

論文 半たわみ性舗装に使用するセメントミルクの充填性に関する研究

清水 進*¹・藤原 浩巳*²・丸岡 正知*³

要旨：ポーラスアスファルト合材の空隙にセメントミルクを充填した半たわみ性舗装は、セメントミルクの確実な充填が必要となる。充填性は P 漏斗による流下時間で判断されるが、この評価方法は本質的に粘性の評価であり、充填性に関する適正な評価方法とは言えないと考えられる。本研究では、P 漏斗以外の充填性に関する評価方法を検討した。また、ポーラスアスファルト合材を模擬した装置を試作し、実際の合材と装置に粘度レベルの違うセメントミルクを充填し比較検討を行った。その結果、半たわみ性舗装におけるセメントミルクの充填性を模擬装置である程度評価できることを確認した。

キーワード：半たわみ性舗装、セメントミルク、P 漏斗、充填性、模擬充填性試験装置

1. はじめに

半たわみ性舗装は空隙率 20～25%のポーラスアスファルト合材に浸透用セメントミルクを充填させたものである。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。構成は、追従性やたわみ性を有するアスファルト合材と剛性を有するセメントミルクからなっており、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に、アスファルト舗装よりも剛性の高い舗装を製造する事が可能となる¹⁾。断面状態を写真-1 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。

現在、半たわみ性舗装に使用されるセメントミルクの性能規格で、日本の各機関によるものを表-1 に示す。

表-1 中の流動性は「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、各機関で最適な流下時間の範囲を決めている。P 漏斗を写真-2、その寸法を図-1 に示す。

しかしながら、実施工においては、P 漏斗の流下時間が 10 秒以下のセメントミルクであっても母体であるポーラスアスファルト合材に十分充填しない場合や、14 秒以上であっても十分充填する場合も見られている。特に高強度タイプのもので、低い水粉体比で練り混ぜられるものにおいては、P 漏斗の流下時間が 20 秒以上となっても十分な充填性を示す事例が認められる。そのため、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評価となっているのか検討し妥当性の検証を行った。さらに、よりの確に充填性が評価できる他の流動性評価方法について検討を行った。

また、充填性については実際のポーラスアスファルト合材で実母体を作成し、これにセメントミルクを流し込み、充填率で評価する方法がとられている。しかし、試験体の作成方法が統一しておらず、空隙率等によらずとも多く、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、再利用が可能な試験方法を考案し、その評価を行った。

表-1 半たわみ性舗装用セメントミルクの規格値

機関名	NEXCO			国土交通省			東京都		
	設計要領	第一集	舗装編 ²⁾	舗装施工便覧 ³⁾			東京都土木材料仕様書 ⁴⁾		
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	7 日			7 日			28 日	7 日	3 日
曲げ強度	規格無し			2.0 N/mm ² 以上			4.0 N/mm ² 以上		
圧縮強度	15.0～36.0 N/mm ²			9.8～29.4 N/mm ²			規格無し		

