

高靱性軽量コンクリートの材料特性に関する研究

平成 18,19 年度共同研究報告書

平成 23 年 11 月

独立行政法人土木研究所寒地土木研究所
ドーピー建設工業株式会社

Copyright © (2011) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

高靱性軽量コンクリートの材料特性に関する研究

耐寒材料チーム

上席研究員 田口史雄

総括主任研究員 嶋田久俊^{※1}

研究員 栗橋祐介^{※2}

研究員 遠藤裕丈

ドーピー建設工業株式会社

部長 坂口国夫

課長 大岡昭雄

課長 松井敏二

係員 市川聖芳

要 旨 :

吸水率を約 15%に調整した頁岩系従来型軽量骨材（最大吸水率は約 30%）とビニロン短繊維を組み合わせた耐凍害性に優れる高靱性軽量コンクリートの施工性と品質について評価を行った。施工性については、スクイズ式ポンプ車による圧送は十分可能で、推奨されるビニロン混入率は 0.5%~0.75% であることが確認された。また、ビニロン繊維およびスラグの使用により、所定の性能を満足できる配合設計が可能であることがわかった。さらに、短繊維混入による耐力向上効果や脆性破壊の抑制効果について検証した結果、実測せん断耐力は計算せん断耐力を大きく上回る結果が示された。

キーワード：軽量コンクリート、ビニロン短繊維、ポンプ圧送、耐凍害性、靱性

※1 現 寒地技術推進室

※2 現 室蘭工業大学

目 次

まえがき（平成 18 年度）

1. 研究目的	1
2. 研究方法	1
2. 1 フローチャート	2
2. 2 試験方法	2
2. 3 試験条件	4
3. 研究結果	8
3. 1 ポンプ圧送試験結果	8
3. 2 硬化コンクリート試験結果	16
3. 3 考察	24
4. 結論	30
5. 今後の問題点等	30

まえがき（平成 19 年度）

6. 研究目的	32
7. 研究方法	32
7. 1 ポンプ圧送試験	32
7. 2 高靱性コンクリート製 PC 梁の静載荷実験	35
8. 研究結果	36
8. 1 ポンプ圧送試験	36
8. 2 高靱性コンクリート製 PC 梁の静載荷実験	43
8. 3 考察	44
9. 結論	49
10. 今後の問題点等	49
参考文献	50

平成 18 年 度

まえがき

軽量コンクリートを用いた土木構造物は、死荷重の軽減による部材断面縮小などの経済効果に加えて、軟弱地盤および基礎工への負担低減など、経済性や耐震性に与えるメリットが大きい。しかしながら一般に吸水率の高い頁岩系の非造粒軽量骨材は、北海道のような寒冷地では耐凍害性に対する懸念が強く使用実績が少ないのが現状である。一方、土木構造物の施工において現場でのコンクリート打設にはポンプ施工が多く用いられるが、軽量コンクリートのポンプ圧送性を確保するためには圧送中の軽量骨材への圧力吸水を考慮して、耐凍害性に影響を及ぼさない範囲であらかじめ軽量骨材を吸水させておく必要がある。ここに耐凍害性と施工性を両立させる配合選定が求められる。さらに、道路橋の主桁や床版など特に靱性や耐久性が要求される構造物への適用を図るには、力学面の要求性能にも応えるため、軽量コンクリートへの短繊維補強材の混入による力学性能の確保も求められる。

1. 研究目的

本研究は、吸水率を約 15%に調整した頁岩系従来型軽量骨材（最大吸水率は約 30%）とビニロン短繊維を組み合わせた耐凍害性に優れる高靱性軽量コンクリートの施工性および品質の評価を行うことを目的とする。ポンプ圧送実験は、ドーピー建設工業（株）幌別工場にて行った。

2. 研究方法

本研究は、ポンプ圧送試験と硬化コンクリート試験に大別される。

ポンプ圧送試験は、配管長 39m とし所定の配合条件でコンクリートポンプ車（スクイズ式）を用いてポンプ圧送を行う。その際、圧送前、後において、吸水率測定、スランプフロー試験、空気量試験、間隙性通過試験、流下試験を行うと共に、各種硬化コンクリート試験を行うための供試体を作製する。作製した供試体は、ある程度硬化した時点（作製の翌日）で寒地土研に運搬し、恒温水槽中で所定材令まで水中養生する。

硬化コンクリート試験は、所定材令まで水中養生した後、圧縮強度試験、曲げ強度試験、曲げタフネス試験、凍結融解試験、動弾性係数測定を行う。

2.1 フローチャート

本研究は、図-2.1.1 に示すフローに沿って行う。

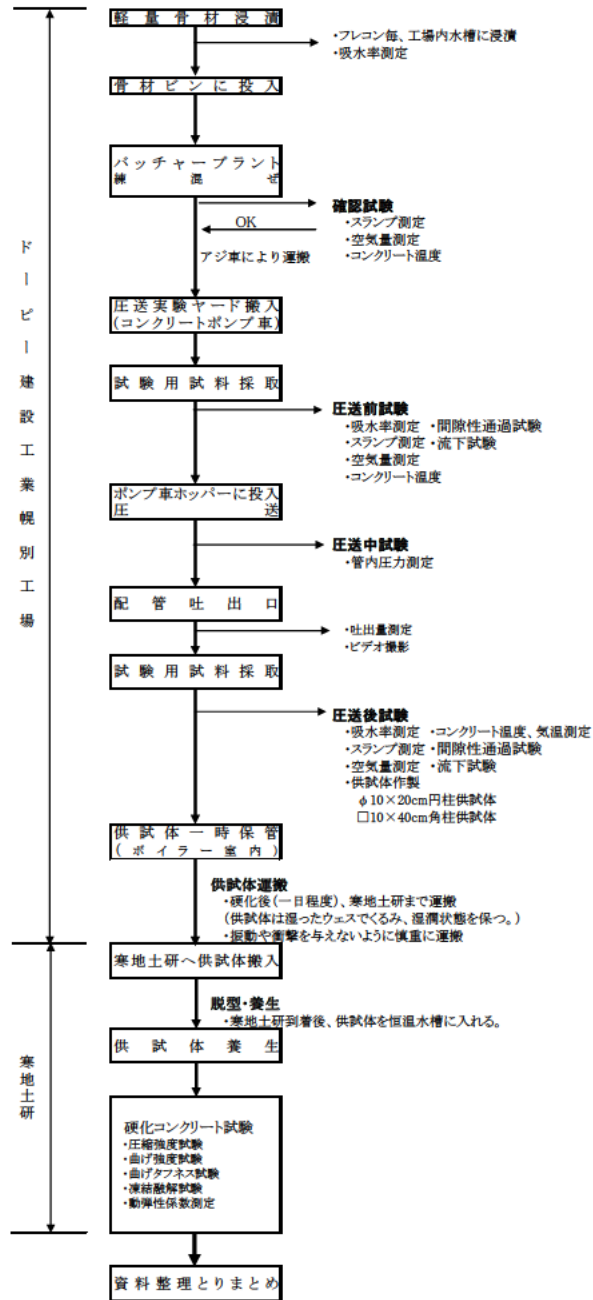


図-2.1.1 試験研究フロー

2.2 試験方法

以下、主な試験項目の試験方法について述べる。

(1) ポンプ圧送実験

練混ぜた軽量コンクリートのポンプ圧送を行う。ポンプ車はスクイズ式を使用する。圧送管は、径 125mm、長さ 39m、直線水平配管とする。なお、軽量コンクリートには短繊維混入軽量コンクリートも含んでいる。

(2) 骨材吸水率測定

「JIS A 1110 粗骨材の密度及び吸水率試験方法」に準じ、軽量骨材の吸水率を測定する。

(3) スランプフロー試験

「JIS A 1150 コンクリートのスランプフロー試験方法」に準じ、練混ぜた軽量コンクリートと圧送後の軽量コンクリートのスランプフローを測定する。

(4) 空気量試験

「JIS A 1128 フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法（空気室圧力方法）」に準じ、練混ぜた軽量コンクリートと圧送後の軽量コンクリートの空気量を測定する。

(5) 間隙通過性試験

「JSCE-F 511 高流動コンクリートの充てん装置を用いた間げき通過試験方法（案）」に準じて、充填装置を用いて、練混ぜた軽量コンクリートと圧送後の軽量コンクリートの間隙通過性を測定する。

(6) 流下試験

「JSCE-F 512 高流動コンクリートの漏斗を用いた流下試験方法（案）」に準じて、Vロート試験器具を用いて、練混ぜた軽量コンクリートと圧送後の軽量コンクリートの流下試験を行う。

(7) 供試体作製

圧送されたコンクリートを型枠に詰め供試体を作製する。供試体寸法は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ および $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ とする。供試体作製は「JIS A 1132 コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準じて行う。

(8) アングル片取り付け

「JSCE-G 552 鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法」に準じて、曲げタフネス測定用の供試体 ($10 \times 10 \times 40\text{cm}$) にアングルを取り付ける。

(9) 圧縮強度試験

「JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じ、アムスラーを使用して、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の供試体を用いて圧縮強度を測定する。

(10) 曲げ強度試験

「JIS A 1106 コンクリートの曲げ強度試験方法」に準じ、曲げ試験機を使用して $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の供試体を用いて曲げ強度を測定する。

(11) 曲げタフネス試験

「JIS A 1106 コンクリートの曲げ強度試験方法」に準じ、曲げ強度測定時に、ひずみを測定し、曲げタフネスを算出する。

(12) 凍結融解試験

「JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法」に準じ、凍結融解試験装置を使用して、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の供試体の凍結融解試験を 300 サイクル行う。

(13) 動弾性係数測定

「JIS A 1127 共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」に準じ、凍結融解試験 30～36 サイクルに 1 回の間隔で、動弾性係数を測定し、耐久性指数を算出する。

2.3 試験条件

(1) ポンプ圧送条件

- ①ポンプ車 : スクイズ式、ブーム式 90～110 m³/h
- ②管径 : 125 mm
- ③配管長 : 39 m

(2) コンクリート所要性状

1) フレッシュコンクリート性状

- ①スランプフロー : 550～650 mm
- ②空気量 : 7.0～9.5 %
- ③ポンプ圧送性能 : 圧送距離 39 m、施工能力 8m³/h 以上

2) 硬化コンクリート性状

- ①圧縮強度 : 40 N/mm² 以上
- ②凍結融解抵抗性 : DF85 %以上

(3) 使用材料

- ①セメント : 普通セメント
- ②使用水 : ドーピー建設工業 (株) 幌別工場内使用地下水
- ③細骨材 : ドーピー建設工業 (株) 幌別工場使用陸砂
- ④粗骨材 : 以下の2種類を使用した
 - (1) ドーピー建設工業 (株) 幌別工場使用砕石 2005 (密度 : 2.60g/cm³)
 - (2) 太平洋アサノライト粗骨材 (密度 : 1.25g/cm³、耐凍害性確保のため、吸水率の目標値を 14.5～15.5%とする。)
- ⑤混和剤 : 粉末スラグ(ブレーン 4000)
ビニロン繊維 (長さ 30mm)
- ⑥混和剤 : 高性能 AE 減水剤レオビルド SP8SBsZ (軽量コンクリート用)
空気連行助剤ヴィンゾル W
AE 減水剤ポゾリス NO.78S (普通コンクリート用)

(4) 試験ケース及び配合

実験ケース	粗骨材使用割合 軽量/砕石	短繊維混入割合 (%)	水セメント比 W/C (%)	水粉体比 W/P (%)	細骨材率 S/a (%)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤	
								セメント C	スラグ	水 W	細骨材 S	粗骨材 G		SP8SBsZ	ヴィンゾル W
												軽量	砕石		
NO.1	0/100	0.0	50.0	50.0	42.2	550 ~ 650	7.0 ~ 9.5	310	0	155	793	0	1084	P*1.00%	P*0.05%
NO.2	100/0	0.0	32.8	27.9	46.5			457	80	150	745	400	0	P*1.10%	P*0.75%
NO.3	100/0	0.5	32.8	27.9	46.5			457	80	150	745	400	0	P*1.35%	P*0.90%
NO.4	100/0	0.75	32.8	27.9	46.5			457	80	150	772	388	0	P*1.45%	P*0.60%
NO.5	70/30	0.0	32.8	27.9	46.5			457	80	150	745	334	143	P*1.00%	P*0.05%
NO.6	70/30	0.50	32.8	27.9	46.5			457	80	150	745	334	143	P*1.25%	P*0.80%
NO.7	100/0	1.00	35.1	25.6	25.6			427	160	150	751	375	0	P*1.55%	P*0.73%

(5) ポンプ圧送手順

ポンプ圧送試験全体配置図を図-2.3.1に示す。

①基本手順

手順1) 1:3モルタルをポンプ車へ先行投入 0.3m³

手順2) 0.75m³/バッチ混練 (全材料投入後120秒混練)

手順3) アジ車へ排出し、性状確認(スランプフロー、空気量、温度)

手順4) 上記不合格の場合、廃棄

合格の場合、更に0.75m³/バッチ混練(120秒)

手順5) アジ車にて、ポンプ車まで運搬

圧送前試料採取、試験(スランプフロー、空気量、骨材吸水率、流下試験、間隙性通過試験)

手順6) ポンプ車ホッパーに投入し、圧送開始(10m³/h設定)

圧送中: 根元及び20m付近管内圧力測定

吐出口: 吐出量測定(施工能力)、ビデオ撮影、分離状態目視確認

手順7) 圧送後試料採取、試験(スランプフロー、空気量、骨材吸水率、流下試験、間隙性通過試験、外気温度測定、供試体作成)

