以下となり、これは振動付与が条件の実現場においても充填不足により舗装性能が得られない可能性があると考えられる。

充填率は、水/粉体比による降伏値と塑性粘度の変化に依存することは明らかである。ここで、低い充填率である Sample No.1-22 を基準として考えた場合、高い充填率を得るためには水/粉体比を 8%増加させて 50%とした Sample No.1-24 とするか、もしくは同一の水/粉体比で減水剤を 0.1%添加した Sample No.1-26 とする必要がある。P 漏斗の流下時間は、Sample No.1-24, Sample No.1-26 とともに 2.4 秒早くなっており、流下時間を変化させる効

果は同様であったことが分かる。一方、テーブルフロー値は Sample No.1-24 が 78mm, Sample No.1-26 が 113mm 大きくなっており、減水剤を添加したほうが、テーブルフロー値を変化させる効果大きいことが分かる。ゆえに、水/粉体比は P 漏斗の流下時間である塑性粘度を変化させる手段として有効に働き、減水剤は塑性粘度とともにテーブルフロー値である降伏値の変化にも有効に働くと言える。

表 - 6.9 粉体 No. 1-2~1-6 の試験結果

Sample No.	1-9	1-10	1-11	1-12	1-13	1-14	1-15	1-16	1-17	1-18	
粉体 No.	1-2				1-3			1-4			
水/試料比(%)	38	42	46	50	38	42	46	50	38	42	
流下時間 (秒)	16.7	11.8	9.9	9.3	13.6	11.7	10.4	9.8	12.5	10.3	
テーブルフロー値 (mm)	182	252	300	356	392	270	321	340	285	349	
粘度 (mPa・s)	6635	3420	2462	1740	1338	3200	2200	1278	1103	600	
充填率(%)	静置下	29.0	64.7	73.9	82.2	19.9	22.9	61.0	78.9	51.6	86.8
	振動下	68.4	88.3	98.4	96.6	59.7	65.3	93.0	93.4	77.3	91.2
Sample No.	1-19	1-20	1-21	1-22	1-23	1-24	1-25	1-26	1-27	1-28	
粉体 No.	1-4		1-5				1-6				
水/試料比(%)	46	50	38	42	46	50	38	42	46	50	
流下時間 (秒)	9.5	8.9	14.0	12.2	10.5	9.8	10.7	9.8	9.3	8.9	
テーブルフロー値 (mm)	375	401	237	251	282	329	322	364	394	419	
粘度 (mPa・s)	464	355	3600	3125	2538	1725	1820	1645	1023	419	
充填率(%)	静置下	91.5	93.6	12.6	10.8	35.0	54.1	79.3	84.0	88.1	91.1
	振動下	95.6	97.0	36.1	45.2	81.2	88.2	82.8	87.0	91.6	96.7

また、流動性の評価方法と充填性の相関性を明確にするため、Sample No.1-9~1-28 を同時に比較した。図 - 6.11 に P 漏斗の流下時間とアスファルト母体への充填率の関係、図 - 6.12 にテーブルフロー値とアスファルト母体への充填率を示す。

図 - 6.11 から P 漏斗の流下時間と充填率の関係は、単項式と多項式とも高い寄与率から相関性が認められ、多項式のほうがさらに高い相関性が認められる。図 - 6.12 からテーブルフロー値と充填率の関係は、単項式と多項式ともさらに高い寄与率となり、同様に多項式のほうがさらに高い相関性が認められる。特に静置下では、寄与率が 0.9233 と非常に高い。近似式では、単項式より多項式のほうがどちらも高い相関性が導き出せ、流動性評価では、P 漏斗の流下時間よりもテーブルフロー値のほうが高い相関性が導き出せた。

また、P 漏斗の流下時間による流動性評価では、目標とする静置下での充填率 70%以上

とするには 10 秒以下としても低い充填率があるため評価が難しく、振動下での充填率 80% 以上とするには、11 秒以下とすれば満足することができる。一方、テーブルフロー値による流動性評価では、静置下での充填率 70%以上とするには 340mm 以上とし、振動下での充填率 80%以上とするには、290mm 以上とすれば目標とする充填率を満足することができる。すなわち、テーブルフロー値による流動性評価が充填率を評価するには適しているといえる。

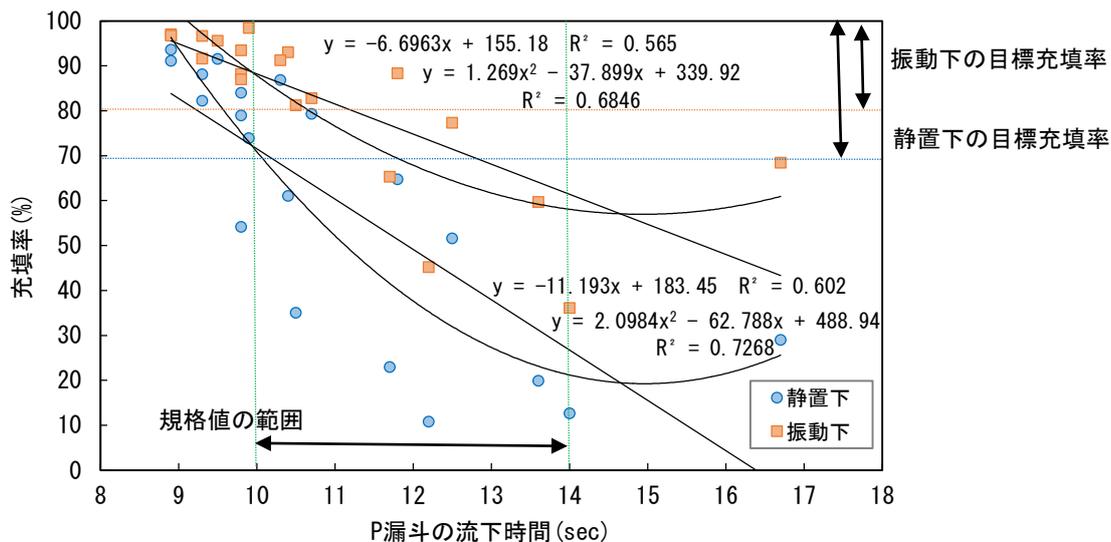


図 - 6.11 P 漏斗の流下時間とアスファルト母体への充填率の関係

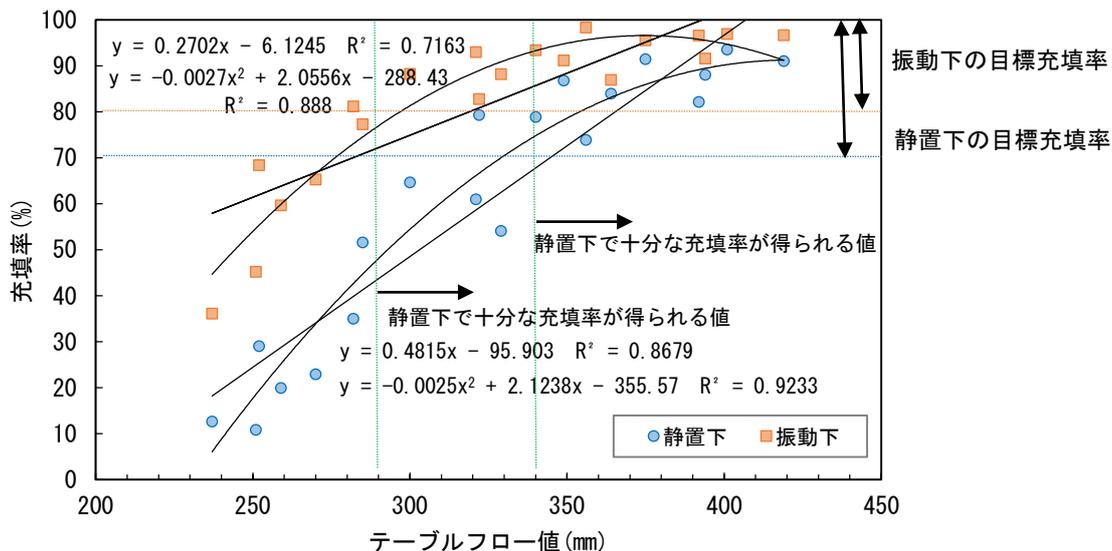


図 - 6.12 テーブルフロー値とアスファルト母体への充填率

さらに、高強度タイプの Sample No.1-1~1-7 を追加して、全ての試験結果を同時に比較した場合の P 漏斗の流下時間とアスファルト母体への充填率の関係を図 - 6.13 に、テーブルフロー値とアスファルト母体への充填率を図 - 6.14 に示す。

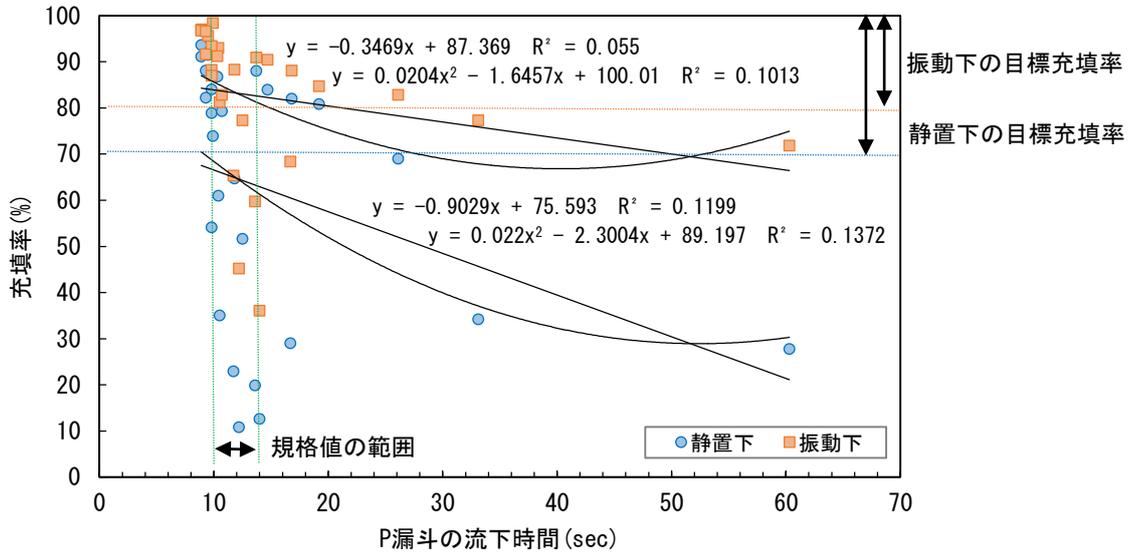


図 - 6.13 P 漏斗の流下時間とアスファルト母体への充填率の関係
(Sample No. 1~28)

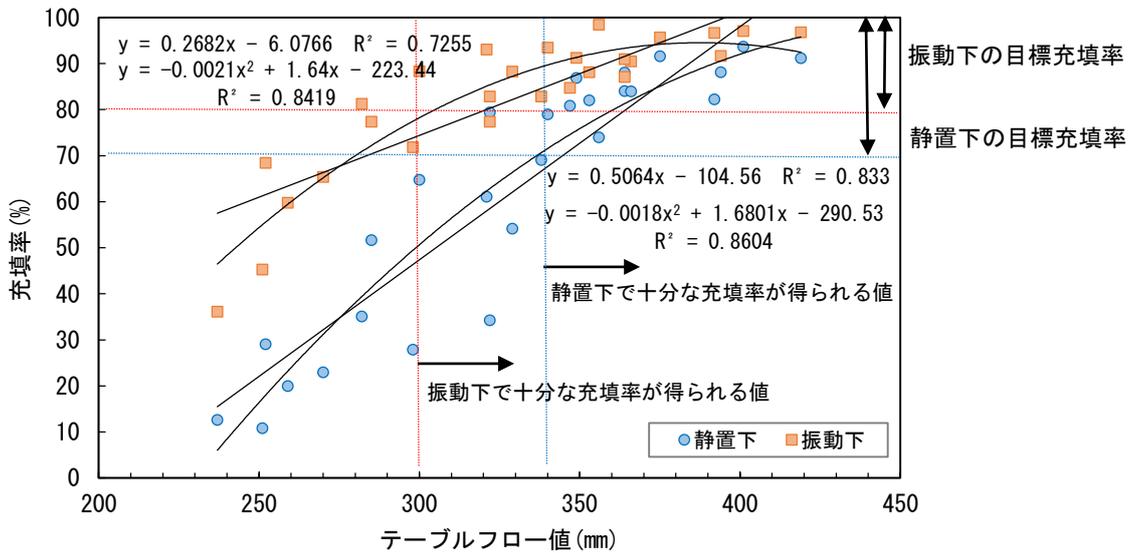


図 - 6.14 テーブルフロー値とアスファルト母体への充填率の関係
(Sample No. 1~28)

図 - 6.13 での P 漏斗の流下時間と充填率の関係は、図 - 6.11 と比べ単項式、多項式ともに極端に低い寄与率となり相関性は認められなくなった。一方、図 - 6.14 でのテーブルフロー値と充填率の関係は、粉体構成や水量の全く異なる配合を取り入れたにも関わらず単項式、多項式ともに高い寄与率を維持しており、図 - 6.12 と同様に相関性が認められた。近似式では、単項式より多項式のほうがどちらも高い相関性が導き出せ、流動性評価では、テーブルフロー値のみ相関性が導き出せた。

また、P 漏斗の流下時間による流動性評価では、測定値が分散しており、相関性が認められないため、充填率を評価する目標値を定めることは難しい。一方、テーブルフロー値による流動性評価では、静置下での充填率 70%以上とするには前結果と同様に 340mm 以上とし、振動下での充填率 80%以上とするには、300mm 以上とすれば目標とする充填率を満足することができる。すなわち、前結果と同様にテーブルフロー値による流動性評価が充填性を評価するには適しているといえる。

今回、充填性の確認で用いた半たわみ性舗装用充填材は、NEXCO をはじめとする各機関で交通開放時間により区別している普通タイプ、早強タイプ、超速硬タイプの規格を満足するため、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、超速硬セメントを使用した充填材と、これらの流動性を変化させるために水/粉体比を変化させた充填材、流動性に最も影響する高性能 AE 減水剤であるポリカルボン酸系減水剤添加の有無と添加量を変化させた充填材、超微粒子無機系混和材のベアリング効果とポリカルボン酸系減水剤添加により減水させ流動性を付与した水/粉体比が全く異なる充填材である。これは、充填に必要な流動性において、流動性の性能や性質に影響を与えるセメントの種類、水/粉体比、減水剤、配合設計の違いが反映されており、異なる全ての要素が含まれている。ゆえに、これらの流動性の性能や性質の異なる充填材を使用したにも関わらず、最終的に高い相関性を示したテーブルフロー値と充填率の相関性を表した図 - 6.14 の多項式は信頼性が高いと考えられ、次式に示す。

静置下の場合

$$Y_1 = -0.0018X^2 + 1.6801X - 290.53 \quad \text{式 [2.1]}$$

X : テーブルフロー値(mm)

Y₁ : 静置下の充填率(%)

振動下の場合

$$Y_2 = -0.0021X^2 + 1.64X - 223.44 \quad \text{式 [2.2]}$$

X : テーブルフロー値(mm)

Y₂ : 振動下の充填率(%)

この多項式により、配合設計や材料検討において、テーブルフロー値の測定からポーラスアスファルト母体への充填率を推測することが可能となる。

今回使用したポーラスアスファルト母体は、NEXCOの配合設計をもとに表-6.3, 6.4に示す配合で行っており、空隙率は24%であり、今回の評価に限定されたものである。実際の現場では、使用する骨材や配合設計が異なる。そのため、空隙率や空隙径が異なり、施工も加味すると統一は難しい。空隙率や空隙径が大きくなれば今回の評価結果を反映させることは可能だが、小さくなった場合は確認が必要となる。しかし、道路会社による半たわみ性舗装用のポーラスアスファルト混合物の空隙率の設計は、NEXCOの規格である21～25%の間である23～24%となるよう行われているため、評価結果は、概ね反映できると考えられる。

以上のことより、今回の試験においてもP漏斗の流下時間による塑性粘度の評価よりも、テーブルフロー試験による降伏値の評価の方が充填性を的確に評価していると考えられる。今回の実験範囲内ではあるが、テーブルフロー値が静置下であれば340mm、振動下であれば300mm以上で十分な充填性を示すものと推察される。また、式[2.1], [2.2]により、テーブルフロー値の評価結果から、静置下もしくは振動下における充填率を推測できると考えられる。

6.5 まとめ

- 1)半たわみ性舗装用充填材の充填性を評価するため各種流動性試験を用いて検討した。その結果、従来用いられているP漏斗をはじめ漏斗による流下時間では充填性を判断するのは難しく、テーブルフロー値の方がよりの確に判断でき、特に内径50mm×高さ100mmの円柱コーンの評価が最も的確に判断できる可能性が高いことが分かった。
- 2)充填性を向上させる手段として、水/粉体比の増加よりも減水剤の添加が、より効果的に働くことが分かり、これは充填性の向上にもつながる。
- 3)今回の実験範囲内ではあるが、静置下であればテーブルフロー値340mm以上、振動下であればテーブルフロー値300mm以上で十分な充填性を示すものと推察される。実際の現場における充填不良を低減させるためにも、テーブルフロー値の明確な範囲を示すことや低空隙率での確認が今後の課題である。

第6章の参考文献

- 1) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社 : 2-4-2 セメントミルク, 2-4 混合物の諸基準, 2 半たわみ性舗装・設計施工マニュアル, 設計要領第一集 舗装, pp 参 2 - 4-参 2 - 5(2017.7)
- 2) (公社)日本道路協会 : 9-4-1 半たわみ性舗装, 9-4 材料別の舗装, 第9章各種舗装, 舗装施工便覧, pp202-203(2006.2)
- 3) 東京都建設局 : 425 半たわみ性アスファルト混合物, 平成 27 年土木材料仕様書, pp420-423(2015)
- 4) 首都高速道路株式会社 : 4.5.2 浸透用セメントミルクと半たわみ性舗装, 4.5 半たわみ性舗装, pp154(2015)
- 5) 広島高速道路公社, : 4.3.4 浸透用セメントミルクの品質規格, 料金所付近の舗装, 舗装設計基準, pp60(2009)
- 6) (公社)土木学会 : JSCE-F 521-2013 プレパックドコンクリートの注入モルタルの流動性試験方法(P 漏斗による方法), 2013 年度制定 コンクリート標準示方書 基準編 土木学会基準および関連基準, pp278(2013)
- 7) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社 : 2 半たわみ性舗装・設計施工マニュアル, 設計要領 第一集 舗装, pp 参 2 - 1-参 2 - 21(2017.7)
- 8) 八谷好高ほか : 舗装補修工事に用いる半たわみ性材料に関する現場・室内試験の比較, V-109, 土木学会第 56 回年次学術講演会, pp218-219(2001.10)
- 9) ITW ENGINEERD POLYMERS APS : DENSIPHALT-MORTAR, DENSIPHALT-SYSTEM, TECHNICAL DATA SHEET
- 10) Suhana KOTING et al. : Effects of Using Silica Fume and Polycarboxylate-Type Superplasticizer on Physical Properties of Cementitious Grout Mixtures for Semiflexible Pavement Surfacing, Hindawi Publishing corporation, The Scientific World journal, (2014)
- 11) ASTM international : C939/C939M-16a, Standard Test Method for Flow of Grout Replaced-Aggregate Concrete (Flow cone Method)(2016)
- 12) 小門武ほか : スランプフロー試験によるフレッシュコンクリートの降伏値評価法の研究, 土木学会論文集, No. 578, V-37, pp19-29(1997)
- 13) (一社)日本建築学会 : JASS 15 M-103, セルフレベリング材の品質基準 付録 付 3, 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 15 左官工事, pp311-313(2007)
- 14) (一財)日本規格協会 : JIS Z 8803, 液体の粘度測定方法(2011)
- 15) 八谷好高ほか : 半たわみ性材料を用いた空港アスファルト舗装の補修・補強, 国土技術政策総合研究所資料, No. 39, pp 6-7(2002)

- 16) 丸岡正知ほか：高流動コンクリートの間げき通過時の圧力損失に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25，No. 1，pp.959-964(2003)
- 17) (公社)土木学会：JSCE-F 541-2013 充填モルタルの流動性試験方法(案)，2013 年度制定 コンクリート標準示方書 基準編 土木学会基準および関連基準，pp296(2013)
- 18) (公社)土木学会：JSCE-F 531-2013 PC グラウトの流動性試験方法(案)，2013 年度制定 コンクリート標準示方書 基準編 土木学会基準および関連基準，pp281-282(2013)

