

論文

[1025] 自己充填コンクリートの充填性に及ぼす粗骨材特性の影響

松尾 茂美*1・小沢 一雅*2

1. はじめに

自己充填コンクリートは、バイブレータ等を用いて振動締固めを行うことなく、自重で生じる圧力勾配によって流動し、型枠の隅々にいたるまで充填する特徴を有しており、この性質が、施工状況に左右されず密実なコンクリートの打設を可能にしている。[1]

自己充填コンクリートの普及、実用化のためには、その配合設計法の確立が必要である。粗骨材は、コンクリート中で最も大きい粒径をもつ粒子であり、コンクリートの流動性や充填性に及ぼす影響は大きい。自己充填コンクリートの配合設計を確立するためには、その品質特性が、充填性に及ぼす影響を定量的に把握する必要がある。

本研究は、粗骨材の形状や粒度分布および粗骨材量が、自己充填コンクリートの充填性に与える影響を明らかにすることを目的として、コンクリートの充填性に関する実験を行い、粗骨材特性の影響を定量的に評価することを試みた。

表-1 粗骨材の物理的性質

記号	名称	表乾比重	実積率 (%)	粒度分布 (残留%)						粗粒率
				25	20	15	10	5.0	2.5	
G 1	泥岩碎石	2.62	58.5	0	1	13	70	100	100	6.71
G 2	砂岩碎石 1	2.66	59.8	0	3	16	68	100	100	6.71
G 3	石灰碎石	2.65	63.0	0	3	16	66	100	100	6.69
G 4	砂岩碎石 2	2.66	59.2	0	10	25	80	100	100	6.90
G 5	砂岩碎石 3	2.66	58.1	0	1	7	45	99	100	6.45

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

実験に用いた材料の物理的性質を表-1、2に示す。

粗骨材は、粒度分布がほぼ同じとなるように調整した形状の異なる3種類（泥岩碎石、砂岩碎石1、石灰碎石）および、異なる粒度に調整した2種類（砂岩碎石2、砂岩碎石3）、合計5種類の碎石を用いた。

セメントは、中庸熟ポルトランドセメント（比重=3.21、フロー値=3100 cm²/g）を使用した。

混和剤は、ポリカルボン酸塩系高性能A E減水剤を用いた。

コンクリート中のモルタルの配合は、空気量を除いたモルタル容積に対して細骨材容積が40%または46%とし、水粉体容積比は、モルタルのフロー値が245mm、ローの流下速度比

表-2 細骨材の物理的性質

名称	表乾比重	吸水率 (%) ^{*1}	実積率 (%)	粒度分布(残留%)						粗粒率
				5.0	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
富士川水系産川砂	2.58	2.70	59.7	0	9	34	67	87	95	2.92

*1 試験は、JIS A 1802 に準拠して行い、1000Gの遠心脱水を行ったときの含水率を吸水率とした。[2]

表-3 コンクリートの配合

粗骨材の種類	G/Glim (%) ^{*1}	W/Vp (%) ^{*2}	Sc (%) ^{*3}	容積 (l/m ³)					混和剤使用量 Cx (%)	スランプロー (cm)
				G	S	C	W	Air		
G 1	50.0	81.9	40.0	288	279	230	188	15	1.15	64.0
	55.0			317	267	220	180	15	1.20	66.0
	60.0			346	256	211	173	15	1.25	66.0
G 2	50.0	81.9	40.0	295	276	228	187	15	1.15	64.0
	55.0			324	264	218	179	15	1.20	67.0
	60.0			353	253	208	170	15	1.25	67.0
G 2	40.0	81.9	46.0	236	345	212	193	15	1.10	67.0
	50.0			295	318	195	178	15	1.20	64.5
	55.0			324	304	187	170	15	1.25	66.0
G 2	60.0	81.9	46.0	353	291	178	163	15	1.45	67.0
	50.0			310	270	223	182	15	1.10	67.0
	55.0			341	258	212	174	15	1.20	66.0
G 3	60.0	81.9	40.0	372	245	202	165	15	1.25	66.0
	50.0			286	280	231	189	15	1.15	67.0
G 4	50.0	81.9	40.0	286	280	231	189	15	1.15	67.0
G 5	50.0			292	277	229	187	15	1.15	66.0

*1 G/Glim:粗骨材の実積率に相当する容積に対するコンクリート中の粗骨材容積の比率(%)