注) *1.5m³/h圧送時間はおおよそ9分となる。

*供試体作成後、直ちに工場内ボイラー室に搬送・保管。

ただし、

②上記手順で、短繊維(ビニロン)混入の実験ケースは、ビニロンの投入は練混ぜ1分後とし、更にビニロン投入完了後2分混練し排出する。

③上記手順で、実験ケースNO.1は、圧送前・圧送後の流下試験、間隙通過試験は除く。

幌別工場全体配置図

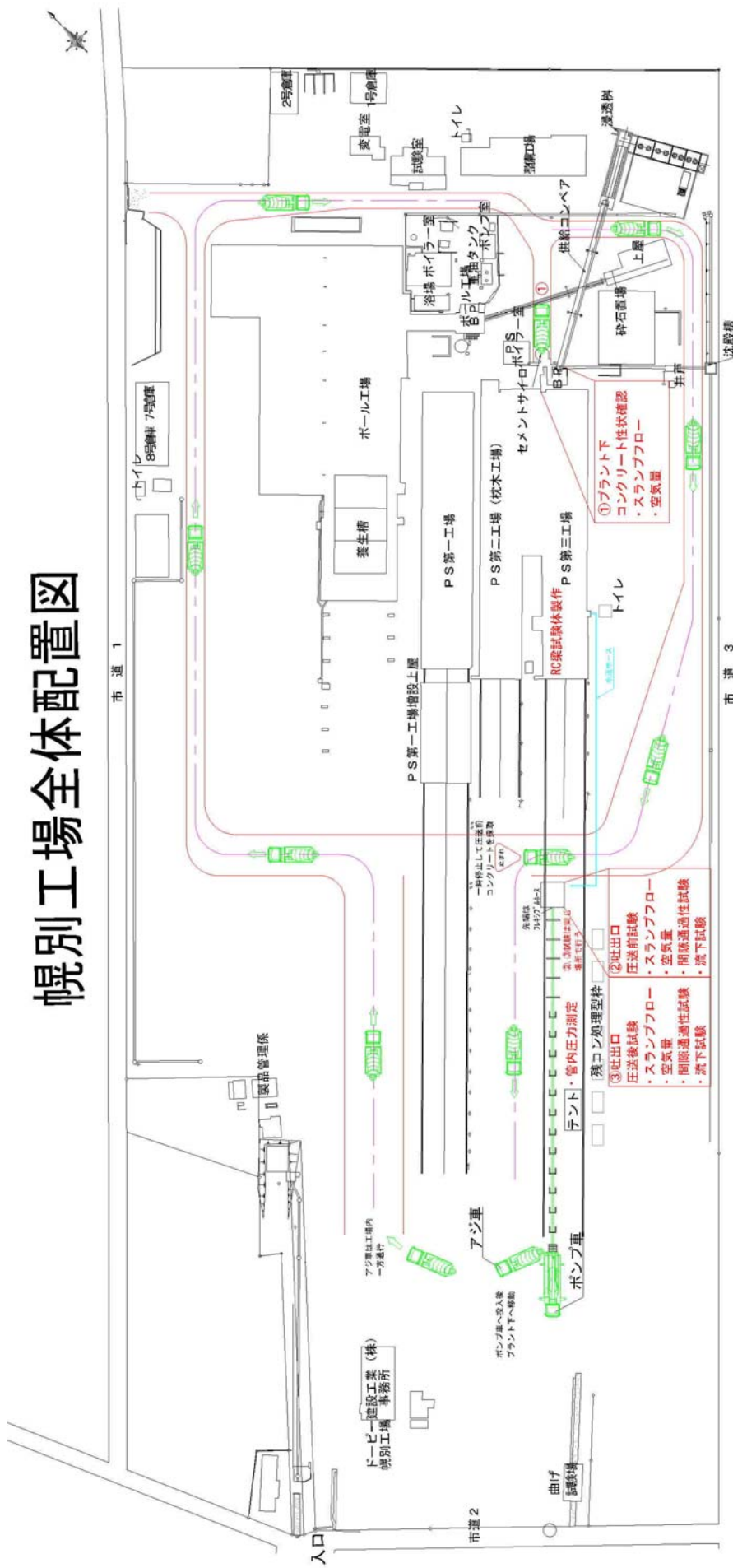


図-2.3.1 ポンプ圧送試験 全体配置図

圧送試験の状況は次のとおりである。



写真-2.3.1 全 景



写真-2.3.2 圧送側



写真-2.3.3 吐出側

3. 研究結果

3.1 ポンプ圧送試験結果

ポンプ圧送試験結果を表-3.1.1に示す。

平成 18年 11月 5 日(日曜日) 天候:曇り時々晴れ

試験結果一覧表

短繊維: ヒニロン短繊維 RFB4000 乾燥吸水率: 16.2 (%)

実測	配合	短繊維使用割合 (%)	短繊維含水率 (%)	短繊維含水率 (g/g)	短繊維含水率 (g/g)	単位量 (kg)		通知制				
						セメント C (%)	スラブ (%)	水 W (%)	短繊維 S (%)	粗骨材 G (%)	S/S/G/P (%)	
N0.1	0/100	0.0	50.0	42.2	310	0	155	733	0	1084	P#1.00%	P#0.05%
N0.2	100/0	0.0	32.8	27.9	457	80	150	745	400	0	P#1.10%	P#0.75%
N0.3	100/0	0.5	32.8	27.9	457	80	150	745	400	0	P#1.35%	P#0.90%
N0.4	100/0	0.75	32.8	27.9	457	80	150	772	388	0	P#1.45%	P#0.60%
N0.5	70/30	0.0	32.8	27.9	457	80	150	745	334	143	P#1.20%	P#0.30%
N0.6	70/30	0.50	32.8	27.9	457	80	150	745	334	143	P#1.25%	P#0.80%
N0.7	100/0	1.00	35.1	25.6	427	160	150	751	375	0	P#1.55%	P#0.75%

*注) 骨材修正係数 (空気量の修正値)
 軽量: 碎石=100:0 → 3.1%
 軽量: 碎石=70:30 → 2.2%

*注) 圧送性
 ○: 圧送良好
 △: 圧送可

(2) ポンプ圧送実験 ポンプ車タイプ: スクワイヤ式 設定吐出量: 10m³/h 管径: 5インチ 配管長: 39m

実測	コース	プレッシュコンクリート性状										圧送後			管内圧力			吐出量 (m ³ /h)	圧送性		
		スランプロー					コンクリート					空気量			吸水率					圧力分配 (kPa/m) (1=1m)	
		スランプロー	500mm到達時間 (s)	逆動停止時間 (s)	フロー量 (mm)	読み値 (%)	空気量 修正後 (%)	吸水率 (%)	コンクリート 温度 (°C)	500mm到達時間 (s)	逆動停止時間 (s)	フロー量 (mm)	読み値 (%)	空気量 修正後 (%)	吸水率 (%)	コンクリート 温度 (°C)	吸水率 (%)				吸水率 (%)
N0.1	-	スランプロー	-	-	11.5cm	3.2	3.2	3.9	3.9	3.9	16.5 (°C)	16.5 (°C)	2.3	2.3	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	11.4	○
N0.2	18.76	49.5	50	50	600	6.9	10.6	10.6	7.5	21.56	18.0 (°C)	18.0 (°C)	15.6	15.6	6.0	6.0	6.0	6.0	10.3	○	
N0.3	4.80	38.84	638	638	710	7.5	10.8	10.8	7.7	31.88	18.0 (°C)	18.0 (°C)	15.0	15.0	6.5	6.5	6.5	6.5	10.5	○	
N0.4	5.67	43.18	681	681	631	7.3	10.5	10.5	7.4	49.25	20.0 (°C)	20.0 (°C)	15.9	15.9	6.9	6.9	6.9	6.9	9.5	○	
N0.5	8.71	27.99	544	544	561	4.8	9.3	9.3	7.1	41.86	18.0 (°C)	18.0 (°C)	12.0 (16.2% : 軽量のみ)	12.0 (16.2% : 軽量のみ)	6.8	6.8	6.8	6.8	8.7	△	
N0.6	15.70	33.76	518	518	720	10.9	10.4	10.4	8.2	36.38	18.0 (°C)	18.0 (°C)	12.8 (17.4% : 軽量のみ)	12.8 (17.4% : 軽量のみ)	9.3	9.3	9.3	9.3	10.0	○	
N0.7	9.57	44.76	624	624	734	6.2	10.4	10.4	7.3	69.43	18.0 (°C)	18.0 (°C)	15.7	15.7	7.1	7.1	7.1	7.1	10.4	△	

表-3.1.1

(1) 吸水率

圧送前・圧送後における吸水率の変化を図-3.1.2に示す。

なお、NO.5、NO.6のケースは、碎石混入率30%であるため軽量骨材のみの吸水率に換算した。

圧送後の吸水率は、NO.2、NO.5のケースでは圧送前に比べ僅かに小さい値を示しているものの、他のケースは0.3~1.6%増加しており、圧送圧力による加圧吸水の傾向がみられる。

軽量骨材の吸水特性は浸漬日数と吸水率の関係（平成16年度調査結果）¹⁾²⁾³⁾から、浸漬日数20日で吸水率16.8~18.3%（浸漬時水温11.6~33.7℃）に達し概ね収束している。よって、飽和時の吸水率は16.8~18.3%程度と推定され、圧送後の飽和状態にかなり近い状態まで吸水率が上昇したと判断される。

圧送時の管内圧力（根元付近）と吸水率変化量との関係を図-3.1.3に示す。

管内圧力と吸水率変化量との間には明瞭な傾向は認められなかった。これは、上記のように、使用した軽量骨材の吸水率が飽和状態に近かったために、加圧吸水に伴う吸水率変化量の明瞭な傾向が示されなかったものと考えられる。

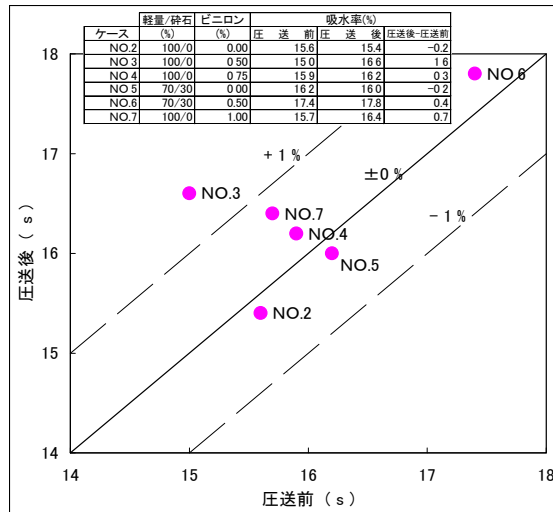


図-3.1.2 圧送前・圧送後における吸水率の変化

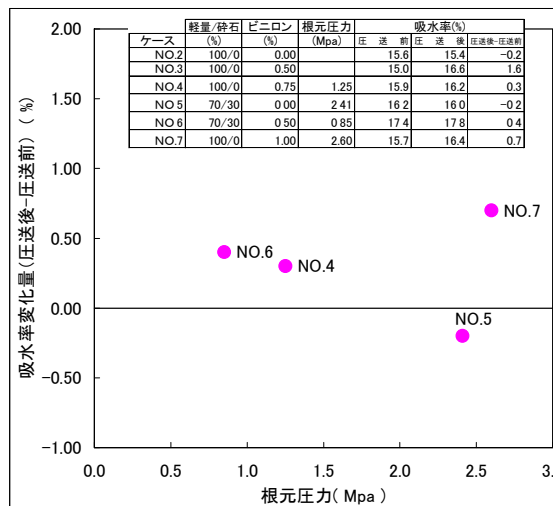


図-3.1.3 管内圧力（根元付近）と吸水率変化量

(2) スランプフロー

圧送前・圧送後のスランプフロー値、500mm 到達時間、および流動停止時間の関係を図-3.1.4 に示す。

スランプフロー値は、何れのケースにおいても圧送後は圧送前に比べて小さくなっている。

500mm 到達時間は、何れのケースにおいても圧送後が圧送前に比べて長くなっている。

流動停止時間は、NO.2 及び NO.7 のケースで圧送後が圧送前に比べて僅かに短くなっているが、他のケースは長くなっている。

以上のスランプフロー性状から、圧送後は、スランプフロー値自体は小さくなる傾向にあるものの、500mm 到達時間や流動停止時間は長くなる傾向にあると言える。このことは、前述したように圧送後の吸水率の増加に伴ってコンクリート中の水分が減少し、流動性が低下することを示している。