第7章 新しい充填性確認試験方法の検討

7.1 新しい充填性確認試験方法の概要

半たわみ性舗装用充填材の配合設計において充填性は、P漏斗の流下時間で評価するとともに、実際のポーラスアスファルト混合物で実母体を作成し、これに充填材を流し込み、充填率で評価する方法がとられている。しかし、最も確実な評価としているポーラスアスファルト母体への充填率評価では、ポーラスアスファルト母体を構成する骨材の粒度範囲や配合、作成方法が統一しておらず¹⁾、空隙率等に個体差があり、ばらつきも多く、一度充填率評価に利用したポーラスアスファルト母体は、再利用することが不可能である。

また、近年では、半たわみ性舗装用充填材の配合設計は、プレミックス化が主流となっているため、セメント製品のプレミックス会社が行い、各道路会社にOEM供給したり、現場に納入している^{2),3),4)}。しかしプレミックス会社では、アスファルトをバインダーとしているポーラスアスファルト母体を作成する能力がなく、作成は、アスファルトの知識や作成能力を有する各道路会社のアスファルト混合物製造工場や技術研究所に委ねている。そのため、充填性評価の都度、ポーラスアスファルト母体の作成依頼をする必要があり、これは、時間的なロスが大きく、同時に限定された評価となってしまう。

そこでポーラスアスファルト母体を模擬し、実母体に近い空隙率を有し、なおかつ再利用を可能とした新たな試験装置を考案し、実際のポーラスアスファルト母体と対比させながら充填性の評価を行った。また、第6章で検討したように、P漏斗の流下時間をはじめ、その他の流動性評価方法にて流動性評価を行い、充填性評価の妥当性を検討するとともに理論づけを行った。

7.2 試験装置の充填性評価の確認実験

7.2.1 実験概要

試験装置の充填性評価の確認実験では、第6章で用いた充填材の中から汎用的に用いられている普通タイプと、水/粉体比が低く、高い強度設定の高強度型普通タイプを用いて、減水剤の添加や水/粉体比を変化させた場合の、P漏斗の流下時間およびその他の流動性評価試験結果と試験装置の充填性の関係や、試験装置と実際のポーラスアスファルト母体への充填性の関係を調べた。

7.2.2 試験装置 - 1

ポーラスアスファルト混合物の空隙を模した簡易的な試験装置を考えるうえで重要なことは、空隙の均一性と簡単な再現である。よって、同一径の球体を組み合わせて立体構造とし、その空隙がポーラスアスファルト混合物の空隙を模擬できないか検討を行い、金属の結晶構造を利用することとした。金属原子は結晶中で規則正しく配列しており、配列は繰り返し単位となる単位格子が存在する。単位格子の中で六方細密構造は、 - 7.1 に示すように、一層で1個の原子に6個の原子が接し、 - 7.2 に示す層を乗せた構造の繰り返しで正六角

柱となる。図 - 7.3 に六方細密構造を示す。ポーラスアスファルト混合物の空隙率は概ね 24%であり，六方細密構造では原子の充填率が必ず 74%となり，近似の空隙率 26%を常に再現することが可能となる^{5),6),7)}。

しかし，球体を利用して正六角柱の構造を再現することは難しい。六方細密構造は図 - 7.4 に示すように 3 個の球体の上に 1 つの球体に乗る形となっているため，図 - 7.5 に示すように正三角錐にすることで再現性が向上し，簡易性が付与できると考え，正三角錐容器に同一径の球体を充填する装置を考案した。図 - 7.6 に構造を示す。

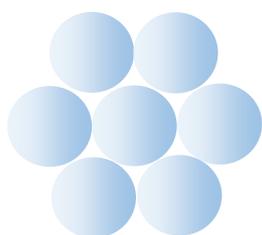


図 - 7.1 六方細密構造の 1 層目



図 - 7.2 六方細密構造の 2 層目

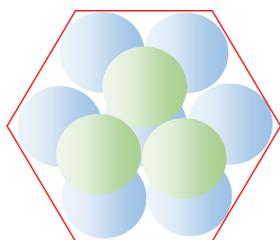


図 - 7.3 六方細密充填構造 1

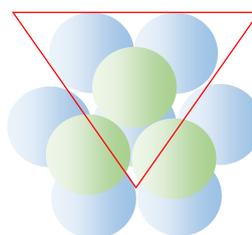


図 - 7.4 六方細密充填構造 2

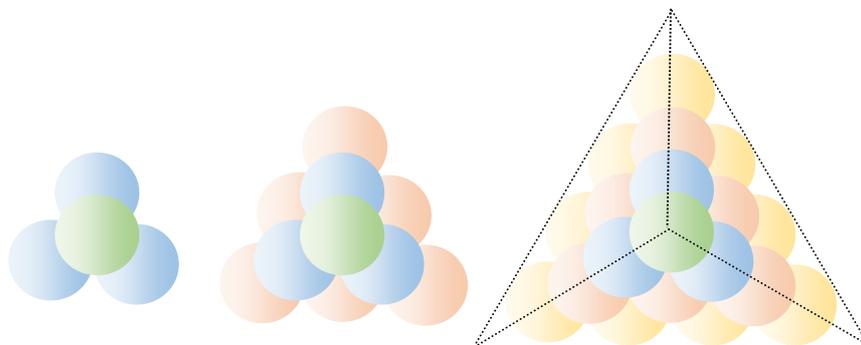


図 - 7.5 六方細密充填の正三角錐構造

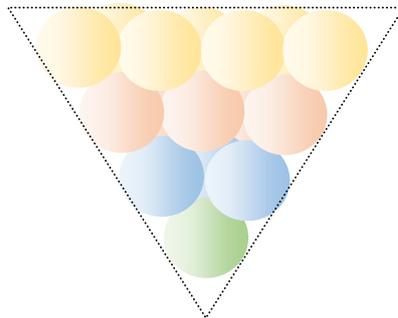


図 - 7.6 正三角錐容器に充填した場合の六方細密充填構造

考案した試験装置を写真 - 7.1 に示す。これは、繰り返しの試験が可能で、常に同一条件となる簡易的な充填性の確認装置となっている。試験装置は上面が取り外し可能な 1 辺約 150mm のアクリル製正三角錐に直径 6mm, 11mm の鋼製球体をそれぞれ六方最密充填としたものである。1 辺を 150mm としたのは、充填高さが約 122mm となり、半たわみ性舗装の最大厚みと考えられる 100mm に対応するためである。

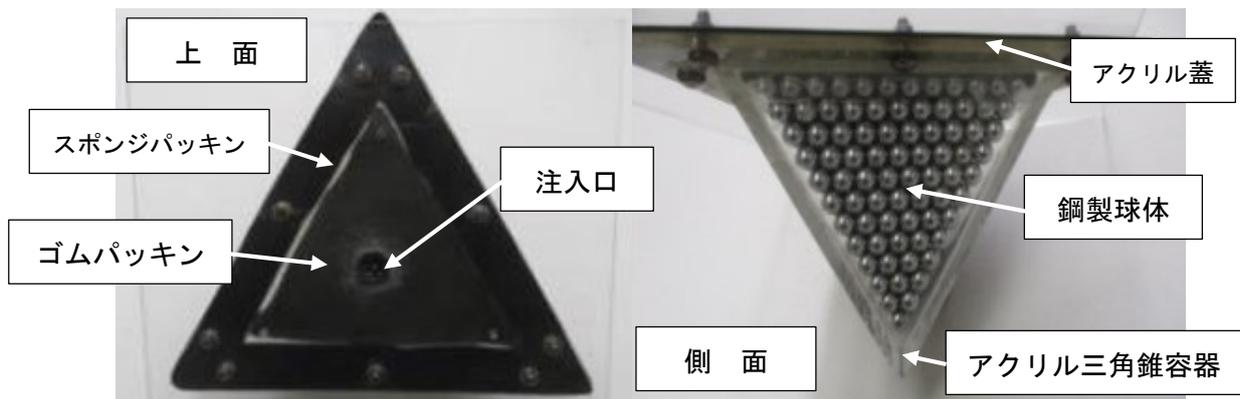


写真 - 7.1 試験装置

実験は上面中央に設けた内径 10mm の注入口から充填材を徐々に注入し、注入量より充填率を求めた。図 - 7.7, 7.8, 7.9, 7.10 に試験装置の寸法を示し、表 - 7.1 に試験装置概要を示す。

この試験装置は正三角錐で構成されているため、球体を詰めた際に、その球体は六方最密充填の配置となる。六方最密充填となった場合、壁面を除いてその空隙率は三角錐体積の 26%となる。これは半たわみ性舗装用の母体であるポーラスアスファルト合材の空隙率(約 24%) とほぼ同程度の値である。しかし、壁面の空隙率は、26%よりも高く母体との差が大きいため、上面スポンジパッキンを設置して水平への充填を抑制するとともに、中央に 10mm の注入口を設けることで、充填率に及ぼす影響を少なくした。

また、試験装置に用いる鋼球の直径を 6mm と 11mm の 2 水準とし、それぞれの試験装置内の層を 23 層と 12 層とした。

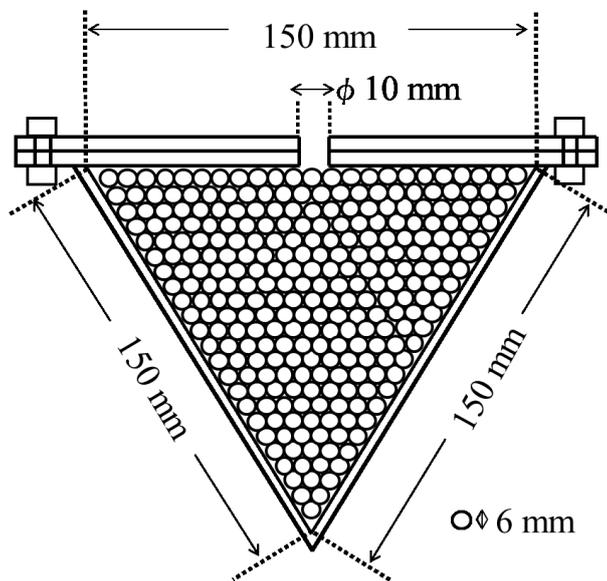


図 - 7.7 鋼球径 6mm試験装置(側面)

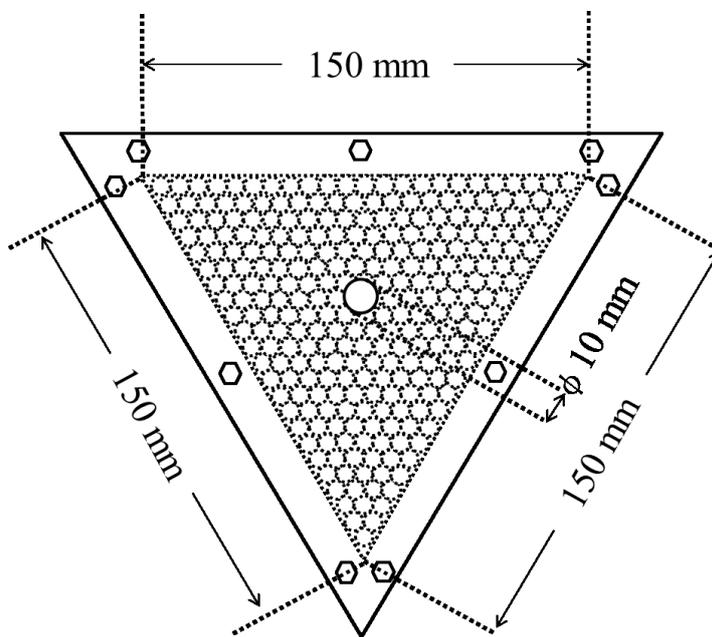


図 - 7.8 鋼球径 6mm試験装置(上面)

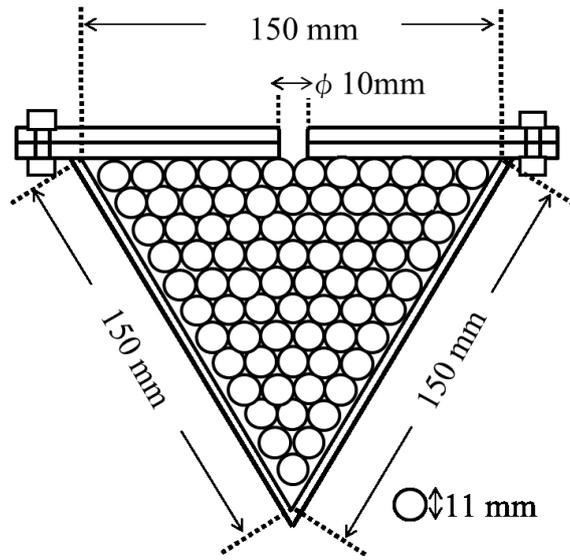


圖 - 7.9 鋼球徑 11mm 試驗裝置 (側面)

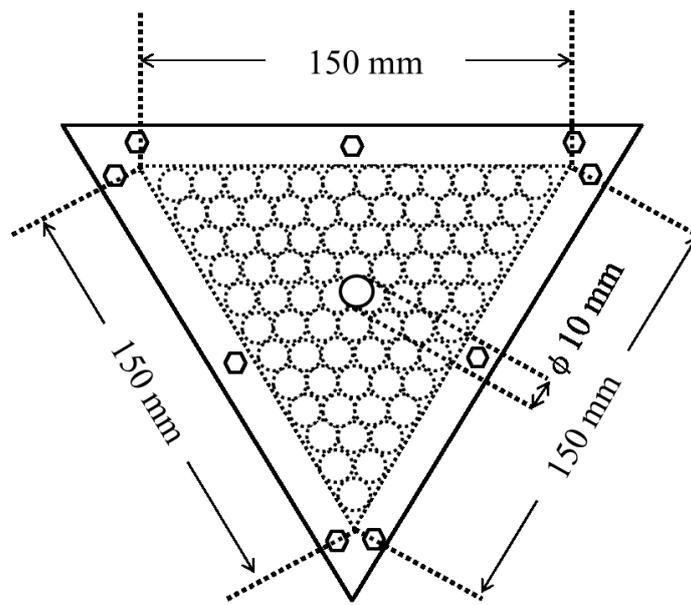


圖 - 7.10 鋼球徑 11mm 試驗裝置 (上面)

表 - 7.1 試験装置の概要

項目	鋼球径 6mm 装置	鋼球径 11mm 装置
鋼球径(mm)	6.0±0.1	11.0±0.1
鋼球層数(層)	23	12
鋼球数(個)	2300	364
鋼球体積(mL)	0.11	0.7
総鋼球体積(mL)	253.00	253.68
装置内容量(mL)	398	
総空隙量(mL)	144.3	145

前述のように、充填材は塑性粘度と降伏値を有するビンガム体でモデル化される。このビンガム体は管内を流動する際には栓流となり、その流れは前述のように以下の式 [1] および図 - 7.11 で示される。

$$r_0 = \frac{2 \cdot l \cdot \tau_f}{\Delta P} \quad \text{式 [1]}$$

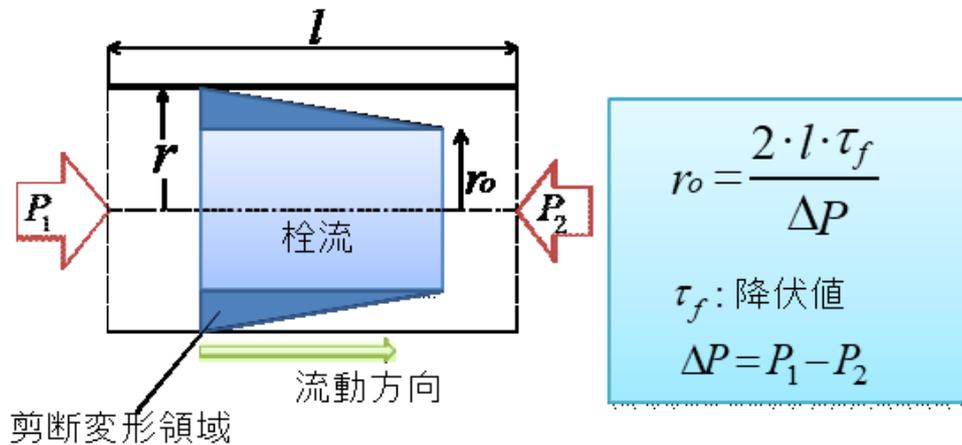


図 - 7.11 管内を流れるビンガム体の栓流モデル

この式中の栓流半径 (r_0) が、管半径 (r) を上回った場合には流動しなくなる。第 6 章と同様にポーラスなアスファルト合材の内部構造を、球の充填構造でモデル化し、その隙間を仮想細管として考えた⁸⁾。つまり、この試験装置に充填材を流し込んだ際、注入口の高さで与えられる流動圧力と充填材の降伏値で決まる栓流半径が、仮想細管の管半径を上回った場合に流動が止まり、それ以上の充填が行われなくなると仮定した。

また、充填材は振動下においては見かけ上降伏値が小さくなり、それに伴い栓流半径も小さくなる。今回、鋼球の大きさを変えたのは、空隙径を変化させることにより栓流半径の違いを反映させることを意図したもので、鋼球径が大きい条件を振動下における充填と想定した。

7.2.3 充填材の種類と配合

充填材の種類は、第6章における実際のポーラスアスファルト母体の充填性評価から、セメントの種類による充填性への影響は少ないと考え、普通ポルトランドセメントを使用した粉体構成の充填材とした。表-7.2に、実験で使用した充填材用粉体の構成を示す。

粉体 No.2-1 は、汎用的に用いられる普通ポルトランドセメントを使用した普通タイプで高性能 AE 減水剤を添加しない粉体構成とした。この粉体 No.2-1 を使用し、水/粉体比を 42, 46, 50, 54% に変化させた 4 種類の充填材を作成した。これは、流動性を支配する一つである塑性粘度を変化させるために用い、水/粉体比により塑性粘度が変化した場合の充填性への影響を確認するためである。

粉体 No.2-2 は、粉体 No.1 に高性能 AE 減水剤であるポリカルボン酸系減水剤を 0.06% 添加した粉体構成とした。この粉体 No.2-2 を使用し、水/粉体比を 46% とした 1 種類の充填材を作成した。これは、流動性を支配するもう一つである降伏値を変化させるために用い、粉体 No.1 と同一の水/粉体比が 46% としたとき塑性粘度の変化よりも降伏値の変化を大きくし、その時の充填性への影響を確認するためである。

粉体 No.2-3 は、普通ポルトランドセメントを用いているが、粉体構成が全く異なる高強度型とした。この粉体 No.2-3 を使用し、水/粉体比を 18~24% の範囲で、1% 刻みで変化させた 4 種類の充填材を作成した。これは、粉体構成の違いによる充填性への影響を確認するためである。

このような考えのもと、普通ポルトランドセメントを用いたほぼ同一の粉体構成の 6 種類の充填材と普通ポルトランドセメントを用いているが全く粉体構成や水/粉体比の異なる 7 種類の充填材の合計 13 種類を用いた。充填材の練り混ぜは 1300rpm のハイスピードハンドミキサーで 2 分間行った。

表 - 7.2 半たわみ性舗装用充填材粉体の成分構成

粉体 No.	普通 ポルトランドセメント	超微粒子 無機混和材	炭酸 カルシウム	珪砂	化学 混和剤	減水剤
No.2-1	64.7	0	32.8	0	2.6	0
No.2-2	64.7	0	32.74	0	2.6	0.06
No.2-3	49.8	10.0	0	39.8	0.3	0.2

(wt%)

7.2.4 評価方法

流動性は第6章と同様に、塑性粘度が支配的要因となる流動性評価のP漏斗の流下時間による評価と、漏斗とは異なる試験方法として降伏値が支配的となる流動性評価のテーブルフロー値による評価を行った⁹⁾。それぞれの試験方法を以下に示す。

- ・P漏斗の流下時間：JSCE-F 521に準拠。P漏斗を用い、規格量となる1725mLの流下時間をストップウォッチにて測定する¹⁰⁾。
- ・テーブルフロー値：JASS 15 M-103に準拠。内径50mm、高さ100mmの円柱コーンに充填材を充填し、円柱を引き上げ横の広がり測定する¹¹⁾。

実母体への充填も第6章と同様の母体であり、縦150mm×横150mm×高さ50mm、空隙率約24%、最大粒径20mmのポーラスアスファルト混合物を用いて、下面と側面を漏出しないようシールし、上面から充填材を流し込み、重量変化により充填率を求めた。

