

無機系短繊維補強コンクリートの現場適用を目的とした実験的検討

THE EXPERIMENTAL STUDY ON FRESH PROPERTIES, HARDENING PROPERTIES AND PUMPABILITY OF INORGANIC SHORT FIBER REINFORCED CONCRETE IN ORDER TO EXECUTION OF THE CONSTRUCTURE

田中 徹*1, 大橋 英紀*1, 仁平 達也*2
Tooru TANAKA, Hideki OHASHI and Tatsuya NIHEI

We did various kinds of experiments, using actual concrete mixer, in order to elucidate properties of fresh concrete and hardening process of inorganic short fiber reinforced concrete at every phase of production, transportation and pumping. Through the experiments, we confirmed that properties of fresh concrete at every phase and dispersibility of short fiber satisfied the target value. In observation of fiber surface by light microscopy, damage of fiber and detaching epoxy from fiber were not observed. The results of the bending strength and the bending toughness coefficient in field test were almost equivalent to the results in laboratory test. The results indicated that bending toughness was not affected by blending by actual concrete mixer nor transportation in the actual agitator vehicle. In addition, decline of slump by pumping was almost equal to the standard ordinary concrete. Moreover, pressure loss per unit length of pipeline in the pumping test was on the same level with the loss of steel short fiber reinforced concrete and PVA short fiber reinforced concrete. Furthermore, bending strength and the bending toughness coefficient did not change even after pumping.

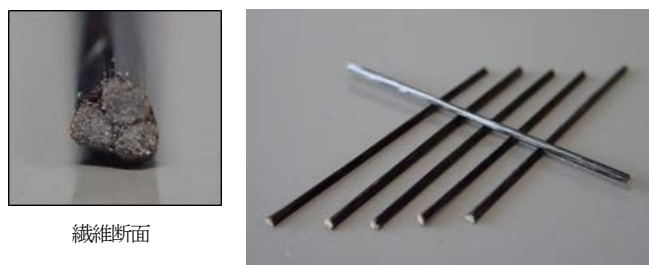
Keywords : *Inorganic Short Fiber, Fiber Reinforced Concrete, Fresh Properties, Hardening Properties, Pumpability*
無機系短繊維, 繊維補強コンクリート, 曲げタフネス, フレッシュ性状, 硬化性状, ポンプ圧送

1. はじめに

短繊維補強コンクリートはひび割れ分散効果や落防止などを目的として様々な構造物に適用されている¹⁾。現在使用されている代表的な短繊維として、鋼繊維や有機繊維（ポリプロピレン繊維やビニロン繊維）が挙げられる。これらの繊維はそれぞれ課題を有している。例えば鋼繊維は錆びの発生、有機繊維は紫外線劣化による強度低下である。

筆者らはこれら短繊維の課題解決を目的に、無機系材料である玄武岩由来のバサルト繊維に着目し、これを原料とした無機系短繊維を用いた補強コンクリートを開発している^{2),3)}（写真1）。本無機系短繊維は腐食が生じないことや紫外線劣化しにくいことが長所として挙げられる。また、耐アルカリ性の高いエポキシ樹脂で繊維を被覆することで長期耐久性を向上させている³⁾。

本稿では開発した無機系短繊維補強コンクリートの実施工を想



繊維断面

写真1 無機系短繊維

定し、アジテータ車による運搬やコンクリートポンプ車による圧送が流動性や空気量、また、硬化性状に与える影響把握を目的として実施した各種試験の結果について報告する。

2. 実機試験

2.1 試験概要

市中のレディーミクストコンクリート工場が無機系短繊維補強コンクリートを製造し、アジテータ車により打設現場まで運搬することを想定した実機試験を行った。

表1に実機試験の試験項目を示す。

フレッシュ性状はコンクリートの練混ぜ直後（0分）と練混ぜ後30分、60分、および、90分で経時変化を確認した。

写真2に繊維混入率試験状況を示す。繊維混入率試験（JSCE-F554-2013）⁴⁾ではアジテータ車の排出開始直後、中間時、および、排出終了直前において試料を採取し、繊維重量を測定した。また、繊維の分散性を把握することを目的に、目視によりファイバボールの有無を確認した。さらに、練混ぜや運搬時において、繊維を被覆しているエポキシ樹脂のはく離や欠損の有無を確認することを目的に、短繊維を無作為に抽出し、繊維表面を光学顕微鏡で観察した。