また、この流動性の低下とともに、粘性が増すこともあわせて示された。

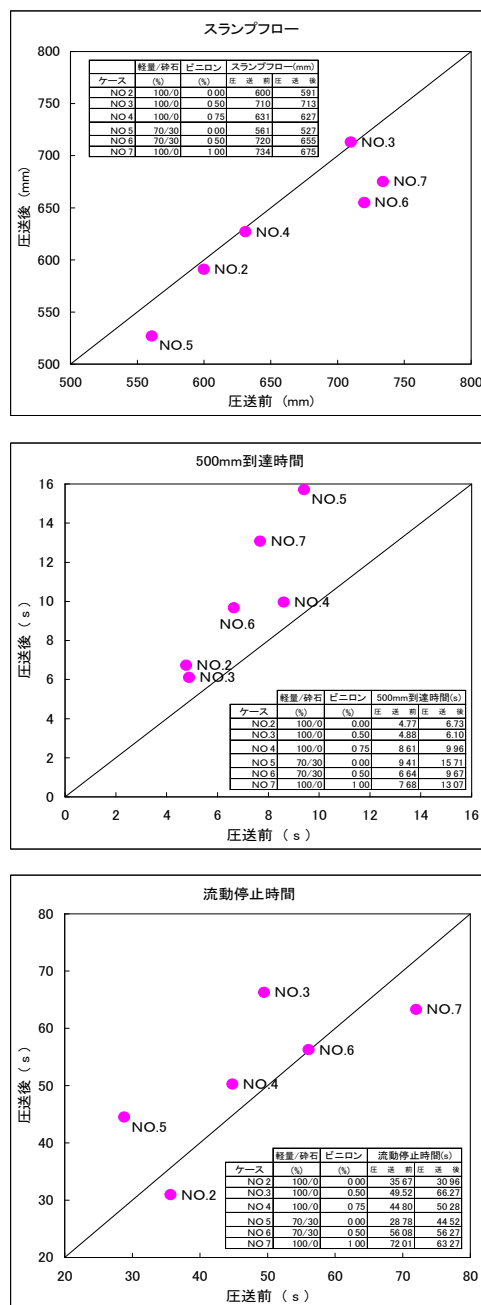


図-3.1.4 圧送前・圧送後のスランプフロー値、500mm 到達時間、流動停止時間の関係

(3) 空気量

圧送前・圧送後における空気量の変化を図-3.1.5に、管内圧力と空気量変化との関係を図-3.1.6に示す。

圧送後の空気量は、1.1%増加したNO.6のケースを除いて、何れのケースも圧送前に比べて0.2~1.5%減少していることが示された。

管内圧力と空気量変化との間に明瞭な傾向は見られないものの、管内圧力1.25MPa以上を示したケースでは、何れも圧送後の空気量は減少している。一方で、NO.6のケースのように、圧送圧力が小さい(0.85MPa)ケースでは圧送後の空気量の減少は生じていない。

上記の結果から、圧送後の空気量は、圧送圧力が小さいうち(0.85MPa以下)は減少しないが、圧送圧力が高くなると(1.25MPa以上)空気量の減少が生じ、その低下量は0.2~1.5%程度になることがわかった。

(4) 間隙通過性

圧送前・圧送後における充填時間および充填高さの変化を図-3.1.7に示す。

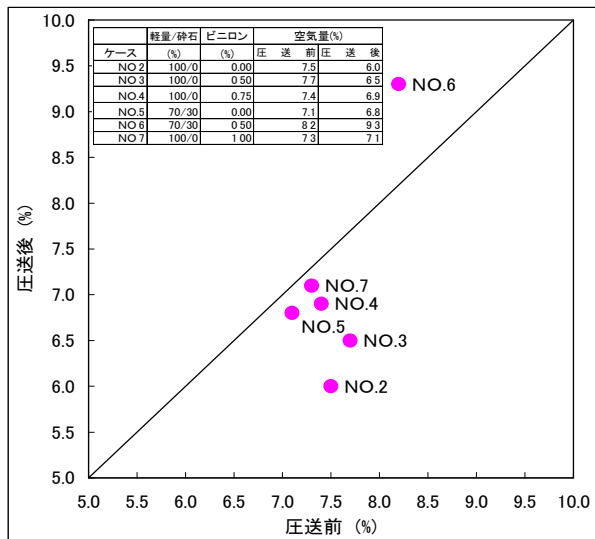


図-3.1.5 圧送前・圧送後における空気量の変化

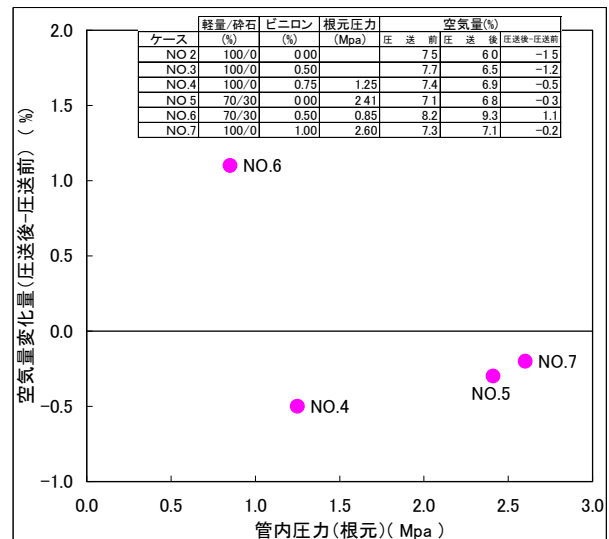


図-3.1.6 管内圧力と空気量変化との関係

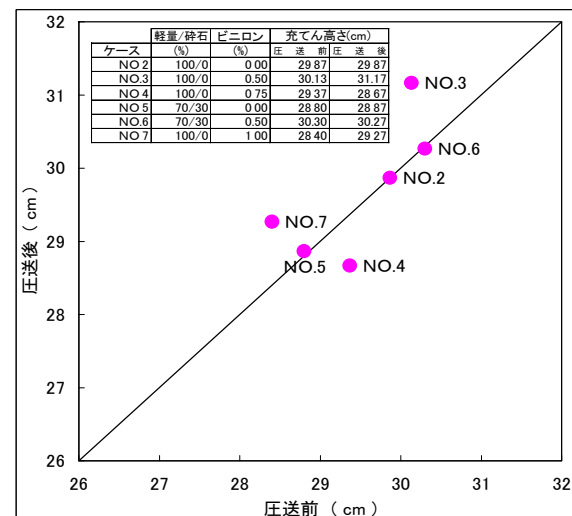
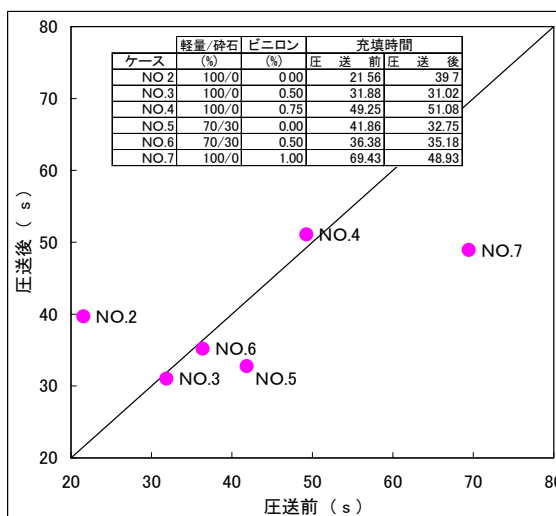


図-3.1.7 圧送前・圧送後における充填時間および充填高さの変化

充填時間および充填高さは、圧送前・圧送後において明瞭な差は認められず、等値線（圧送後＝圧送前）付近を中心に両側に分布しており、圧送前・後において顕著な変化はないと判断される。

また、圧送後におけるビニロン混入率と充填時間および充填高さの関係を図-3.1.8に示す。

充填時間および充填高さは、ビニロン混入率 0.5%~0.75%付近で顕著に変化している。図に示すように、充填時間は長くなっていることから、ビニロン混入率が 0.5%~0.75%を超えると間隙通過性は大きく低下すると判断される。

(5) 流下試験

圧送前・圧送後における流下時間の変化を図-3.1.9に、圧送後におけるビニロン混入率と流下時間の関係を図-3.1.10に示す。

圧送前・圧送後における流下時間の関係は、等値線（圧送後＝圧送前）付近にほぼ集まっており、圧送前・圧送後で流下時間の変化はないと判断される。

また、圧送後におけるビニロン混入率と流下時間の関係をみると、流下時間はビニロン混入率 0.75%まではさほど変化はないが、1.0%になると流下時間がやや長くなっており、ビニロン混入率が 1.0%を超えると流下抵抗に影響が顕著に現れると言える。

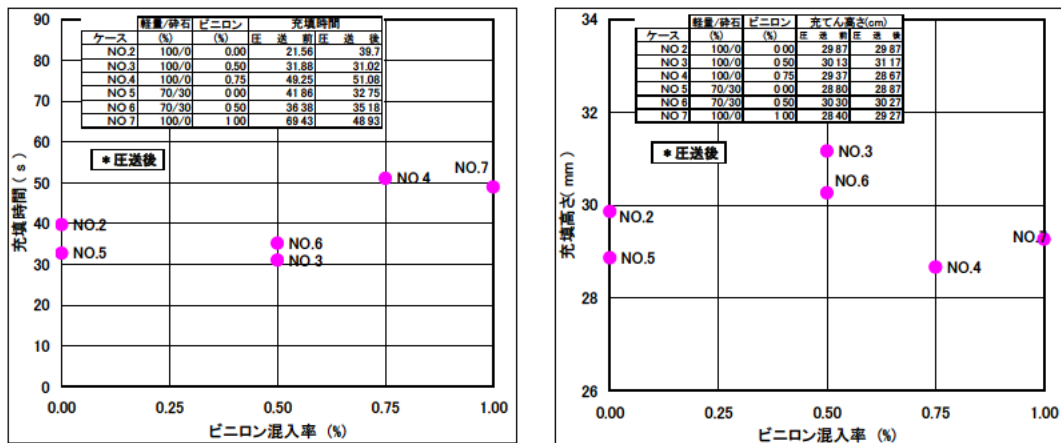


図-3.1.8 ビニロン混入率と充填時間および充填高さの関係（圧送後）

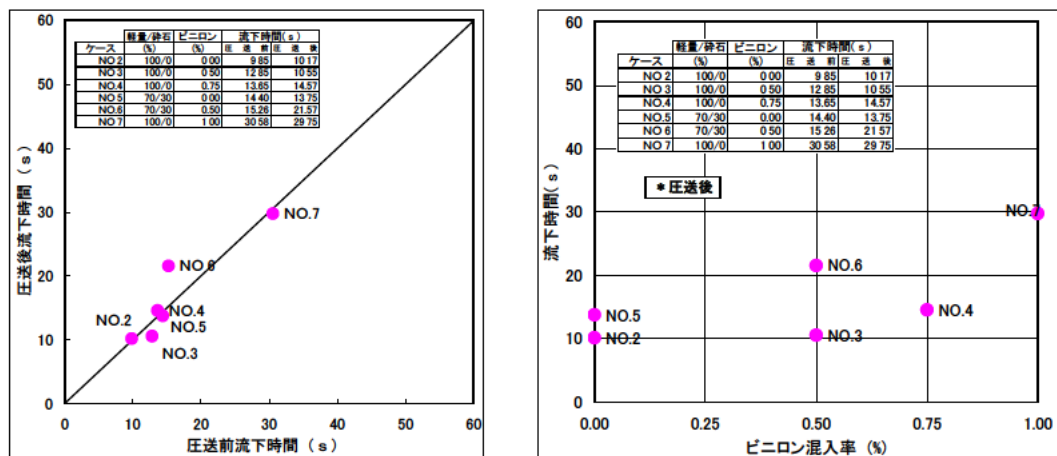


図-3.1.9 圧送前・圧送後における流下時間の変化 図-3.1.10 ビニロン混入率と流下時間の関係

(6) 管内圧力

管内圧力は、配管の根元（吐出口）および中間（吐出口まで 15m の位置）において、圧送開始から終了まで測定した。NO. 4～NO. 7 のポンプ圧送中の配管内圧力の推移状況を図-3. 1. 11 に示す。

以下に、各ケースの管内圧力の推移状況の特徴について記す。

①NO. 4

- ・圧送中の管内圧力の変動は少なく、ほぼ一定値を示し、安定した圧送状況である。根元の最大圧力は 12.7kgf/cm^2 (1.25MPa)、中間の最大圧力は 4.9kgf/cm^2 (0.48MPa) であった。
- ・根元から中間にかけての圧力勾配は 0.52kgf/cm^2 (0.051MPa/m) である。

②NO. 5

- ・圧送開始直後に根元圧力は 15kgf/cm^2 (1.47MPa) 程度まで上昇し、以降も圧力は上昇し続け、圧送終了時においては最大圧力が 24.6kgf/cm^2 (2.41MPa) にまで達している。中間圧力も同様な傾向を示し、最大圧力 9.8kgf/cm^2 (0.96MPa) であった。
- ・根元から中間にかけての圧力勾配は 0.99kgf/cm^2 (0.097MPa/m) で、測定した 4 ケースの中で最も大きい。

③NO. 6

- ・圧送中の管内圧力の変動は少なく、ほぼ一定値を示し、安定した圧送状況である。根元の最大圧力は 8.7kgf/cm^2 (0.85MPa)、中間の最大圧力は 4.8kgf/cm^2 (0.47MPa) であった。圧力は、測定した 4 ケースの中で最も小さかった。
- ・根元から中間にかけての圧力勾配は 0.26kgf/cm^2 (0.025MPa/m) で、測定した 4 ケースの中で最も小さかった。

④NO. 7

- ・圧送開始直後、根元圧力は 15kgf/cm^2 (1.47MPa) 程度にまで上昇し、以降、圧送の前半では圧力は上昇し続け、圧送の後半においてはほぼ最大圧力の 26.5kgf/cm^2 (2.41MPa) に達し、圧力が下がることなく、その値のまま推移している。中間圧力も同様な傾向を示し、最大圧力は 13.1kgf/cm^2 (1.28MPa) であった。圧力は、測定した 4 ケースの中で最も大きかった。
- ・根元から中間にかけての圧力勾配は 0.89kgf/cm^2 (0.088MPa/m) である。