*1 秩父コンクリート工業（株） 技術開発部 （正会員）

*2 宇都宮大学教授 大学院 工学研究科 地球環境デザイン学専攻 工博 （正会員）

*3 宇都宮大学准教授 大学院 工学研究科 地球環境デザイン学専攻 工博 （正会員）

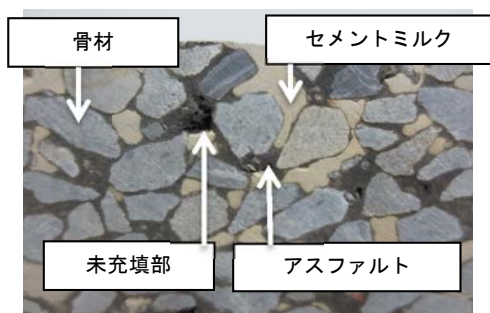


写真-1 断面の状態

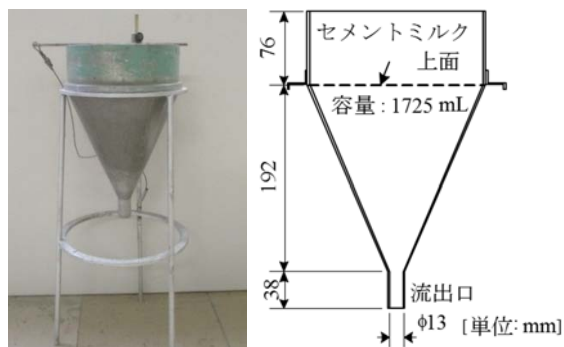


写真-2 P漏斗

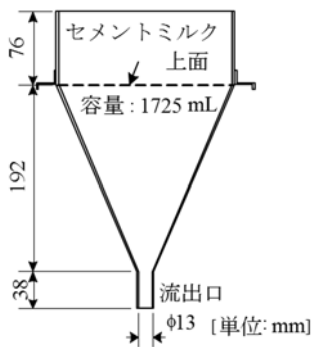


図-1 P漏斗の寸法

2. 試験概要

2.1 P漏斗の流下時間と充填性の関係確認実験

(1) 実験概要

日本で市販されている、汎用型普通硬化タイプを2種類と、水粉体比が低く、高い強度設定の高強度型普通硬化タイプの3種類のセメントミルクを用いて、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実母体への充填性の関係を調べた。

表-2 に、実験で使用したセメントミルク用粉体の構成を示す。汎用型は減水剤無添加の粉体 No.1 で水粉体比を 42, 46, 50, 54%に変化させた4配合と、減水剤 0.06% 添加の粉体 No.2 で水粉体比を 46%とした1配合の合計5配合のセメントミルクを用いた。高強度型は粉体 No.3 で、水粉体比を 18~24%の範囲で、1%刻みで変えた7配合のセメントミルクを用いた。

練混ぜは粉体 5 kgと練り混ぜ水を高速ハンドミキサー (1300rpm) で2分間行った。

実施した流動性評価方法を以下に示す。

- 1) 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⁵⁾。
- 2) テーブルフロー値：JASS 15 M-103 に準拠。内径 50mm、高さ 100mm の円柱コーンにセメントミルクを充填し、円柱を引き上げ横の広がり測定する⁶⁾。
- 3) B型粘度計による粘度：JIS Z 8803 に準拠。試料を 1000mL ビーカーに 500mL 採取し粘度を測定する⁷⁾。

実母体への充填は写真-3 に示す、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合材を用いて、下面と側面を漏出しないようシールし、上面からセメントミルクを流し込み、重量変化により充填率を求めた。

一般的な施工は振動ローラーによる振動を必要とするが、大面積施工の場合、全てに均一な振動の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、実母体の上全面からセメントミルク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）で余剰なセメントミルク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セメントミルクを散布していき、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。

また、実母体の空隙にはセメントミルクが浸透可能な連続空隙と、浸透が不可能な独立空隙が存在するため、実質的に 100%の完全充填は不可能である。ゆえに、半たわみ性舗装の性能を有するために必要なセメントミルクの充填率を考慮し、静置下では 70%以上、振動下では 80%以上を目標値とした⁸⁾。



写真-3 実母体

表-2 セメントミルク用粉体の成分構成

粉体 No.	普通ポルトランドセメント	無機混和剤	超微粒子無機混和材	炭酸カルシウム	珪砂	有機混和剤	減水剤
粉体 No.1	54.7	10.0	0	32.8	0	2.6	0
粉体 No.2	54.7	10.0	0	32.74	0	2.6	0.06
粉体 No.3	49.8	0	10.0	0	39.8	0.3	0.2

[単位：weight%]

(2) 試験結果

表－3、4 に P 漏斗の流下時間、テーブルフロー値、粘度および充填率の測定結果、図－2 に P 漏斗の流下時間と粘度の関係を示す。これらの結果より、同一粉体配合では、水粉体比が高くなるに従いテーブルフロー値は大きくなり、P 漏斗の流下時間は短く、粘度は低くなることが分かる。P 漏斗の流下時間は粘度の代用特性となり得るものであるため、P 漏斗の流下時間と粘度には図－2 から分かるように相関性が認められる。