充填率は静置下と振動下で測定した。まず、実母体の上全面から充填材を徐々に散布していき、母体の内部への浸透が終わった時点（静置下）で余剰な充填材を排除して充填率を求めた。その後、振動台の上で50Hzの振動を10秒間与えながら徐々に充填材を散布していき、更なる浸透が終わった時点（振動下）で同様に充填率を求めた。半たわみ性舗装の性能を有するために必要な充填材の充填率を考慮し、静置下では70%以上、振動下では80%以上を目標値とした¹²⁾。

装置への充填は、まず、鋼球を正三角錐容器に六方細密充填にして詰め、スポンジパッキンとゴムパッキンを乗せ、フタをネジで締めてから、装置上面が水平となるように装置を固定する。次に、充填材を上面のφ10mm穴から徐々に浸透させ、装置の内部への浸透が終わった時点で余剰な充填材を排除して充填率を求めた。写真-7.2に浸透状況を示す。



写真 - 7.2 鋼球径 11mm における充填材の浸透状況

7.2.5 試験結果

表 - 7.3 に粉体 No.2-1, 2-2 の試験結果, 表 - 7.4 に粉体 No.2-3 の試験結果を示す。また, 前試験結果である P 漏斗の流下時間やテーブルフロー値と試験装置充填率との相関性を判断するため, 表 - 7.3 に示す普通タイプの粉体構成である粉体 No.2-1, 2-2 における P 漏斗の流下時間と試験装置充填率の関係を図 - 7.12, 表 - 7.4 に示す高強度タイプの粉体構成である粉体 No.2-3 における P 漏斗の流下時間と試験装置充填率の関係を図 - 7.13, 表 - 7.3 と表 - 7.4 を同時に考えた粉体 No.2-1, 2-2, 2-3 における P 漏斗の流下時間と試験装置充填率の関係を図 - 7.14, 表 - 7.3 に示す普通タイプの粉体構成である粉体 No.2-1, 2-2 におけるテーブルフロー値と試験装置充填率の関係を図 - 7.15, 表 - 7.4 に示す高強度タイプの粉体構成である粉体 No.2-3 におけるテーブルフロー値と試験装置充填率の関係を図 - 7.16, 表 - 7.3 と表 - 7.4 を同時に考えた粉体 No.2-1, 2-2, 2-3 におけるテーブルフロー値と試験装置充填率の関係を図 - 7.17 に示す。その結果, 以下の事が分かった。

表 - 7.3 粉体 No. 2-1, 2-2 の流動性評価試験結果と充填率

Sample No.	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	
粉体 No.	2-1				2-2	
水/試料比(%)	42	46	50	54	46	
減水剤使用量(%)	0	0	0	0	0.06	
P 漏斗の流下時間(秒)	12.2	10.5	9.8	8.8	9.9	
テーブルフロー値(mm)	251	282	329	344	356	
実母体の 充填率(%)	静置下	10.8	35.06	54.1	69.9	73.9
	振動下	45.2	81.2	88.2	93.0	98.4
試験装置の 充填率(%)	剛球径 6mm	2.4	4.7	17.7	60.2	64.9
	剛球径 11mm	12.6	64.6	81.0	89.2	96.9

表 - 7.4 粉体 No. 2-3 の流動性評価試験結果と充填率

Sample No.	2-6	2-7	2-8	2-9	2-10	2-11	2-12	
粉体 No.	2-3							
水/試料比(%)	18	19	20	21	22	23	24	
P 漏斗の流下時間(秒)	60.3	33.1	26.1	19.2	16.8	14.7	13.7	
テーブルフロー値(mm)	298	322	338	347	353	366	364	
実母体の 充填率(%)	静置下	27.8	34.2	69.0	80.8	82.0	83.9	88.0
	振動下	71.8	77.3	82.8	84.7	88.1	90.4	90.9
試験装置の 充填率(%)	剛球径 6mm	2.9	12.3	20.9	40.2	47.2	58.8	85.0
	剛球径 11mm	48.0	76.4	95.3	98.1	95.3	98.6	95.3

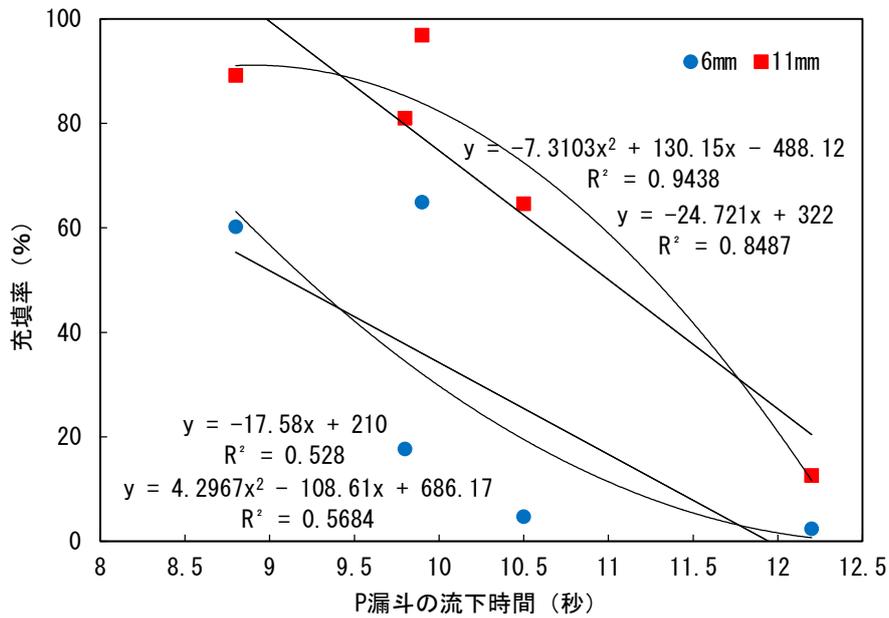


図 - 7.12 粉体 No. 2-1, 2-2 における P 漏斗の流下時間と試験装置充填率の関係

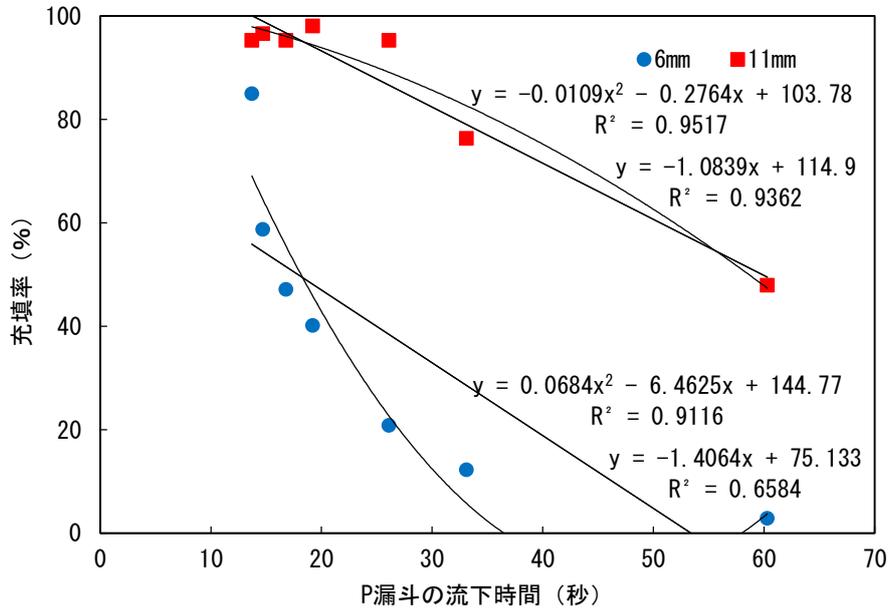


図 - 7.13 粉体 No. 2-3 における P 漏斗の流下時間と試験装置充填率の関係

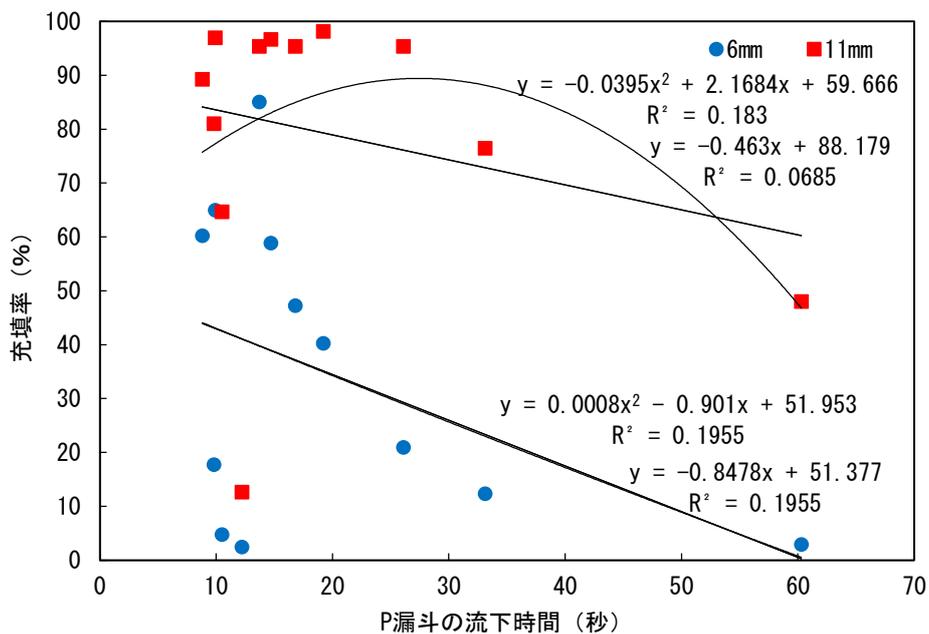


図 - 7.14 粉体 No. 2-1, 2-2, 2-3 における P 漏斗の流下時間と試験装置充填率の関係

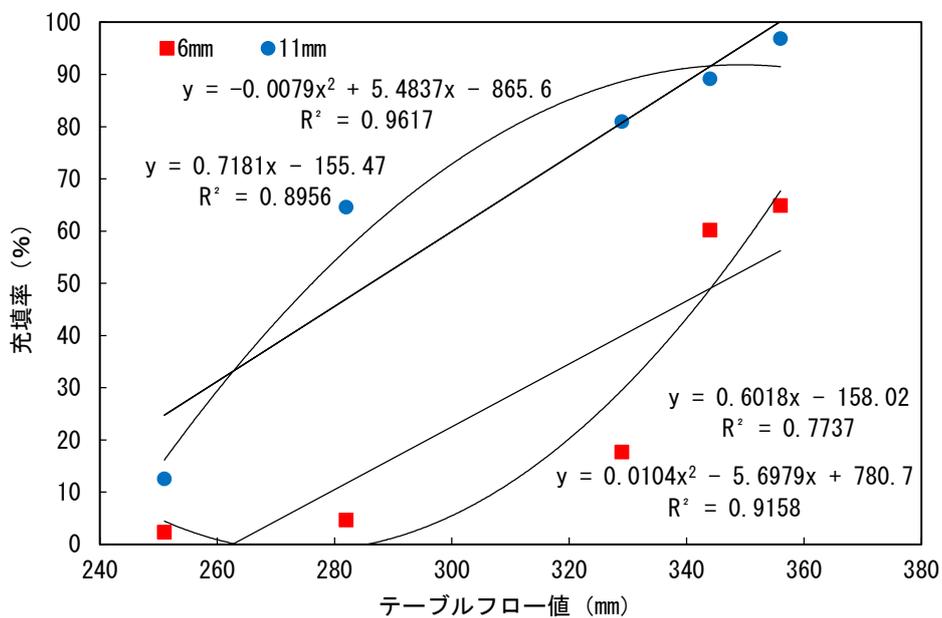


図 - 7.15 粉体 No. 2-1, 2-2 におけるテーブルフロー値と試験装置充填率の関係

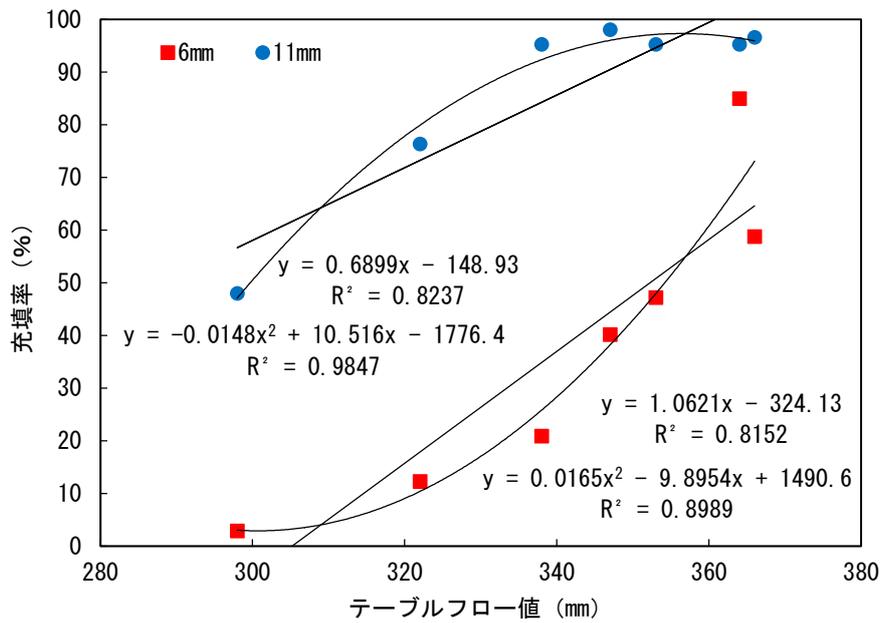


図 - 7.16 粉体 No. 2-3 におけるテーブルフロー値と試験装置充填率の関係

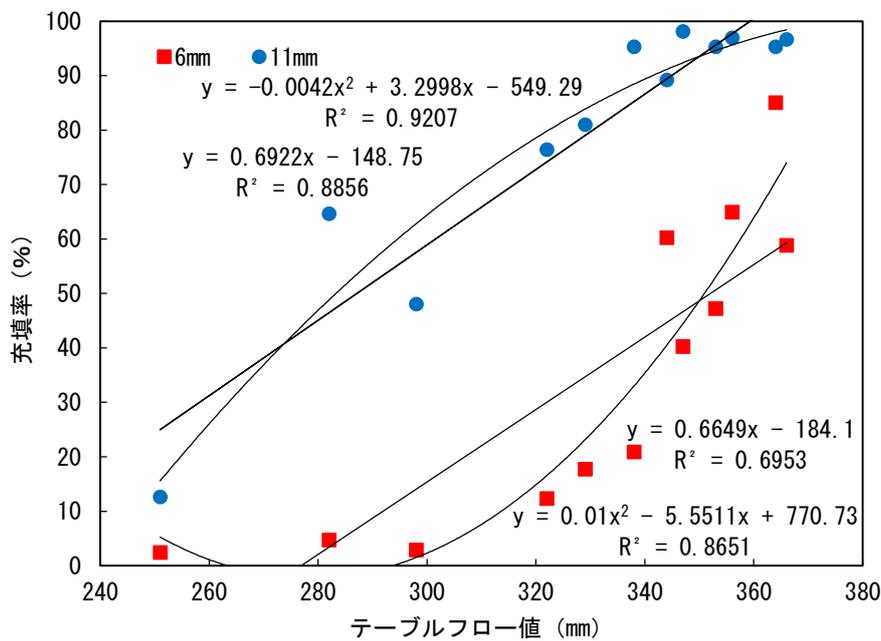


図 - 7.17 粉体 No. 2-1, 2-2, 2-3 におけるテーブルフロー値と試験装置充填率の関係

図 - 7.12 から粉体 No.2-1, 2-2 における P 漏斗の流下時間と試験装置充填率の関係は、鋼球径 11mm では単項式, 多項式ともに高い寄与率から相関性が認められた。しかし, 6mm では低い寄与率となり相関性は低下した。図 - 7.13 から粉体 No.2-3 における P 漏斗の流下時間と試験装置充填率の関係は、鋼球径 6mm, 11mm において単項式, 多項式ともに高い寄与率から相関性が認められた。しかし, 図 - 7.14 から粉体 No.2-1, 2-2, 2-3 における P 漏斗の流下時間と試験装置充填率の関係は、鋼球径 6mm, 11mm のどちらも単項式, 多項式ともに低い寄与率となり相関性が認めらなくなった。これは、粉体 No.2-1 と粉体 No.2-2, もしくは粉体 No.2-3 のように同じ粉体構成であれば、水/粉体比の変化や高性能 AE 減水剤の添加による流動性変化を P 漏斗の流下時間で評価した場合は、装置充填率を反映するが、粉体 No.2-1, 2-2 や粉体 No.2-3 のようにまったく異なる粉体構成を交えて、流動性変化を P 漏斗の流下時間で評価した場合は、装置充填率を反映することは難しいと考えられる。

一方、図 - 7.15 から粉体 No.2-1, 2-2 におけるテーブルフロー値と試験装置充填率の関係は、鋼球径 6mm, 11mm において単項式, 多項式ともに高い寄与率から相関性が認められた。図 - 7.16 から粉体 No.2-3 におけるテーブルフロー値と試験装置充填率の関係は、同様に鋼球径 6mm, 11mm において単項式, 多項式ともに高い寄与率から相関性が認められた。また、図 - 7.17 から粉体 No.2-1, 2-2, 2-3 におけるテーブルフロー値と試験装置充填率の関係は、鋼球径 6mm, 11mm において単項式, 多項式ともに高い寄与率から相関性が認められた。これは、水/粉体比の変化や高性能 AE 減水剤の添加による流動性変化をテーブルフロー値で評価した場合や、粉体 No.2-1, 2-2 や粉体 No.2-3 のようにまったく異なる粉体構成を交えて、流動性変化をテーブルフロー値で評価した場合でも、同様に装置充填率を反映すると考えられる。ゆえに、第 6 章で評価した実際のポーラスアスファルト母体の充填性評価結果と同様に、塑性粘度が支配的となる P 漏斗の流下時間による流動性評価より、降伏値が支配的となるテーブルフロー値による流動性評価のほうが、水/粉体比や高性能 AE 減水剤、粉体構成により流動性の性質を大きく変化させた場合でも、装置の充填率を反映しており、充填性を評価するのに適している。

第 6 章では、空隙率 24%で厚み 50mm の実際のポーラスアスファルト母体において、静置下で目標の 70%以上を満足するためにはテーブルフロー値を 340mm 以上、振動下で目標の 80%以上を満足するためにはテーブルフロー値を 300mm 以上としており、寄与率が高い図 - 7.17 の多項式を用いて、テーブルフロー値から装置の目標とする充填率を求めることができる。鋼球径 6mm, 11mm, 2 種類の多項式を式 [3.1], [3.2] に示す。

鋼球径 6mm の場合

$$Y_3 = 0.01X^2 - 5.5511X + 770.73 \quad \text{式 [3.1]}$$

X : テーブルフロー値(mm)

Y₃ : 鋼球径 6mm の充填率(%)

鋼球径 11mm の場合

$$Y_4 = -0.0042X^2 + 3.2998X - 549.29 \quad \text{式 [3.2]}$$

X : テーブルフロー値(mm)

Y₄ : 鋼球径 11mm の充填率(%)

この 2 種類の式に第 6 章で提示した静置下における実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率である 70%以上が得られるテーブルフロー値の目標値である 340mm と振動下における実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率である 80%以上が得られるテーブルフロー値の目標値である 300mm を X に代入して導き出される静置下と振動下を想定した装置の目標充填率を表 - 7.5 に示す。

表 - 7.5 テーブルフロー値からの装置の目標充填率

項目	静置下	振動下
鋼球径 6mm	39.355%	5.4%
鋼球径 11mm	87.122%	80.65%

鋼球径 6mm では、振動下で約 5%以上、静置下で約 39%以上となり、鋼球径 11mm では、振動下で約 81%以上、静置下で約 87%以上となった。鋼球径 6mm は、振動下で非常に小さい目標充填率となった。これは、もともと静置下を想定しており、振動下の目標値であるテーブルフロー値が 300mm では、充填性を評価することができないと考えられる。また、鋼球径 11mm は、振動下を想定しているが、どちらでも充填性を評価することは可能と考えられる。ゆえに、装置の充填率が、鋼球径 6mm では、充填率が 39%以上であれば静置下のポーラスアスファルト母体に 70%以上充填され、また、鋼球径 11mm では、充填率が 81%以上であれば振動下のポーラスアスファルト母体に 80%以上充填され、充填率が 87%以上であれば静置下のポーラスアスファルト母体に 70%以上充填されることとなる。