*2 W/Vp:水粉体容積比(%)

*3 Sc:空気量を除いたモルタル容積に対する細骨材容積の比率(%)

*1 東京大学受託研究員 工学部土木工学科 (正会員)

*2 東京大学助教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

が1.25となるように決定した。[2] 何れの配合もスランプフロー値の大小によるフレッシュ性状の違いを少なくするため、高性能A E減水剤の使用量でスランプフローを 65 ± 2 cmに調整した。

(表-3)

練混ぜは、セメントと細骨材を30秒練混ぜた後、1次水を加えて90秒間練混ぜた。その後、粗骨材、2次水および高性能A E減水剤を加えて150秒間練混ぜた。1次水の量は、水粉体容積比で72%となる量とした。(図-1)

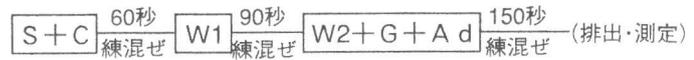


図-1 練混ぜ方法

2.2 充填性の評価方法

(1) Vロート試験

Vロート試験は、コンクリートが間隙を通過する性能を評価するものであり、小沢らの研究[3]によると流出口幅が7.5cmのロートは、鉄筋径が19mm、純間隔が56mmの間隙を通過する性能をほぼ評価することが可能とされている。流出口幅に対応する間隙に対し、通過する性能の高いコンクリートは、一般にロート流下時間が短くなる。試験方法は、図-2に示す流出口幅の異なる3種類 ($d=7.5, 6.5, 5.5$ cm) のロートを用いて、ロート内に充填したコンクリートが流下に要する時間 (t_c) を測定した。

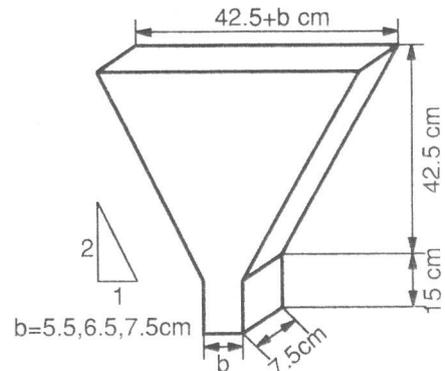


図-2 Vロート試験装置

式(1)によって相対ロート速度比 (R_c) を算出し、これを評価に用いた。なお、 R_c は、流下に要する時間が10秒の時を基準にした場合に対する相対的な流下速度を表す。

$$R_c = 10 / t_c \quad (1)$$

ここに、 R_c : 相対ロート速度比、 t_c : Vロート流下時間(秒)である。

(2) 高密度配筋部充填性試験

高密度配筋部充填性試験は、ハイパフォーマンスコンクリートの開発に用いられた試験である。本試験は、コンクリートが鉄筋間隙を鉛直および水平方向へ通過する能力とコンクリートが材料分離することなく型枠の隅々まで流動する能力を評価するものであり、コンクリートの自己充填性を総合的に評価できる試験である。

高密度配筋部充填性試験装置を図-3に示す。試験方法は、本試験装置の試料投入口上部にVロート試験装置を設置し、その下部開口部から排出したコンクリートを直接本試験装置に投入し、その流動状況をビデオ撮影および目視観察を行った。なお、試験結果(図-4、5、9、13)に示す3本の曲線は、3種類のVロート(7.5、6.5、5.5cm)試験で排出したそれぞれのコンクリートが本試験装置内で最終的に静止した時の充