また、本実験では配合 No.1～5 の汎用型では 5 配合とも P 漏斗の流下時間の規格は満足したが、テーブルフロー値は 251～356mm と大きな差が出た。実母体への充填率は特に静置下の充填率に大きな差があり、配合 No.1, 2, 3 の 3 配合においては P 漏斗の流下時間の規格を満足していても静置下における充填率は目標値を満足しなかった。さらに配合 No.1 では、振動下においても充填率は目標値を満足しなかった。

配合 No.6～12 の高強度型では、P 漏斗の流下時間は配合 No.12 以外は全て上限値の 14 秒を超えているが、水粉体比 20%以上の条件ではほぼ目標とする充填率を達成している。特に、配合 No.8 の水粉体比 20%では、P 漏斗の流下時間が 26 秒と各機関の規格値の 13 から 14 秒を大きく超えているが、実母体に注入した際の充填率は静置下で 69.0%と目標に近い値を示し、振動下においては目標値を十分に満足する 82.8%の充填率を示した。また、配合 No.7 の水粉体比 19%においては P 漏斗の流下時間 33

秒と、更に規格値から逸脱するものの振動下では 77.3%の充填率であり、目標値に近い充填性を示した。

図－3 に P 漏斗の流下時間と充填率の関係、図－4 にテーブルフロー値と充填率の関係を示す。汎用型と高強度型を同時に比較した場合には、図－3 から P 漏斗の流下時間と充填率の関係は、低い寄与率となり相関性は認められなかった。

以上の事より、P 漏斗の流下時間は充填性の的確な評価とは言えない可能性が示された。

一方、図－4 からテーブルフロー値と充填率の関係は、高い寄与率となり相関性が認められた。

一般に、セメントミルクはレオロジー的にはビンガム流体にモデル化され、この場合、流体は降伏値と塑性粘度のレオロジー定数を有する。これらのうち、塑性粘度の評価は各種の漏斗試験で行われるのが一般的である。P 漏斗の流下時間は高い相関性からも、塑性粘度を評価する試験方法である。

ポーラスアスファルト合材への充填性は、セメントミルクの自重によって内部の空隙に浸透できるかどうかにより決まるものであり、それを決めるものは塑性粘度ではなく、降伏値と考えられる。そのため、充填性の評価としては P 漏斗の流下時間よりも、降伏値を反映すると考えられるテーブルフロー値の方がより適しているものと考えられる⁹⁾。図－4 および表－3、4 より今回の実験範囲内ではあるが、テーブルフロー値 340mm 以上で十分な充填性を示すものと推測される。

表－3 汎用型セメントミルクの流動性評価試験結果と実母体充填率

配合 No.	1	2	3	4	5	
粉体 No.	1				2	
水粉体比 (%)	42	46	50	54	46	
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	
粘度 (m Pa・s.)	3125	2538	1725	1342	1740	
実母体 充填率 (%)	静置下	10.8	35.0	54.1	69.9	73.9
	振動下	45.2	81.2	88.2	93.0	98.4

表－4 高強度型セメントミルクの流動性評価試験結果と実母体充填率

配合 No.		6	7	8	9	10	11	12
粉体 No.		3						
水粉体比 (%)		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
粘度 (m Pa・s.)		16700	7675	5038	2250	1798	1075	765
実母体 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