硬化性状は圧縮強度試験、静弾性係数試験、および、割裂引張強度試験に加えて、曲げタフネス試験（JSCE-G552）を実施し、本無機系短繊維補強コンクリートの曲げ強度、および、曲げ靱性係数を測定した。

*1 戸田建設技術開発センター 修士（工学）

*2（公財）鉄道総合技術研究所 博士（工学）

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

Railway Technical Research Institute, Dr.Eng.

2.2 使用材料および配合

表2に無機系短繊維の物性、表3、および、表4に試験に用いたコンクリートの材料と配合を示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は陸砂と砕砂の混合砂、粗骨材は砕石を使用した。混和剤は高性能 AE 減水剤を使用した。使用した短繊維は長さ40mm、密度1.83g/cm³である。

配合は水セメント比50%、単位水量175 kg/m³、空気量4.5%とした。細骨材率は事前の試験練りの結果から52.0%とした。また、短繊維は外割で1.0vol.%混入した。

2.3 無機系短繊維補強コンクリートの製造

写真3に無機系短繊維の投入状況を示す。

レディーミクストコンクリート工場においてコンクリートを製造後、実機ミキサ上部の投入口から短繊維を投入した後、45秒間練混ぜ排出した。

コンクリートは1バッチあたり1m³練混ぜ、2バッチを合わせて1台のアジテータ車に積込んだ。本試験においては同一配合のコンクリートをアジテータ車2台使用した。

2.4 実機試験結果および考察

(1) フレッシュ性状

実機試験時の外気温は21°C、コンクリート温度は22~24°Cであった。

図1にスランブの経時変化を示す。経過時間90分でのスランブの低下量は1台目2.0cm、2台目2.5cmであり、2台とも出荷時（経過時間0分）から経過時間90分まで、目標スランブ18±2.5cm以内の範囲であった。

図2に空気量の経時変化を示す。経過時間90分での空気量の低下量は1台目が0.7%、2台目が0.6%であり、はじめの30分でも0.5%低下しているが、その後の変化は認められなかった。空気量は出荷時（経過時間0分）から経過時間90分まで、2台とも目標空気量4.5±1.5%の範囲であった。

スランブ、および、空気量の経時変化の結果より、本無機系短繊維補強コンクリートは経過時間90分においても目標範囲を満足し、繊維を使用しない普通コンクリートの場合の場合と同様に、実機ミキサによる製造、および、アジテータ車で運搬が可能であることを確認した。

表1 試験項目

分類	試験項目	規格等	詳細
フレッシュ性状*1	スランブ	JIS A 1101	目標スランブ：18.0±2.5cm
	空気量	JIS A 1128	目標空気量：4.5±1.5%
	コンクリート温度	JIA A 1156	—
繊維分散性	繊維混入率	JSCE-F554-2013	「鋼繊維補強コンクリート鋼繊維混入率試験方法(案)」による。排出開始直後・中間時・排出終了直前の3ヶ所でコンクリートを採取し、繊維混入率を測定。 目標値：想定混入量に対して、各採取時±5%以内、平均値95%以上
	繊維分散性	—	目視によるファイバーボール等の有無を確認
	繊維観察	—	光学顕微鏡による繊維の表面状態の確認
硬化性状*2	圧縮強度	JIS A 1108	養生：標準水中、材齢：28日
	静弾性係数	JIS A 1149	圧縮強度試験と同時に実施
	割裂引張強度	JIS A 1113	養生：標準水中、材齢：28日
	曲げタフネス	JSCE-G 552	養生：標準水中、材齢：28日