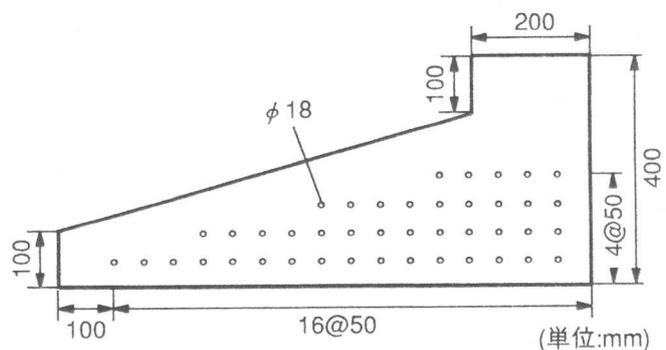


図-3 高密度配筋部充填性試験装置

填状況である。充填性の評価は、以下に示す項目に基づいてA～Dにランク付けすることにより行うこととした。

- A：コンクリートが一体となって鉄筋の間隙を滑らかに通過し、流動勾配が緩やかである。観察によって鉄筋間隙におけるコンクリートの閉塞が確認されない。
- B：コンクリートは鉄筋の間隙を通過するが、間隙を通過する際にやや変形速度が遅く、流動勾配も若干の段差が認められる。このランクまでは、自己充填コンクリートとして、一般の構造物に安心して使用できると考えられる。
- C：コンクリートは横方向の間隙をほとんど通過できるが、コンクリートの閉塞が数カ所確認され、ジャンカが数カ所発生し、流動勾配も急となる。
- D：コンクリートが鉄筋間隙を主に垂直方向にしか移動できず、コンクリートの閉塞やジャンカが発生し、流動勾配もかなり急となる。

3 粗骨材量が充填性に及ぼす影響

モルタル中の細骨材量および水セメント比を同一とし、コンクリートのスランプフローを高性能減水剤によってほぼ一定としても、粗骨材量を増加させると充填性は悪くなるのが分かる。(図-4) 砂岩碎石1を用いた結果では、粗骨材量が324 /m³以下では、充填性が良好であったのに対して(図-4)、353 /m³の場合、充填性ランクがBからDに変化している。(図-4) これは、粗骨材量の増加に伴い、粗骨材粒子どうしの衝突や接触摩擦による相互干渉が大きくなるからであり、自己充填性実現のためには、粗骨材量がある程度制限する必要があることが分かる。

モルタル中の細骨材量を増加させると、粗骨材量の増加による充填性の低下がさらに顕著となる。モルタル中の細骨材量が46%の場合、粗骨材量が295 /m³を越えると急激に充填性ランクが低下している。(図-5) Vロート試験による結果を見ても、細骨材量が40%の場合には、粗骨材量の増加に対して、ほぼ線型に相対ロート速度比が低下しているのに対して、細骨材量が46%の場合には、粗骨材量が295 /m³を越えると急激に相対ロート速度比が低下している。(図-6) コンクリートが流動中の粗骨材粒子どうしの相互干渉には、その間隙に存在する粒子が影響を及ぼす。粗骨材粒子の間隙に存在する細骨材量が増加したことで、粗骨材量の増加に伴う粒子

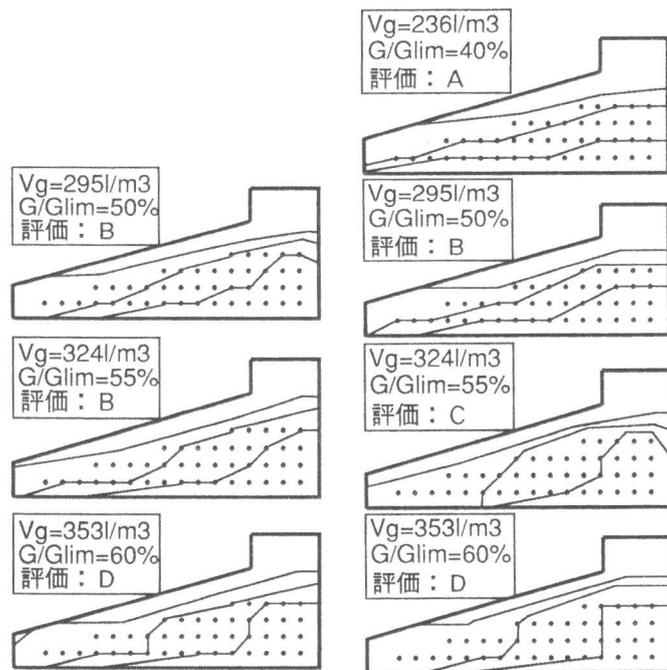


図-4 充填性試験結果 (砂岩碎石1、Sc=40%)

図-5 充填性試験結果 (砂岩碎石1、Sc=46%)