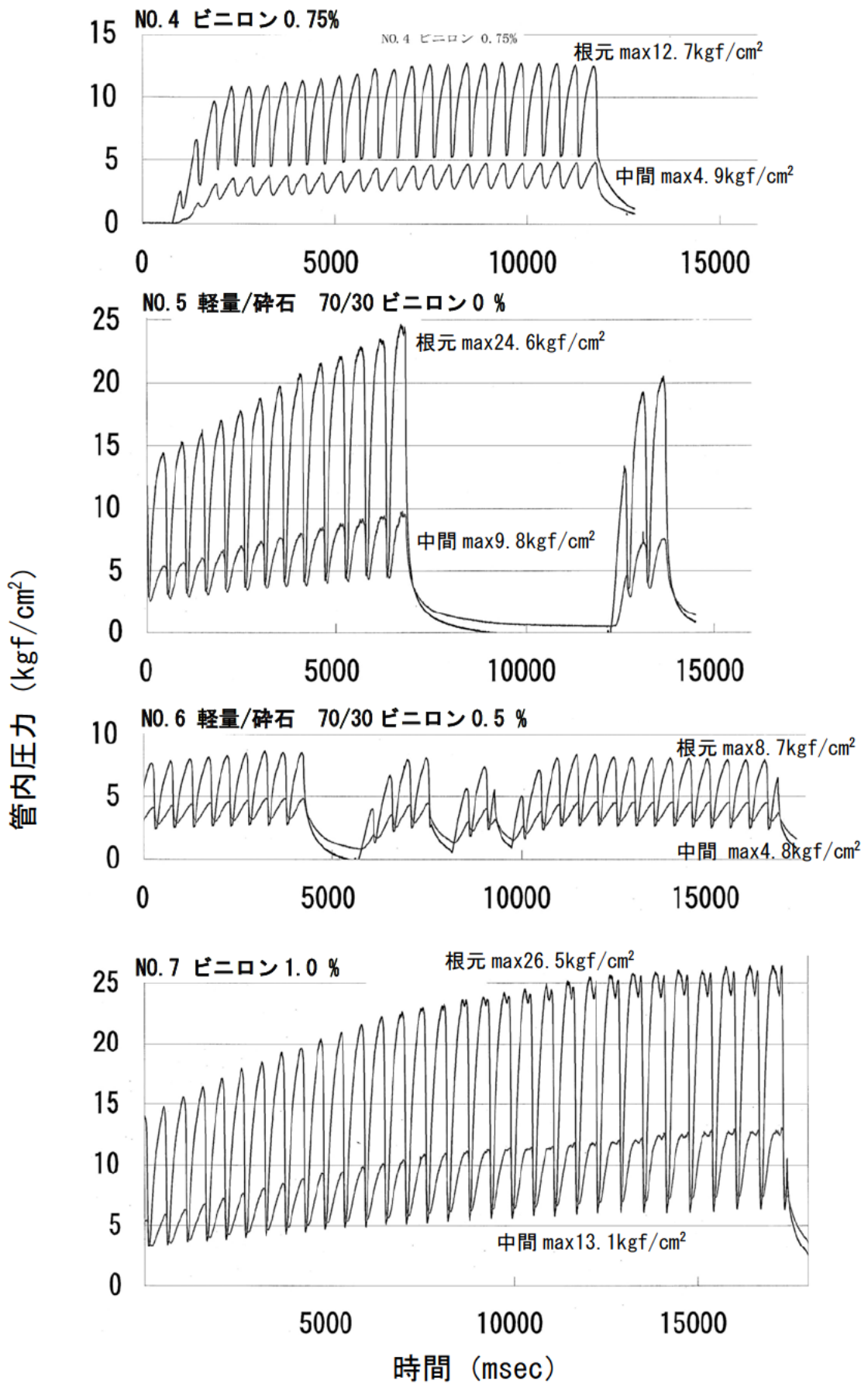


図-3.1.11 管内圧力推移状況

(7) 吐出量

圧送前におけるスランプフローと吐出量の関係を図-3.1.12に、圧力勾配（配管根元→配管中間（1=15m）の圧力損失）と吐出量の関係を図-3.1.13に示す。

スランプフローと吐出量の関係より、圧送前のスランプフローが大きいほど、吐出量も増加する傾向が見られる。また、圧力勾配と吐出量の関係から、No.7を除いて圧力勾配が小さくなるほど吐出量も増加する傾向が概ね見られた。

上記の結果から、スランプフローが大きく流動性に富むほど、管内における摩擦などによる流動抵抗も小さくなり、設定吐出量（本試験では10m³/h）が維持されやすいと言える。

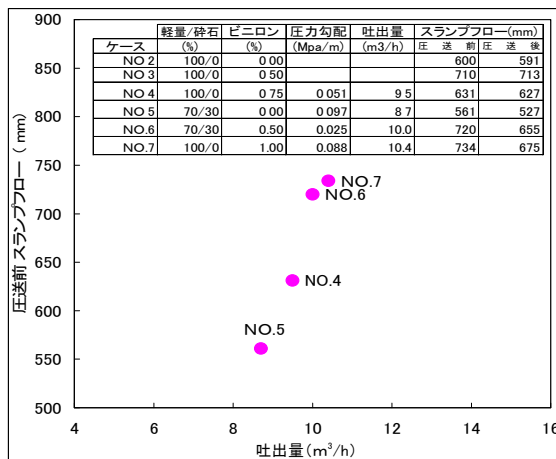


図-3.1.12 スランプフローと吐出量の関係

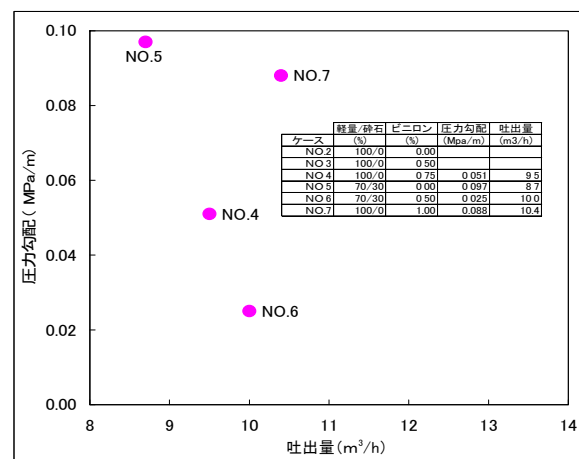


図-3.1.13 圧力勾配と吐出量の関係

3. 2 硬化コンクリート試験結果

硬化コンクリート試験結果を表-3.2.1に示す。

硬化コンクリート試験結果一覧表

実験ケース	フレッシコンクリート性状											硬化コンクリート性状										
	コンクリート温度 (℃)	500mm到達時間 (s)	スランプフロー 流動停止 時間 (s)	スランプ プロー値 (mm)	読み値 % (読み値)	空気量 % (空気量)	修正後* % (修正後)	充てん時 間 (sec)	間引き通過性 充てん高さ (cm)	流下試験 流下時間 (sec)	吸水率 % (吸水率)	吐出量 (m³/h)	圧縮強度 材令28日 (N/mm²)	圧縮強度 材令28日 (N/mm²)	単位体積重量 (kg/m³)	単位体積重量 (kg/m³)	曲げ強度 材令28日 (N/mm²)	曲げ強度 材令28日 (N/mm²)	曲げ弾性係数 (f _b) (N/mm²)	曲げ弾性係数 (f _b) (N/mm²)		
NO.1	16.5 (℃)	-	-	スランプ 14.5 cm	3.7	-	-	-	内	29.5	-	11.4	40.81	40.81	2350	2386	4.57	4.57	0.37	0.37		
									中	30.0												
									外	30.1												
									平均	29.9												
									内	29.5												
									中	30.0												
									外	30.1												
NO.2	18.0 (℃)	6.73	30.96	591 (595×586)	9.1	6.0	39.7	内	29.5	10.2	15.4	1909	49.15	49.15	1911	1893	4.64	4.64	0.24	0.24		
								中	30.0													
								外	30.1													
								平均	29.9													
								内	29.5													
								中	30.0													
								外	30.1													
NO.3	18.0 (℃)	6.10	66.27	713 (705×720)	9.6	6.5	31.02	内	31.0	10.6	16.6	1821	29.67	29.67	1856	1815	4.82	4.82	1.55	1.55		
								中	31.2													
								外	31.3													
								平均	31.2													
								内	28.2													
								中	28.8													
								外	29.0													
NO.4	20.0 (℃)	9.96	50.28	627 (605×648)	10.0	6.9	51.08	内	28.2	14.6	16.2	1828	27.69	27.69	1869	1861	4.28	4.28	1.43	1.43		
								中	28.8													
								外	29.0													
								平均	28.7													
								内	28.5													
								中	29.0													
								外	29.1													
NO.5	18.0 (℃)	15.71	44.52	527 (514×540)	9.0	6.8	32.75	内	28.5	13.8	11.9 (106.0% 軽量のみ)	8.7	49.40	49.40	1963	1988	5.98	5.98	1.70	1.70		
								中	29.0													
								外	29.1													
								平均	28.9													
								内	30.2													
								中	30.2													
								外	30.4													
NO.6	18.0 (℃)	9.67	56.27	655 (670×640)	11.5	9.3	35.18	内	30.2	21.6	13.2 (17.8% 軽量のみ)	10.0	38.32	38.32	1941	1988	4.65	4.65	1.10	1.10		
								中	30.2													
								外	30.4													
								平均	30.3													
								内	29.4													
								中	29.4													
								外	29.0													
NO.7	18.0 (℃)	13.07	63.27	675 (675×675)	10.2	7.1	48.93	内	29.4	29.8	16.4	1861	40.11	40.11	1868	1875	5.00	5.00	2.67	2.67		
								中	29.4													
								外	29.0													
								平均	29.3													
								内	29.4													
								中	29.4													
								外	29.0													

表-3.2.1

(1) 圧縮強度試験結果

28日養生におけるコンクリート圧縮強度 σ_c は表-3.2.2に示すとおりである。

目標圧縮強度 $\sigma_c \geq 40 \text{ N/mm}^2$ を満足するケースは、NO.1、NO.2、NO.5およびNO.7であり、他の3ケースは目標強度を下回った。

今回の着眼点であるビニロン混入のケースは、ビニロン混入率が0.50%および0.75%の何れのケースも目標強度を下回り、また、ビニロン混入率1.00%のケースは目標強度を上回っているものの、他に比べてスラグ混入量を2倍に増量しているため、現段階では一概に目標強度を上回ると結論付けることはできない。

以上より、今回試験した配合において、ビニロン混入のケースは目標強度に達していない結果となった。

以下に、コンクリートのフレッシュ性状と圧縮強度の相関について、1) 砕石混入、2) ビニロン混入、3) 軽量骨材のみの使用等の観点から検討した。

1) 砕石混入

単位体積重量 γ および圧縮強度 σ_c と砕石混入割合との関係を各々図-3.2.1、図-3.2.2に示す。

γ は、砕石混入割合の増加に伴って大きくなる傾向を示した。軽量骨材の密度(絶乾)が 1.25 g/cm^3 であるのに対し、砕石の密度(絶乾)は 2.60 g/m^3 と大きいため、砕石の混入量が増えると物理的にコンクリート重量は重くなるのは当然のことである。

一方、圧縮強度 σ_c は、砕石混入率の増加に伴って大きくなる傾向が見られる。

表-3.2.2 コンクリート圧縮強度 σ_c

ケース	空気量 (%)	フロー値 (mm)	W/C (%)	スラグ (kg/m ³)	砕石混入割合 (%)	AL混入割合 (%)	ビニロン混入割合 (%)	圧縮試験結果	
								単位体積重量 γ (tf/m ³)	圧縮強度 σ_c (N/mm ²)
NO.1	3.7	*11.5cm	50.0	0	100	0	0.00	2.35	40.47
NO.2	6.0	591	32.8	80	0	100	0.00	1.91	47.58
NO.3	6.5	713	32.8	80	0	100	0.50	1.84	30.30
NO.4	6.9	627	32.8	80	0	100	0.75	1.83	29.16
NO.5	6.8	527	32.8	80	30	70	0.00	1.98	52.99
NO.6	9.3	655	32.8	80	30	70	0.50	1.86	35.18
NO.7	7.1	675	35.1	160	0	100	1.00	1.87	43.31

注) *印はスランプを示す。

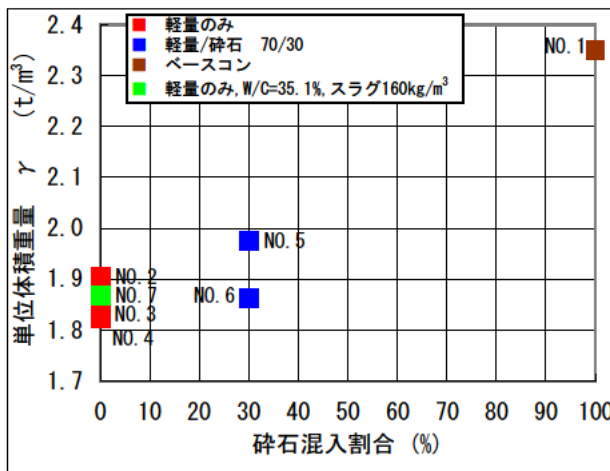


図-3.2.1 単位体積重量 γ ～砕石混入割合

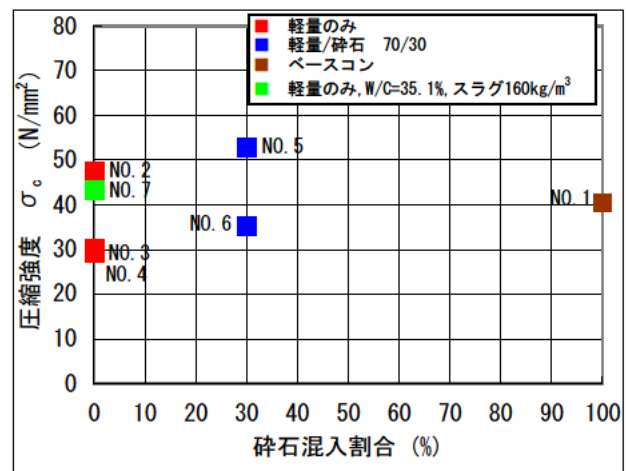


図-3.2.2 圧縮強度 σ_c ～砕石混入割合

2) ビニロン混入

単位体積重量 γ および圧縮強度 σ_c とビニロン混入割合との関係を各々図-3.2.3、図-3.2.4に示す

γ ～ビニロン混入割合の関係より、今回の試験におけるビニロン混入水準(max 1%)程度では γ に及ぼす影響はほとんどないと判断される。

一方、圧縮強度は、ビニロン混入率の増加に伴って低下する傾向が示された。特に、混入率 0.5%付近まで低下割合が大きく、以降も割合は緩慢ではあるが低下の傾向が示される。