*1 フレッシュ性状のスランブ、空気量およびコンクリート温度は、経過時間30、60、90分で測定を実施した。

*2 硬化性状の各試験は、荷卸時（経過時間30分）に供試体を採取した。

表2 無機系短繊維の特徴

項目	物性等	
被覆樹脂	エポキシ樹脂	
繊維長	(mm)	40
換算断面積	(mm ²)	0.67
密度	(g/cm ³)	1.83
引張強度	(N/mm ²)	1103
引張弾性率	(kN/mm ²)	27.1
破断時伸び率	(%)	4.5

表3 使用材料

分類 (記号)	使用材料
水 (W)	上水道水 (つくば市)
セメント (C)	普通ポルトランド (密度3.15g/cm ³ , 住友大阪セメント製)
細骨材1 (S1)	陸砂 (行方産, 表乾密度2.58g/cm ³ , 粗粒率2.50)
細骨材2 (S2)	砕砂 (佐野産, 表乾密度2.69g/cm ³ , 粗粒率3.10)
粗骨材 (G)	砕石 (2005, つくば産, 表乾密度2.69g/cm ³ , 粗粒率2.69, 実積率60%)
繊維 (Fb)	バサルト短繊維 (エポキシ樹脂被覆, 長さ40mm, 密度1.83g/cm ³)
混和剤 (Ad)	ポリカルボン酸系, 高性能AE減水剤

表4 配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					Ad (C×%)	Fb	
		W	C	S1	S2	G		混入率 (vol.%)	混入量 (kg)
50.0	52.0	175	350	630	280	863	1.3	1.0	18.3



写真2 繊維混入率試験状況



写真3 繊維投入状況

(2) 繊維分散性

図 3 に繊維混入率試験の結果を示す。想定混入量と比較して、排出開始直後、中間時、および、排出終了直前ではいずれも 100±5% の範囲内となった。平均値は 1 台目が 99%、2 台目が 100% となり、いずれの値も繊維混入率試験 (JSCE-F554-2013) の値を満足した。全試料での標準偏差は 2.3%、変動係数は 2.3% であり、既往の参考文献⁶⁾ (鋼繊維補強コンクリートの検討結果: 標準偏差 5%, 変動係数 4.8%) と比較しても良好な値となった。また、目視確認の結果、ファイバーボールは認められなかった。

写真 4 に無機系短繊維の顕微鏡による観察写真を示す。製造時、および、運搬時に骨材や繊維同士の接触によって、繊維表面のエポキシ樹脂の損傷や繊維自体が折れる等の不具合が生じる可能性が考えられたが、目視、および、顕微鏡観察の結果、これらの不具合は認められなかった。

以上より、実機ミキサによる製造、および、運搬においても無機系短繊維の損傷や折れの発生確率は低いことを確認した。

(3) 硬化性状

表 5 に材齢 28 日における各種強度試験の結果、図 4 に曲げタフネス試験における荷重-変位曲線を示す。また、事前の室内試験練りで採取した同一材料、配合の試験体を用いて実施した各種強度試験の結果を比較用として示す。

試験の結果、実機試験と事前の室内試験の結果に大きな差異は認められず、製造方法や運搬の有無による影響は見られなかった。

また、曲げ強度と曲げ靱性係数の値は実機と室内試験では差が小さく、繊維が良好に分散していることを示唆する結果となった。

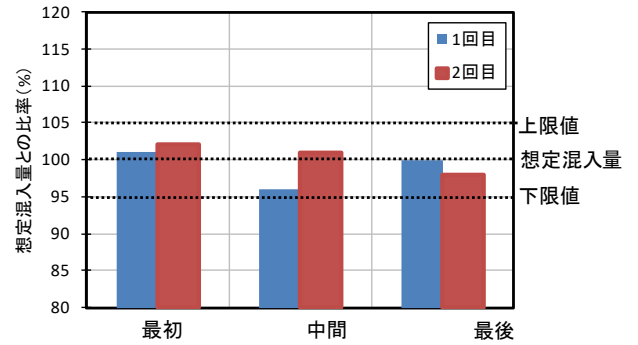
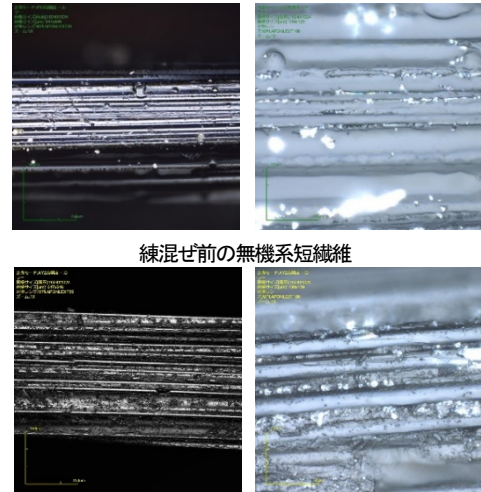


