

PC部材を対象としたコンクリートの振動条件下の充填性に関する実験的研究

オリエンタル白石㈱ 正会員 ○中村 敏之
 福岡大学 博士(工学) 橋本紳一郎
 オリエンタル白石㈱ 工修 牧野 翔平
 福岡大学大学院 杉田菜々望

Abstract : The test method to which vibration was given is being performed in concrete of an identical slump so far. The interstitial pass-ability and segregation resistance of concrete by the difference in the influence of water cement ratio is being estimated. The filling property of concrete by which the influence of water cement ratio is small was good. Also the filling property of concrete by which the sand-aggregate ratio is large was good. So the experiment on sand-aggregate ratio on filling property of concrete for prestressed concrete member by vibration condition was carried out. As a result, when the sand-aggregate ratio was too large, the filling property of concrete fell. In addition, full scale experiment of prestressed concrete member was carried out. The result was the same tendency as filling property of concrete by the test method.

Key words : Vibrating compaction , Interstitial pass-ability , Segregation resistance, Slump flow

1. はじめに

コンクリート工事における初期欠陥などの不具合のリスクを低減させるためには、使用するコンクリートが対象の打込み箇所に対して、適切な充填性を有する必要がある。適切な充填性を有したコンクリートを使用しないと、たとえ初期欠陥が生じなくても、たとえば、材料分離したコンクリートがかぶり部に充填されると硬化後の耐久性が低下する可能性がある。一般に、フレッシュコンクリートのコンシステンシーの評価で用いられる試験はスランプ試験であるが、コンクリート標準示方書施工編¹⁾の施工標準では、標準的な施工方法として実際の型枠への打込みには棒状バイブレータを用いた締固めによるとしている。しかしながら、振動条件下の充填性能はスランプ試験では定量的に評価することは難しい。そのため、これまでに筆者らは、土木学会「コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会(341委員会)第2期委員会報告書²⁾」(以下、341委員会報告書)に提案される加振ボックス充填試験とタンピング試験を用いて、同一スランプにおける振動条件下の間隙通過性、材料分離抵抗性、変形性などのコンクリートの充填に関わる性能を定量的な指標で評価した³⁾。その結果、同一スランプにおいても、細骨材率が増加することで充填性が向上し、また、水セメント比が小さいコンクリートほどその効果が大きいことを示した。水セメント比が小さいコンクリートの優位性は、単位セメント量が多いことに起因し、そのため、細骨材率が小さくても、高い施工性能を維持し、十分な充填性能が得られたと推察された。そこで、本稿では、一般的に水セメント比が小さく、単位セメント量の多いプレストレストコンクリート(以下、PC)部材を対象としたコンクリートについて、細骨材率と骨材の種類を水準として、同一スランプにおける充填性能を実験的に評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1に使用材料を示す。セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。細骨材および粗骨材は砕砂・砕石の組み合わせと川砂・川砂利の組み合わせの2種類を使用した。混和剤はポリカルボン酸

エーテル系高性能AE減水剤を使用した。

2.2 配合水準

表-2に配合とスランプおよび空気量の測定結果を示す。なお、配合名は骨材に砕砂・砕石を使用したものをPCC(以下、PCC配合)、川砂・川砂利を使用したものをPCR(以下、PCR配合)とし、水セメント比、細骨材率の順に命名した。水セメント比は38%一定とし、細骨材率はPCC配合は38, 43, 48, 53%の4水準とし、PCR配合では38, 43, 48, 53, 58の5水準とした。高性能AE減水剤の添加率はセメント質量に対し0.6%を共通として、スランプが8±1cm, となるように単位水量を調整した。なお、スランプはコンクリート標準示方書施工編に示されるPC部材における打込みの最小スランプの目安の最小値が7cmであることから、レディーミクストコンクリートの種類における近傍の8cmとして設定した。試験は温度20℃, 相対湿度60%の室内で行った。コンクリートの練混ぜは100L強制練りミキサを使用し、各配合で60L練り混ぜた。スランプはJIS A 1101に、空気量はJIS A 1128に準じて測定した。

