

論文 舗装用スリップフォームコンクリートの施工性を考慮したフレッシュ性状評価に関する研究

佐藤 聡明*1・鎌田 修*2・坂本 康文*3

要旨: 本研究は、舗装用スリップフォームコンクリートのフレッシュ性状を評価するため、フレッシュ性状に要求される性能と評価方法の調査し、新たな試験方法として舗装用スリップフォームコンクリートの締固め性試験および変形抵抗性試験を考案した。考案した試験方法を用い、同一材料で単位水量、単位粗骨材容積を変化させた場合、異なる材料、配合の締固め性および変形抵抗性の確認を行った。また、試験結果と現場状況との整合性を検討することで、考案した試験の有効性を確認した。

キーワード: コンクリート舗装, スリップフォーム, フレッシュ性状, 締固め性試験, 変形抵抗性試験

1. はじめに

舗装に用いるスリップフォーム工法（以下、SFP工法）とは、敷きならし、締固め、成型、表面仕上げ等の機能を兼備したスリップフォームペーパーを使用し、型枠やレールを使用せずにコンクリートを連続的に打設する工法である。舗装用スリップフォームのコンクリートの打設状況を写真-1に示す。SFP工法は、セットフォーム工法に比べ、型枠やレールの設置および撤去作業が不要であること、施工機械が少なく作業工程が簡素化できること、それに伴い舗装に要する作業人員が削減できること、施工能力が大きいことなどの特長を有している。近年、労働者の不足や高齢化に伴う省力化、コスト縮減等が求められ、1990年代半ばから高速道路のコンポジット舗装の連続鉄筋コンクリート版の施工を中心に施工実績が増えている。

SFP工法に用いるコンクリート（以下、SFPC）は、打設時に十分な締固めを行い硬化後に目標強度を満足する性能を有していることは当然であるが、ペーパーが通り過ぎた直後から端部が自立し、その形状を維持することに優れた性能を有したものでなければならない。そのため、SFPCは、スリップフォームペーパーが比較的簡易な機械構造であり、型枠を用いずに打設する機械であるこ



写真-1 舗装用スリップフォームの打設状況

とを考慮すると、セットフォーム工法用コンクリートよりも厳密に管理する必要があり、施工時のフレッシュ性状（ワーカビリティ）が特に重要であるといえる。しかし、SFPCのフレッシュ性状を評価する試験方法は確立されておらず、要求される性能についても十分に把握できていない。

そこで、本研究では、SFPCのフレッシュ性状に要求される性能とその評価方法の調査、新たな試験方法の考案、同一材料で単位水量、単位粗骨材容積を変化させた場合、異なる材料、配合のフレッシュ性状の確認、現場状況との整合性を確認することで、考案した試験の有効性の検討を行った。

2. 既存試験方法の調査

施工の確実性を判定するためのコンクリートのフレッシュ性状を評価する試験方法は、近年、一般的なコンクリートを中心に研究されている。また、スリップフォーム用コンクリートを対象としたフレッシュ性状の評価は、全国生コンクリート工業組合連合会・全国生コンクリート協同組合連合会が「スリップフォーム工法用コンクリート製造マニュアル」（以下、全生マニュアル）でまとめているが、一般的な構造物を対象としたものであり、舗装用コンクリートは対象としていない¹⁾。また、現場では、熟練技術者が握った感触などからSFPCのフレッシュ性状を定性的に判断している。

日本コンクリート工学協会では、舗装以外の一般的なコンクリートを対象とした「施工の確実性を判定するためのコンクリートの試験方法とその適用性に関する研究報告書²⁾」（以下、JCI報告書）をまとめている。JCI報告書では、コンクリートはスランプが同程度であっても、配合によってレオロジー特性が異なることで、流動