図 3 繊維混入試験の結果



繊維混入率試験で取出した無機系短繊維 (左: 倍率 400 倍, 右: 2000 倍)

写真 4 無機系短繊維の顕微鏡による観察

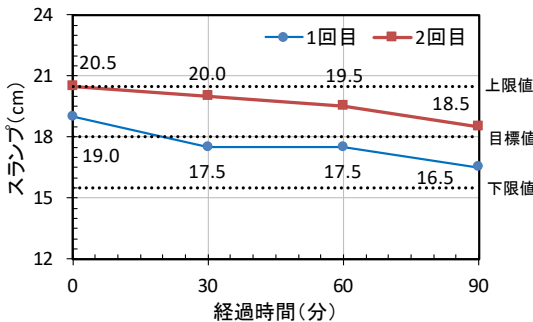


図 1 スランプの経時変化

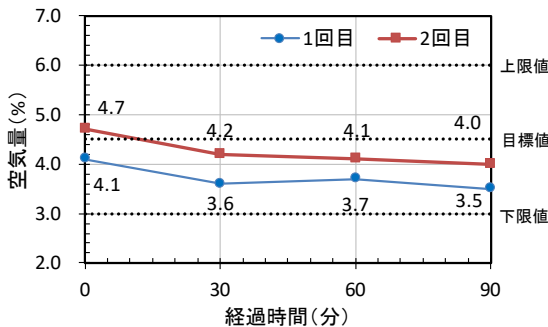


図 2 空気量の経時変化

表 5 強度試験の結果

試験項目	実機試験	室内試験
圧縮強度 (N/mm ²)	49.4	45.4
静弾性係数 (kN/mm ²)	29.1	25.7
割裂引張強度 (N/mm ²)	3.62	3.43
曲げ強度 (N/mm ²)	5.62	5.58
曲げ靱性係数 (N/mm ²)	5.02	4.94

*養生方法は標準水中、試験材齢は 28 日。

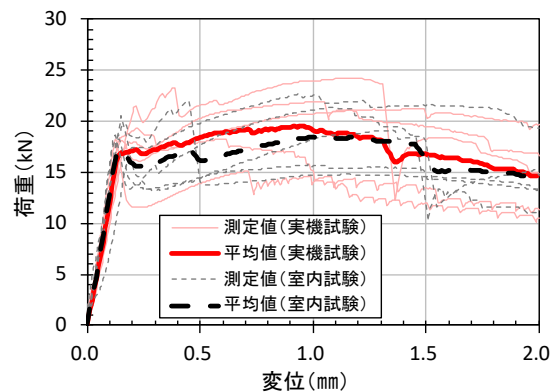


図 4 曲げタフネス試験の結果

3. ポンプ圧送試験

3.1 試験概要

図5に配管経路図、表6に管内圧力測定位置（測定位置の番号は図5を参照）を示す。

本試験は文献1)を参考に、水平換算距離141.6mを圧送し、実吐出量計測用の型枠に排出・打設した。管内圧力の計測は主にベント管付近の10箇所とした。

無機系短繊維補強コンクリートの製造はレディーミクストコンクリート工場の強制2軸ミキサで、1バッチ当たり2.0m³を練混ぜた。無機系短繊維は実機試験と同様の手順で練混ぜ、アジテータ車1台に2バッチ合わせて計4.0m³のコンクリートを積載し、約15分かけて試験場所まで運搬した。コンクリートポンプ車は最大吐出圧力5.6MPa、最大吐出量100m³/hを有するものを使用し、輸送管の管径は5B(125A)とした。設定吐出量は一般的な施工を想定して20m³/h、30m³/h、および、40m³/hとし、管内圧力が安定するまで計測した。フレッシュコンクリート試験は出荷時（練混ぜからの経過時間7分）、圧送前（29分）、および、圧送後（44分）にそれぞれ実施した。繊維混入率試験はアジテータ車からの排出開始直後、中間時、および、排出終了直前で採取し、測定した。