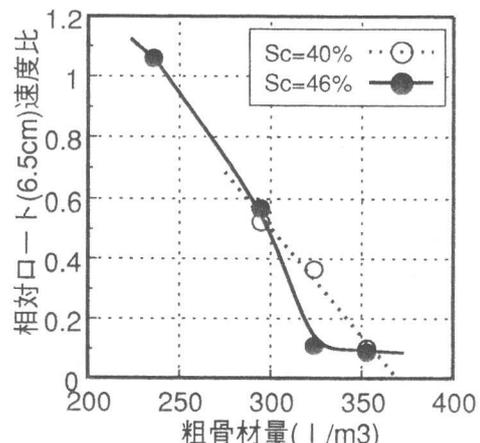


図-6 粗骨材量と相対ロート(6.5cm)速度比の関係

どうしの相互干渉の増大効果がより敏感になり、急激に間隙通過性能が低下したものと想像できる

4. 粗骨材の形状が充填性に及ぼす影響

粒度分布をほぼ同一に調整した3種類の粗骨材（泥岩碎石、砂岩碎石1、石灰碎石）を用いて、粗骨材の形状が充填性に及ぼす影響を調べた。これら3種類の粗骨材は、それぞれ、58.5、59.8、63.0%の実積率を有しており、実積率が小さいほど形状が悪いものと想像される。

モルタルの配合を同一とし、3種類の粗骨材を用いたコンクリートのVロート試験結果を見ると、同一の粗骨材容積でも相対ロート速度比は異なっており、3種の中では形状が良いと考えられる石灰碎石は、他の2種の粗骨材に比べて相対ロート速度比が大きく、また、粗骨材容積の増加に対する変化も緩やかとなっている。

（図-7）粗骨材の形状は、粗骨材粒子どうしの干渉に影響を及ぼすと考えられ、形状の良い石灰碎石は、他の2種の粗骨材に比べ、同量の粗骨材容積では、相互干渉の程度が小さいためと考える。

粗骨材量を表現する指標として、相対粗骨材容積比（ G/G_{lim} ）を考えると、3種の粗骨材のVロート試験結果は、ほぼ一本の直線で表現されることが分かる。（図-8）相対粗骨材容積比とは、コンクリート中で実積率に相当する粗骨材量に対する粗骨材容積の比を表し、これを用いることで、粒度分布が同一で形状の異なる3種の粗骨材粒子どうしの相互干渉の程度を正規化することがほぼ可能であることが示されたのである。

高密度配筋部充填性試験の結果では、相対粗骨材容積比を同一とすると、形状の異なる3種の粗骨材を用いたコンクリートの充填性は、ほぼ同様の充填性状を示している。（図-9）ただし、形状の良い石灰碎石の結果は、他の2種に比べて若干充填性ランクが高い。Vロート試験の結果を見ても、流出口幅が6.5cmのロートを用いた場合は、3種類の粗骨材を用いた結果は、ほぼ同一と判断できるが（図-8）、流出口幅が5.5cmと間隙通過が厳しい条件とした場合には、石灰碎石を用いたコンクリートの相対ロート速度比は若干大きい。（図-10）

ここで、粗骨材粒子の形状の影響を評価するために用いた実積率は、JIS A 1104に拠っている。この試験方法では、粗骨材粒子を容器に充填する際に、突き棒および叩きによる粒子の再配列を促進し