*1 鹿島道路（株） 生産技術本部 技術研究所（正会員）

*2 鹿島道路（株） 生産技術本部 技術研究所 博(工)（正会員）

*3 鹿島道路（株） 生産技術本部 技術研究所（正会員）

性や分離抵抗性などのフレッシュ特性が異なるとし、またフレッシュ性状の違いにより充填しやすさや締固めやすさも異なることから、完成した構造体コンクリートの品質に差異が生じるとしている。このような観点から、締固めのしやすさを評価する試験や振動締固め時の間隙通過性・材料分離抵抗性を評価する試験などのスランブでは評価しきれないフレッシュ特性を評価するための試験方法をいくつか紹介している。その中で、スランブ 8cm と 18cm の標準的、高粘性および粗々しいコンクリートの配合に対し、9 種類の評価試験方法を実施し、それらの有効性を評価している。その結果、スランブ 18cm 程度の比較的軟らかいコンクリートにはバイブレータの加振による評価方法が、スランブ 8cm 程度の比較的硬いコンクリートにはタンピング等の衝撃による評価方法が、それぞれコンクリートの特性を評価するのに適しているとの結果が報告されている。

一方、全生マニュアルでは、一般構造物用スリップフォームコンクリートに要求されるフレッシュ時の性能として、「締固め性」、「変形抵抗性」、「脱型性」を挙げ、通常実施されているスランブ試験や空気量試験では評価することが困難であるとして、特殊な試験機を用いた評価法を提案している。

3. 新たな評価試験方法の開発

3.1 開発コンセプトおよび試験方法の考案

低スランブコンクリートにはタンピング等の衝撃による評価方法が適しているとの研究結果が得られている²⁾。また、全生マニュアルの評価試験機は、大型で持ち運びが困難なため現場での適用は難しい。これらを踏まえ、SFPC の評価試験方法は、持ち運び可能で、現場で実施可能な簡易な装置で、定量的評価が可能であることを基本コンセプトとして、タンピング等の衝撃による評価試験方法で開発を行った。考案した試験は、モルタルフロー試験で使用するフローテーブル、CBR モールドを用いた「SFPC の締固め性試験」（以下、締固め性試験）および「SFPC の変形抵抗性試験」（以下、変形抵抗性試験）である。なお、「脱型性」については今後の検討課題とした^{3), 4)}。

3.2 締固め性試験

本試験は、モルタルフロー試験に用いるフローテーブル、CBR 供試体作製用モールドおよびカラーを用いて、締固め特性を評価しようとするものである。写真-2 に示すように、現場測定の際に床面の支持力の影響で有意な差が発生しないようなコンクリート床版上あるいは十分な支持力を有した箇所に硬質ゴム（厚さ 5mm）および鉄板（500mm×500mm、厚さ 10mm）を敷き、その上にフローテーブルを設置する。モールドおよびカラー内

に所定量（φ150mm×175mm×コンクリートの単位容積質量）のコンクリートを投入し、ウェイト（厚さ 2mm、約 260 g）を載せ、0、5、10、20、40、60、80 回程度まで高さ 10mm の落下運動を繰り返す。各落下回数時のカラー天端からの下がりを測定することで、その落下回数時の密度を算出し、当該密度をコンクリートの単位容積質量で除した値を締固め度とし、落下回数と締固め度の関係から締固め性を評価した。

3.3 変形抵抗性試験

本試験は、写真-3 に示すように、締固め性試験後のモールドをフローテーブル上で静かに取り外した試験体を落下運動させ、落下回数（エネルギー）が増加した際の変形形状を逐次測定し、変形抵抗特性を評価しようとするものである。締固め度がほぼ 100%になっている試験体を、締固め性試験同様、0、5、10、20、30 回程度落下運動を繰り返す。各落下回数時の試験体の形状（最も膨らんだ箇所の変形量）を測定する。各落下回数時に測定した値のうち、図-1 に示すように各落下回数時の最大幅と落下前の幅の差を水平変位量とし、変形抵抗性を評価した。また、目視により供試体の崩壊する状況も確認することとした。



写真-2 締固め性試験



写真-3 変形抵抗性試験

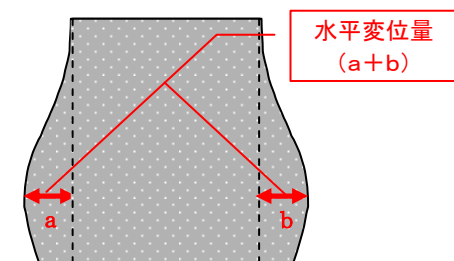


図-1 水平変位量の定義

4. 試験結果および考察

4.1 同一材料を用いた場合のフレッシュ性状の検討

同一材料を用い、水セメント比を一定として単位水量を増加させることでスランブを変化させた場合、同一材料でスランブ、空気量を同程度とし単位粗骨材容積（細骨材率）を変化させた場合、それぞれがフレッシュ性状に与える影響を確認した。