また、圧送前後で供試体を採取し、表1に示した各種強度試験（圧縮強度、静弾性係数、および、曲げタフネス）を実施し、圧送前後の硬化コンクリートの品質を比較した。

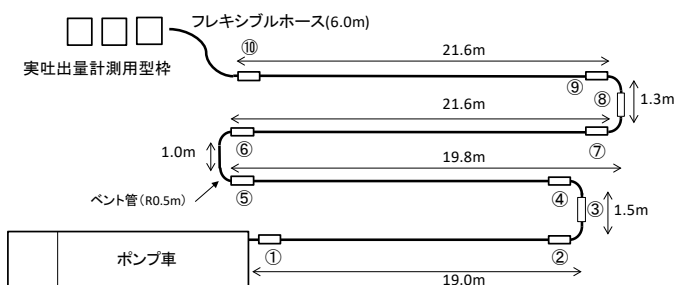


図5 配管経路図

表6 管内圧力測定位置

管内圧力測定位置	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
水平換算距離(m)	0.3	18.6	24.9	32.3	54.3	67.8	86.3	92.8	100.3	121.6

表7 使用材料

分類(記号)	使用材料
水(W)	河川水・回収水(スラッジ水)
セメント(C)	普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm ³)
細骨材1(S1)	川砂(表乾密度2.54g/cm ³ , 粗粒率2.85)
細骨材2(S2)	海砂(表乾密度2.58g/cm ³ , 粗粒率2.64)
粗骨材(G)	碎石(2005, 表乾密度2.60g/cm ³ , 実積率59.0%)
繊維(Fb)	バサルト短繊維(エポキシ樹脂被覆, 長さ40mm, 密度1.83g/cm ³)
混和剤(Ad)	高性能AE減水剤, ポリカルボン酸系

3.2 使用材料および配合

表7に本試験に使用したコンクリートの使用材料、表8にコンクリートの配合を示す。配合は実際に適用する予定の現場を想定し、呼び強度30(N/mm²)相当で水セメント比47.0%, 細骨材率52.0%, 繊維混入率1.0vol.%（外割）とした。混和剤は高性能AE減水剤を使用した。ポンプ圧送後のスランプの目標値は12.0±2.5cm, 空気量は4.5±1.5%とした。

なお、圧送前の目標スランプは、土木学会のコンクリートのポンプ施工指針7(以下、ポンプ指針とする)を参考に、普通コンクリートのスランプの低下量は圧送距離50m以上150m未満の場合0~1cm程度、さらに経時変化により1~2cm程度低下すると想定し、15.0±1.5cmとした。

3.3 ポンプ圧送試験結果および考察

(1) フレッシュ性状

表9に出荷時・圧送前・圧送後のフレッシュコンクリート試験の結果を示す。スランプは運搬により0.5cm低下し、ポンプ圧送により1.5cm低下した。ポンプ圧送によるスランプの変化はポンプ指針で示している普通コンクリートと同等であった。また、空気量は圧送前後で変化は認められなかった。

(2) 繊維分散性

繊維混入率試験の結果、想定混入量と比較して、96%, 101%, および、99%, 平均値は99%, 標準偏差2.9%となり、いずれの値も繊維混入率試験(JSCE-F554-2013)の値を満足した。また、2.4(2)の試験結果(平均値100%, 標準偏差2.3%)と同等であった。ポンプ圧送試験前後においてファイバボールは認められず、本無機系短繊維はコンクリート内に均一に分散していることを確認した。