また、試験装置充填率と実際のポーラスアスファルト母体充填率の相関性を判断するため、表 - 7.3 に示す普通タイプの粉体構成である粉体 No.2-1, 2-2 における試験装置充填率と静置下のポーラスアスファルト母体充填率の関係を図 - 7.18, 表 - 7.4 に示す高強度タイプの粉体構成である粉体 No.2-3 における試験装置充填率と静置下のポーラスアスファルト母体充填率の関係を図 - 7.19, 表 - 7.3 と 7.4 を同時に考えた粉体 No.2-1, 2-2, 2-3 における試験装置充填率と静置下のポーラスアスファルト母体充填率の関係を図 - 7.20, 表 - 7.3 に示す普通タイプの粉体構成である粉体 No.2-1, 2-2 における試験装置充填率と振動下のポーラスアスファルト母体充填率の関係を図 - 7.21, 表 - 7.4 に示す高強度タイプの粉体構成である粉体 No.2-3 における試験装置充填率と振動下のポーラスアスファルト母体充填率の関係を図 - 7.22, 表 - 7.3 と 7.4 を同時に考えた粉体 No.2-1, 2-2, 2-3 における試験装置充填率と振動下のポーラスアスファルト母体充填率の関係を図 - 7.23 に示す。その結果、以下の事が分かった。

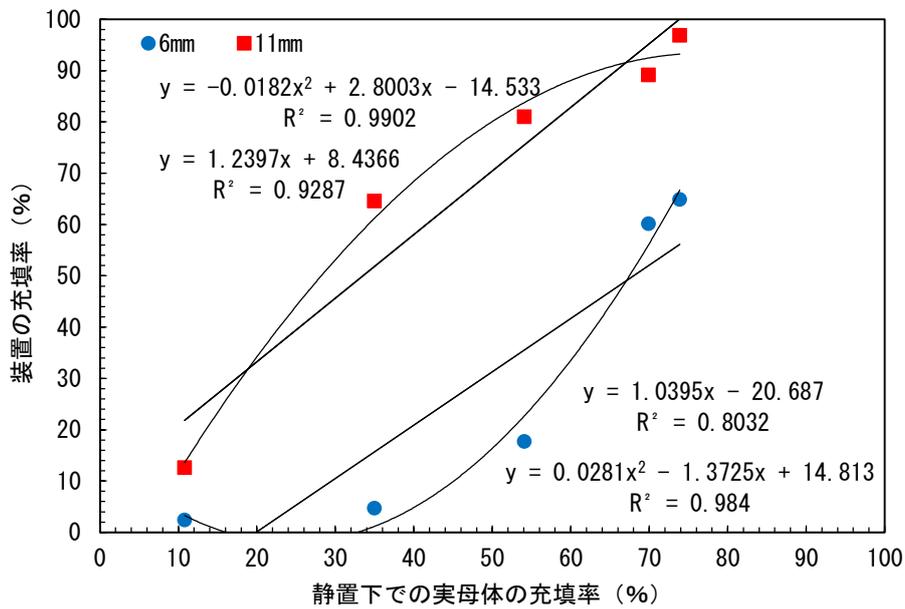


図 - 7.18 粉体 No. 2-1, 2-2 における装置充填率と静置下のポーラスアスファルト母体充填率の関係

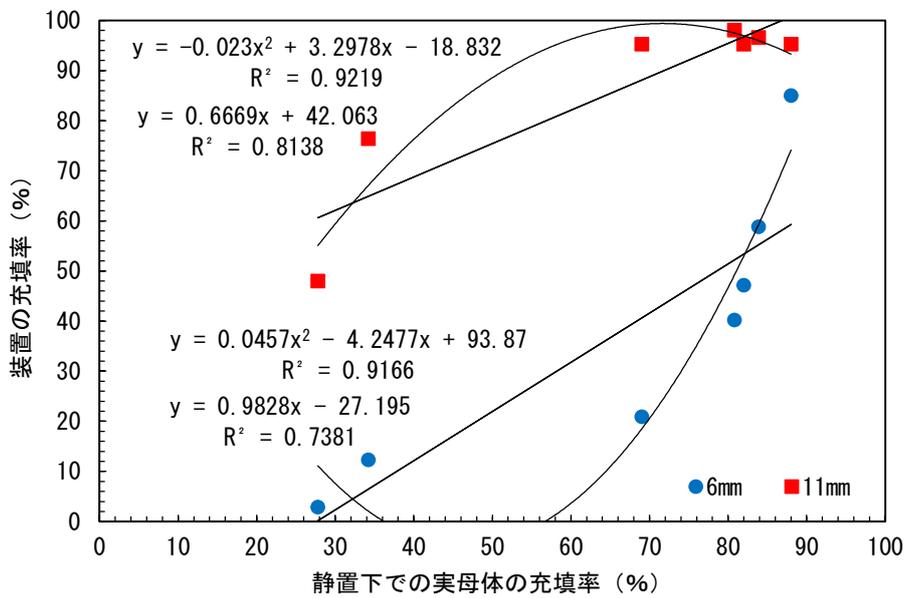


図 - 7.19 粉体 No. 2-3 における装置充填率と静置下のポーラスアスファルト母体充填率の関係

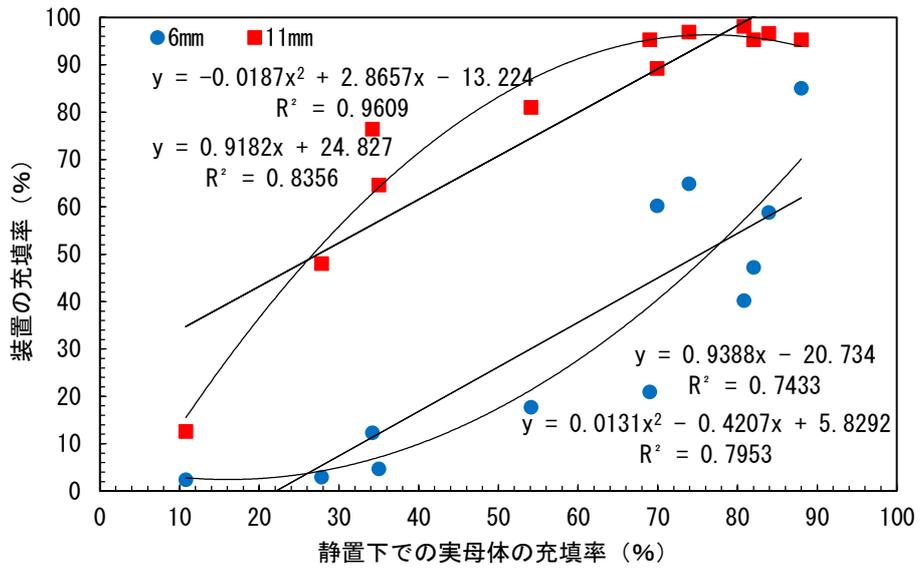


図 - 7.20 粉体 No. 2-1, 2-2, 2-3 における装置充填率と静置下ポーラスアスファルト母体充填率の関係

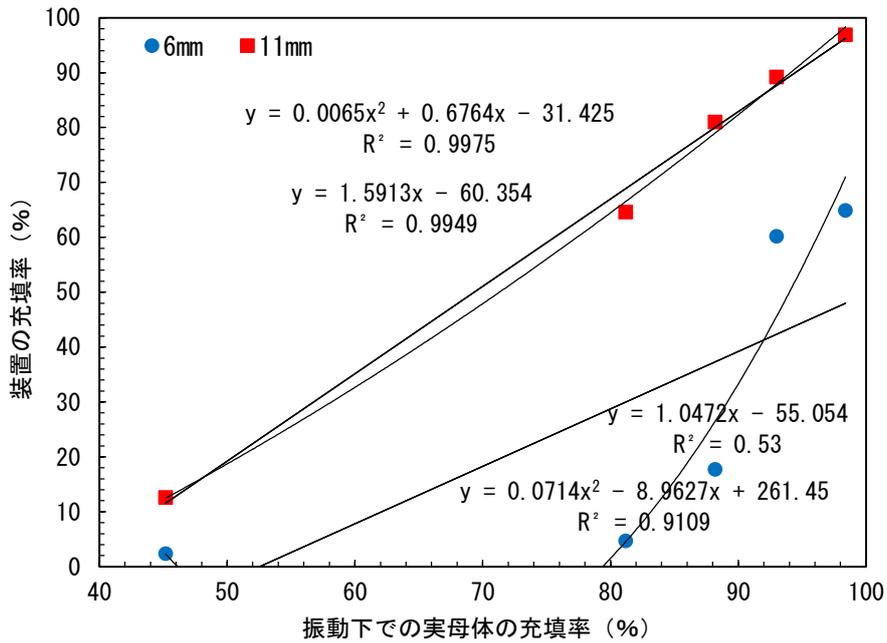


図 - 7.21 粉体 No. 2-1, 2-2 における装置充填率と振動下のポーラスアスファルト母体充填率の関係

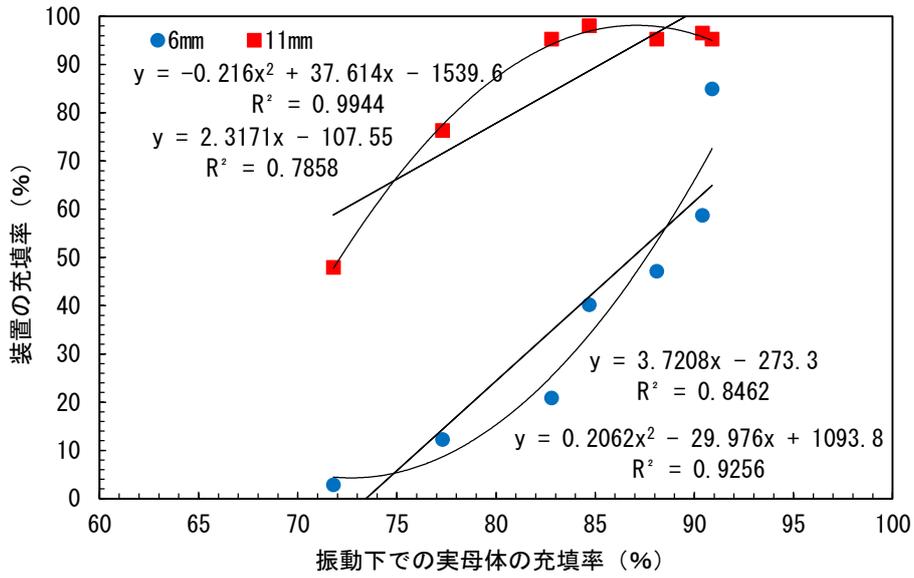


図 - 7.22 粉体 No. 2-3 における装置充填率と振動下のポーラスアスファルト母体充填率の関係

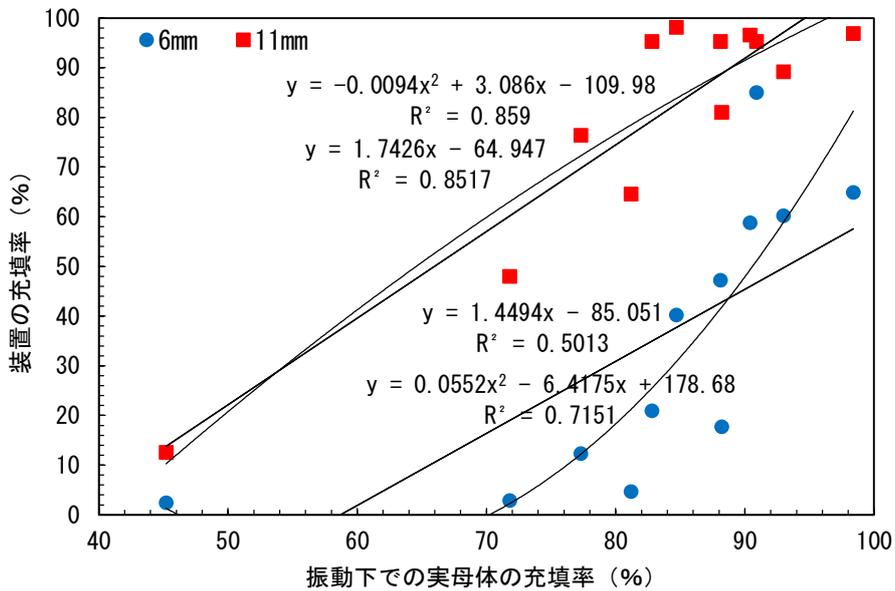


図 - 7.23 粉体 No. 2-1, 2-2, 2-3 における装置充填率と振動下のポーラスアスファルト母体充填率の関係

図 - 7.18 から粉体 No.2-1, 2-2 における装置充填率と静置下のポーラスアスファルト母体充填率の関係は、鋼球径 6mm, 11mm において単項式, 多項式ともに高い寄与率から相関性が認められた。特に鋼球径 11mm の多項式では $R^2=0.9902$ と非常に高くなっている。

図 - 7.19 から粉体 No.2-3 における装置充填率と静置下のポーラスアスファルト母体充填率の関係は、同様に鋼球径 6mm, 11mm において単項式, 多項式ともに高い寄与率から相関性が認められた。また、図 - 7.20 から粉体 No.2-1, 2-2, 2-3 における装置充填率と静置下のポーラスアスファルト母体充填率の関係は、鋼球径 6mm, 11mm において単項式, 多項式ともに高い寄与率から相関性が認められた。特に鋼球径 11mm の多項式では $R^2=0.9609$ と非常に高くなっている。これは、水/粉体比の変化や高性能 AE 減水剤の添加による流動性変化を装置充填性で評価した場合や、粉体 No.2-1, 2-2 や粉体 No.2-3 のようにまったく異なる粉体構成を交えて、流動性変化を装置充填性で評価した場合でも、同様に充填率を反映すると考えられる。

図 - 7.21 から粉体 No.2-1, 2-2 における装置充填率と振動下のポーラスアスファルト母体充填率の関係は、鋼球径 6mm, 11mm において単項式, 多項式ともに高い寄与率から相関性が認められた。特に鋼球径 11mm の多項式では $R^2=0.9975$ と非常に高くなっている。

図 - 7.22 から粉体 No.2-3 における装置充填率と振動下のポーラスアスファルト母体充填率の関係は、同様に鋼球径 6mm, 11mm において単項式, 多項式ともに高い寄与率から相関性が認められた。特に鋼球径 11mm の多項式では $R^2=0.9944$ と非常に高くなっている。また、図 - 7.23 から粉体 No.2-1, 2-2, 2-3 における装置充填率と振動下のポーラスアスファルト母体充填率の関係は、鋼球径 11mm において単項式, 多項式ともに高い寄与率から相関性が認められた。しかし、鋼球径 6mm において多項式では高い寄与率だが、単項式では寄与率が低下している。これは、鋼球径 6mm を静置下による実際のポーラスアスファルト母体の充填を想定しており寄与率が低くなっていると考えられる。単項式での評価では鋼球径 6mm において相関性が低くなるが、多項式の評価においては、水/粉体比の変化や高性能 AE 減水剤の添加による流動性変化を装置充填性で評価した場合や、粉体 No.2-1, 2-2 や粉体 No.2-3 のようにまったく異なる粉体構成を交えて、流動性変化を装置充填性で評価した場合でも、同様に充填率を反映すると考えられる。

図 - 7.20, 7.23 から装置の充填率と実際のポーラスアスファルト母体の充填率の関係は、最も高い寄与率から式 [4.1], [4.2], [4.3], [4.4] に示す多項式で表すことができる。

静置下における鋼球径 6mm の場合

$$Y_5=0.013X^2-0.4207X-5.8292 \quad \text{式 [4.1]}$$

X : 静置下のポーラスアスファルト母体の充填率(%)

Y₅ : 鋼球径 6mm の充填率(%)

静置下における鋼球径 11mm の場合

$$Y_6 = -0.0187X^2 + 2.8657X - 13.22 \quad \text{式 [4.2]}$$

X : 静置下のポーラスアスファルト母体の充填率(%)

Y₅ : 鋼球径 11mm の充填率(%)

振動下における鋼球径 6mm の場合

$$Y_7 = 0.0552X^2 - 6.4175X - 178.68 \quad \text{式 [4.3]}$$

X : 振動下のポーラスアスファルト母体の充填率(%)

Y₇ : 鋼球径 6mm の充填率(%)

振動下における鋼球径 11mm の場合

$$Y_8 = -0.0094X^2 + 3.086X - 109.98 \quad \text{式 [4.4]}$$

X : 振動下のポーラスアスファルト母体の充填率(%)

Y₈ : 鋼球径 11mm の充填率(%)

この 4 種類の式に実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率である静置下の 70%と振動下の 80%を代入して導き出される、装置の鋼球径 6mm と 11mm における目標充填率を表 - 7.6 に示す。

表 - 7.6 実際の母体目標充填率からの装置の目標充填率

項目	静置下	振動下
鋼球径 6mm	41.2902%	18.56%
鋼球径 11mm	95.745%	76.74%

鋼球径 6mm では、実際のポーラスアスファルト母体に静置下において目標値である 70%以上の充填率を得るには、約 41%以上の充填率が必要となり、振動下において目標値である 80%以上の充填率を得るには、約 19%以上の充填率が必要となる。鋼球径 11mm では、実際のポーラスアスファルト母体に静置下において目標値である 70%以上の充填率を得るには、約 96%以上の充填率が必要となり、振動下において目標値である 80%以上の充填率を得るには、約 77%以上の充填率が必要となる。鋼球径 6mm は、振動下で低い目標充填率となった。これは、もともと静置下を想定しており、振動下における充填率 80%以下の評価をするのは難しいと考えられる。また、鋼球径 11mm は、静置下で 100%近い目標充填率となった。これも同様に、もともと振動下を想定しており、静置下における充填率 70%以上の評価をするのは難しいと考えられる。

ゆえに、装置の充填率が、鋼球径 6mm では、充填率が 41%以上であれば静置下のポーラスアスファルト母体に 70%以上充填され、また、鋼球径 11mm では、充填率が 77%以上であれば振動下のポーラスアスファルト母体に 80%以上充填されることとなる。この装置の

目標充填率の値は、前述のテーブルフロー値と装置の目標充填率の関係から導き出した値と近似している。これは、テーブルフロー値による評価と目標値が実際のポーラスアスファルト母体への充填性と鋼球径 6mm と 11mm の装置の充填性を的確に評価し、鋼球径 6mm の装置による充填性の評価と目標充填率が静置下における実際のポーラスアスファルト母体の充填性を的確に評価し、鋼球径 11mm の装置による充填性の評価と目標充填率が、振動下における実際のポーラスアスファルト母体の充填性を的確に評価していると考えられる。

これらの結果から、最終的に目標とする装置の充填率は、静置下の実際のポーラスアスファルト母体を想定した場合は、鋼球径 6mm において 40%以上、振動下の実際のポーラスアスファルト母体を想定した場合は、鋼球径 11mm において 80%となる。

また、テーブルフロー値から鋼球径 6mm の装置の充填率を導く式 [3.1]、テーブルフロー値から鋼球径 11mm の装置の充填率を導く式 [3.2]、鋼球径 6mm の装置の充填率から静置下における実際のポーラスアスファルト母体の充填率を導く式 [4.1]、鋼球径 11mm の装置の充填率から振動下における実際のポーラスアスファルト母体の充填率を導く式 [4.4] は、信頼性が高いと考えられる。

以上より充填性を確認するための試験装置は、実母体の充填率の傾向を大凡再現しているものと思われる。

今回は実験数が少ないため、最適な鋼球径の検討を含め、今後さらにデータの蓄積を行い、より適切な帰帰式を含め、精度の高い相関関係について検討を進め、充填性評価の新たな手法について提案していく予定である。

7.2.6 まとめ

半たわみ性舗装用充填材の充填性を評価するため、実際のポーラスアスファルト母体を模擬し、鋼球径 6mm と 11mm の球体を正三角錐容器に六方細密充填させた装置を考案し、各種流動性試験や実際のポーラスアスファルト母体の充填性から検討した結果、以下のことが分かった。

- 1)従来用いられている P 漏斗による流下時間では、鋼球径 6mm と 11mm の装置の充填性を判断するのは難しく、内径 50mm×高さ 100mm の円柱コーンによるテーブルフロー値の方がよりの確に判断できる可能性が高いことが分かった。
- 2)鋼球径 6mm と 11mm の装置は、実際のポーラスアスファルト母体の充填率との相関性が認められ、充填性の評価が可能であると判断できた。なかでも鋼球径 6mm の装置は、静置下における実際のポーラスアスファルト母体の充填性を評価し、鋼球径 11mm の装置は、振動下における実際のポーラスアスファルト母体の充填性を評価していることが分かった。
- 3)今回の実験範囲内ではあるが、静置下における実際のポーラスアスファルト母体の目標充