表-1 使用材料（配合1）

材 料	記号	物 性 等
水	W	水道水
セメント	C	高炉セメントB種、密度=3.04g/cm ³
砂	S	山砂、F.M.=2.54、表乾密度=2.58g/cm ³
粗骨材	G	石灰石碎石2005、表乾密度=2.70g/cm ³ 、実積率=62.0%
AE減水剤	Ad	標準型、リグニンスルホン酸塩

表-2 配合（スランブの変化）

W/C (%)	s/a (%)	単位粗骨材容積 (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)					練上り性状	
			W	C	S	G	Ad	スランブ (cm)	空気量 (%)
45.1	41.2	0.67	138	306	751	1121	C×1.0%	2.0	4.8
45.1	40.8	0.67	141	313	738	1121	C×1.0%	3.5	5.5
45.1	40.4	0.67	144	319	725	1121	C×1.0%	5.0	6.0
45.1	40.0	0.67	147	326	712	1121	C×1.0%	6.0	5.8
45.1	39.4	0.67	150	333	697	1121	C×1.0%	6.0	6.5
45.1	39.0	0.67	153	339	684	1121	C×1.0%	9.0	6.5

※単位量は空気量を5.5%として計算したもの。

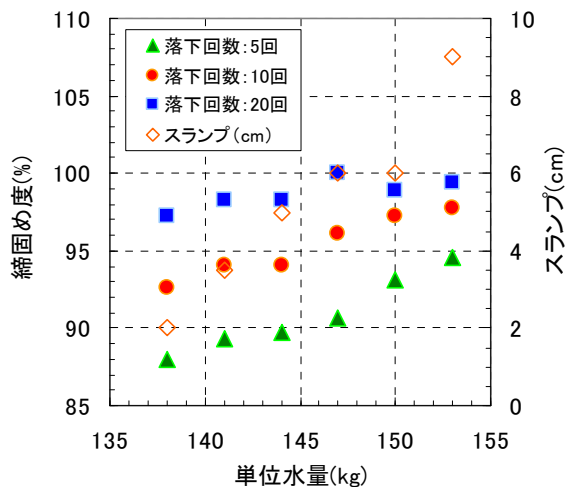


図-2 単位水量と締固め度・スランブの関係

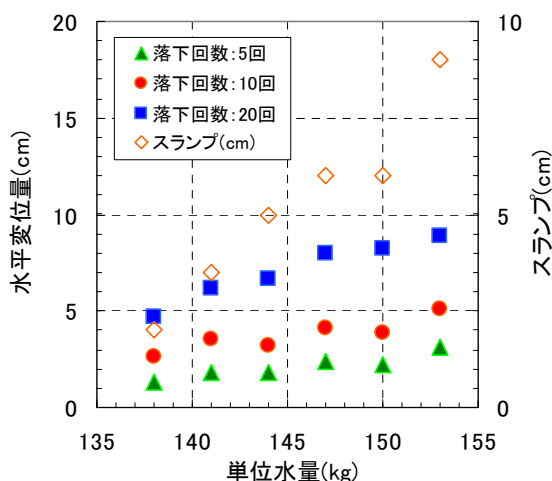


図-3 単位水量と水平変位量・スランブの関係

(1) 同一材料で単位水量を増加させることでスランブを変化させた場合

本検討に用いた材料を表-1に示す。表-2に示すように水セメント比および単位粗骨材量を一定とし、単位水量を増加させることでスランブを変化させ、練上り直後のコンクリートに対し、締固め性試験および変形抵抗性試験を実施した。なお、表-2には、練上り時のスランブ、空気量も示している。

締固め性試験および変形抵抗性試験の結果から、落下回数5回、10回、20回時の試験結果をまとめた。それらの落下回数時における単位水量と締固め度およびスランブの関係を図-2に、単位水量と水平変位量およびスランブの関係を図-3に示す。図-2、図-3より、同一材料で単位水量を増加させることでスランブを変化させた場合、締固め度および水平変位量はスランブの増加に伴い増加しており、相関関係があることがわかる。