2.3 試験方法

(1) 間隙通過性, 材料分離抵抗性の評価試験

間隙通過性および材料分離抵抗性は、341委員会報告書において提案される加振ボックス充填試験に準じた方法で評価した。図-1に試験装置を示す。試験容器は「JSCE-F511 高流動コンクリートの充填試験方法(案)」で使用されるボックス形容器を用い、障害R2(D13×3本, あき35mm)を用いた。バイブレータは振動体の呼び径28mm, 振動数240Hzの手持形振動機を使用した。ボックス型容器は防振性のあるゴムマットに静置し、試料を容器のA室に3層に分けて詰めた。試料を詰める際には各層を詰める度に仕切り板の面板方向へ容器を3回揺らして、試料の上面が水平になるようにした。試料を上面まで詰めた後、上面を軽く均し、A室中央にバイブレータの先端と容器底面との間隔が100mmとなる位置までバイブレータを挿入した。バイ

表-1 使用材料

水	上水道水	密度 (g/cm ³)	1.00
セメント	早強ポルトランドセメント	密度 (g/cm ³)	3.14
		比表面積 (cm ² /g)	4500
細骨材1 (PCC配合)	砕砂 (茨城県桜川産硬質砂岩)	表乾密度 (g/cm ³)	2.63
		吸水率 (%)	0.84
		実積率 (%)	55.5
		粗粒率	2.85
		微粒分量 (%)	2.3
細骨材2 (PCR配合)	川砂 (長野県伊那市三峰川筋)	表乾密度 (g/cm ³)	2.68
		吸水率 (%)	1.19
		実積率 (%)	66.1
		粗粒率	2.71
粗骨材1 (PCC配合)	砕石 (茨城県桜川産硬質砂岩)	最大寸法 (mm)	20
		表乾密度 (g/cm ³)	2.66
		吸水率 (%)	0.41
		実積率 (%)	61.2
		粗粒率	6.76
粗骨材2 (PCR配合)	川砂利 (長野県伊那市三峰川筋)	最大寸法 (mm)	25
		表乾密度 (g/cm ³)	2.73
		吸水率 (%)	1.18
		実積率 (%)	62.3
粗粒率	6.88		
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系	

表-2 配合

配合No.	配 合					フレッシュ性状					
	水セメント比 W/C	細骨材率 s/a	混和剤添加率 C×mass%	単位量 (kg/m ³)					スランプ	空気量	練上がり温度
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP			
%	%	%	kg	kg	kg	kg	kg	cm	%	℃	
PCC-38-38	38.0	38.0	0.6	148	389	685	1126	2.34	7.0	4.0	20.5
PCC-38-43		43.0		152	400	767	1024	2.40	7.0	4.7	20.5
PCC-38-48		48.0		157	413	844	922	2.48	7.5	4.7	21.0
PCC-38-53		53.0		163	429	917	819	2.57	7.0	5.1	21.0
PCR-38-38	38.0	38.0	0.6	136	358	707	1163	2.15	7.5	4.0	21.5
PCR-38-43		43.0		144	378	785	1048	2.27	7.0	4.0	21.0
PCR-38-48		48.0		148	389	865	945	2.34	7.5	5.0	21.5
PCR-38-53		53.0		154	405	940	840	2.43	7.5	4.9	21.5
PCR-38-58		58.0		160	421	1012	738	2.53	7.0	4.4	22.0

ブレータが動かないように位置を保持しながら、仕切りゲートを引き上げ、バイブレータを始動し、試料が A 室から障害 R2 を通過し、B 室正面における高さ 190mm および 300mm に到達した時間をストップウォッチで 0.01 秒単位まで測定した。300mm まで到達した後にバイブレータを停止し、B 室の上面から 2L の試料を採取し、JIS A 1112 に準じて洗い分析により単位粗骨材量を求めた。間隙通過性の評価指標を式(1)に、材料分離抵抗性の評価指標を式(2)に示す。間隙通過性の指標は、B 室の高さで 190mm~300mm の一定距離 (=110mm) を、試料が障害 R2 の通過に要した時間 (s) で除した間隙通過速度 (mm/s) とした。材料分離抵抗性の指標は、300mm 到達後の B 室上面の試料、つまり、障害 R2 を通過して最も先端に到達した試料の単位粗骨材量 (kg/m³) を配合における単位粗骨材量 (kg/m³) で除した粗骨材量変化率 (%) とした。なお、粗骨材量変化率は値が 100%に近いほど B 室の単位粗骨材量が配合における単位粗骨材量に対して変化していないことを示している。