充填率 70%以上を得るには、鋼球径 6mm の装置において 40%以上、振動下における実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率 80%以上を得るには、鋼球径 11mm の装置において 80%以上の充填率であれば十分な充填性を示すものと推察される。今後は、データの蓄積を行い、導きだした値の信頼性を向上させるとともに、最適な試験装置の確立を行っていきたい。

7.3 試験装置の充填性評価と理論充填率

7.3.1 実験概要

半たわみ性舗装用充填材の充填性を評価する新しい試験装置が、実際のポーラスアスファルト母体の充填性を評価できる可能性を示した。また、充填性を評価するための流動性評価は、塑性粘度が支配的となる P 漏斗の流下時間より降伏値が支配的となるテーブルフロー値の評価が、試験装置や実際のポーラスアスファルト母体の充填性を適切に評価している可能性を示した。しかし、実験に使用した充填材は、半たわみ性舗装用に粉体構成を調整した充填性を重視した市販品を基本としたものであり、水/粉体比や高性能 AE 減水剤により流動性を変化させて実験を行っているが、基本的な粉体構成の考え方は同一である。ゆえに、粉体構成に市販品の基本である充填性の要素を取り入れず、目標とした P 漏斗の流下時間とテーブルフロー値の組み合わせから、実験用に新たな充填材を作成して、この充填材を試験装置や実際のポーラスアスファルト母体へ浸透させて流動性評価と充填性の相関性を評価した。さらに、充填材が有する降伏値をもとにした考えから、試験装置の理論充填率を理論式によって推測し、実際の試験装置やポーラスアスファルト母体の充填率と比較して検証した。

7.3.2 試験装置 - 2

前実験では、鋼球径 6mm と 11mm の球体を使用した試験装置を用いて行っている。鋼球径 6mm と 11mm の球体を比較した場合、実際のポーラスアスファルト母体の充填性との相関性は、鋼球径 11mm の球径のほうが高くなっており、振動下の目標充填率が表 - 7.5 と表 - 7.6 に示すように約 80%と実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率である 80%を概ね再現していた。しかし、静置下における実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率である 70%以上を得るためには、鋼球径 11mm において表 - 7.5 に示すように 95%以上となり評価の範囲が狭くなる。また、鋼球径 6mm は、静置下の充填性評価を想定し鋼球径 11mm よりも空隙径を小さくしているため、振動下の充填率は表 - 7.5 に示すように非常に低くなり評価が難しく、表 - 7.5 と表 - 7.6 に示すように目標充填率が約 40%となり、静置下の充填性評価は可能であるが、実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率である 70%との差が大きい。そのため今回の実験で使用する鋼球径は、高い相関性を有する 11mm と、静置下の充填性評価をさらに向上させるため 6mm と 11mm の中間を目標充填率として、6mm と 11mm の中間の空隙径が形成できる 9mm の 2 種類として、鋼球径 11mm は 12 層とし鋼球径 9mm は 15 層とした。正三角錐容器では、上面の注入口に内径 ϕ 10mm × 長さ 50mm の円柱パイプを接続させ、3 か所に空気口を設けた。そのほかは、前実験と同様の装置である。表 - 7.7 に試験装置の概要、図 - 7.24 に鋼球径 11mm の試験装置の寸法を示す。

表 - 7.7 試験装置の概要

項目	鋼球径 9mm 装置	鋼球径 11mm 装置
鋼球径(mm)	9.0±0.1	11.0±0.1
鋼球層数(層)	15	12
鋼球数(個)	680	364
鋼球体積(mL)	0.38	0.7
総鋼球体積(mL)	258.4	253.68
装置内容量(mL)	398	
総空隙量(mL)	139.6	145

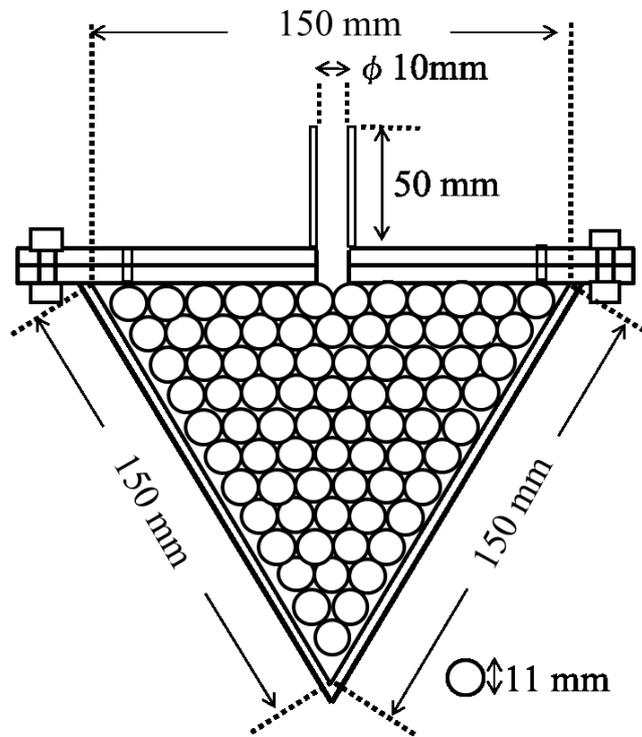


図 - 7.24 鋼球径 11mm試験装置(側面)

7.3.3 実際のポーラスアスファルト母体の充填性の確認実験

7.3.3.1 実験概要

実際のポーラスアスファルト母体の充填性の確認実験では、目標とする P 漏斗の流下時間とテーブルフロー値を有する充填材を調整し、この充填材を実際のポーラスアスファルト母体に浸透させ、P 漏斗の流下時間やテーブルフロー値と実際のポーラスアスファルト母体の充填性の関係を調べた。

7.3.3.2 充填材の種類と配合

充填材の粉体構成を普通ポルトランドセメントと流動性を調整する増粘剤とし、さらに液体の高性能 AE 減水剤と水/粉体比により流動性を調整して、P 漏斗の流下時間とテーブルフロー値を任意にコントロールした充填材を作成した。テーブルフロー値では、200～400mm の範囲とし、200～225, 225～275, 275～325, 325～375, 375～425mm にグループ分けを行い(以下 200, 250, 300, 350, 400 とする)、P 漏斗流下時間では 7 秒～19 秒の範囲とし、7～9, 9～11, 11～13, 13～15, 15～17, 17～19 秒とグループ分けを行い (以下 8, 10, 12, 14, 16, 18 とする)、それぞれを組み合わせた充填材とした。表 - 7.8 に使用した材料、表 - 7.9 に配合の組み合わせ、表 - 7.10 に充填材の構成を示す。

練り混ぜにはハンドミキサーを使用し、1 バッチあたりの練り混ぜ量を約 5kg とした。手順は、水と高性能 AE 減水剤を練り混ぜ容器に投入し、その後粉体を投入し 60 秒間練り混ぜを行った。

表 - 7.8 使用材料

種類	材料名	成分名他
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³
増粘剤	粉体増粘剤	ヒドロキシプロピルメチルセルロース
減水剤	液体高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル化合物

表 - 7.9 P 漏斗の流下時間とテーブルフロー値の組み合わせ配合

項目		P 漏斗の流下時間(秒)					
		8	10	12	14	16	18
テーブルフロー値 (mm)	200	—	—	○ Sample No.3-1	○ Sample No.3-2	○ Sample No.3-3	○ Sample No.3-4
	250	—	○ Sample No.3-5	○ Sample No.3-6	○ Sample No.3-7	○ Sample No.3-8	—
	300	○ Sample No.3-9	○ Sample No.3-10	○ Sample No.3-11	○ Sample No.3-12	—	—
	350	○ Sample No.3-13	○ Sample No.3-14	○ Sample No.3-15	—	—	—
	400	○ Sample No.3-16	○ Sample No.3-17	○ Sample No.3-18	—	—	—

表 - 7.10 充填材の構成

Sample No.	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6
水/セメント比(%)	61.3	51.5	51.5	51.5	51.5	72.4
増粘剤/セメント比(%)	0.19	0.09	0.12	0.14	—	0.10
減水剤/セメント比(%)	—	—	—	—	—	—
Sample No.	3-7	3-8	3-9	3-10	3-11	3-12
水/セメント比(%)	72.6	66.8	92.3	85.4	66.7	72.6
増粘剤/セメント比(%)	0.34	0.40	0.15	0.22	0.07	0.31
減水剤/セメント比(%)	0.21	0.20	0.22	0.22	—	0.17
Sample No.	3-13	3-14	3-15	3-16	3-17	3-18
水/セメント比(%)	85.4	61.3	85.2	85.2	85.2	72.6
増粘剤/セメント比(%)	0.15	—	—	—	—	0.28
減水剤/セメント比(%)	0.22	—	0.11	0.07	—	0.20

7.3.3.3 評価方法

前実験と同様に、P 漏斗の流下時間を JSCE-F 521 に準拠して測定し、テーブルフロー値を JASS 15 M-103 に準拠し内径 50mm、高さ 100mm の円柱コーンにて測定した。また、充填材の充填率は、同様のポーラスアスファルト母体を使用して、静置下と振動下において同様の方法で測定した。

7.3.3.4 試験結果

表 - 7.11 に P 漏斗の流下時間とテーブルフロー値と実際のポーラスアスファルト母体の充填率を示す。また、図 - 7.25 に静置下における P 漏斗の流下時間と実際のポーラスアスファルト母体の充填率の関係、図 - 7.26 に振動下における P 漏斗の流下時間と実際のポーラスアスファルト母体の充填率の関係、図 - 7.27 に静置下におけるテーブルフロー値と実際のポーラスアスファルト母体の充填率の関係、図 - 7.28 に振動下におけるテーブルフロー値と実際のポーラスアスファルト母体の充填率の関係を示す。

表 - 7.11 充填材の流動性評価試験と実際のポーラスアスファルト母体の充填率

Sample No.		3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6
P漏斗の流下時間 (秒)		17.08	14.67	12.85	16.21	15.81	10.91
テーブルフロー値 (mm)		200	200	210	210	235	250
実母体充填率(%)	静置下	25.46	27.87	41.74	20.53	67.47	47.86
	振動下	33.96	39.12	56.53	27.79	73.06	63.83
Sample No.		3-7	3-8	3-9	3-10	3-11	3-12
P漏斗の流下時間 (秒)		11.22	13.79	11.08	10.03	13.32	8.86
テーブルフロー値 (mm)		250	270	290	300	300	320
実母体充填率(%)	静置下	52.13	66.24	57.32	80.8	77.96	84.52
	振動下	64.97	75.18	69.58	87.3	86.95	93.93
Sample No.		3-13	3-14	3-15	3-16	3-17	3-18
P漏斗の流下時間 (秒)		8.91	11.37	9.27	12.09	9.22	8.65
テーブルフロー値 (mm)		350	360	365	395	410	420
実母体充填率(%)	静置下	83.6	79.8	85.1	75.11	94.24	85.7
	振動下	90.02	87.17	88.1	78.98	99.91	87.8

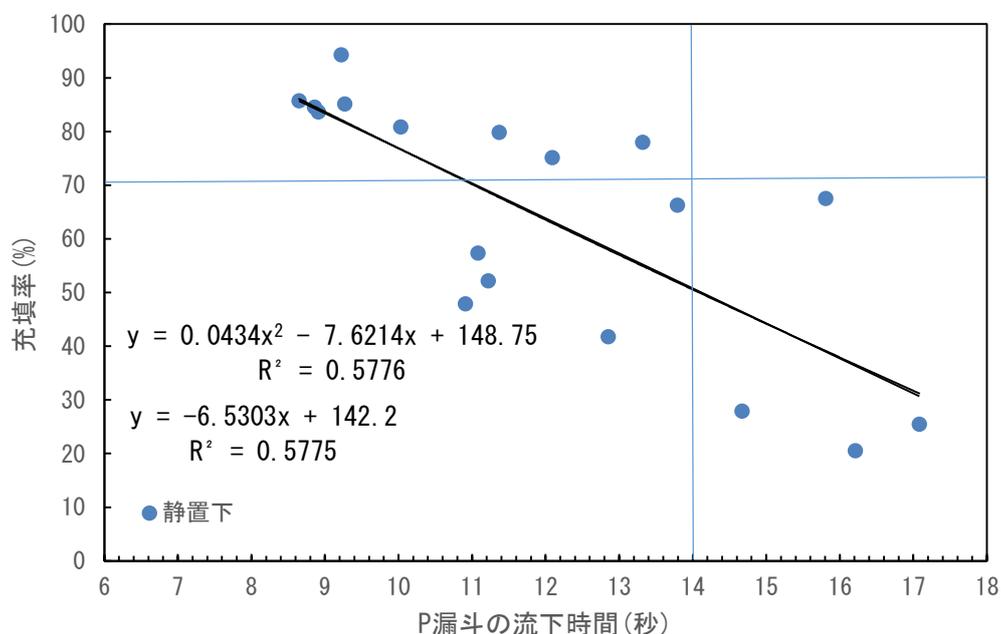


図 - 7.25 静置下におけるP漏斗の流下時間と実際のポーラスアスファルト母体の充填率の関係

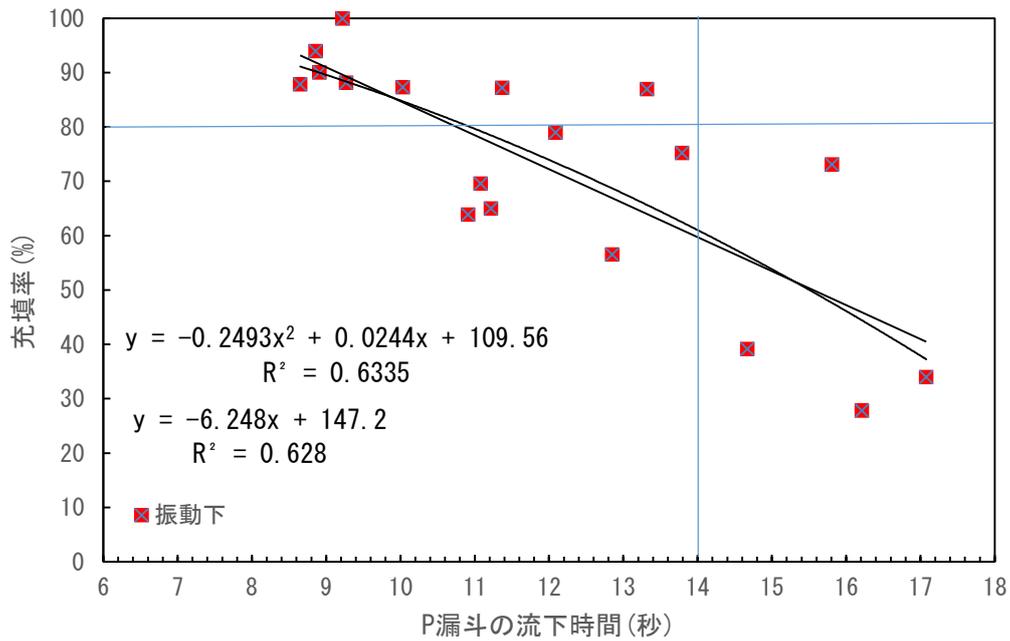


図 - 7.26 振動下における P 漏斗の流下時間と
実際のポーラスアスファルト母体の充填率の関係

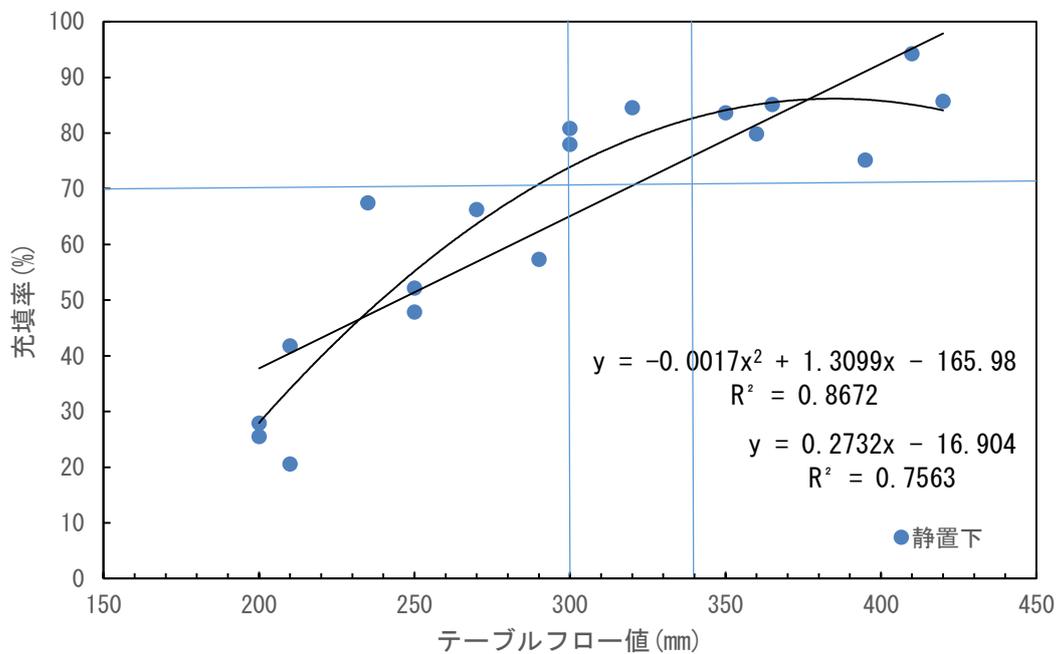


図 - 7.27 静置下におけるテーブルフロー値と
実際のポーラスアスファルト母体の充填率の関係

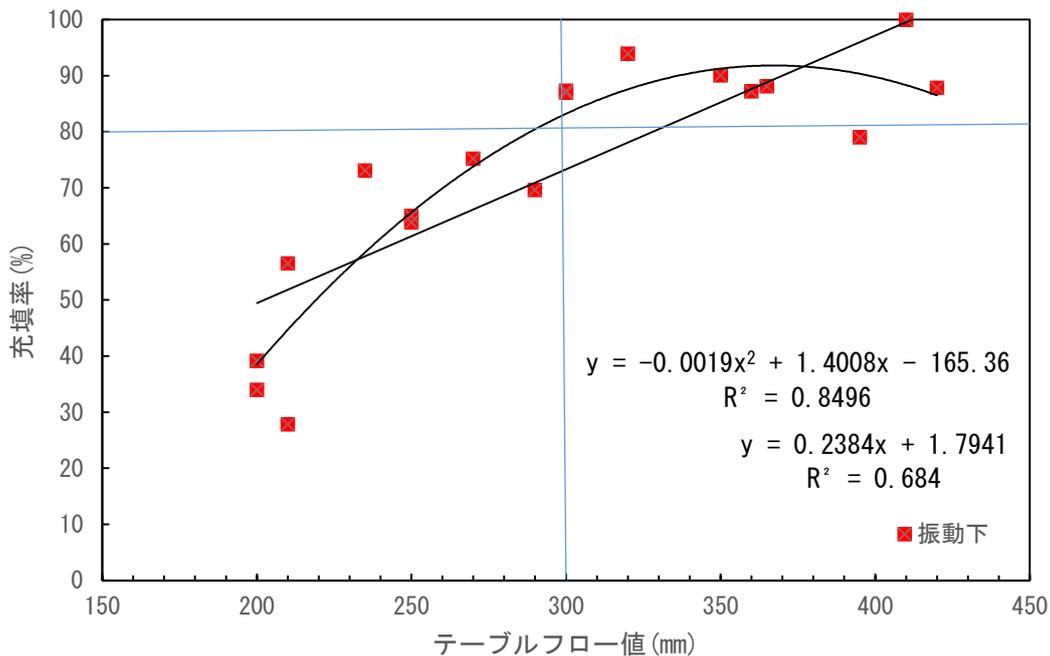


図 - 7.28 振動下におけるテーブルフロー値と実際のポーラスアスファルト母体の充填率の関係

表 - 7.11, 図 - 7.25, 7.26 から, P 漏斗の流下時間が規格内であっても, 静置下において目標とする充填率 70%以下, 振動下において目標とする充填率 80%以下の充填材が多数存在している。また, 第 6 章で示したテーブルフロー値の範囲は, 静置下において目標とする充填率 70%以上とするためには 340mm 以上, 振動下において目標とする充填率 80%以上とするためには 300mm 以上としている。表 - 7.11, 図 - 7.27, 7.28 から, テーブルフロー値が 340mm 以上であれば, 静置下において目標とする充填率 70%以上, テーブルフロー値が 300mm 以上であれば, 振動下において目標とする充填率 80%以上となっている。