(2) 同一材料でスランブ、空気量を同程度とし単位粗骨材容積（細骨材率）を変化させた場合

本検討に用いた材料を表-3に示す。表-4に示すように単位水量および単位セメント量を一定とし、単位粗骨材容積（細骨材率）を変化させ、上述の検討と同様に試験を実施した。なお、表-4には、練上り時のスランブ、空気量も示している。

締固め性試験および変形抵抗性試験の結果から、落下回数5回、10回、20回時の単位粗骨材容積と締固め度の関係を図-4に、単位粗骨材容積と水平変位量の関係を図-5に示す。図-4より、締固め度は各落下回数ともに単位粗骨材容積が0.7で最も大きくなる結果となった。一方、図-5より、水平変位量は、落下回数5回、10回時では単位粗骨材容積が変化しても同程度であるのに対し、単位粗骨材容積が0.75の落下回数20回では試験体が崩壊したため急激に増加する結果となった。

以上から、同一材料でスランブ、空気量を同程度とした場合、考案した試験によって最適なフレッシュ性状となる単位粗骨材容積（細骨材率）を見出せる可能性があることがわかった。

表-3 使用材料（配合2）

材 料	記号	物 性 等
水	W	水道水
セメント	C	高炉セメントB種、密度=3.04g/cm ³
砂	S	砕砂、F.M.=2.68、表乾密度=2.63g/cm ³
粗骨材	G	安山岩碎石2005、表乾密度=2.67g/cm ³ 、実積率=61.1%
AE減水剤	Ad	標準型、変形リグニンスルホン酸化合物とセルロースエーテルの複合体

表-4 配合（単位粗骨材容積の変化）

W/C (%)	s/a (%)	単位粗骨材容積 (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)					練上り性状	
			W	C	S	G	Ad	スランブ (cm)	空気量 (%)
47.9	47.7	0.60	147	307	876	978	C×1.5%	5.0	6.0
47.9	43.5	0.65	147	307	797	1053	C×1.5%	5.0	6.7
47.9	39.0	0.70	147	307	715	1134	C×1.5%	5.0	5.8
47.9	34.7	0.75	147	307	636	1215	C×1.5%	5.5	6.8

※単位量は空気量を5.5%として計算したもの。

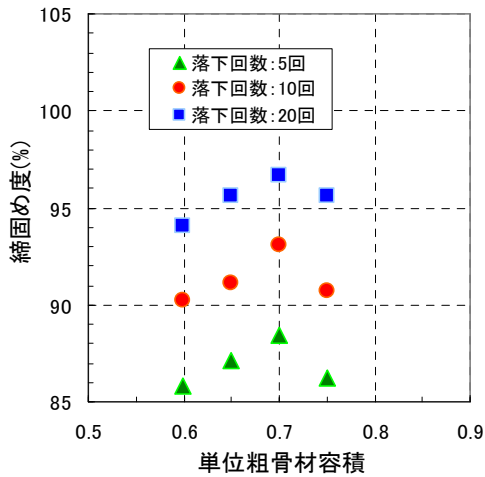


図-4 単位粗骨材容積と締固め度の関係

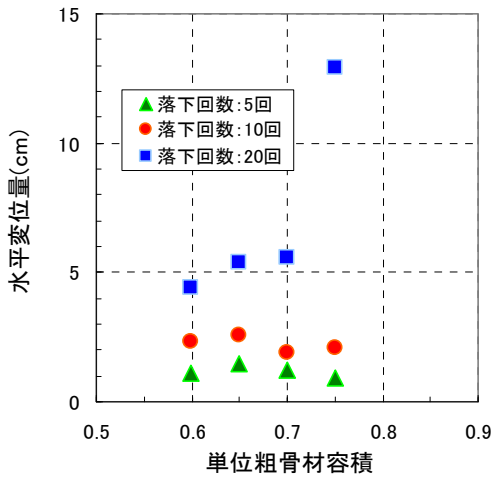


図-5 単位粗骨材容積と水平変位量の関係

4.2 異なる材料を用いた場合のフレッシュ性状の検討

異なる材料および配合を用いた場合のフレッシュ性状の検討に使用した材料を表-1, 表-3, 表-5 に, 配合を表-6 に示す。表中では表-2, 表-4 の網掛け部分の配合を, それぞれ配合 1, 配合 2 としている。なお, 表-6 に練上り時のスランプ, 空気量試験の結果を示す。実験は, 練上り直後のコンクリートに対し, 考案した試験を実施することで, 異なる材料および配合を用いた場合のフレッシュ性状を確認した。