圧縮強度は、ビニロン混入率 0.5%以上では、目標強度 40N/mm²を下回っている。

ただし、NO.7はスラグ混入量が他の2倍であり強度増加に寄与している可能性があるため、ここでは考察の対象から除外している。

3) 軽量骨材のみの使用

単位体積重量 γ と圧縮強度 σ_c との関係を図-3.2.5に示す。

γ ～ σ_c の関係には正の相関が見られ、 γ が大きくなるほど σ_c も増加する傾向が認められる。

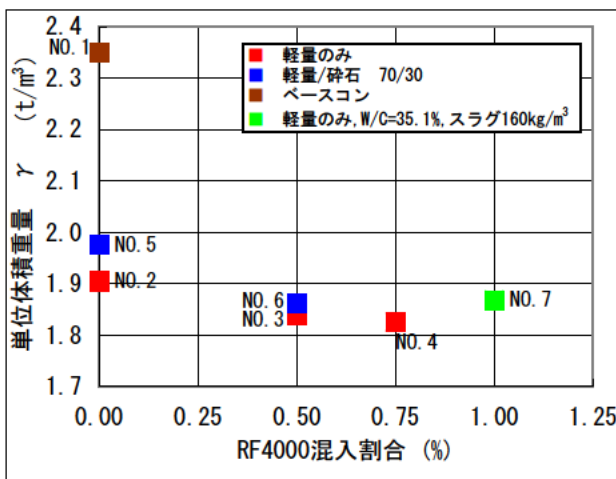


図-3.2.3 単位体積重量 γ ～
ビニロン(RF4000)混入割合

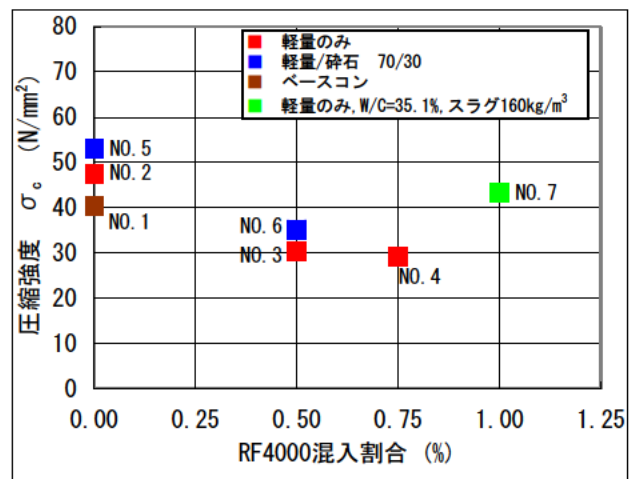


図-3.2.4 圧縮強度 σ_c ～
ビニロン(RF4000)混入割合

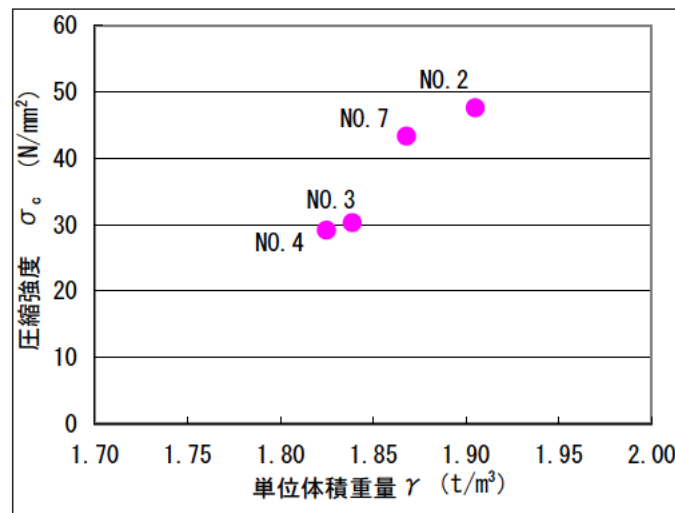


図-3.2.5 単位体積重量 γ ～圧縮強度 σ_c

空気量と圧縮強度 σ_c との関係を図-3.2.6 に示す。

空気量と圧縮強度の間には負の相関が見られ、空気量が増加すると圧縮強度 σ_c は低下する傾向が見られる。

なお、NO.7 はスラグ混入量が他の2倍であり強度増加に寄与している可能性があるため、2) ビニロン混入における検討と同様に考察の対象から除外している。

スランプフローと圧縮強度 σ_c との関係を図-3.2.7 に示す。

スランプフローが大きくなるほど圧縮強度は低下する傾向が見られる。

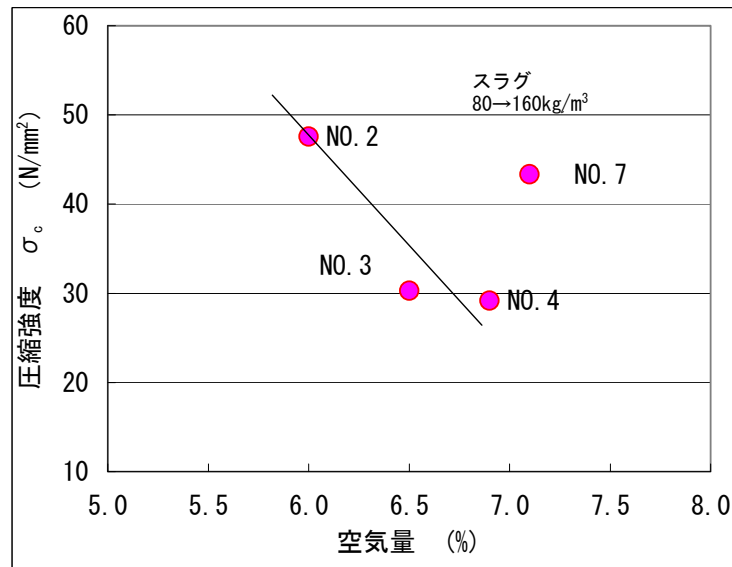


図-3.2.6 空気量と圧縮強度 σ_c との関係

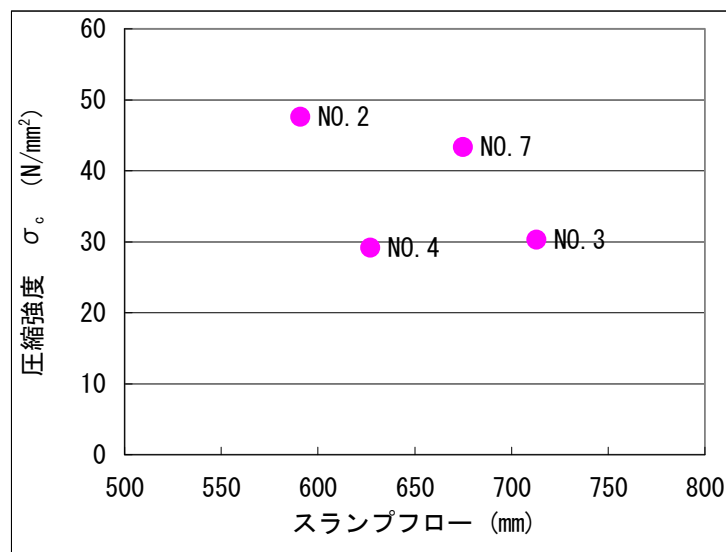


図-3.2.7 スランプフロー～圧縮強度 σ_c

(2) 供試体断面観察

圧縮強度試験後、供試体をコンクリートカッターで切断し、供試体内部の観察を行った。観察は、圧縮強度 σ_c の高いNO.2供試体と低いNO.3供試体について行った。

各々の供試体性状を表-3.2.3に、観察断面を写真-3.2.1に示す。

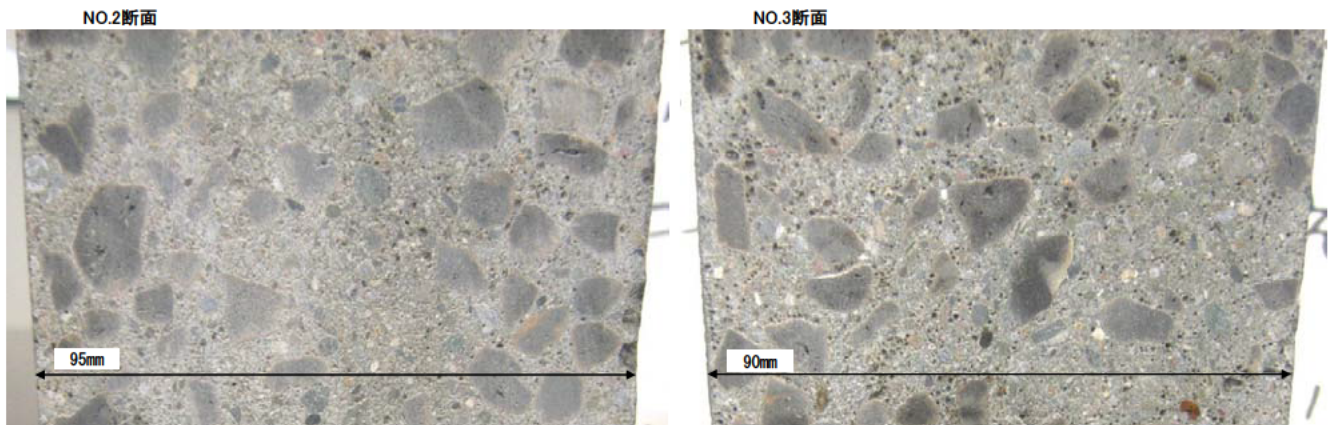
写真を比較すると、NO.2に対してNO.3は、微細な空隙（写真では黒い斑点状に映っている）が非常に多く分布しているのが特徴的である。

圧送後に測定した両者の空気量はほぼ同等であり、この空隙を形成した微細な気泡は空気量には反映されておらず、供試体成形後に発生したものと推察される。

また、NO.2およびNO.3は、配合条件がほぼ同等であるにも関わらず、圧縮強度に大きな差異が生じており、NO.3の強度低下はこの微細な気泡の多量発生に起因していると推察される。

表-3.2.3 供試体性状

供試体	圧縮強度 σ_c (N/mm ²)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)
NO.2	47.58	591	6.0
NO.3	30.30	713	6.5



上記写真で黒を強調

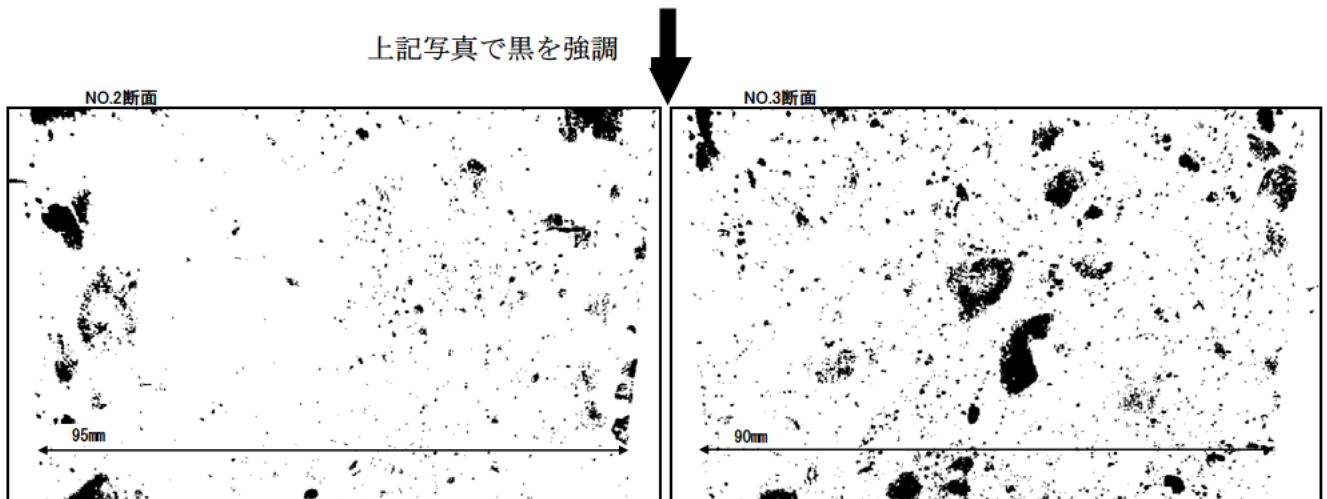


写真-3.2.1 観察断面

(3) 曲げ強度および曲げタフネス試験結果

繊維補強コンクリートは、通常のコンクリートに比べると曲げ強度と曲げ破壊時の靱性が大きくなる。ここで、本試験で用いたビニロン繊維 (max1.0%) の混入が曲げ強度および曲げタフネスに及ぼす影響について検討する。

曲げ強度および曲げタフネスを表-3.2.4 に示す。

表-3.2.4 曲げ強度および曲げタフネス

ケース	空気量	フロー値	W/C	スラグ	砕石混入割合	AL混入割合	ビニロン	曲げ強度・曲げタフネス試験結果		
	(%)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(%)	(%)	混入割合 (%)	単位体積重量 γ (tf/m ³)	曲げ強度 σ_b (N/mm ²)	曲げタフネス f_b (N/mm)
NO.1	3.7	*11.5cm	50.0	0	100	0	0.00	2.36	4.73	0.35
NO.2	6.0	591	32.8	80	0	100	0.00	1.94	4.84	0.17
NO.3	6.5	713	32.8	80	0	100	0.50	1.86	4.88	1.49
NO.4	6.9	627	32.8	80	0	100	0.75	1.87	4.56	1.66
NO.5	6.8	527	32.8	80	30	70	0.00	1.98	5.63	0.82
NO.6	9.3	655	32.8	80	30	70	0.50	1.91	4.69	1.29
NO.7	7.1	675	35.1	160	0	100	1.00	1.88	4.84	2.46