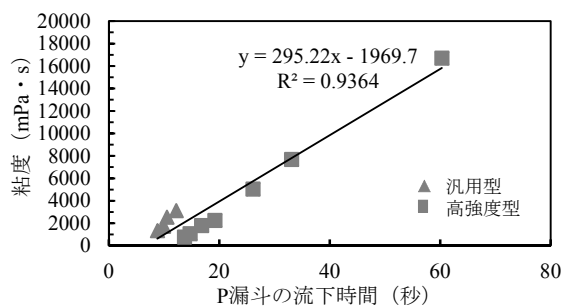


図-2 P漏斗の流下時間と粘度

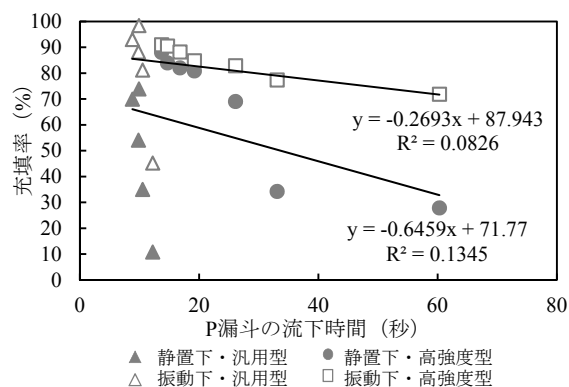


図-3 P漏斗の流下時間と充填率

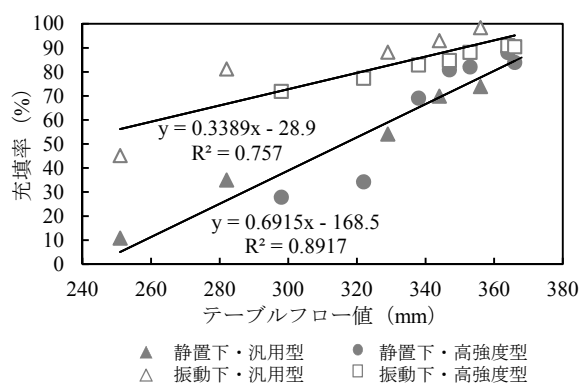


図-4 テーブルフロー値と充填率



写真-4 試験装置

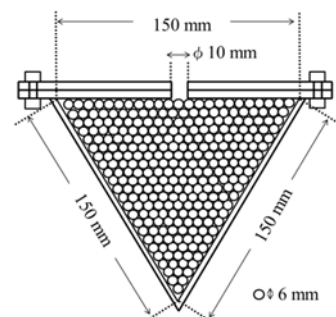


図-5 鋼球径 6mm試験装置 (側面)

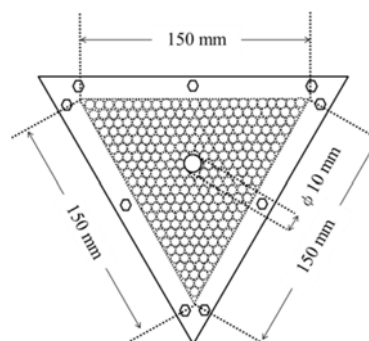


図-6 鋼球径 6mm試験装置 (上面)

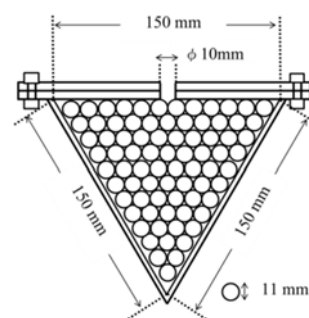


図-7 鋼球径 11mm試験装置 (側面)

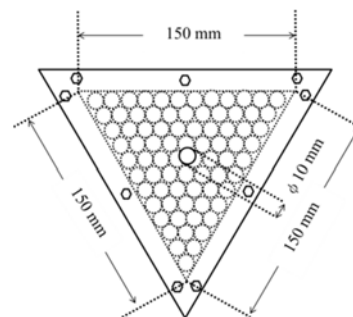


図-8 鋼球径 11mm試験装置 (上面)

2.2 新しい充填性確認試験方法の検討実験

(1) 実験概要

充填性の確認は実母体への充填試験で可能である。しかし、実際には実母体への注入は1枚に対して1回しか試験を行えないため、その都度作成する必要がある。また、母体間での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、写真-4に示す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して下記の試験装置を考案した。試験装置は上面が取り外し可能な1辺約150mmの亚克力製正三角錐に直径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。