(1) 締固め性試験

締固め性試験の結果を図-6 に示す。図-6 より, 締固め度は, いずれの配合も落下回数 20 回程度まで急激に締固め度が増加し, それ以降の締固め度の伸びは小さくなる傾向となった。落下回数 5 回, 10 回, 20 回時の締固め度に着目すると, 配合 1 の締固め度が最も大きく, 配合 2~5 は若干の差があるものの同程度の締固め度となっている。一方, 配合 3 は, 他の配合に比べスランプが大きいにも係わらず, 締固め度は概ね配合 2~5 と同

表-5 使用材料

材料名	記号	配合3	配合4	配合5
水	W	上澄水	地下水	地下水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度=3.15g/cm ³	高炉セメントB種, 密度=3.04g/cm ³	普通ポルトランドセメント, 密度=3.16g/cm ³
細骨材	S1	陸砂, F.M.=3.10 表乾密度=2.58g/cm ³	川砂, F.M.=2.43 表乾密度=2.62g/cm ³	海砂, F.M.=2.46 表乾密度=2.60g/cm ³
	S2	山砂, F.M.=2.00 表乾密度=2.58g/cm ³	—	砕砂, F.M.=3.21 表乾密度=2.64g/cm ³
粗骨材	G1	砂岩碎石2005, 実積率=60.1%, 表乾密度=2.63g/cm ³	輝石斑岩碎石2005, 実積率=59.3%, 表乾密度=2.63g/cm ³	石灰石碎石2005, 実積率=59.4%, 表乾密度=2.69g/cm ³
	G2	—	輝石斑岩碎石4020, 実積率=61.3%, 表乾密度=2.64g/cm ³	石灰石碎石4020, 実積率=58.5%, 表乾密度=2.71g/cm ³
A E 減水剤	Ad	標準型, リグニンスルホン酸塩とオキシカルボン酸塩	高機能型, リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体	標準型, リグニンスルホン酸塩とオキシカルボン酸塩

表-6 配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位粗骨材容積(m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)							練上り性状	
				W	C	S1	S2	G1	G2	Ad	スランプ(cm)	空気量(%)
1	45.1	40.0	0.67	147	326	712	—	1121	—	C×1.0%	6.0	5.8
2	47.9	47.7	0.60	147	307	876	—	978	—	C×1.5%	5.0	6.0
3	44.8	34.2	0.78	144	321	431	186	1242	—	C×0.2%	8.5	5.7
4	46.0	40.4	0.70	140	304	747	—	550	550	C×0.9%	6.0	6.5
5	40.0	35.8	0.74	132	330	396	264	610	610	C×1.0%	5.5	6.7