(2) 変形性の評価試験

変形性は、341委員会報告書において提案されるタンピング試験に準じた方法で評価した。図-2 に試験方法を示す。試験はスランプ試験終了後の試料を用いて行った。スランプ試験における平板は、試験前に厚さ2cmで敷き詰めた表乾状態の細骨材の上に水平に設置した。スランプを測定後、JIS A 1101に準じてスランプフローを測定した。スランプおよびスランプフローを測定後、質量1.2kgの木製棒を500mmの高さから、平板の中心から頂点方向に300mm離れた四隅に右回りで順次、落下させ、打撃による振動を与えた。平板を8回 (2周) 叩くごとにスランプフローを測定し、これを32回 (8周) まで行い、そのときの試料の状態を目視で観察した。変形性の評価指標を式(3)に示す。nは打撃前を含むスランプフローを測定した回数とした。単位スランプフロー変化量 K_{sf} (mm/回) は、打撃1回に対するスランプフローの増加量 (mm) を表し、変形性の指標とした。

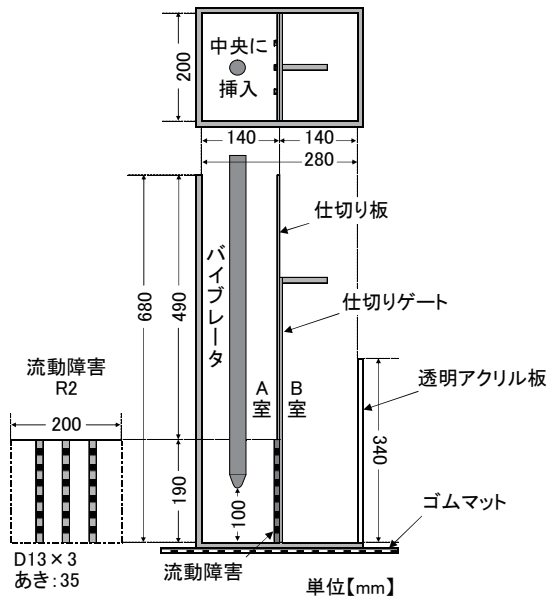


図-1 加振ボックス充填試験装置

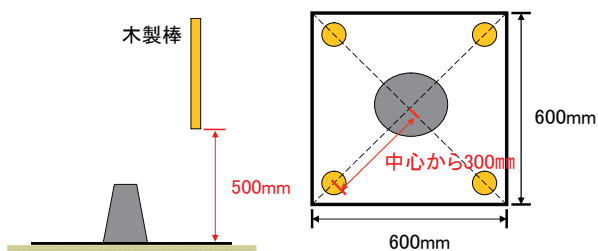


図-2 タンピング試験方法

$$V_{pass} = \frac{110}{t_{300} - t_{190}} \quad (1)$$

ここに、 V_{pass} : 間隙通過速度 (mm/s)

t_{300} : 300mm 到達時間 (s)

t_{190} : 190mm 到達時間 (s)

$$\delta_B = \frac{G_B}{G_0} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 δ_B : 粗骨材量変化率 (%)

G_B : B 室の単位粗骨材量 (kg/m³)

G_0 : 配合における単位粗骨材量 (kg/m³)

$$K_{sf} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i S_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n S_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (3)$$

ここに、 K_{sf} : 単位スランプフロー変化量 (mm/回)

n : スランプフローを測定した回数 (回)

x_i : i 回目の測定時におけるタンピング回数 (回)

S_i : i 回目の測定時におけるスランプフロー (mm)