図 - 7.25, 7.27 の近似単項式と多項式による寄与率から, 静置下における P 漏斗の流下時間とテーブルフロー値の充填率の相関性を比較すると, テーブルフロー値が高くなり高い相関性となっている。また, 図 - 7.26, 7.28 の近似単項式と多項式による寄与率から, 振動下における P 漏斗の流下時間とテーブルフロー値の充填率の相関性を比較すると, 静置下と同様にテーブルフロー値が高くなり高い相関性となっている。

以上より, 前述と同様に塑性粘度が支配的となる P 漏斗の流下時間より降伏値が支配的となるテーブルフロー値による流動性評価が, 実際のポーラスアスファルト母体への充填性を的確に評価できると考えられる。また, 今回作成した充填材においてもテーブルフロー値が静置下において 340mm 以上, 振動下において 300mm 以上とした範囲は, 概ね信頼できると考えられる。

7.3.4 試験装置の充填性の確認実験

7.3.4.1 実験概要

試験装置の充填性の確認実験では、目標とする P 漏斗の流下時間とテーブルフロー値を有する充填材を、図 - 7.24 に示す鋼球径 9mm と 11mm の試験装置に浸透させて、実際のポーラスアスファルト母体の充填率との関係を調べた。

7.3.4.2 充填材の種類と配合

充填材は、粉体構成を普通ポルトランドセメントと流動性を調整する増粘剤とし、さらに液体の高性能 AE 減水剤と水/粉体比により流動性を調整して、P 漏斗の流下時間とテーブルフロー値を任意にコントロールした前実験と同様の充填材を用いた。

練り混ぜにはハンドミキサーを使用し、1 バッチあたりの練り混ぜ量を約 5kg とした。手順は、水と高性能 AE 減水剤を練り混ぜ容器に投入し、その後粉体を投入し 60 秒間練り混ぜを行った。

7.3.4.3 評価方法

装置への充填は、まず、各鋼球径の球体を正三角錐容器に六方細密充填にして詰め、スポンジパッキンとゴムパッキンを乗せてからフタをネジで締めてから、装置上面が水平となるように装置を固定する。次に、充填材を上面のφ10mm の円柱パイプ注入口から徐々に浸透させ、装置の内部への浸透が終わり、空気口から充填材が吐出した時点で余剰な充填材を排除して充填率を求めた。

7.3.4.4 試験結果

表 - 7.12 に試験装置への充填率を示す。また、図 - 7.29 に静置下における実際のポーラスアスファルト母体と鋼球径 9mm の試験装置の充填率の関係、図 - 7.30 に振動下における実際のポーラスアスファルト母体と鋼球径 9mm の試験装置の充填率の関係、図 - 7.31 に静置下における実際のポーラスアスファルト母体と鋼球径 11mm の試験装置の充填率の関係、図 - 7.32 に振動下における実際のポーラスアスファルト母体と鋼球径 11mm の試験装置の充填率の関係を示す。

表 - 7.12 充填材の試験装置充填率

Sample No.		3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6
装置充填率(%)	9mm	25.96	55.49	42.65	70.50	75.89	82.03
	11mm	68.95	45.94	79.15	56.75	83.47	92.28
Sample No.		3-7	3-8	3-9	3-10	3-11	3-12
装置充填率(%)	9mm	83.50	76.18	80.53	79.98	76.31	71.34
	11mm	86.46	79.16	86.19	98.60	78.97	81.23
Sample No.		3-13	3-14	3-15	3-16	3-17	3-18
装置充填率(%)	9mm	89.50	88.87	99.04	69.72	94.42	92.90
	11mm	90.80	93.47	98.60	74.94	95.59	90.11

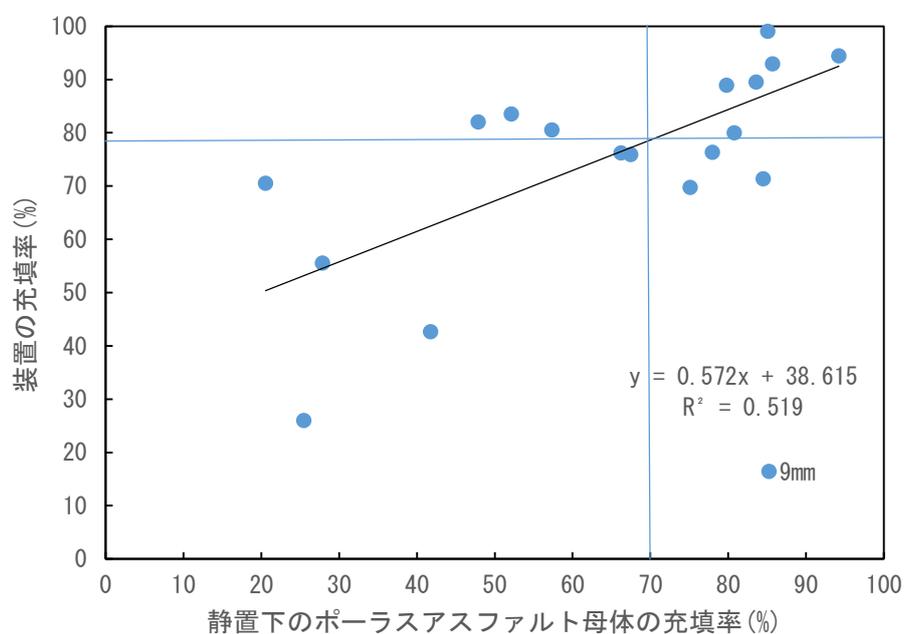


図 - 7.29 静置下における実際のポーラスアスファルト母体と鋼球径 9mm の試験装置の充填率の関係

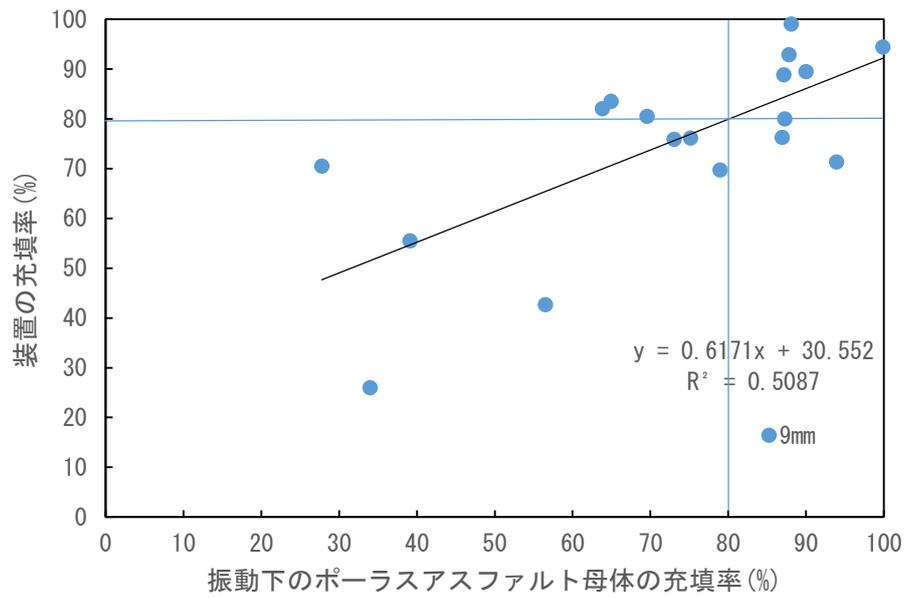


図 - 7.30 振動下における実際のポーラスアスファルト母体と鋼球径 9mm の試験装置の充填率の関係

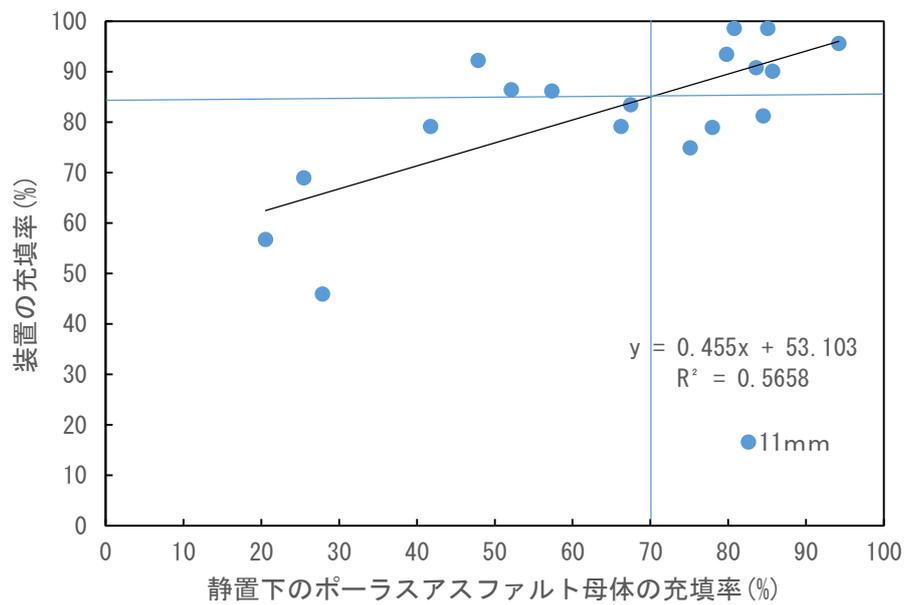


図 - 7.31 静置下における実際のポーラスアスファルト母体と鋼球径 11mm の試験装置の充填率の関係

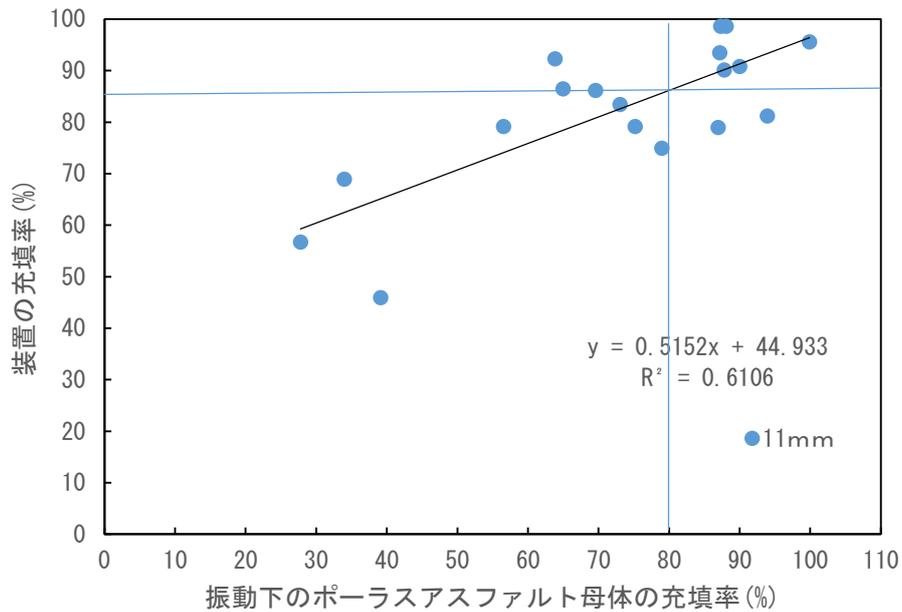


図 - 7.32 振動下における実際のポーラスアスファルト母体と鋼球径 11mm の試験装置の充填率の関係

図 - 7.29, 7.30, 7.31, 7.32 から、静置下と振動下における実際のポーラスアスファルト母体の充填率と、鋼球径 9mm と 11mm の試験装置の充填率は、近似単項式の高い寄与率から相関性が認められ、鋼球径 9mm と 11mm の試験装置が実際のポーラスアスファルト母体の充填率を反映していると考えられる。装置の充填率と実際のポーラスアスファルト母体の充填率の関係は、式 [5.1], [5.2], [5.3], [5.4] に示す単項式で表すことができる。

静置下における鋼球径 9mm の場合

$$Y_9 = 0.572X + 38.65 \quad \text{式 [5.1]}$$

X : 静置下のポーラスアスファルト母体の充填率(%)

Y₉ : 鋼球径 9mm の充填率(%)

振動下における鋼球径 9mm の場合

$$Y_{10} = 0.6171X + 30.552 \quad \text{式 [5.2]}$$

X : 静置下のポーラスアスファルト母体の充填率(%)

Y₅ : 鋼球径 9mm の充填率(%)

静置下における鋼球径 11mm の場合

$$Y_{11}=0.455X+53.103 \quad \text{式 [5.3]}$$

X : 振動下のポーラスアスファルト母体の充填率(%)

Y₁₁ : 鋼球径 11mm の充填率(%)

振動下における鋼球径 11mm の場合

$$Y_{12}=0.5152X+44.933 \quad \text{式 [5.4]}$$

X : 振動下のポーラスアスファルト母体の充填率(%)

Y₁₂ : 鋼球径 11mm の充填率(%)

この 4 種類の式に実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率である静置下の 70%と振動下の 80%を代入して導き出される, 装置の鋼球径 9mm と 11mm における目標充填率を表 - 7.13 に示す。

表 - 7.13 装置の目標充填率

項目	静置下	振動下
鋼球径 9mm	78.655%	79.92%
鋼球径 11mm	84.953%	86.149%

表 - 7.13 から, 鋼球径 9mm の試験装置において約 79%以上であれば, 静置下における実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率である 70%以上を得ることができ, 鋼球径 9mm の試験装置において同様に約 80%以上であれば, 振動下における実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率である 80%以上を得ることができる。また, 鋼球径 11mm の試験装置において約 85%以上であれば, 静置下における実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率である 70%以上を得ることができ, 鋼球径 11mm の試験装置において同様に約 86%以上であれば, 振動下における実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率である 80%以上を得ることができる。今回の実験では, 鋼球径 9mm と 11mm のどちらも, 静置下の実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率 70%を得るために必要な目標充填率と, 振動下の実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率 80%を得るために必要な目標充填率とほぼ同一となった。これは, 今回用いた充填材が, 振動により実際のポーラスアスファルト母体の充填率に極端な変化が生じないためであると考えられ, 前実験結果と異なるところではある。しかし, まったく異なる観点から作成した充填材においても, 鋼球径 11mm の試験装置の目標充填率は前実験結果である目標充填率を概ね再現している。

以上より, 鋼球径 9mm と 11mm の試験装置は, 実際のポーラスアスファルト母体の充填率を反映している。

7.3.5 降伏値による理論充填率の検討

7.3.5.1 検討概要

前述のように充填性の評価は、塑性粘度が支配的となる P 漏斗の流下時間よりも降伏値が支配的となるテーブルフロー値のほうが適していると実証してきた。ゆえに、充填材の試験装置への充填率は、内径 50mm×高さ 100mm の円筒コーンを使用したテーブルフロー値から導けることが可能であると考え、充填率の理論式の検討を行った。

7.3.5.2 テーブルフロー値と降伏値

一般的にセメントモルタルの 0 打のテーブルフロー値と降伏値の間には、式[6.1]に示す関係があることが報告されている。

$$\tau_f = \frac{\rho g \alpha R^2 H}{\sqrt{3} A^2} \quad \text{式[6.1]}$$

τ_f : 降伏値

ρ : モルタルの密度(kg/m³)

g : 重力加速度 (m/s²)

A : 0 打フロー値の半径 (m)

R : フローコーンの下面半径 (m)

H : フローコーンの高さ (m)

α : フローコーンの形状に関するパラメータ

$$\alpha = \frac{1+a+a^2}{3} \quad \text{式 [6.2]}$$

a : フローコーンの下面半径に対する上面半径の比

ここで、フローコーンは内径 50mm の円筒であるため、下面半径 0.025m、上面半径 0.025m となり次のように表される。

$$a = \frac{0.025}{0.025} = 1 \quad \text{式[6.3]}$$

よって、 $\alpha = 1$ となり、モルタルの降伏値 τ_f は、式[6.2]と式[6.3]を式[6.1]に代入し、式[6.4]よりテーブルフロー値から求めることができる。

$$\tau_f = \frac{3.536 \times 10^{-4}}{A^2} \rho \quad \text{式[6.4]}$$

7.3.5.3 仮想細管理論と充填率理論

7.3.5.3.1 鋼球間の仮想細管半径 $r_{\text{理論値}}$

今回の実験で使用した試験装置は、球体の六方最密充填となっており、試験装置内の球の状態モデルを図 - 7.33 に示す。図 - 7.33 から式 [6.5] の関係となり仮想細管の予想半径 r_0 は式 [6.6] により決定することができる。

$$\frac{r}{r+r_0} = \cos 30^\circ \quad \text{式 [6.5]}$$

$$r_0 = \frac{(2\sqrt{3}-3)r}{3} \quad \text{式 [6.6]}$$

r : 球の半径(cm)

r_0 : 仮想細管の予想半径(cm)

式 [6.6] より、9mm の仮想細管の予想半径は $r_0=0.0696\text{cm}$ 、11mm の仮想細管の予想半径は $r_0=0.0851\text{cm}$ となる。

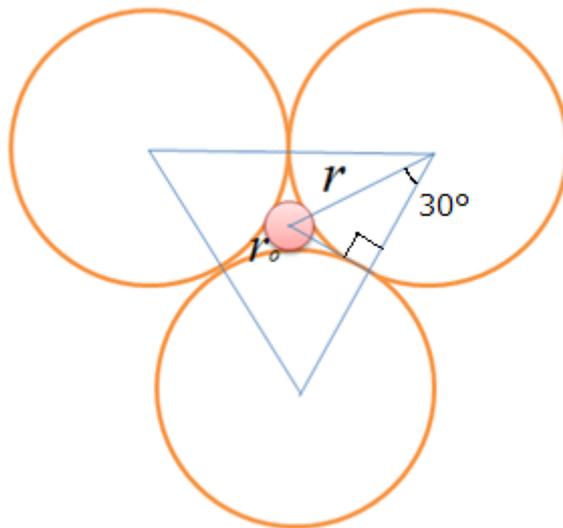


図 - 7.33 試験装置内の球の状態モデル

7.3.5.3.2 テーブルフロー値と仮想細管半径 $r_{\text{実測値}}$

仮想細管理論よりビンガム流体における栓流半径は式 [6.7] で表すことができる。また、今回実験の際には $\Delta P=5\text{cm}$ の時に流動停止としたため、流動停止の時は栓流半径と仮想細管半径が等しくなるためテーブルフロー値から求められる仮想細管半径は、式 [6.8] となる。

$$r_0 = \frac{2l\tau_f}{\Delta P} \quad \text{式 [6.7]}$$

$$r_{\text{実測値}} = \frac{2l\tau_f}{\Delta P} \quad \text{式 [6.8]}$$

l : 仮想細管長さ (cm)

ΔP : 圧力差

圧力差 ΔP は式 [6.9] で表すことができる。

$$\Delta P = \rho g \Delta H \quad \text{式 [6.9]}$$

Δh : 高低差

仮想細管のモデルを図 - 7.34 に示す。図 - 7.34 の h を仮想細管高さ、 l を仮想細管長さとする、仮想細管長さ l は式 [6.10] で表すことができ、仮想細管高さ h は鋼球径 9mm 試験装置の場合は $h_9=11.025\text{cm}$ となり、鋼球径 11mm 試験装置の場合は $h_{11}=9.88\text{cm}$ となる。

$$l = \frac{2\sqrt{3}}{9} \pi h \quad \text{式 [6.10]}$$

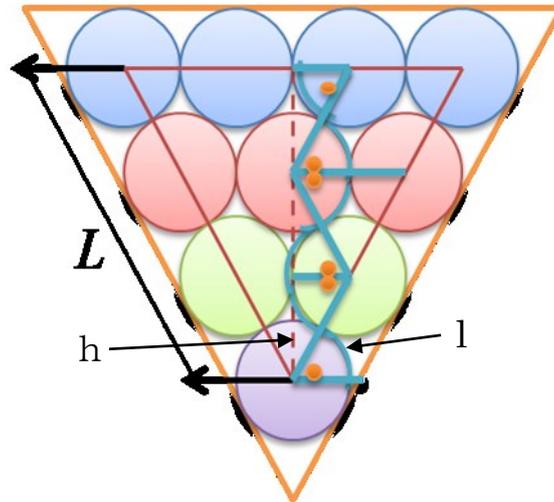


図 - 7.34 仮想細管のモデル

式 [6.8] に式 [6.1] 式 [6.9] 式 [6.10] をそれぞれ代入し，鋼球径 9mm と 11mm の仮想細管半径は，式[6.11]，式[6.12]となる。

$$\text{鋼球径 9mm} \quad r_{\text{実測値}} = \frac{1.923}{A^2} \quad \text{式[6.11]}$$

$$\text{鋼球径 11mm} \quad r_{\text{実測値}} = \frac{1.723}{A^2} \quad \text{式[6.12]}$$