注) *印はスランプを示す。

1) 曲げ強度 σ_b

ビニロン混入割合と曲げ強度との関係を図-3.2.8 に示す。

今回試験で用いたビニロン混入範囲 (max1.0%) では、曲げ強度はビニロン混入割合に関わらず、ほぼ一定の値を示し、曲げ強度に及ぼす影響はみられなかった。

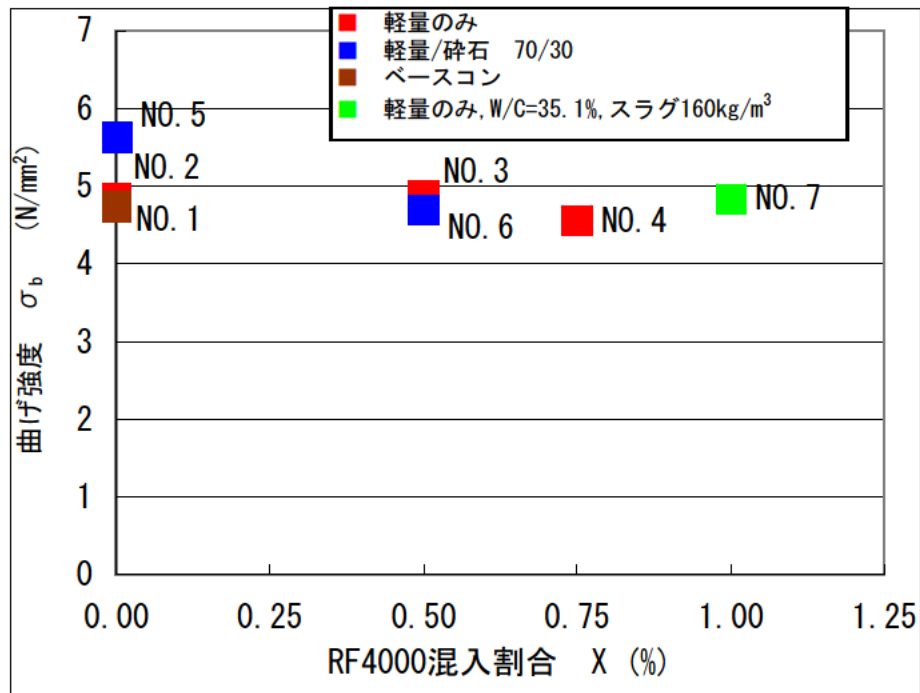


図-3.2.8 ビニロン混入割合～曲げ強度

圧縮強度 σ_c ~ 曲げ強度 σ_b の関係を図-3.2.9 に示す。

軽量コンクリートの圧縮強度 σ_c と曲げ強度 σ_b との関係については、 $\sigma_c / \sigma_b = 5 \sim 10$ という報告がなされている⁴⁾。今回の試験値においても図に示すように、この範囲内にあった。

2) 曲げタフネス f_b

各ケースの曲げ荷重-たわみ曲線を図-3.2.10 に示す。ビニロン繊維を混入していない NO. 1、NO. 2 および NO. 5 の各ケースは最大荷重に達した直後に破断しているのに対し、ビニロン繊維を混入した NO. 3、NO. 4、NO. 6 および NO. 7 の各ケースは最大荷重に達した後もたわみが進行しており靱性を有していることが分かる。

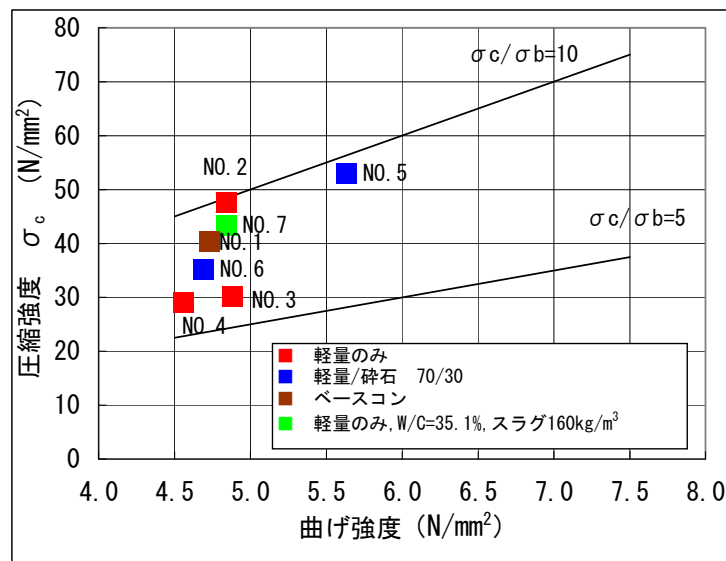


図-3.2.9 圧縮強度 σ_c ~ 曲げ強度 σ_b の関係

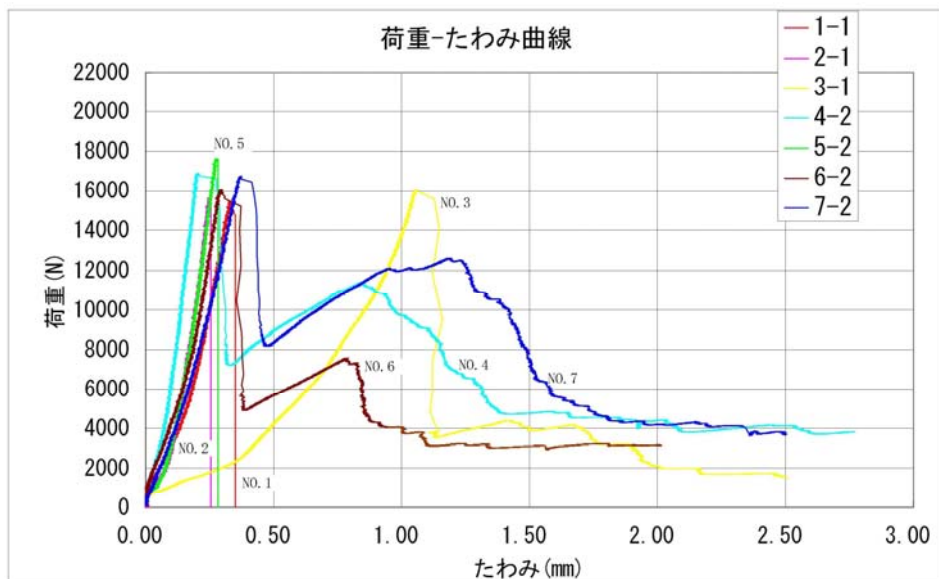


図-3.2.10 曲げ荷重-たわみ曲線

繊維補強コンクリートの靱性は、曲げタフネス（曲げじん性係数）で評価される。そこで、ビニロン混入割合～曲げじん性係数の関係を調べた。図-3.2.11 に結果を示す。

ビニロン混入率と曲げじん性係数との間には良い正の相関がみられ、ビニロン混入率が増大するほど、曲げじん性係数は大きくなり、靱性が向上していることが分かる。

(4) 凍結融解試験結果

相対動弾性係数および質量減少率と凍結融解サイクルとの関係を図-3.2.12、図-3.2.13 に示す。

相対動弾性係数は、NO.4およびNO.7は凍結融解サイクルの増加に伴い緩やかな減少は示しているものの、300サイクル終了時の値は各々89.2%、95.9%で、耐久性指数DFは89%程度以上に保持されており、目標DF85%以上が満足された。

NO3は、他の2ケースに比べ、相対動弾性係数の減少割合が大きく、240サイクルで85%、300サイクル終了時には75.2%に低下しており、耐久性指数DFは85%程度で目標DF85%を下回った。

一方、質量減少率は、何れのケースも凍結融解サイクルの増加に伴い、質量は増加する傾向を示し、300サイクル終了時に0.66%～1.14%の増加となっている。

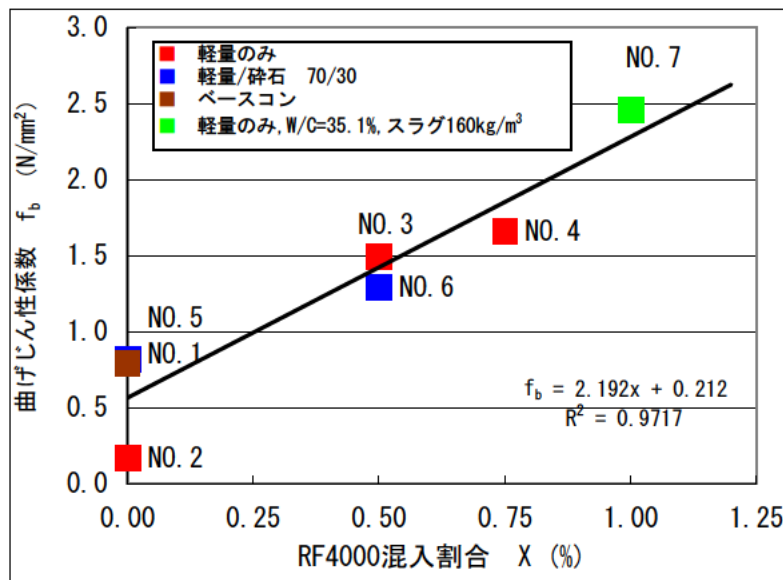


図-3.2.11 ビニロン(RF4000)混入割合～曲げじん性係数の関係

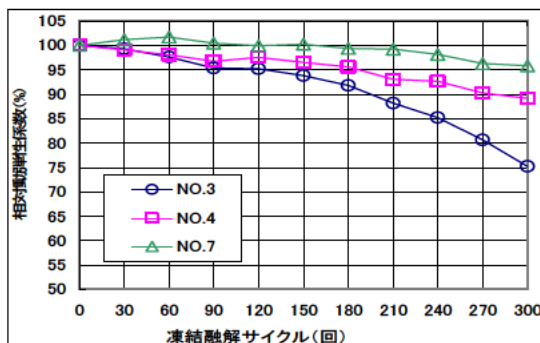


図-3.2.12 相対動弾性係数～凍結融解サイクル

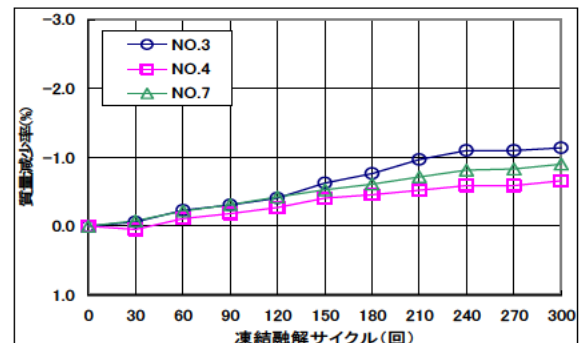


図-3.2.13 質量減少率～凍結融解サイクル

3. 3 考察

(1) ポンプ圧送性

ビニロン繊維を混入した軽量コンクリートのポンプ圧送性について、圧送中の管内圧力、吐出量(設定吐出量 10m³/h)および施工性(目視観察)等により評価する。

図-3.3.1 にビニロン混入率と管内根元圧力との関係を示す。

図より、ビニロン混入率の増加に伴い、管内根元圧力も増加していることが分かる。

NO.5 は、圧送前スランプフロー(561mm)が他のスランプフロー(631~734mm)に比べて小さかったために管内圧力が大きくなっていると推察される。

図-3.3.2 に管内根元圧力と吐出量との関係を示す。

図より、吐出量は何れのケースにおいても設定吐出量(10m³/h)がほぼ維持されているものの、その吐出量を維持するための圧送圧力は、ビニロン混入率が多いほど(NO.6:0.5%→NO.4:0.75%→NO.7:1.00%)大きな管内根元圧力が必要であることが分かった。

試験を通しての施工性は、管の閉塞もなく、何れのケースも圧送可能であり、特に、NO.3(圧力は未測定)、NO.4の圧送性が良好に感じられた。

以上より、ビニロン繊維を混入した軽量コンクリートのポンプ圧送性は、今回の試験水準(ビニロン混入率 0~1%)で見ると、ビニロンの混入率が高くなるほど高い圧送圧力を必要とするものの、スクイズ式ポンプ車による圧送が十分可能な範囲であり、圧送性に問題はないと判断される。圧送性の観点から推奨されるビニロン混入率は0.5%~0.75%である。