3. 試験結果および考察

3.1 間隙通過性

図-3に細骨材率と間隙通過速度の関係を示す。いずれも細骨材率の増加にともない、間隙通過速度は大きくなる傾向を示したが、PCC配合では、細骨材率53%以上で小さくなり、PCR配合では細骨材率58%以上で小さくなった。このような傾向は筆者らの過去の実験³⁾における水セメント比40~55%の普通ポルトランドセメントとAE減水剤を使用した通常のコンクリートと異なる。おそらく、PC部材を対象としたコンクリートは、比表面積の大きな早強ポルトランドセメントの使用や高性能AE減水剤により単位水量を減じたことで粘性が増し、細骨材率が大きい配合の場合、さらに粘性が増したことで、間隙通過性が低下したと考えられる。このことから、試験方法としては間隙通過性がもっとも良好となる細骨材率を検出したと言える。つまり、単位セメント量と細骨材率が大きい配合には、間隙通過性の上限が存在すると考えられる。一方で、得られた間隙通過速度は、筆者らの過去の実験³⁾におけるコンクリートと比較して大きい値であるため、PC部材を対象としたコンクリートのように単位セメント量が比較的多い場合、打込み対象の配筋状態や施工条件によっては、細骨材率を38~43%まで低減しても、相対的に高い間隙通過性が得られる可能性があると考えられる。

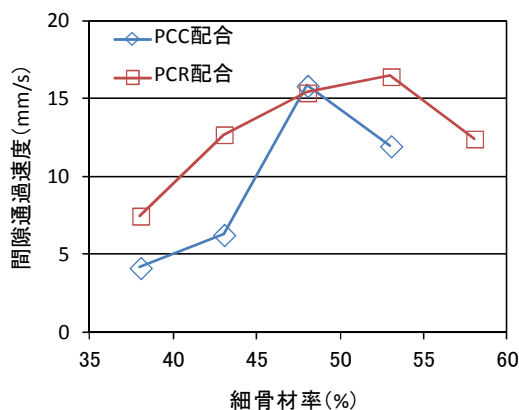


図-3 細骨材率と間隙通過速度

3.2 材料分離抵抗性

図-4に細骨材率とB室における粗骨材量変化率の関係を示す。いずれも細骨材率の増加にともない、粗骨材量変化率は大きくなる傾向を示した。しかしながら、PCR配合では、細骨材率が大きい場合に粗骨材量変化率が100%を超え、間隙通過した粗骨材量が配合に対し多くなった。つまり、材料分離抵抗性が低下したことになる。一般に、細骨材率が増加すると、単位セメント量が増加するが、土木学会「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案)⁴⁾」には、単位セメント量が大きいほど材料分離抵抗性が向上するとしている。本試験で得られた粗骨材量変化率はこれを定量的に表していると考えられるが、細骨材率が大きい場合には、PCR配合のように材料分離抵抗性が低下していることから、粗骨材量変化率は単位セメント量の影響に骨材種類や細骨材率の影響を加味した指標であると考えられる。一方、細骨材率が38~43%の場合、筆者らの過去の実験³⁾におけるコンクリートの粗骨材量変化率が73~89%であったことに対し、PC部材を対象としたコンクリートは83~95%であったことから、相対的に高い材料分離抵抗性を有していると考えられる。