7.3.5.3.3 半径比

鋼球間の仮想細管半径とテーブルフロー値による実測値から導かれる仮想細管半径は，異なる値となるため両方の半径の比を式[6.13]により半径比 α とし，2種類の鋼球径の半径比 α は式[6.14]，式[6.15]となる。また，半径比 α は，テーブルフロー値を変数として図 - 35 に示すように変化する。

$$\frac{r_{\text{実測値}}}{r_{\text{理論値}}} = \alpha_{\text{半径比}} \quad \text{式[6.13]}$$

$$\text{鋼球径 9mm} \quad \alpha_{\text{半径比}} = \frac{27.79}{A^2} \quad \text{式[6.14]}$$

$$\text{鋼球径 11mm} \quad \alpha_{\text{半径比}} = \frac{20.27}{A^2} \quad \text{式[6.15]}$$

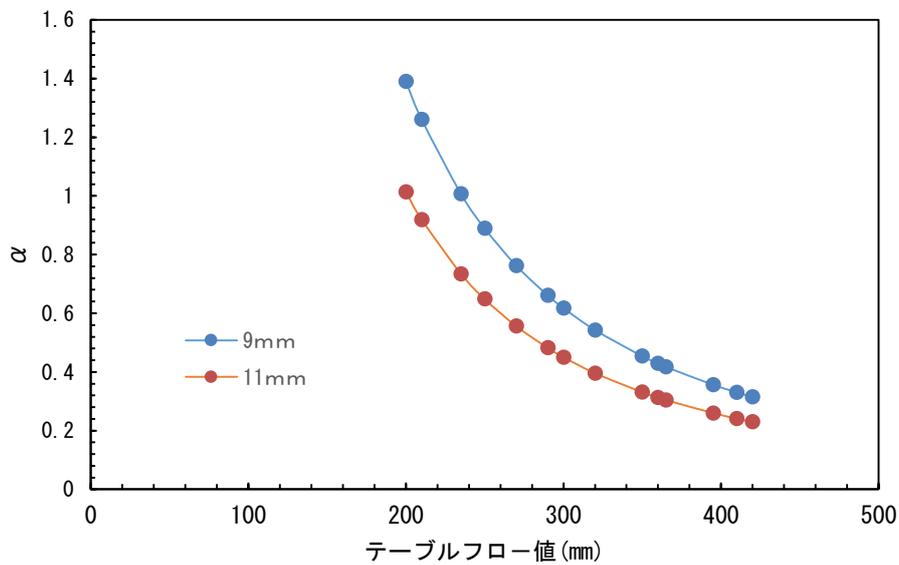


図 - 7.35 テーブルフロー値と半径比 α

7.3.5.3.4 理論充填率

充填理論式は $\Delta H_{理論}$ から導き出した。式[6.13]は式[6.16]とすることができ、仮想細管半径は、式[6.8]で表すことができるため、両式から式[6.17]となる。

$$r_{実測値} = \alpha_{半径比} r_{理論値} \quad \text{式[6.16]}$$

$$\frac{2l\tau_f}{\rho g \Delta H_{実測}} = \alpha_{半径比} \frac{2l\tau_f}{\rho g \Delta H_{理論}} \quad \text{式[6.17]}$$

$\Delta H_{理論}$ は試験装置の注入口上部から流動停止時の充填材が充填された層までの高さであり、式[6.18]の考えのもと、 $\Delta H_{実測} = 5\text{cm}$ から式[6.19]、式[6.20]となる。

$$\Delta H_{理論} = \alpha_{半径比} \Delta H_{実測} \quad \text{式[6.18]}$$

$$\text{鋼球径 } 9\text{mm} \quad \Delta H_{理論} = \frac{138.95}{A^2} \quad \text{式[6.19]}$$

$$\text{鋼球径 } 11\text{mm} \quad \Delta H_{理論} = \frac{101.35}{A^2} \quad \text{式[6.20]}$$

ここで、三角錐充填試験装置の充填試験結果よりテーブルフロー値が 360mm 付近で充

填率が約 100%となるため、係数 B として、鋼球径 11mm では係数 $B_{11}=16.433$ 、鋼球径 9mm では係数 $B_9=11.99$ の係数をかけて、式[6.21]、式[6.22]として反映させた。

$$\text{鋼球径 9mm } \Delta H_{\text{理論}} = \frac{1666.01}{A^2} \quad \text{式[6.21]}$$

$$\text{鋼球径 11mm } \Delta H_{\text{理論}} = \frac{1665.48}{A^2} \quad \text{式[6.22]}$$

$\Delta H_{\text{理論}}$ は図 - 7.35 に示す充填のモデルで表すことができ、 $\Delta H_{\text{理論}}$ から充填高さが求められる。また、実際の充填では上の部分も充填されているので以下のように分けて考えた。下の部分では、充填高さまで完全にセメントミルクが充填すると仮定し、充填高さまでの鋼球間隙の体積分を充填量とした。上の部分では、テーブルフロー値によって様々な形となって充填されるのが確認できるため、充填高さの上面を底面として高さを充填高さ上面から試験装置上面までとした三角錐状に充填すると仮定して考え、図 - 7.36 に示すオレンジの三角錐を充填量とした。

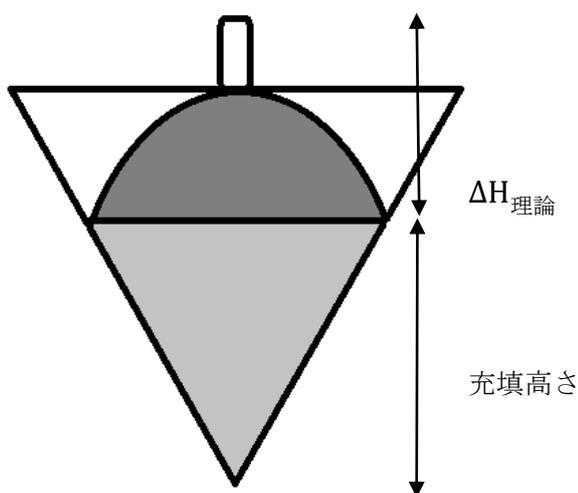


図 - 7.35 充填のモデル

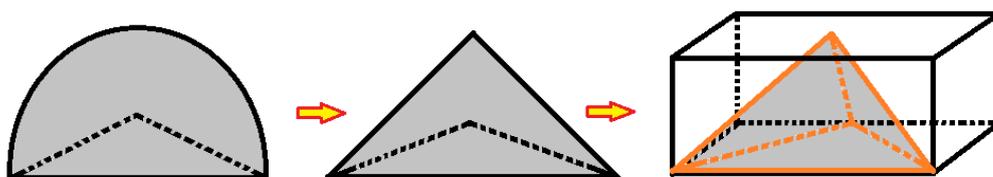


図 - 7.36 上部充填概

7.3.5.3.5 9mm 試験機の理論充填率

表 - 7.14 に鋼球径 9mm の $\Delta H_{理論}$ と充填量高さを示す。また表 - 7.14 から導いた理論充填率を表 - 7.15 に示す。

表 - 7.14 鋼球径 9mm の $\Delta H_{理論}$ と充填量高さ

テーブルフロー値(mm)	$\Delta H_{理論}$ (cm)	充填量高さ(cm)
200	11.654	0.642
210	10.106	2.19
235	7.063	5.233
250	5.659	6.637
270	4.138	8.158
290	2.921	9.375
300	2.402	9.894
320	1.506	10.79
350	0.438	11.858
360	0.140	12.156

表 - 7.15 鋼球径 9mm の装置の実際の充填率と理論充填率

テーブルフロー(mm)	200	200	210	210	235	250	250	270	290
9mm 実際(%)	25.96	55.49	42.65	70.50	75.89	82.03	83.50	76.18	80.53
9mm 理論(%)	1	1	2.32	2.32	14.95	23.45	23.45	36.37	42.85
テーブルフロー(mm)	300	300	320	350	360	365	395	410	420
9mm 実際(%)	79.98	76.31	71.34	89.50	88.87	99.04	69.72	94.42	92.90
9mm 理論(%)	56.28	56.28	87.59	100	100	100	100	100	100

図 - 7.36 に鋼球径 9mm の試験装置の充填率と理論充填率を示す。近似曲線を対数式とした場合、高い寄与率から相関性が認められる。ゆえに理論充填率に対数の係数を加えると精度が上がる可能性が考えられるため、対数式に理論充填率を代入して新たな理論充填率を導いた。新たな理論充填率を表 - 7.16 に示す。

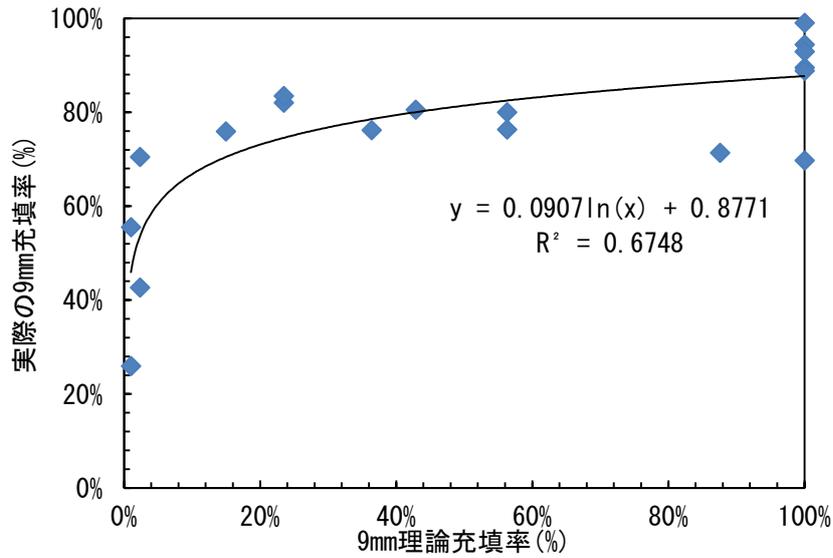


図 - 7.36 鋼球径 9mm の試験装置の充填率と理論充填率

表 - 7.16 鋼球径 9mm の新しい理論充填率

テーブルフロー(mm)	200	200	210	210	235	250	250	270	290
9mm 実際 (%)	25.96	55.49	42.65	70.50	75.89	82.03	83.50	76.18	80.53
9mm 理論 (%)	1	1	2.32	2.32	14.95	23.45	23.45	36.37	42.85
9mm 新理論 (%)	45.94	45.94	53.57	53.57	70.47	84.63	84.63	78.54	80.02
テーブルフロー(mm)	300	300	320	350	360	365	395	410	420
9mm 実際 (%)	79.98	76.31	71.34	89.50	88.87	99.04	69.72	94.42	92.90
9mm 理論 (%)	56.28	56.28	87.59	100	100	100	100	100	100
9mm 新理論 (%)	82.50	82.50	86.51	87.71	87.71	87.71	87.71	87.71	87.71

表 - 7.16 から鋼球径 9mm の理論充填率と実際の充填率の関係を図 - 37 に示す。図 - 37 から高い寄与率から相関性が認められる。

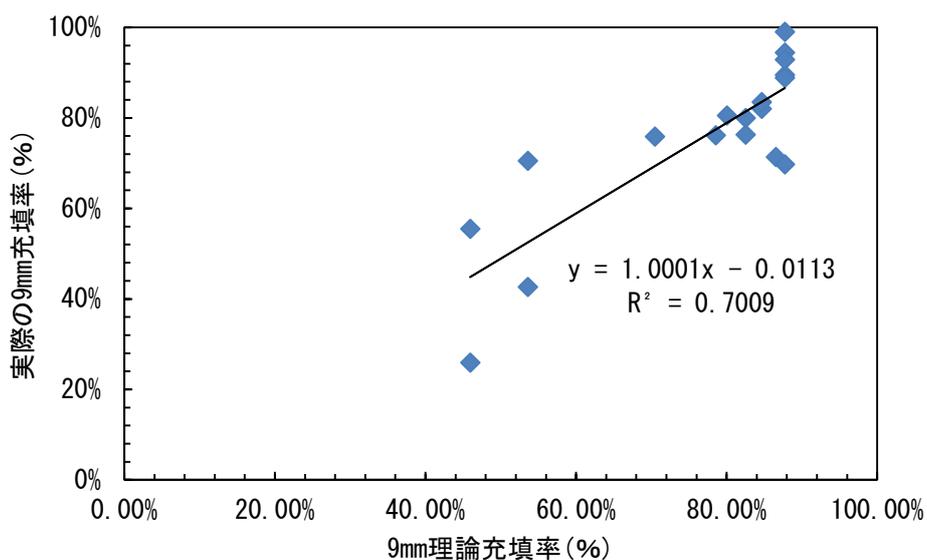


図 - 7.37 鋼球径 9mm の試験装置の充填率と新しい理論充填率

7.3.5.3.6 11mm 試験機の理論充填率

表 - 7.17 に鋼球径 11mm の $\Delta H_{\text{理論}}$ と充填量高さを示す。また表 - 7.16 から導いた理論充填率を表 - 7.18 に示す。

表 - 7.17 鋼球径 11mm の $\Delta H_{\text{理論}}$ と充填量高

テーブルフロー値(mm)	$\Delta H_{\text{理論}}$ (cm)	充填量高さ(cm)
200	11.655	0.725
210	10.106	2.274
235	7.063	5.317
250	5.659	6.721
270	4.138	8.242
290	2.921	9.459
300	2.402	9.978
320	1.506	10.874
350	0.438	11.942
360	0.140	12.24

表 - 7.18 鋼球径 11mm の装置の実際の充填率と理論充填率

テーブルフロー(mm)	200	200	210	210	235	250	250	270	290
11mm 実際(%)	68.95	45.94	79.15	56.75	83.47	92.28	86.46	79.16	86.19
11mm 理論(%)	1	1	3.38	3.38	18.05	23.02	23.02	31.86	42.43
テーブルフロー(mm)	300	300	320	350	360	365	395	410	420
11mm 実際(%)	98.60	78.97	81.23	90.80	93.47	98.60	74.94	95.59	90.11
11mm 理論(%)	42.48	42.48	51.30	81.1	93.02	100	100	100	100

図 - 7.38 に鋼球径 11mm の試験装置の充填率と理論充填率を示す。近似曲線に対数式とした場合、高い寄与率から相関性が認められる。ゆえに理論充填率に対数の係数を加えると精度が上がる可能性が考えられるため、対数式に理論充填率を代入して新たな理論充填率を導いた。新たな理論充填率を表 - 7.19 に示す。

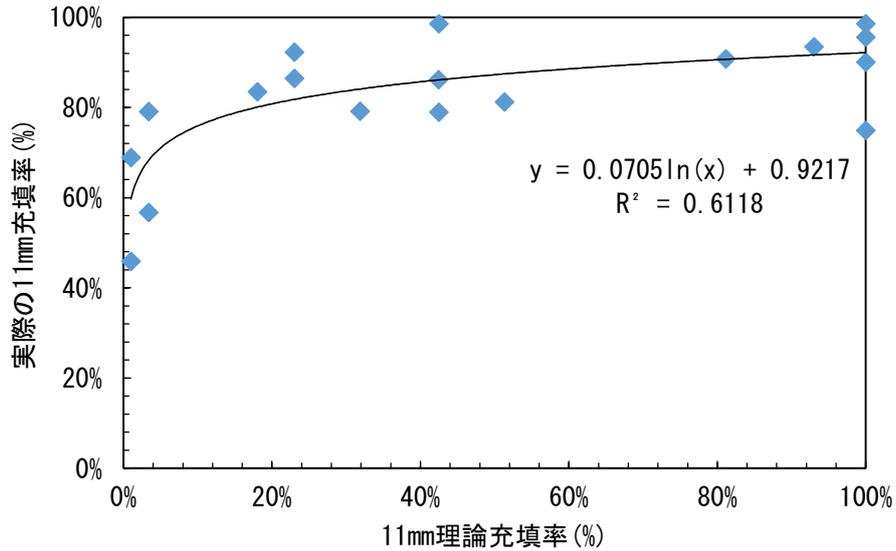


図 - 7.38 鋼球径 11mm の試験装置の充填率と理論充填率

表 - 7.19 鋼球径 11mm の新しい理論充填率

テーブルフロー(mm)	200	200	210	210	235	250	250	270	290
11mm 実際(%)	68.95	45.94	79.15	56.75	83.47	92.28	86.46	79.16	86.19
11mm 理論(%)	1	1	3.38	3.38	18.05	23.02	23.02	31.86	42.43
11mm 新理論(%)	59.70	59.70	68.29	68.29	80.10	81.81	81.81	84.11	86.13
テーブルフロー(mm)	300	300	320	350	360	365	395	410	420
11mm 実際(%)	98.60	78.97	81.23	90.80	93.47	98.60	74.94	95.59	90.11
11mm 理論(%)	42.48	42.48	51.30	81.1	93.02	100	100	100	100
11mm 新理論(%)	86.13	86.13	87.46	90.69	91.66	92.17	92.17	92.17	92.17

表 - 7.19 から鋼球径 11mm の理論充填率と実際の充填率の関係を図 - 39 に示す。図 - 37 から高い寄与率から相関性が認められる。

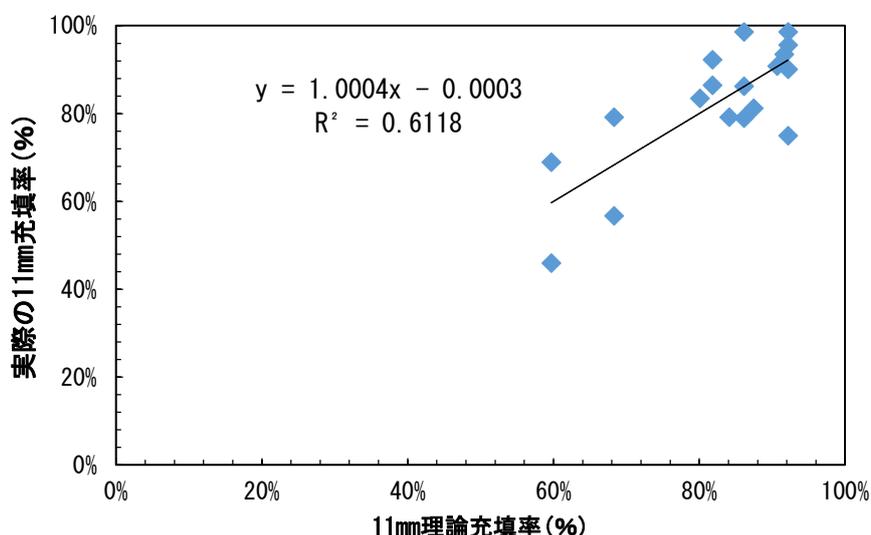


図 - 7.39 鋼球径 11mm の試験装置の充填率と新しい理論充填率

以上より、テーブルフロー値から導いた理論充填率から試験装置の充填率を概ね表せることがわかった。また図 - 7.40 に理論充填率とポーラスアスファルト母体の充填率を示す。図 - 7.40 の高い寄与率から理論充填率とポーラスアスファルト母体の充填率には相関性が認められる。ゆえにテーブルフロー値から導いた試験装置の理論充填率は、実際のポーラスアスファルト母体の充填率を反映しているとともに、試験装置の充填率が実際のポーラスアスファルト母体の充填率を反映していると考えられる。