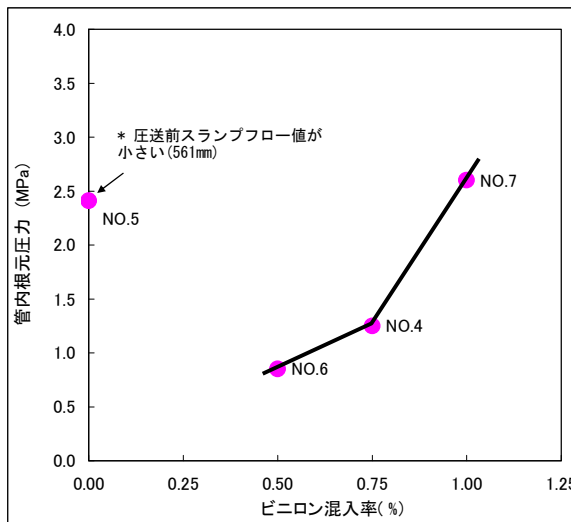


図-3.3.1 ビニロン混入率と管内根元圧力との関係

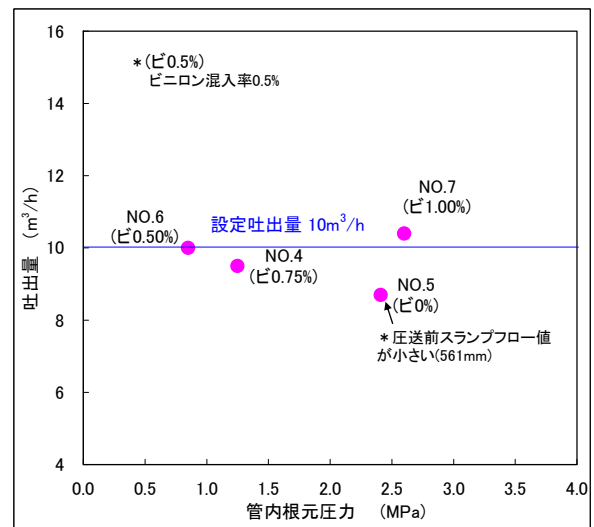


図-3.3.2 管内根元圧力と吐出量との関係

(2) 強度特性

1) 圧縮強度

今回の試験結果では、ビニロン繊維を混入した軽量コンクリートの圧縮強度は目標強度 $\geq 40\text{N/mm}^2$ を下回る結果であった。

この圧縮強度の低下の要因として以下のことが挙げられ、これらの要因が圧縮強度の発現に単独あるいは複合的に影響したものと推察される。

- ・ ビニロンの混入割合
- ・ 空気量
- ・ スランプフロー

ここでは、これらの要因ごとに圧縮強度との関係について考察する。

a) ビニロンの混入割合

図-3.3.3 にビニロン混入割合と圧縮強度 σ_c との関係を示す。

図中、NO. 2、NO. 3 および NO. 4 は軽量骨材のみを使用したケースであり、NO. 5 および NO. 6 は「軽量：砕石 = 70:30」の混合骨材を使用したケースである。

NO. 7 は、水セメント比 W/C (=35.1%) が他のケース (=32.8%) に比べて大きく、スラグの混入量を他のケースの 2 倍に増量したケースである。

NO. 1 はベースコンクリートである。

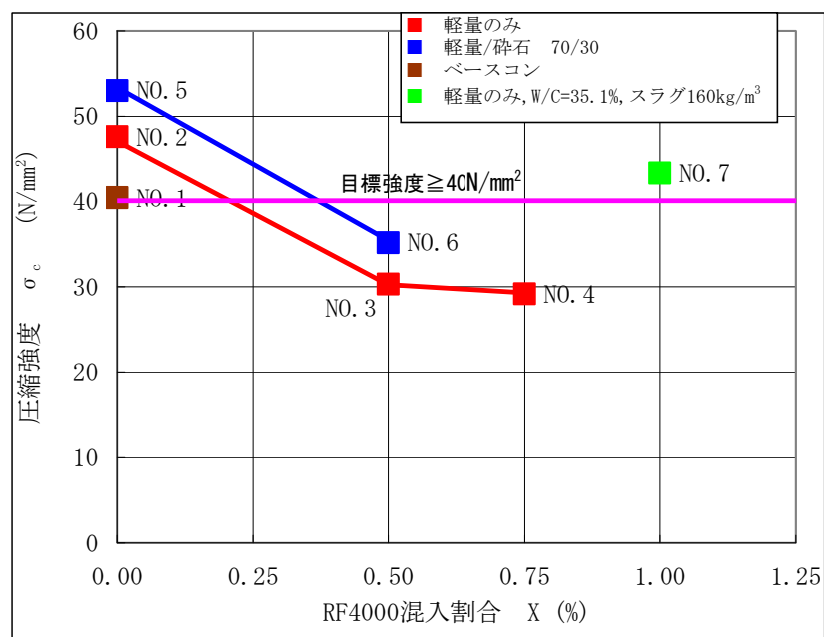


図-3.3.3 ビニロン混入割合と圧縮強度との関係

この図より、以下に示すことがわかった。

- 全般的な傾向として、圧縮強度 σ_c は、ビニロン混入割合の増加に伴い、低下する傾向が示された。
- NO. 2～NO. 4 では、 σ_c はビニロン混入率 0.5% で大きく低下し、目標強度を下回っている。また、ビニロン混入率 0.75% 以降になると、 σ_c の低下割合は小さくなる。
- NO. 5～NO. 6 では、 σ_c は上記と同様に、ビニロン混入率 0.5% で目標強度を下回るが、NO. 2～NO. 4 に比べると大きな値を示し、砕石混入による強度増加の効果が認められる。
- NO. 7 の σ_c は、ビニロン混入率 1.0% で目標強度を上回っている。このケースは、他のケースに比べて W/C が大きく、かつ、ビニロン混入率も大きいいため、 σ_c は小さくなると予想されるが、実際には σ_c は大きくなっている。これは、スラグの混入量を 2 倍に増量したことによるスラグの強度寄与効果が作用したものと推察される。

以上のことを総合的に勘案すると、圧縮強度 σ_c はビニロンの混入に伴って低下し、混入割合 0.5% 程度でも目標強度 $\geq 40\text{N/mm}^2$ は下回るが、砕石混入量やスラグ混入量を適当に調整することで、ビニロン混入率 1.0% 程度の範囲内では目標強度を満足することが十分可能と考えられる。

b) 空気量

図-3.3.4 に空気量と圧縮強度との関係を示す。

この図から、以下の特徴的な傾向が読み取れる。

- 圧縮強度 σ_c は、空気量の増加に伴い低下する。
- NO. 2～NO. 4 の軽量骨材のみを使用したケースでは、空気量 6% 程度を越えると目標強度を下回っている。
- NO. 5～NO. 6 の砕石 30% 混合したケースでは、空気量 9% 程度を越えると目標強度を下回っている。
- NO. 7 のケースでは、空気量 7% 程度で目標強度を上回っている。

以上のことを総合的に勘案すると、軽量骨材のみを使用した場合、空気量 6% 程度を超えると σ_c は目標強度を下回るが、砕石混入量やスラグ混入量を適当に調整することで、空気量 7.0～9.5% の範囲で目標強度を満足することは十分可能と考えられる。

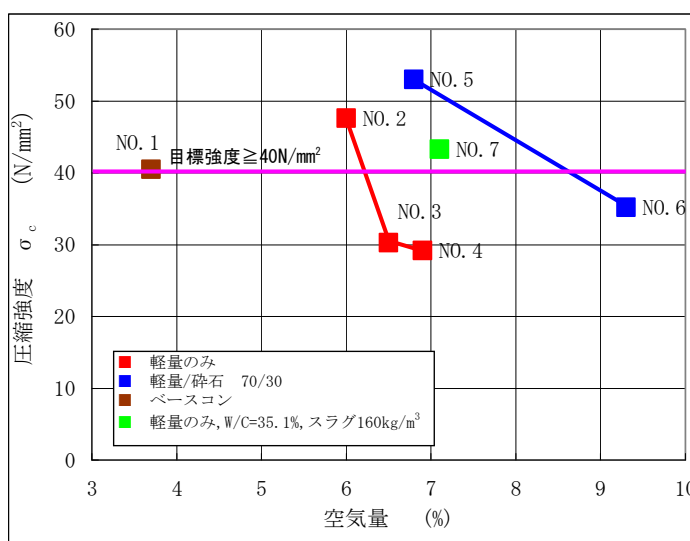


図-3.3.4 空気量と圧縮強度との関係

c)スランプフロー

図-3.3.5 にスランプフローと圧縮強度との関係を示す。

図を見ると、圧縮強度 σ_c はスランプフローが大きくなるに従って低下する傾向を示し、スランプフローが 600mm 程度を越えると目標強度を下回る結果と示した（なお、NO.7 のケースは、スラグ混入量が他のケースの 2 倍と多く、かつ水粉体比 W/P(=25.6%) も他のケース(=27.9%) より小さいため、ここでは考察の対象としない）。

このスランプフローと σ_c との関係を説明するための補足的な検討として、スランプフローを調整している高性能 AE 減水剤 (SP8SBsZ) の使用量に着目して結果を整理した。

図-3.3.6 に高性能 AE 減水剤 (SP8SBsZ) 使用量と圧縮強度との関係を示す。

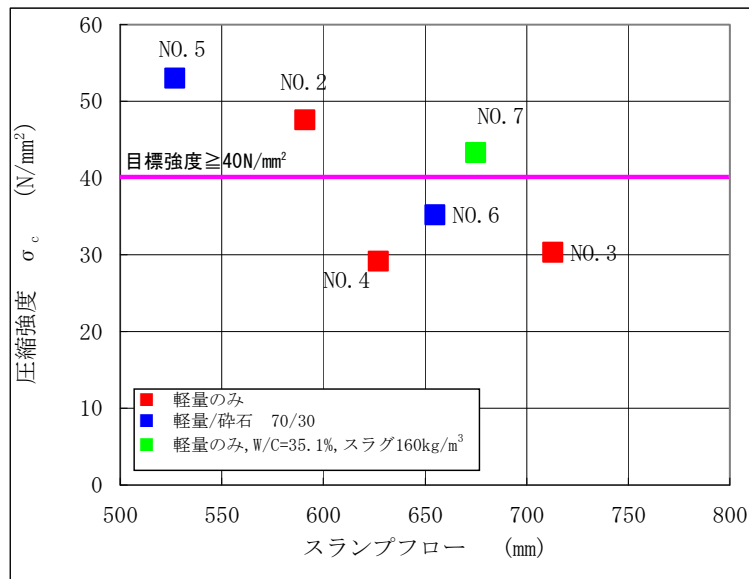


図-3.3.5 スランプフローと圧縮強度との関係

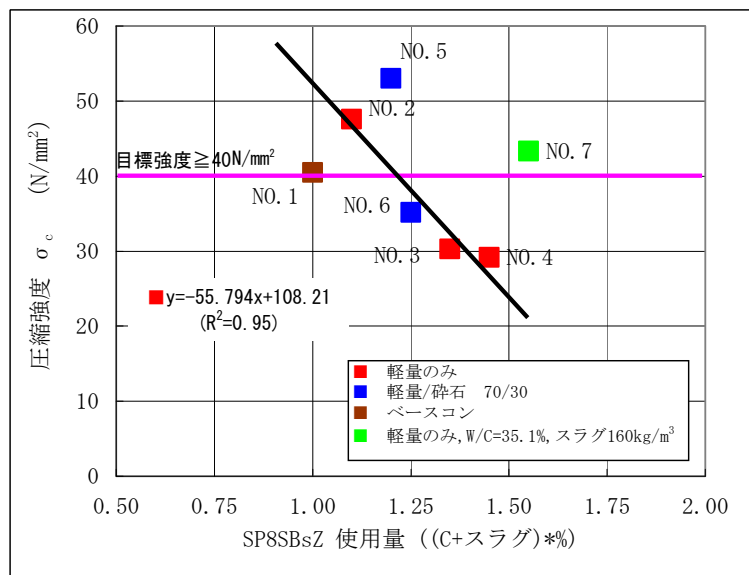


図-3.3.6 高性能 AE 減水剤 (SP8SBsZ) 使用量と圧縮強度との関係

この図を見ると、圧縮強度 σ_c と混和剤 (SP8SBsZ) との間には非常によい負の相関 ($R^2=0.9562$)、すなわち、AE 減水剤 (SP8SBsZ) の使用量の増加に伴って、 σ_c が直線的に減少する傾向が認められる。

図より読み取ると、目標強度 $\geq 40\text{N/mm}^2$ を満足するための AE 減水剤 (SP8SBsZ) の使用量は 1.2% 程度となる。

d) 圧縮強度の低下原因の推定

圧縮強度が目標強度 $\geq 40\text{N/mm}^2$ を満足できなかった原因は、上記 c) で述べたような、ビニロン繊維の混入や空気量およびスランプフロー等が単独あるいは相互的に影響した結果、供試体の断面観察で判明したように、供試体内部に“微細な空隙”が多量に混入したことが考えられる。

平成 17 年度に行った室内試験練り⁵⁾では、同一配合のビニロン繊維混入率 0.5~0.75% において目標強度を満足したにも関わらず、ポンプ圧送試験では目標強度を下回ったことは、上述の“微細な空隙”が室内試験練りに比べてポンプ圧送試験の方が発生し易い状況にあることを示している。

これは、以下に示す室内試験練りとポンプ圧送試験の試験方法の相違点に起因すると考えられ、ポンプ圧送試験の方が、実機練り、アジ車運搬中の攪拌等により試験練りに比べて攪拌効率が高まり、より微細な巻き込みエアが増大しやすいことがわかった。

① 練混ぜ方法

室内試験練り : 二軸強制練りミキサー (40 L 練り)

ポンプ圧送試験 : 実機 (バッチャープラント 0.75m³ 練り)