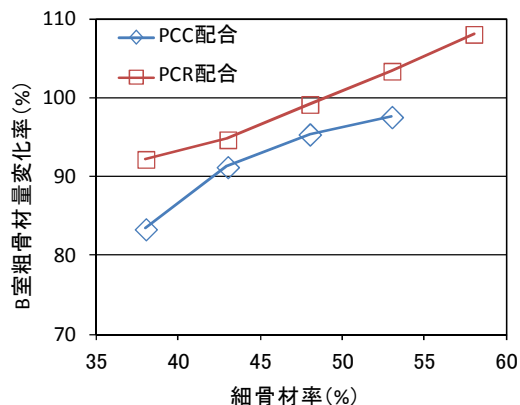


図-4 細骨材率と粗骨材量変化率

3.3 変形性

図-5に細骨材率と単位スランプフロー変化量の関係を示す。いずれも細骨材率の増加にともない、単位スランプ

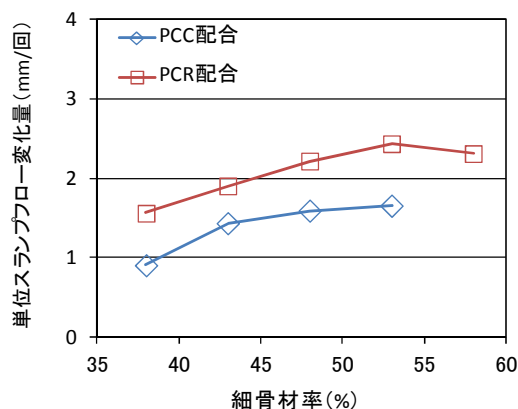


図-5 細骨材率と単位スランプフロー変化量

フロー変化量は大きくなる傾向を示したが、PCR配合では細骨材率58%以上で小さくなった。また、PCC配合においても、細骨材率が増加するにしたがい、単位スランブフロー変化量の増加割合が低下した。このことは、間隙通過性と同様に、細骨材率が大きい配合の場合、粘性が増したことにより、変形性が低下したと考えられる。このように、タンピング試験で得られる単位スランブフロー変化量は、加振ボックス充填試験で得られる間隙通過速度と同様な傾向が見られることから、間接的に間隙通過性を評価することができる可能性があると考えられる。

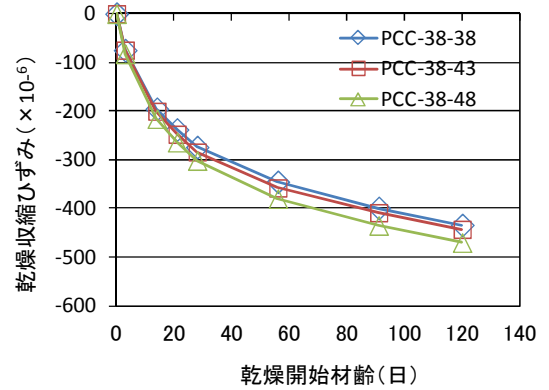


図-6 乾燥収縮ひずみ

3.4 PC部材を対象としたコンクリートの充填性能

以上のように、本稿の範囲では、PC部材を対象としたコンクリートは細骨材率が48~53%程度でもっとも充填性能が良好となり、一方で、細骨材率を38~43%まで減じても、充填性能を確保しやすい傾向にあり、配合設計する上での自由度は大きい。骨材種類の違いにおいても、川砂・川砂利を使用すると、さらにその性能は向上した。

また、一般にPC部材は早強ポルトランドセメントの使用や単位セメント量が大きい配合とする傾向にあり、温度ひび割れや収縮が懸念されるため、品質や経済性に対してはできるだけ単位セメント量を低減することが望ましい。図-6に本試験で用いたPCC配合のうち、細骨材率が38, 43, 48%のコンクリートの収縮量を示す。なお、測定は、JIS A 1129に準じて行い、乾燥開始材齢120日までの値を示している。細骨材率が小さいほど単位水量と単位セメント量が小さいため、それにともない、細骨材率の小さい配合のほうが収縮量は小さくなっている。しかしながら、根本的には、まずは施工において確実な充填が確保できるコンクリートを用いないと、いくら品質向上を考慮した配合設計をしても、結果的な品質は低下する。したがって、打込み対象の配筋状態や施工条件を考慮し、たとえば、定着部や接合部の鉄筋が過密であったり、シース管と鉄筋とのあきが小さい場合などには、細骨材率を調整するなどの間隙通過速度や粗骨材量変化率が大きくなるような配合を選定し、それを加振ボックス充填試験で確実に充填できることを確認することが先決であると考えられる。このことで品質低下に対する施工リスクを減らし、それを前提に品質を考慮することで、施工性と品質の両者を満足する配合設計の最適化を図ることが可能となると考えられる。

4. 間隙通過速度と実物大模擬型枠の充填性

4.1 実験概要

加振ボックス充填試験で得られた間隙通過速度について、実際の施工における充填性との関係を確認するため、ポストテンション T 桁のスパン中央における下縁部の一部を切り出した形状の模擬型枠を用いて、打込み試験を行った。図-7に模擬型枠の形状を示す。シースはφ70 (外径73mm) とし、4本配置した。鉄筋は引張鉄筋D22を3本、スターラップD13を300mm間隔で配置した。模擬型枠は長さ750mm、高さ650mmとした。これらを4体製作し、各PCC配合で打込み試験を行った。写真-1に実験状況を示す。各配合において、締固め後に500mm程度の高さになる量のコンクリートを115L製造し、模擬型