(3) ポンプ圧送時の管内圧力損失

図6に設定吐出量30m³/hにおける圧送時の圧力波形を示す。管内圧力は波形の安定した箇所にて読み取り、管内圧力損失を検討した。

表8 配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					Ad (C×%)	Fb 混入率 (vol.%)
		W	C	S1	S2	G		
47.0	52.0	172	366	352	537	832	0.8	1.0

表9 フレッシュコンクリート試験結果

試験時期	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	外気温 (°C)
出荷時	16.0	4.1	8	1
圧送前	15.5	5.0	8	2
圧送後	14.0	4.8	8	5

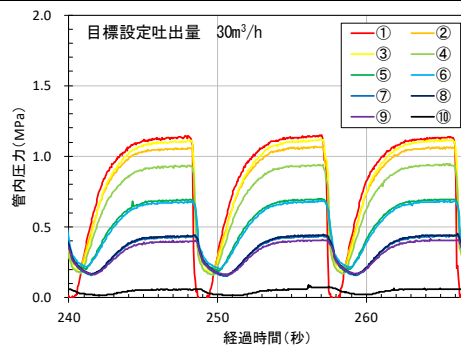


図6 圧送時の管内圧力波形の例

図 7 に水平換算距離と管内圧力の関係を示す。管内圧力は水平換算距離が長くなるとともに減少した。また吐出量が上昇すると、同一水平換算距離での管内圧力は高くなる傾向となった。

図 8 に吐出量と水平管 1m 当りの管内圧力損失の関係を示す。本検討では管内圧力損失はベント管の影響がなく管内圧力が安定している⑥-⑦の直管の区間で評価した。ポンプ指針で示されている普通コンクリートのスランプ 15cm の標準値と比較すると、管内圧力損失は 1.3~1.7 倍程度となった。既往の文献⁸⁾⁹⁾で検討された、繊維混入率 1.0vol.% の鋼繊維や PVA (ビニロン) 繊維においても、管内圧力損失は普通コンクリートと比較して大きくなっており、同程度の圧力損失であったことから、本無機系短繊維補強コンクリートは他の短繊維補強コンクリートと同様の圧送性を有しているものと考えられる。

(4) 強度試験結果

表 10 に各種強度試験の結果を示す。本無機系短繊維補強コンクリートはポンプ圧送前後において圧縮強度、および、静弾性係数の差は小さく、曲げ性能や引張性能を評価する指標である曲げ強度、および、曲げ靱性係数は同等であり、大きな差異はみられなかった。

以上の結果から、本無機系短繊維補強コンクリートはポンプ圧送によるコンクリートの硬化性状への影響は認められなかった。

4. まとめ

実施工を想定して、レディーミクストコンクリート工場で本無機系短繊維補強コンクリートを製造し、アジテータ車により運搬した後のフレッシュ性状と硬化性状の検討、および、ポンプ圧送試験を行った。以下にこれらの結果をまとめる。

- (1) 実機試験の結果、本無機系短繊維補強コンクリートは経過時間 90 分においてもフレッシュ性状の目標範囲を満足し、実機ミキサによる製造、および、アジテータ車での運搬が可能であることを確認した。
- (2) アジテータ車による運搬後の無機系短繊維を観察した結果、繊維表面のエポキシ樹脂の損傷や繊維自体が折れる等の不具合は認められなかった。
- (3) 実機試験と室内試験の結果を比較すると、曲げ強度や曲げ靱性係数は同等であり、実機ミキサによる練混ぜ、および、アジテータ車の運搬は本無機系短繊維補強コンクリートの曲げ靱性への影響がないことを確認した。
- (4) ポンプ圧送試験の結果、本無機系短繊維補強コンクリートのスランプ低下量は一般的な普通コンクリートと同等であった。
- (5) 管内圧力損失はスランプ 15cm の普通コンクリートの標準値より大きく、既往の文献⁸⁾⁹⁾の鋼繊維や PVA 繊維を使用した短繊維補強コンクリートと同程度であった。
- (6) ポンプ圧送前後において圧縮強度、および、静弾性係数の差は小さく、曲げ強度、および、曲げ靱性係数は同等であり、ポンプ圧送による本無機系短繊維補強コンクリートの硬化性状への影響は認められなかった。