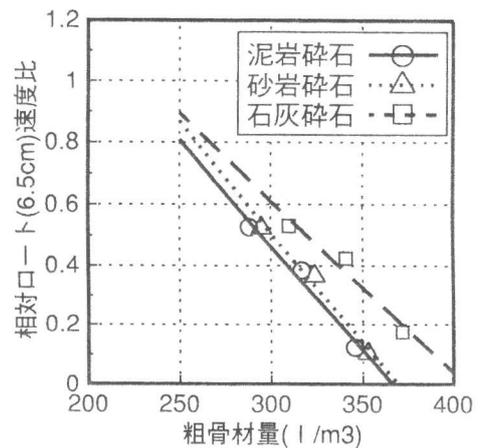


図-7 粗骨材量と相対ロート(6.5cm)速度比の関係

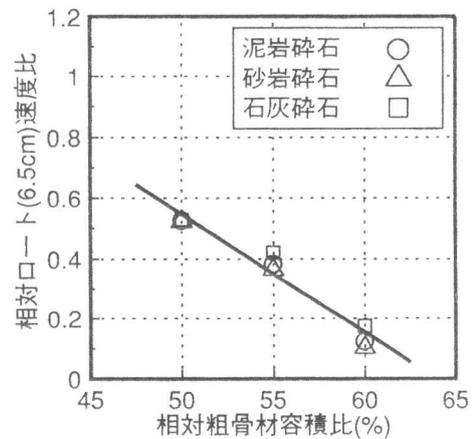


図-8 相対粗骨材容積比と相対ロート(6.5cm)速度比の関係

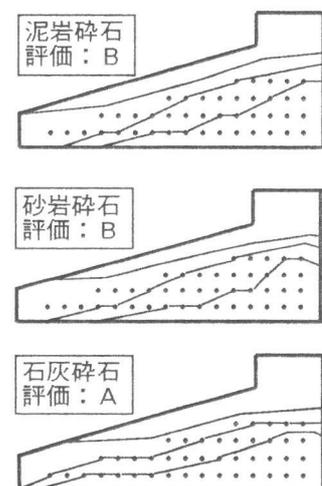


図-9 充填性試験結果 (G/Glim=50%、Sc=40%)

ており、実際のコンクリート中では、この条件に比べると粗骨材粒子に作用する力は小さいと予想される。そこで、突き棒による締固め作業を5回に減らして試験を行い、得られた実積率を用いて、Vロート試験の結果を再考した。その結果、流出口幅5.5cmのロートを用いた場合でも、JISの方法による実積率を用いた結果に比べ、3種類の粗骨材を用いたコンクリートの相対ロート速度比が近い値を示す。(図-11) 高密度配筋部や流出口幅の小さいロート等の間隙通過が厳しい条件における粗骨材粒子の相互干渉の影響をさらに精度良く評価するためには、実際のコンクリート中に近い条件を再現できる実積率試験方法の開発が必要である。

5. 粗骨材の粒度分布が充填性に及ぼす影響

本研究は、粗骨材の形状や粒度分布および粗骨材量が、自己充填コンクリートの充填性に与える影響を明らかにするため、コンクリートの流動性および充填性に関する実験を行ったものである。その結果、本実験の範囲内で以下の知見が明らかとなった。

砂岩砕石を用いて粒度分布をJIS A 5308 附属書1の粒度範囲内で大、中、小に調整した粗骨材(砂岩砕石2、砂岩砕石1、砂岩砕石3)を用いて、粗骨材の粒度分布がコンクリートの充填性に及ぼす影響を調べた。3種類の粗骨材は、それぞれ、6.90、6.71、6.45の粗粒率を有しており、粗粒率が大きいほど粒度が粗い粗骨材である。

モルタルの配合を同一とし、JISの方法により得られる実積率を用いて、相対粗骨材容積比を50%とした3種の粗骨材を用いたコンクリートは、流出口幅が7.5および6.5cmロートを用いたVロート試験から得られる相対ロート速度比がほぼ同一の結果となっている。(図-12) しかし、流出口幅が5.5cmのロートを用いた場合には、粒度の小さい順に相対ロート速度比が若干大きい値を示している(図-12)。これは、最大寸法が20mmで一定の条件で間隙通過が緩い条件の場合、すなわち、通過する間隙がそれほど小さくない場合には、粒度分布の違いによる粗骨材粒子どうしの相互干渉の影響を実積率を用いて評価できることを示している。しかし、流出口幅が5.5cmと間隙通過が厳し

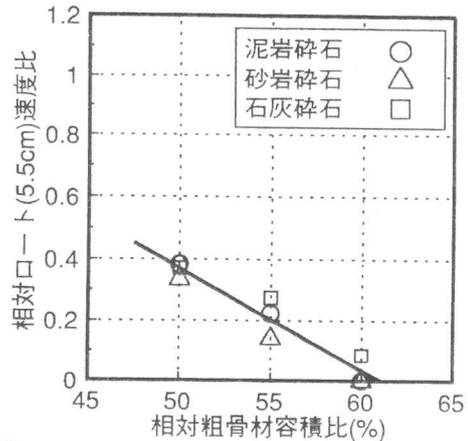


図-10 相対粗骨材容積比と相対ロート(5.5cm)速度比の関係

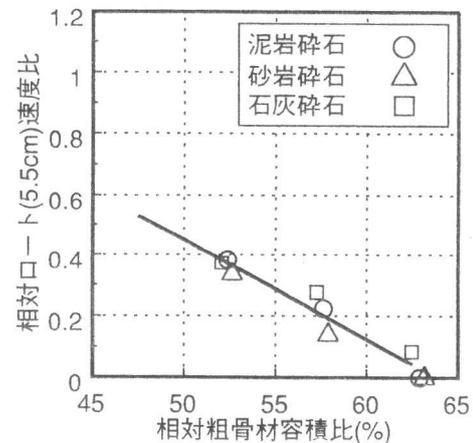


図-11 相対粗骨材容積比と相対ロート(5.5cm)速度比の関係 (実積率試験方法・5回突き)