※単位量は空気量を5.5%として計算したもの。

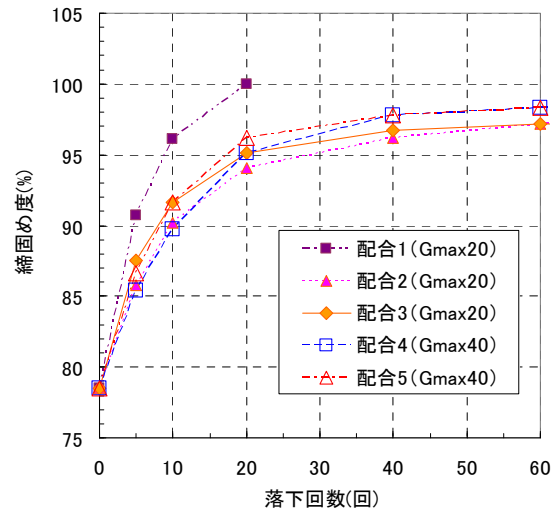


図-6 落下回数と締固め度の関係

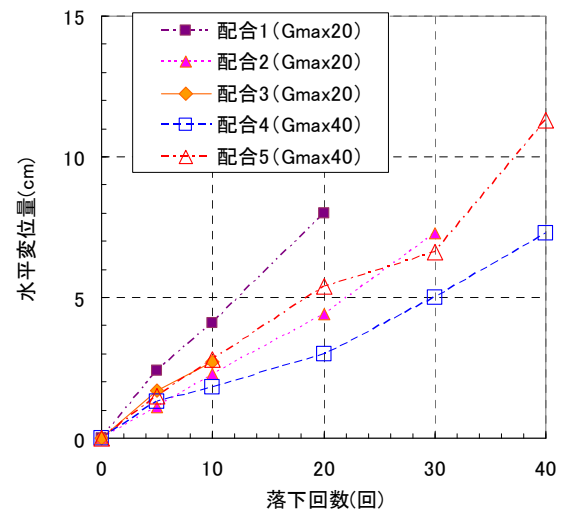


図-7 落下回数と水平変位量の関係

程度となっている。また、配合4および配合5は、骨材の最大寸法が40mmであるが、骨材の最大寸法が20mmの配合2および配合3と同程度の締固め度となっている。

以上から、スランプ試験では締固め性を十分に評価できないが、考案した試験を用いることにより評価することが可能であることがわかった。また、骨材の最大寸法の違いは締固め性に影響しないことがわかった。

(2) 変形抵抗性試験

変形抵抗性試験の結果を図-7に示す。落下回数と水平変位量の関係は、落下回数の増加に伴い水平変位量も増加する傾向となった。一定の落下回数を与えた場合、変形量が最も少ないものが変形抵抗性に優れた配合であると考えられる。締固め性試験と同様に落下回数5回、10回、20回時に着目すると、落下回数5回では同程度の水平変位量であるが、落下回数10回、20回では水平変位量に明らかな差異が生じており、配合5の水平変位量が最も小さく、配合1の水平変位量が最も大きくなっていることがわかる。また、骨材の最大寸法の違いによる水平変位量に傾向は見られなかった。なお、配合3は落下回数10~20回の間で頂部が崩壊したため20回時の値を記入していない。この原因として、他の配合に比べ、スランプや単位粗骨材容積が若干大きいこと(s/aが若干小さいこと)等で、少ない落下回数で材料分離が生じた可能性があるものと考えられる。

次に、試験時の試験体の状況を写真-4に示す。試験結果と同様、落下回数が増加するに従い、試験体に変形



写真-4 変形抵抗性試験時の状況

していくのがわかる。落下回数10回ではいずれの試験体も側面が膨らむような変形をしている。落下回数20回では、配合1および配合5は底部が広がるような形状であるのに対し、配合2は試験体中央にひび割れ、配合3は頂部が崩壊する変形、配合4は落下回数10回と同じような変形形状となっており、明らかな差が生じる結果となった。

以上から、締固め性試験結果と同様、考案した試験で変形抵抗性のある程度評価できることがわかった。また、目視においても、スランプや空気量が同程度であっても使用する材料や配合の違いにより差異が生じることが確認できた。なお、崩壊を起こす要因についても今後検討を進めたい。

5. 現場状況との整合性

4章で示した結果は練上り直後のものであるが、以下に示す現場では目標スランプおよび目標空気量が練上り直後に概ね6.0cm、6.0%、打設時に3.5cm、5.5%であるため、現場の施工状況への影響も比較して考察できるものと考え、試験結果と現場状況の整合性を検討した。

写真-5は、配合1を用いた連続鉄筋コンクリート舗装(打設厚21cm)の現場である。打設時のスランプは測定した52データの平均が3.7cm、標準偏差0.69cmであったが、モールドの通過後に端部(肩)が下がるエッジスランプの発生が度々見られ、写真に示すような当て木による対処が必要な箇所があった。図-6、7の室内試験結果より、配合1は締固めやすく、変形しやすい配合であると考察できるが、現場においてもその傾向が顕著に現れていた。

写真-6は、配合2を用いた連続鉄筋コンクリート舗装(打設厚24cm)の現場である。この現場では硬化後に鉄筋に沿って表面から縦ひび割れが発生した。試験結果では、図-6から配合2は落下回数20回以降の締固め度が小さいことおよび写真-4から落下回数20~30回時に試験体にひび割れが生じていることがわかる。現場で発