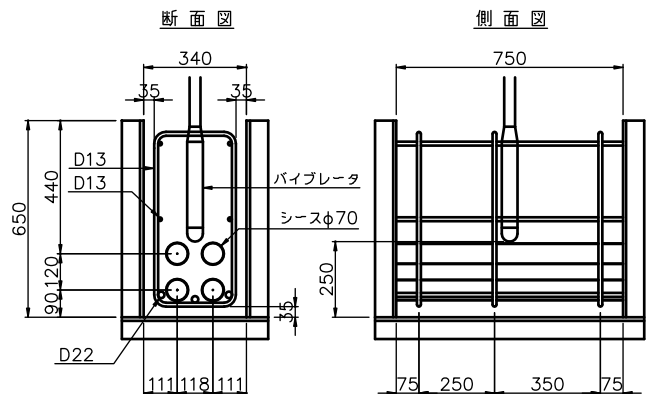


図-7 細骨材率と粗骨材量変化率の関係



写真-1 打込みおよび締固め状況

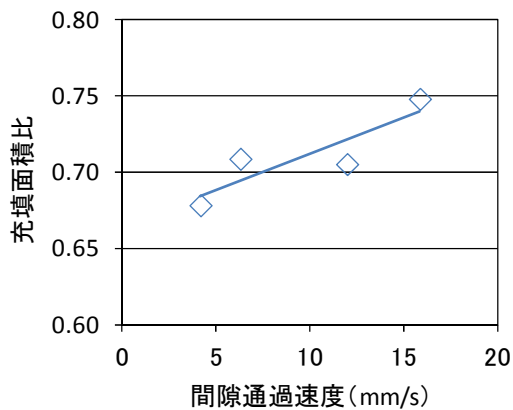


図-8 間隙通過速度と充填面積比

と充填面積比の関係を示す。充填面積比は、試験体断面積に対する充填された面積の比とした。間隙通過速度は充填面積比と相関した傾向が見られ、間隙通過速度の大きい配合のほうがより充填面積比が大きくなった。このことから、配合選定時に加振ボックス充填試験を実施して、結果から得られる間隙通過性の評価により、事前に実際の打込みの充填性能を予測できる可能性があると考えられる。それにより、充填不良などの施工リスクを低減することができると考えられる。

5. まとめ

PC部材を対象としたコンクリートについて、細骨材率と骨材の種類を水準として、同一スランブにおける充填性能を実験的に評価した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 単位セメント量が比較的多いことから、間隙通過性や材料分離抵抗性などの充填性能が良好となる傾向であり、打込み箇所の配筋状態や施工条件によって、細骨材率を減じても十分な充填性能が確保できる可能性がある。
- 2) 配合選定時に加振ボックス充填試験で間隙通過性や材料分離抵抗性を把握することで、事前に実際の打込みに対する充填性能が確認できる可能性があり、施工リスクが低減できると考えられる。
- 3) タンピング試験で得られる単位スランブフロー変化量も間隙通過性が評価できる可能性がある。

参考文献

- 1) (社)土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[施工編]，2013.3
- 2) (社)土木学会：コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会（341委員会）第2期委員会報告書，2013.11
- 3) 中村，橋本，佐伯，北野：水セメント比および細骨材率が振動条件下におけるコンクリートの充填性に及ぼす影響，日本コンクリート工学会，年次論文集，第38巻，2016.7
- 4) (社)土木学会：施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針（案），2007.3



(a)PC-C-38 (b) PC-C-43 (c) PC-C-43 (d) PC-C-48

写真-2 充填状況

枠にシュート（パイロンの先端口径 100mm としたもの）で高さ 1.5m からすべて打込み，打込み後，型枠中央の一箇所にφ50 棒状パイブレータをシースに接触しない高さ（底板から 250mm）まで挿入した。棒状パイブレータを始動し，締固め時間は 15 秒とした。本来であれば，締固め挿入間隔は 500mm であるため，棒状パイブレータは二箇所に挿入する必要があるが，充填過程における状況で充填性能を評価するために，一箇所による締固めとし，硬化後の充填された面積で評価することとした。

4.2 実験結果

写真-2 に硬化後の充填状況を示す。いずれも上段のシース下部程度まで充填された。図-8 に間隙通過速度