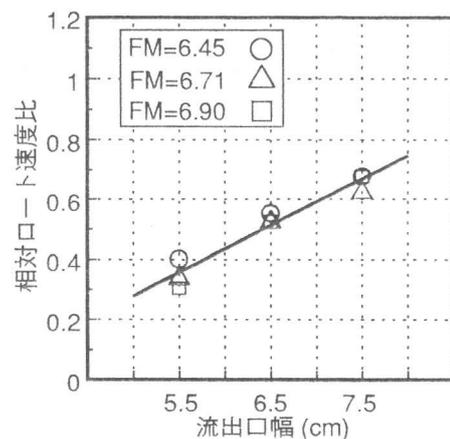


図-12 流出口幅と相対ロート速度比の関係

い条件の場合には、粒度の影響は実積率だけで評価することが困難であり、間隙寸法に対する粒子の大きさを考慮した評価試

験を導入することが必要である。今回使用した3種の粗骨材の平均粒径は、Vロート流出口幅に対し0.12~0.23の範囲にあり0.2程度となると従来の実積率試験の適用が困難となるものと思われる。その影響は、高密度配筋部充填性試験の結果にも現れており、粒度の小さい砂岩碎石3の充填性ランクは、他の2種に比べて高い評価となっている。(図-13)

6. 結論

本研究は、粗骨材の形状や粒度分布および粗骨材量が、自己充填コンクリートの充填性に与える影響を明らかにするため、コンクリートの流動性および充填性に関する実験を行った。

その結果、以下の知見が明らかとなった。

- (1) 本研究で使用した形状および粒度分布の異なる最大寸法20mmの5種類の粗骨材の場合、相対粗骨材容積比を50%とすると良好な自己充填性を実現することが可能であることが示された。この値は、モルタル中に含まれる細骨材量が多少増加しても急激には、充填性が低下しないと考えられる量である。
- (2) 粒度分布を同一としても、実積率が異なる碎石を使用すると、同一の配合のモルタルと同一容積の粗骨材とを組み合わせたコンクリートの間隙通過性および充填性は、異なることが示された。
- (3) 通過する間隙が比較的緩やかな条件でモルタルの配合が同じ場合、粗骨材の粒度および形状が異なっても、粗骨材の実積率に相当する容積に対するコンクリート中の粗骨材容積の比率(相対粗骨材容積比)を同一とすれば、間隙通過性がほぼ同一の自己充填コンクリートを実現することが可能であることが示された。ただし、ロート口幅が5.5cm等の間隙通過が厳しい条件においても精度良く評価するためには、実積率を求める際に、粗骨材粒子の容器への充填方法や粗骨材粒子の大きさと容器の大きさの関係等の改善を図り、コンクリート中の粗骨材粒子の受ける境界条件に近い状況を再現することが有効であることが示された。

今後は、最大寸法および他の粒子との相互影響を含め、粗骨材が、充填性に及ぼす影響をさらに一般的に評価することを進めたい。

謝 辞

本研究を行うにあたり、貴重なご指導を賜りました岡村 甫教授、また実験の実施に際しご協力を頂いた関係者の皆様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] K. Ozawa, K. Maekawa, H. Okamura: Development of High Performance Concrete, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B), Vol. XLI, No.3, 1992
- [2] 岡村 甫、前川宏一、小沢一雅: ハイパフォーマンスコンクリート、技報堂出版、pp35-47、1993.9
- [3] 小沢一雅、岡村 甫、坂田 昇: 締固め不要コンクリートの充填性評価のためのロート試験、超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集、pp17-22、1993.5

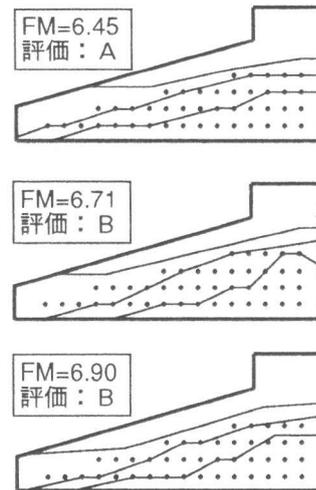


図-13 充填性試験結果
(砂岩碎石、G/Glim=50%)