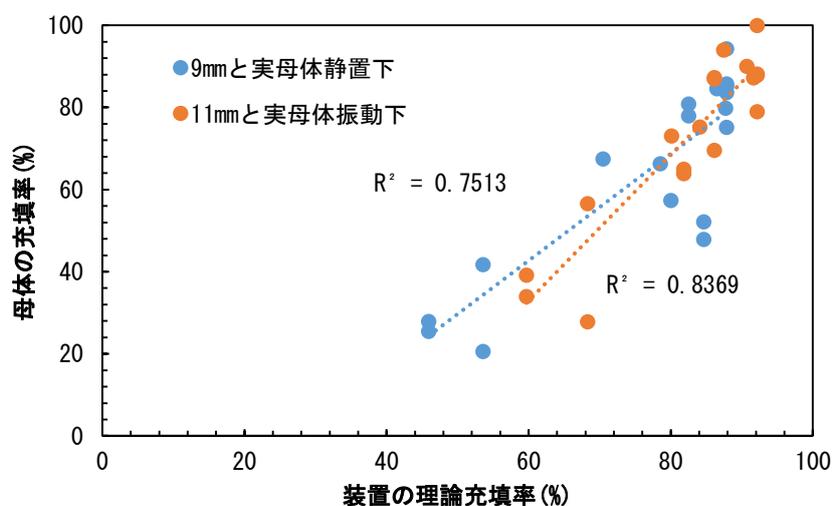


図 - 7.40 試験装置の理論充填率とポーラスアスファルト母体充填率

7.4 まとめ

- 1) 球径 6mm と 11mm の鋼球体を正三角錐容器に詰め、六方細密充填とした新たな充填性の確認を行う試験装置を考案した。この装置の充填性と各種流動性試験や実際のポーラスアスファルト母体の充填性から検討した結果、従来用いられている P 漏斗による流下時間では、鋼球径 6mm と 11mm の装置の充填性を判断するのは難しく、内径 50mm×高さ 100mm の円柱コーンによるテーブルフロー値の方がよりの確に判断できる。鋼球径 6mm と 11mm の装置は、実際のポーラスアスファルト母体の充填率との相関性が認められ、充填性の評価が可能である。なかでも鋼球径 6mm の装置は、静置下における実際のポーラスアスファルト母体の充填性を評価し、鋼球径 11mm の装置は、振動下における実際のポーラスアスファルト母体の充填性を評価していることが分かった。また、今回の実験範囲内ではあるが、静置下における実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率 70%以上を得るには、鋼球径 6mm の装置において 40%以上、振動下における実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率 80%以上を得るには、鋼球径 11mm の装置において 80%以上の充填率であれば十分な充填性を示すものと推察される。
- 2) P 漏斗の流下時間とテーブルフロー値から実験用に充填材を作成し、鋼球径 9mm と 11mm の試験装置や実際のポーラスアスファルト母体の充填性を評価した結果、同様に塑性粘度が支配的となる P 漏斗の流下時間より降伏値が支配的となるテーブルフロー値による流動性評価が、実際のポーラスアスファルト母体への充填性を的確に評価していた。また、今回作成した充填材においてもテーブルフロー値が静置下において 340mm 以上、振動下において 300mm 以上とした範囲は、概ね信頼できると考えられる。静置下と振動下における実際のポーラスアスファルト母体の充填率と、鋼球径 9mm と 11mm の試験装置の充填率は、高い寄与率から相関性が認められ、鋼球径 9mm と 11mm の試験装置が実際のポーラスアスファルト母体の充填率を反映している。
- 3) 充填材の試験装置への充填率は、テーブルフロー値から導けることが可能であると考え、充填率の理論式の検討を行った。 $\Delta H_{\text{理論}}$ から理論充填率を実際の充填率に近似して導くには、導き出した理論充填率にテーブルフロー値 360mm の理論充填率を 100%とした考えを加え、鋼球径 9mm では $\Delta H_{\text{理論}} = 1666.01/A^2$ 、鋼球径 11mm では、 $\Delta H_{\text{理論}} = 1665.48/A^2$ とし、対数近似式において実際の充填率と相関性が認められることから、この対数近似式で最終的な理論充填率を導くことができる。ゆえに、降伏値が支配的となるテーブルフロー値から式と係数により理論充填率を導くことで、実際の試験装置への充填率を判断することができ、最終的には実際のポーラスアスファルト混合物への充填率も概ね判断することが可能であり、鋼球径 9mm と 11mm の試験装置が実際のポーラスアスファルト母体の充填率を反映している。

第7章の参考文献

- 1) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社:2-4-3 半たわみ性混合物, 2-4 混合物の諸基準, 2 半たわみ性舗装・設計施工マニュアル, 設計要領 第一集 舗装, pp 参 2 - 6(2017.7)
- 2) 秩父コンクリート工業株式会社: カラースタッフ, カタログ
- 3) 住友大阪セメント株式会社: ニューファンコート, カタログ
- 4) 大林道路株式会社: ハイシールパウダー, カタログ
- 5) 実教出版株式会社: 17 金属の結晶構造, 増補新訂版サイエンスビュー科学総合資料, pp52-53(2015.2.28)
- 6) 化学大辞典編集委員会: 六方格子 六方細密パッキング 六方晶系 六方詰込構造, 化学大辞典 9, 共立出版株式会社, pp982-983
- 7) F.A コットンほか: 陰イオンの密なパッキングをもった構造, 無機化学(上), 株式会社培風館, pp45-46(1983.9.10)
- 8) 丸岡正知ほか: 高流動コンクリートの間げき通過時の圧力損失に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 1, pp. 959-964(2003)
- 9) 小門武ほか: スランプフロー試験によるフレッシュコンクリートの降伏値評価法の研究, 土木学会論文
- 10) (公社)土木学会: JSCE-F 521-2013 プレパックドコンクリートの注入モルタルの流動性試験方法(P 漏斗による方法), コンクリート標準示方書 基準編 土木学会基準および関連基準, pp278(2013)
- 11) (一社)日本建築学会: JASS 15 M-103, セルフレベリング材の品質基準 付録 付 3, 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 15 左官工事, 丸善株式会社, pp311-313(2007)
- 12) 八谷好高ほか: 半たわみ性材料を用いた空港アスファルト舗装の補修・補強, 国土技術政策総合研究所資料, No. 39, pp. 6-7(2002)

第 8 章 総括

本研究では

1. 目的や用途の多様化に伴い、研究・開発された新たな化学混和剤と各種の混和材料を組み合わせ、適切な配合組成を見出すことで、新たな性能を有するグラウトモルタルを開発し、その適用性を評価した。
2. 現在のフレッシュ性状の評価方法が充填性を適切に評価しているかについて、半たわみ性舗装に使用される充填材を用いてレオロジーに基づき検証を行い、適切な評価方法を提案した。
3. 充填される母体を模擬した簡易で繰り返し可能な試験装置をレオロジーに基づき考案し、検証を行うことで、試験装置の適用性を評価して、理論付けを行った。

第 1 章の序論では、モルタルにおける各種要求性能の多様化と、それに伴い関連する混和材料の開発状況より、現状のモルタルにおける問題点と研究の目的を示している。

第 2 章では、研究の背景とグラウトモルタルのフレッシュ性状に関する既往の研究について述べ、本研究の位置づけを示している。

第 3 章では、土木分野における多様化した要求性能から既存の技術では達成できない充填性を必要とする新たなプレミックス型グラウトモルタルの開発を行い、性能評価を行っている。

比較的大きな空間・空隙への充填では無収縮グラウト材に着目した場合は、「超速硬無収縮グラウト材」を開発している。これは、難しいとされていた超速硬セメントを使用した時の初期の無収縮性と風化の影響の最小限化を目標とし配合検討を行い、風化による性状変化と凝結遅延を起こさず安定した初期膨張性を有する超速硬無収縮グラウト材であることを実証し、日本下水道協会の「下水道用鋳鉄製マンホールふた」高さ調整部材及び無収縮流動性モルタルの規格を達成している。

空間・空隙の大きさや条件が不確定な地下空洞に着目した場合は、「起泡型軽量充填材料」と「水中不分離型軽量充填材」を開発している。起泡型軽量充填材料では、難しいとされていたプレミックス化による練り混ぜ時の起泡の安定化を目標とし配合検討を行い、安定した起泡力と起泡保持性を有し、地下空洞に充填可能な流動性を有する起泡型軽量充填材であることを実証している。「水中不分離型軽量充填材」では、コスト面と安定した単位容積質量の両立が難しく、練り混ぜ水を利用した軽量化と水中不分離を目標とし配合検討を行い、高水/試料比と水中不分離性、六価クロム無溶出を両立しノンブリーディング、無収縮性を有する水中不分離型軽量充填材であることを実証している。

極小空間・空隙への充填では、今までにはなかった特殊箇所の半たわみ性舗装に着目した場合、「高流動型半たわみ性舗装用充填材」、「高強度型半たわみ性舗装用充填材」、「急勾配型半たわみ性舗装用充填材」を開発している。

「高流動型半たわみ性舗装用充填材」では、低空隙である高機能舗装、舗装厚み 100mm、

無振動で充填可能な充填材を目標とし配合検討を行い、流動性を損なうことなく材料分離抵抗性を有する硬化時間が異なる 4 種類の高流動型充填材を開発し、舗装厚み 100mm の充填評価で適用可能を実証している。「高強度型半たわみ性舗装用充填材」では、コンテナヤード、埠頭、飛行場駐機場への半たわみ性舗装の適用を目標とし配合検討を行い、水/試料比の低減と分離抵抗性を両立させた充填可能な流動性を有する高強度型充填材を開発し、塑性変形試験で耐久性を実証している。「急勾配型半たわみ性舗装用充填材」では、勾配を有する箇所での充填可能な充填材を目標とし配合検討を行い、無振動での充填率が非常に低く、5 秒の振動付与で充填率が向上する急勾配型充填材を開発している。

第 4 章では、セメントを使用するモルタルやアスファルト舗装は環境に与える負荷が大きく低減が望まれている背景から、セメントを使用した舗装として一般的な半たわみ性舗装の環境負荷低減を検討し、3 種類の半たわみ性舗装用充填材の開発を行い、性能評価を行っている。セメントの CO₂ 原単位に着目した場合には、「低 CO₂ 型半たわみ性舗装用充填材」を開発している。セメントの CO₂ 原単位低減では、高炉スラグ等を利用した技術はあるが、半たわみ性舗装用充填材の開放時間の規格があり適用は難しく、充填材の CO₂ 原単位低減と硬化の促進を目標とし配合検討を行い、適切な充填性を有し、一般的な充填材と同等の開放時間が可能であり、CO₂ 原単位を 39.2~66.7%低減可能な低 CO₂ 充填材となっていることを実証している。資源循環に着目した場合には、「資源循環型半たわみ性舗装用充填材」を開発している。セメントは様々な資源循環技術を取り入れているが、その中でも都市ゴミの焼却灰を原料としたエコセメント化技術は高い資源循環率を有する。このエコセメントを使用した半たわみ性舗装用充填材は存在しないため、エコセメント特有の性質に合わせた配合検討を行い、適切な充填性を有し、一般的な充填材と同等の開放時間が可能であり、高炉スラグにより六価クロムの溶出がない、半たわみ性混合物として曲げ強度が規格値を達成する資源循環率 12.5~27.5%の資源循環型充填材となっていることを実証している。ヒートアイランド現象に着目した場合には、「保水性舗装用充填材」を開発している。保水性舗装に用いる充填材は存在しているが、低強度のためセメント中の重金属の溶出防止が難しく、重金属の無溶出化を目標とし配合検討を行い、安定した早期強度発現性を有し 3 時間で交通開放可能な、六価クロムの溶出がなく、保水性舗装として保水量、温度低減効果が規格値を達成する保水性舗装用充填材となっており、室内試験で温度低減効果を確認し、実路において路面温度の低減効果を確認した結果、充填材が保水性舗装用充填材となっていることを実証している。

前章から開発してきた各種グラウトモルタルは、セメントと混和材料の組み合わせから成り立っている。混和材料の中でも化学混和剤は、無機系混和材料の使用から生じる流動性低下等の不具合を補う重要な役割を果たしており、ポリカルボン酸系に代表される化学混和剤の進化・発展がそれを可能にしている。今後もさらに進化・発展するであろう化学混和剤を常に評価検討して、新たな要求性能に対応するグラウトモルタルの開発を行うことを課題とし、土木分野の発展に繋げていきたい。

第 5 章では、半たわみ性舗装の特殊箇所用に開発した充填材である「高流動型 1 時間開放タイプ」が実際の特異な現場状況に適用可能かを検討している。特殊箇所として伸縮装置前後 1 m の高機能舗装に着目して検討を行い、高機能舗装の空隙率 17%、混合物温度 80°C 領域において全浸透し、1 時間で交通解放可能な、橋梁部伸縮装置前後 1m 区間における高機能舗装用充填材となっていることを実証している。これは、舗装性能向上、作業効率向上、工期短縮が可能であることを意味している。

第 6 章では、半たわみ性舗装用充填の流動性評価と充填性評価について検討している。半たわみ性舗装において充填材の確実な充填は、性能を左右する重要な要因であり、流動性評価が充填性評価となっているかを検証する必要がある。検討では、各種流動性評価方法と実際のポーラスアスファルト母体を用いて、半たわみ性舗装用充填材の充填性を評価している。半たわみ性舗装用充填材の流動性評価方法は、NEXCO 等により規格化され、P 漏斗の流下時間により判断している。しかし、P 漏斗の流下時間による流動性評価が実際の母体への充填性の評価となっているのか検討し妥当性を検証した結果、P 漏斗をはじめ各種漏斗による流下時間で充填性を判断するのは難しいことを実証し、的確に充填性が評価できる他の流動性評価性状試験方法について検討した結果、テーブルフロー値がよりの確に判断できることを実証した。また、充填性を向上させる手段として水/粉体比の増加による流動性の向上よりも、粉体構成において高性能 AE 減水剤の添加が、より効果的に働くことを実証した。これは、半たわみ性舗装用充填材をビンガム流体として考え、実際のポーラスアスファルト母体の空隙を仮想細管とした場合、流動圧力と充填材の降伏値で決まる栓流半径が、仮想細管の管径を上回った場合に流動が止まり、それ以上の充填が行われなくなり、充填性に影響を与える要因は降伏値となるため、充填性を管理する試験方法は、降伏値が支配的となるテーブルフロー試験の方が、塑性粘度が支配的となる P 漏斗試験よりも妥当性が高いと考えられる。また、実際のポーラスアスファルト母体への充填を静置下と振動下で行い、今回の実験範囲内ではあるが、静置下であればテーブルフロー値 340mm 以上、振動下であればテーブルフロー値 300mm 以上で十分な充填性を示すものと推察される。実際の現場における充填不良を低減させるためにも、データ数を増やし、テーブルフロー値の明確な範囲を示すことや低空隙率での確認が今後の課題である。

第 7 章では、半たわみ性舗装用充填材の充填性の評価に使用する実際のポーラスアスファルト母体を模擬した試験装置を提案し検討を行っている。実際のポーラスアスファルト母体は、作成が難しく、均一がなく、繰り返しの使用が難しいため、簡易的な繰り返しの使用が可能な新たな試験装置が望まれている。そのため、球径 6mm と 11mm の鋼球体を正三角錐容器に詰め、六方細密充填とした新たな充填性の確認を行う試験装置を考案した。この装置の充填性と各種流動性試験や実際のポーラスアスファルト母体の充填性から検討した結果、従来用いられている P 漏斗による流下時間では、鋼球径 6mm と 11mm の装置の充填性を判断するのは難しく、内径 50mm×高さ 100mm の円柱コーンによるテーブルフロー値の方がよりの確に判断できることを実証し、鋼球径 6mm と 11mm の装置は、実際の

ポーラスアスファルト母体の充填率との相関性が認められ、充填性の評価が可能であることを実証した。なかでも鋼球径 6mm の装置は、静置下における実際のポーラスアスファルト母体の充填性を評価し、鋼球径 11mm の装置は、振動下における実際のポーラスアスファルト母体の充填性を評価していることが分かった。今回の実験範囲内ではあるが、静置下における実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率 70%以上を得るには、鋼球径 6mm の装置において 40%以上、振動下における実際のポーラスアスファルト母体の目標充填率 80%以上を得るには、鋼球径 11mm の装置において 80%以上の充填率であれば十分な充填性を示すものと推察される。課題として導き出したテーブルフロー値と装置の充填率の回帰式では、テーブルフロー値が 380mm 付近以上であった場合、充填率を出すことができない。そのため、高機能舗装や舗装厚み 100mm に対応した特殊箇所用の充填材の充填率評価はできない。よって、今後は、データの蓄積を行い、導きだした値の信頼性を向上させるとともに、最適な試験装置の確立を行っていききたい。

また、P 漏斗の流下時間とテーブルフロー値から実験用に全く異なる充填材を作成し、鋼球径 9mm と 11mm の試験装置や実際のポーラスアスファルト母体の充填性を評価した結果、同様に塑性粘度が支配的となる P 漏斗の流下時間より降伏値が支配的となるテーブルフロー値による流動性評価が、実際のポーラスアスファルト母体への充填性を的確に評価していることを実証した。静置下と振動下における実際のポーラスアスファルト母体の充填率と、鋼球径 9mm と 11mm の試験装置の充填率は、高い寄与率から相関性が認められ、鋼球径 9mm と 11mm の試験装置が実際のポーラスアスファルト母体の充填率を反映していることを実証した。さらに高い相関性を導くためにも、試験装置の改良を行い、最適な球径や形状を検討していく必要がある。

充填率の理論式の検討では、充填材の試験装置への充填率は、降伏値に依存するためテーブルフロー値から導けることが可能であると考え検討を行った。 $\Delta H_{\text{理論}}$ から理論充填率を実際の充填率に近似して導くには、導き出した理論充填率にテーブルフロー値 360mm の理論充填率を 100%とした考えを加え、鋼球径 9mm では $\Delta H_{\text{理論}}=1666.01/A^2$ 、鋼球径 11mm では、 $\Delta H_{\text{理論}}=1665.48/A^2$ とし、対数近似式において実際の充填率と相関性が認められることから、この対数近似式をさらに加えて最終的な理論充填率を導くことができる。ゆえに、降伏値が支配的となるテーブルフロー値から式と係数により理論充填率を導くことで、実際の試験装置への充填率を判断することができ、最終的には実際のポーラスアスファルト混合物への充填率も概ね判断することが可能であり、鋼球径 9mm と 11mm の試験装置が実際のポーラスアスファルト母体の充填率を反映していることを理論づけた。今後は、この理論を実際の現場に適用できるように正確性を向上させ、充填性の評価方法として充填材の開発や評価に貢献していききたい。

謝辞

本稿を終わるにあたり、本研究に終始懇切なご指導ご鞭撻を賜りました宇都宮大学 大学院工学研究科 藤原浩巳教授に心より感謝申し上げます。

また、本研究の遂行にあたり、厚意あるご指導、ご教示を賜りました宇都宮大学 中島章典教授、丸岡正知准教授に深謝いたします。

本稿の審査では、宇都宮大学 池田裕一教授、山岡暁教授よりご指導、ご助言を頂きまして心よりお礼申し上げます。

首都大学東京 國分勝郎名誉教授には、宇都宮大学 藤原浩巳教授をご紹介して下さるとともに、貴重なご助言、ご指導を賜りましたことを深く感謝申し上げます。

本研究における実験の協力からデータ分析など多方面よりご尽力を頂きました宇都宮大学 工学部 青木達也技官をはじめ材料研究室のみなさま、一人一人のお名前を挙げる事ができませんが、それぞれの立場から様々な形でお力添えを頂きまして、ありがとうございます。

勤務先である秩父コンクリート工業（株）山口博司社長、久保業常務をはじめ経営に携わるみなさまには、勤務と学問の両立に多大なるご理解とご配慮を頂きました。また、遠山雅一顧問、柴崎文雄顧問には、宇都宮大学大学院博士後期課程に入学の機会を与えて下さるとともに、ご尽力を頂きました。ここに謹んで感謝申し上げます。

中原大磯所長、徳光克也氏、梶谷明宏氏、弓木宏之氏をはじめ日本道路（株）技術研究所のみなさま、鈴木徹氏をはじめ大林道路（株）エンジニアリング部のみなさま、東本崇氏をはじめ同社技術研究所のみなさま、長島鋳物（株）技術部 井上崇顧問、阿部裕所長をはじめ同社仙台営業所のみなさま、太平洋セメント（株）セメント事業本部 営業部 福田康昭氏には、試験体作成、試験の相談から実施、現場施工に至るまで、日頃より有益なご助言とご協力を頂き感謝の意を表します。

本研究実験遂行にあたり（株）ADEKA、BASF ジャパン（株）、（株）花王、信越化学工業（株）、ライオン・スペシャリティ・ケミカルズ（株）社をはじめ混和材料メーカーには、浅識非才な著者の意見を聞いていただき、化学混和剤の開発・改良や細やかなご助言、様々な材料のご提供を頂きました。ここに謝意を表します。

秩父コンクリート工業（株）秋元文敏営業本部長をはじめ営業本部のみなさま、松村武文生産・技術本部長をはじめ生産・技術本部のみなさまには、多大なるご配慮とご理解を頂きました。また、同社技術開発部のみなさまには、日々多忙な中、本研究実験のご協力を頂きました。本研究遂行にあたり、ご助力を頂きました同社全ての方達にお礼を申し上げます。

最後に、私事ではありますが温かく見守り、励ましてくれた家族、親戚、友人に心から感謝します。ありがとう。