実験は上面中央に設けた内径 10mm の注入口からセメントミルクを徐々に注入し、注入量より充填率を求めた。
図-5, 6, 7, 8 に試験装置の寸法を示す。

この試験装置のように正三角錐に球体を詰めた際に、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。壁面の空隙率は、26% よりも高く母体との差が大きいため、上面中央に 10mm の注入口を設け、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。

前述のように、セメントミルク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、その流れは以下の式 (1) および図-9 で示される。

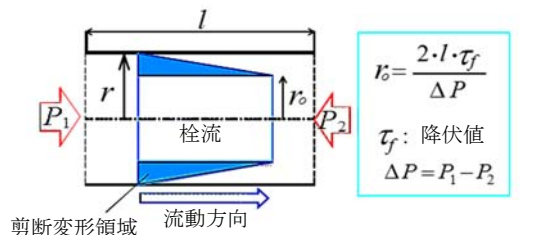
$$r_0 = \frac{2 \cdot l \cdot \tau_f}{\Delta P} \quad (1)$$


図-9 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。本研究においては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¹⁰⁾。つまり、この試験装置にセメントミルクを流し込んだ際、注入口の高さで与えられる流動圧力とセメントミルク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、セメントミルク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。

実験は配合 No.1~12 のセメントミルクを用いて、充填性確認試験（鋼球径 6mm および 11mm）を行った。

(2) 試験結果

表-5 に試験結果を示す。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、実母体充填率と試験装置充填率との相関性を判断するため、図-10 に P 漏斗の流下時間と試験装置充填率の関係、図-11 にテーブルフロー値と試験装置充填率の関係、図-12 に鋼球径 6mm 試験装置充填率と実母体充填率の関係、図-13 に鋼球径 11mm 試験装置充填率と実母体の充填率を示す。その結果、以下の事が分かった。

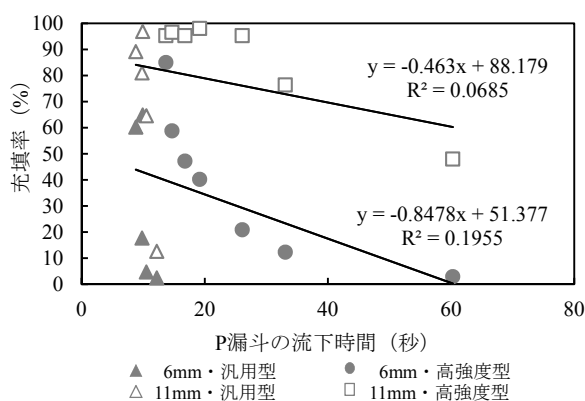


図-10 P 漏斗の流下時間と試験装置充填率

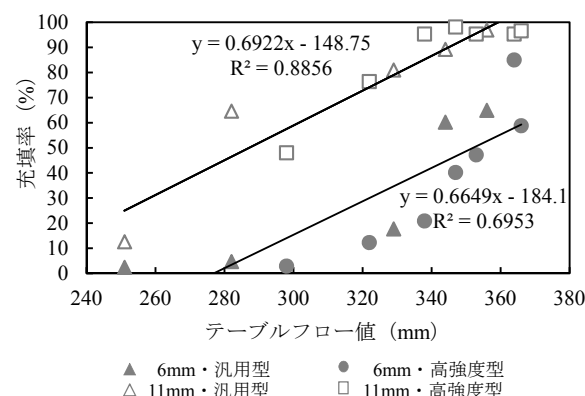


図-11 テーブルフロー値と試験装置充填率

表-5 汎用型・高強度型セメントミルクの試験装置充填率

配合 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
試験装置 鋼球径 6mm	2.4	4.7	17.7	60.2	64.9	2.9	12.3	20.9	40.2	47.2	58.8	85.0
充填率 (%) 鋼球径 11mm	12.6	64.6	81.0	89.2	96.9	48.0	76.4	95.3	98.1	95.3	98.6	95.3