写真-5 配合1の施工状況



写真-6 配合2の施工後に生じた縦ひび割れ

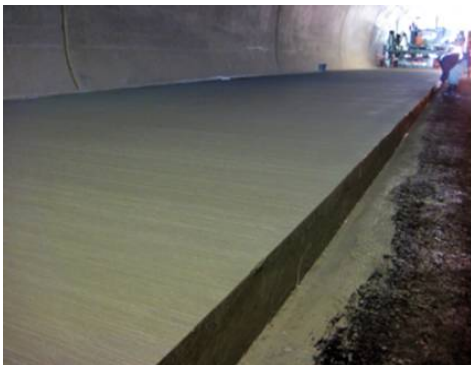


写真-7 配合4の施工状況

生じたひび割れの原因はさまざまな要因が重なり合ったものと推察されるが、コンクリートの配合面から考えた場合、試験結果からわかった締固め性が低く、変形に対してひび割れが生じやすい性状が一因となっている可能性が高いと考えられる。

写真-7は、配合4を用いた連続鉄筋コンクリート舗装（打設厚21cm）の現場である。施工時にエッジスランプ等の不具合もほとんど見られず、良好な仕上がりが得られていた。試験結果では、図-6から落下回数5回、10回時の締固め度が若干低いものの、落下回数20回以降の締固め度が大きく、十分な締固めを行えば締め固めることが可能であり、図-7および写真-4から他の配合に比べ変形抵抗性に優れた配合であると判断できる。

以上から、現場における施工状況は考案した試験から得られた結果と整合性があることがわかった。

6. 考察

室内試験結果および現場での状況から、配合1のように少ない落下回数で大きな締固め度が得られても、同時に水平変位量が大きくなる配合ではエッジスランプが生じてしまう。このことから、SFPCは、締固め性と変形抵抗性のバランスが取れた配合でなければならないことがわかる。また、配合2のように変形抵抗性試験時に試験体の中央にひび割れが生じる配合や少ない落下回数で試験体が崩壊する配合は、施工時に不具合が生じ

る可能性があることから、考案した試験方法によって得られる数値だけでなく、試験時の状況も重要であることがわかる。以上から、SFPCには適した配合が存在し、本論文の範囲内では、練上り直後にスランプ6cm、空気量6%程度のコンクリートの場合、締固め性試験の落下回数20回で95%程度、変形抵抗性試験の落下回数10回で2cm程度かつ少ない落下回数でひび割れや崩壊が生じない配合がSFPCに適しているものと考えられる。ただし、さらにデータを蓄積し、検討を重ねる必要がある。

7. まとめ

- ・同一材料で単位水量を増加させスランプを変化させた場合、スランプと締固め性および変形抵抗性には相関関係が見られた。
- ・同一材料でスランプ、空気量を同程度とした場合、単位粗骨材容積を変化させると締固め性や変形抵抗性が異なり、考案した試験により最適なフレッシュ性状となる配合が決定できる可能性がある。
- ・材料や配合が異なる場合、スランプや空気量が同程度であっても締固め性や変形抵抗性に差異が生じる結果が得られた。考案した試験を実施することで、スランプや空気量試験では評価できない施工性に影響を及ぼすフレッシュ性状の確認ができるものと考えられる。
- ・現場における施工状況は、考案した試験方法の結果から得られる見解と同様の現象が発生していることが確認できた。よって、SFPCの施工性を評価する一手法になり得るものと考えられる。
- ・SFPCは、締固め性と変形抵抗性のバランスが取れた配合でなければならず、SFPCに適した配合が存在することがわかった。

参考文献

- 1) 全国生コンクリート工業組合連合会・全国生コンクリート協同組合連合会：スリップフォーム工法用コンクリート製造マニュアル（2003年度版），pp1-10，2003
- 2) （社）日本コンクリート工学協会：施工の確実性を判定するためのコンクリートの試験方法とその適用性に関する研究報告書，pp23-219，2009.7
- 3) 佐藤聡明，神下竜三，鎌田修，坂本康文：舗装用スリップフォームコンクリートのフレッシュ性状評価に関する研究，第64回セメント技術大会，pp80-81，2010.5
- 4) 佐藤聡明，神下竜三，鎌田修，坂本康文：舗装用スリップフォームコンクリートの性能に関する基礎的研究，土木学会第65回年次学術講演会，pp231-232，2010.9