謝辞

最後に、本試験にご協力いただいた、戸田建設九州支店の高橋和寛氏他現場の皆様、混和剤を提供いただいた㈱フローリック九州営業所の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 南邦明, 下津達也, 斉藤雅充: 北陸新幹線第 4 千曲川橋りょう (連続合成桁) の架設, 橋梁と基礎, pp.41-47, 2012
- 2) 仁平達也, 笹田航平, 田中徹, 井戸康浩: バサルト短繊維の耐アルカリ性に関する一考察, 土木学会第 72 回年次学術講演会, V-547, pp.1093-1094, 2017
- 3) 笹田航平, 田中徹, 仁平達也, 井戸康浩: バサルト短繊維補強コンクリートが鉄筋コンクリートの付着特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, 2017
- 4) 福宮恭彦, 南邦明, 斉藤雅充, 下津達也: 鋼鉄道橋連続合成桁で用いる鋼繊維補強コンクリートの性能特性, 土木学会第 67 回年次学術講演会 I-454, pp.907-908, 2012
- 5) JSCE-F554-1999 「鋼繊維補強コンクリートの鋼繊維混入率試験方法」
- 6) 伊藤始, 岩波光保, 横田弘: 短繊維補強コンクリートの施工性に関する検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1087, 2004
- 7) コンクリートのポンプ施工指針[2012 年版] コンクリートライブラリー 第 135 号 土木学会
- 8) 浦野真次, 滝本和志, 高橋圭一: 有機系短繊維混入コンクリートのポンプ圧送性に関する検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会 V-320, pp.639-640, 2008
- 9) 臼井達哉, 木ノ村幸士, 坂本淳, 斎賀雄: 鋼繊維補強高流動コンクリートのポンプ圧送性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, vol.38, No.1, 2016

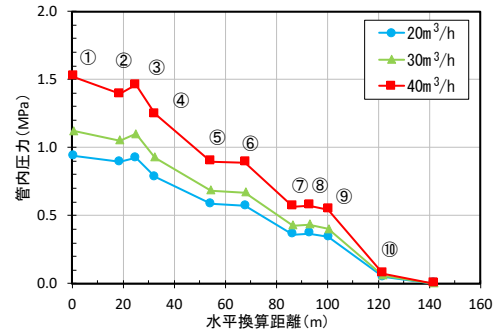


図 7 水平換算距離と管内圧力の関係

本検討	バサルト短繊維40mm	1.0vol. %	スランプ15.5cm
文献8)-1	PVAφ0.66×30mm	1.0vol. %	スランプ15.0cm
文献8)-2	PVAφ0.66×30mm	1.0vol. %	スランプ19.5cm (軽量骨材)
文献9)-1	鋼繊維φ0.75×30mm	1.0vol. %	スランプフロー71.0cm
文献9)-2	鋼繊維φ0.75×30mm	1.0vol. %	スランプフロー61.0, 65.0cm

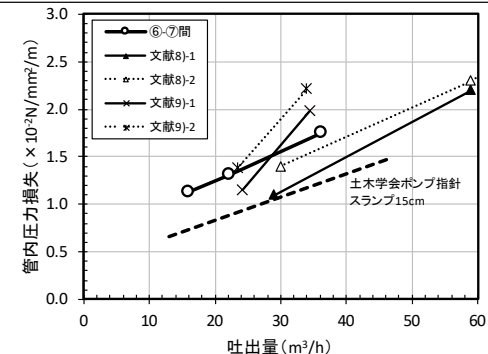


図 8 吐出量と管内圧力損失の関係

表 10 強度試験結果

採取時期	圧縮強度 (N/mm²)	静弾性係数 (kN/mm²)	曲げ強度 (N/mm²)	曲げ靱性係数 (N/mm²)
圧送前	39.9	27.9	5.33	4.45
圧送後	36.2	26.7	5.40	4.52