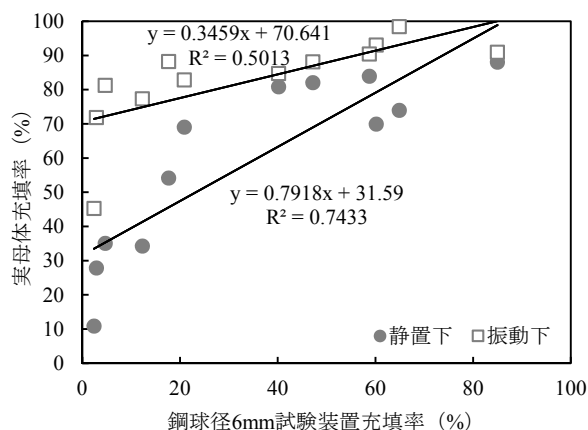


図-12 鋼球径 6mm試験装置充填率と実母体充填率

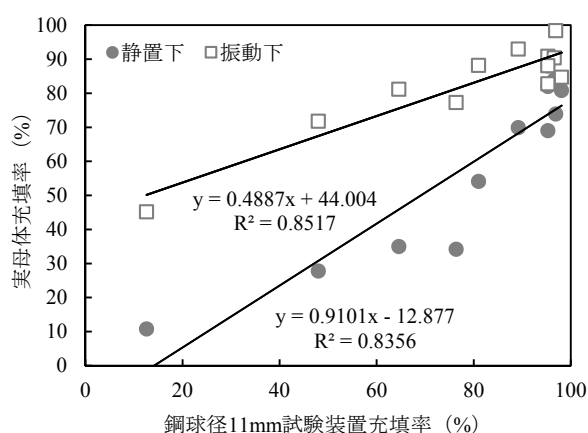


図-13 鋼球径 11mm試験装置充填率と実母体充填率

本試験においても、汎用型と高強度型を同時に比較した場合、図-10 から P 漏斗の流下時間と試験装置充填率の関係は、低い寄与率となり相関性は認められなかった。図-11 からテーブルフロー値と試験装置充填率の関係は、高い寄与率となり相関性が認められた。

また、図-12, 13 から試験装置充填率と実母体充填率にも高い相関性が認められ、特に鋼球径 11mm は静置下と振動下の両方ともに 0.8 以上の高い寄与率となった。ゆえに、鋼球径 11mm の条件で形成される空隙径が実母体の充填率を、より高く反映すると考えられる。

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が、全般に実母体充填率より小さめの値となった。

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、より適切な回帰式を含め、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。

3. 結論

半たわみ性舗装用セメントミルクの充填性を評価する方法について検討した。その結果、従来用いられている P 漏斗の流下時間では、母体であるポーラスアスファルト合材への充填性を的確に評価しているとは言えず、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評価できる可能性が高い事が分かった。

また、今回提案した充填性試験装置はポーラスアスファルト合材への充填性を評価できる可能性があることが分かったが、今後更なる検討を要する。

参考文献

- 1) 昆布谷竹郎：アスファルト舗装施工方法の変遷，土木学会論文集，第 384 号/V-7，1987.8
- 2) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本購読道路株式会社：半たわみ性舗装設計・施工マニュアル，設計要領 第一集 舗装編，参考資料，2015.7
- 3) 日本道路協会：9-4 半たわみ性舗装，舗装施工便覧，pp.202～205，2006
- 4) 東京都建設局：425 半たわみ性アスファルト混合物，土木材料仕様書，pp.420～423，2015
- 5) 土木学会：JSCE-F521-1999，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，2013
- 6) 日本建築学会：JASS 15 M-103，セルフレベリング材の品質基準，建築工事標準仕様書・同解説，JASS 15，左官工事，2007
- 7) 日本規格協会：JIS Z 8803，液体の粘度測定方法，2011
- 8) 八谷好高・坪川将丈・松崎和博・高橋修・阿部寛：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，pp.6～7，No.39，2002.6
- 9) 小門武・細田尚・宮川豊章・藤井学：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，PP.19～29，1997
- 10) 丸岡正知・石澤由・芦澤良一・藤原浩巳：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