② 供試体作成までのプロセス

室内試験練り : 練り船に排出 → 切り返し → 供試体作成

ポンプ圧送試験 : アジ車に排出 → アジ車運搬 (約 5 分) → ポンプ圧送
→ 練り船に排出 → 切り返し → 供試体作成

2) 曲げ強度および曲げタフネス

図-3.3.7 に曲げ強度および曲げタフネス (曲げじん性係数) とビニロン混入割合との関係を示す。

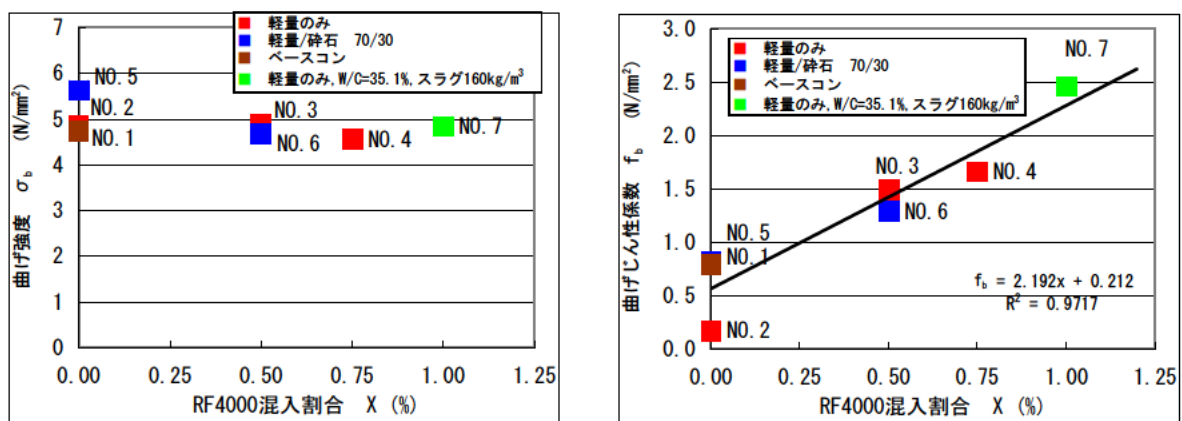


図-3.3.7 曲げ強度および曲げタフネス (曲げじん性係数) とビニロン (RF4000) 混入率との関係

ビニロン混入割合と曲げ強度 σ_b の関係を見ると、 σ_b は、ビニロンの混入割合に関わらず概ね一定値を示しており、ビニロン混入割合は曲げ強度の増加には寄与しないと判断される。

一方、曲げタフネスの指標である曲げじん性係数は、ビニロンの混入割合との間に非常に良い正の相関 ($R^2=0.9717$) を示し、ビニロン混入割合が多くなるほど曲げじん性係数も大きくなる傾向が見られ、曲げタフネスが向上していることが伺える。

(3) 耐凍害性

コンクリートの耐凍害性の向上に寄与する大きな要因として空気量が挙げられる。

図-3.3.8 に空気量と耐久性指数との関係を示す。

この図より、空気量の増加に伴って耐久性指数は向上することが伺える。目標耐久性指数 ≥ 85 を満足するには空気量は7%以上を確保する必要があることが示された。

ビニロン混入割合と耐久性指数との関係を図-3.3.9 に示す。

この図より、既報⁶⁾と同様、ビニロン混入割合が大きくなるほど耐久性指数も大きくなる傾向が示唆され、ビニロン混入は耐凍害性の向上に有効であると判断される。今回の試験においては、目標耐久性指数 ≥ 85 を満足するにはビニロン混入割合 0.75%程度以上であった。

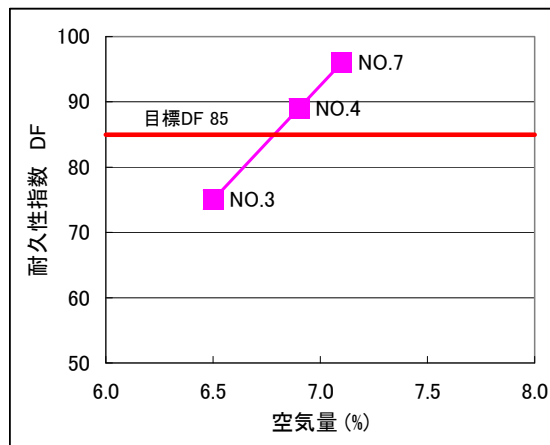


図-3.3.8 空気量と耐久性指数との関係

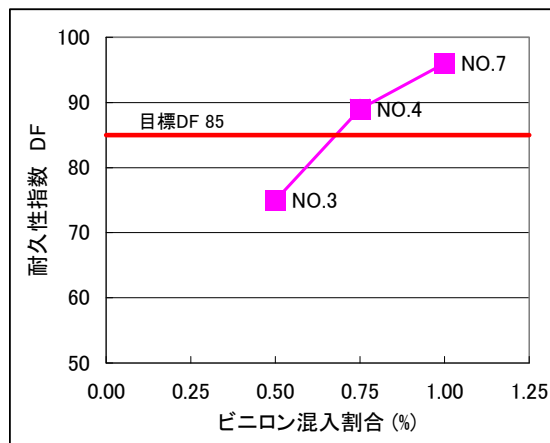


図-3.3.9 ビニロン混入割合と耐久性指数との関係

4. 結論

今回実施したポンプ圧送試験結果より以下の知見が得られた。

- (1) ビニロン繊維を混入した軽量コンクリートのポンプ圧送性は、ビニロンの混入率が高くなるほど高い圧送圧力を必要とするものの、スクイズ式ポンプ車で十分圧送可能であった。特に、推奨されるビニロン混入率は0.5%~0.75%である。
- (2) 圧縮強度が目標強度 $\geq 40\text{N/mm}^2$ を下回った原因は、ビニロン繊維混入、空気量およびスランプフロー等が、単独あるいは相互的に影響した結果、供試体内部に“微細な空隙”が多量に混入したことが考えられる。
- (3) 室内試験練りとポンプ圧送試験では、ポンプ圧送試験の方が、実機練り、アジ車運搬中の攪拌等により試験練りに比べて攪拌効率が高まり、微細な巻き込みエア一量が増大する。
- (4) 圧縮強度 σ_c は、ビニロン混入率の増加、空気量の増加、スランプフローの増加（AE 減水剤（SP8SBsZ）の使用量の増加）等に伴い低下し、目標強度 40N/mm^2 を下回るが、碎石混入量やスラグ混入量を適当に調整することでカバーできると考えられる。
- (5) ビニロン混入割合は曲げ強度の増加には寄与しないが、曲げタフネスの指標である曲げじん性係数はビニロン混入割合が多くなるほど大きくなる。
- (6) 耐久性指数は、ビニロン混入割合が大きくなるほど、空気量が増加するほど大きくなる。目標耐久性指数 ≥ 85 を満足するにはビニロン混入割合0.75%程度以上、空気量7%程度以上であった。
- (7) 今回の試験より、圧送性、目標強度（ 40N/mm^2 以上）、耐凍害性（DF85以上）等を満足するNo.7のケース（スラグ量増量）の配合が推奨される。

5. 今後の問題点等

コンクリート構造物（上部）の軽量化は、死荷重の軽減、下部工の縮小化、コスト縮減など、多くのメリットが期待される。これまでの室内試験、今回のポンプ圧送試験より、ビニロン繊維を混入した高靱性軽量コンクリートのポンプ圧送性、圧縮強度特性、曲げ特性、耐凍害性を満足しうる配合が選定された。ただし、実施工においては、実機練り、アジ車運搬中の攪拌等により攪拌効率が高まり、微細な巻き込みエア一量が増大し、強度阻害の要因となることから、できるだけ不要なエア一の発生を抑制する方策（AE 減水剤の種類、使用量等）を検討することが必要である。

平成 19 年 度

まえがき

近年、コンクリートの高性能化が求められる一方で、厳しい財政事情のもと、建設コストの縮減に寄与する技術の普及が求められている。その技術の一つに、軽量コンクリートの適用が考えられる。密度が $2.6\text{g}/\text{cm}^3$ 程度の一般的な粗骨材に比べて密度が約50%小さい軽量骨材を用いた軽量コンクリートは、コンクリートの自重を軽減する上で有効な材料であり、橋梁上部工の軽量化による下部工の断面縮小や基礎工の省力化、これに伴う工期の縮減、さらには耐震性の向上など大きなメリットが期待される。

しかし、軽量コンクリートは、使用される軽量骨材の吸水性が大きくかつ強度が小さいことから、普通コンクリートに比べ、耐凍害性、引張およびせん断強度が小さいことが知られている。現場でのコンクリートの打設は一般的にポンプが広く用いられるが、軽量コンクリートの場合、軽量骨材の圧力吸水に起因する閉塞を防ぐため、事前に軽量骨材を吸水させる必要がある。通常は軽量骨材の全空隙を飽和させるプレウェッティングが施されるが、寒冷地においては耐凍害性の低下が危惧され、頁岩系非造粒型の軽量骨材の吸水率に着目した過年度の実験では耐凍害性とポンプ施工性を両立できる最適な吸水率は概ね約15%（最大吸水率は約30%）であることを確認している。

一方、コンクリートの引張靱性を改善する対策として、種々の短繊維を混入する方法が広範に検討されている。そのうち、PVA（ポリビニルアルコール）短繊維は親水性があり、セメントペーストとの付着性能に優れる等の特徴を有している。これについては過年度の実験で、PVA短繊維を軽量コンクリートに混入することでせん断耐力の向上が可能で、脆性的な破壊が抑制されること、さらに、短繊維混入率を0.5%とすることで普通コンクリート以上の押し抜きせん断耐力が期待されることを実証している。

このように、軽量コンクリートにおいても、軽量骨材の吸水率を調整することで耐凍害性と施工性を両立できること、PVA短繊維を適用することで靱性化が図れることをこれまでに明らかにしてきた。しかし、吸水率を抑えた頁岩系非造粒型の軽量骨材を使用した軽量コンクリートをPVA短繊維で補強した高靱性軽量コンクリートの施工性のうちポンパビリティに関しては、まだ十分な検討に至っていなかった。

このため、現在は実機（スクイズ式ポンプ車）を使用した靱性軽量コンクリートの圧送実験を行い、その施工性について検討を進めている。圧送性、耐凍害性、靱性の両立に関しては目処が立ったが、圧送によるコンクリートの品質・性状の低下に起因する圧縮強度の低下が確認され、圧縮強度の確保が課題として残っている。なお、昨年の実験では、スラグの増量が圧縮強度の改善に効果的であることを確認している⁷⁾。

6. 研究目的

これまでの研究で得た成果をふまえ、本研究ではスラグ量を実験水準とし、圧送性、耐凍害性、靱性、圧縮強度を満足する配合条件について検討を行った。また、これまでの研究では、高靱性軽量コンクリートを用いた RC 梁の耐荷性能および破壊性状に関する検討を行っているものの、PC 梁を対象とした実験は行っていない。そこで、高靱性軽量コンクリート製 PC 梁の耐荷性能および破壊性状を検討することを目的に、普通、軽量および高靱性軽量コンクリート製 PC 梁の静載荷実験を実施し、PVA 短繊維混入による軽量コンクリート製 PC 梁の耐力向上効果や脆性破壊の抑制効果を検証した。

7. 研究方法

7. 1 ポンプ圧送試験

本研究では、現場試験と室内試験の2種類の試験を行った。現場試験はドービー建設工業幌別工場敷地内にてポンプ圧送実験を行った。ここでは、施工性、強度特性に及ぼすスラグの影響に着目し、スラグ量を80、160、240kg/m³の3水準とした。配合設計は外割方式で、単位水量(150kg/m³)と単位セメント量(427kg/m³)は一律とした。軽量骨材は頁岩系非造粒型(15%吸水)、繊維はビニロン短繊維(長さ30mm)、混入率は0.5%とした。ポンプ圧送(スクイズ)の管径は5インチ、目標吐出量10m³/h、圧送距離は39mとした。ポンプ圧送実験では、圧送前後において、吸水率測定、スランプフロー試験、空気量試験を行うと共に、硬化コンクリート試験を行うための供試体を作製した。供試体は、作製の翌日に寒地土研へ運搬し、恒温水槽中で所定材令まで水中養生させた。室内試験は、所定材令まで水中養生した後、硬化コンクリート試験(圧縮強度試験、凍結融解試験、動弾性係数測定、長さ変化試験)を行った。

実験条件については、以下の通りである。

(1) コンクリート目標性状

A) フレッシュコンクリート性状

- ①スランプフロー : 550~650 mm
- ②空気量 : 7.0~9.5 %

B) 硬化コンクリート性状

- ①圧縮強度 : 40 N/mm² 以上
- ②凍結融解抵抗性 : DF85 %以上

(2) コンクリートの配合

表-7.1.1の通りである。

表-7.1.1 コンクリートの配合

実 験 ケ ー ス	水セメント比 W/C %	水粉体比 W/P %	細骨材率 S/a %	ビニロン %	スランブ フロー (mm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤			備 考
							セメント C	スラグ	水 W	細骨材 S	粗骨材 G		8SBSZ (kg)	78S (kg)	Vinsol (kg)	
											軽量	砕石				
No.1	50.0	50.0	42.2	—	(目標) 550 ~ 650	(目標) 7.0 ~ 9.5	310	0	155	793	0	1084	—	P*0.25% 0.755	P*0.080% 0.248	普通コン
No.2	32.8	27.9	46.5	—			457	80	150	745	400	—	P*1.15% 6.176	— 0.806	P*0.15% 0.806	
No.3	35.1	25.6	48.3	0.5			427	160	150	751	375	—	P*1.20% 7.044	— 1.350	P*0.23% 1.350	ブーム圧送実施
No.4	35.1	22.5	45.8	0.5			427	240	150	678	375	—	P*1.40% 9.338	— 1.334	P*0.20% 1.334	
No.5	35.1	25.6	48.3	0.5			427	160	150	751	375	—	P*1.20% 7.044	— 0.880	P*0.15% 0.880	軽量低含水商品

※S/a→細骨材率

(3) 使用材料

- ①セメント：普通セメント
- ②使用水：ドーピー建設工業（株）幌別工場内使用地下水
- ③細骨材：ドーピー建設工業（株）幌別工場使用陸砂
- ④粗骨材：ドーピー建設工業（株）幌別工場使用砕石 2005（密度 2.60g/cm³）
- ⑤軽量骨材：太平洋アサノライト“絶乾品”および“低含水商品” *1）（密度 1.25g/cm³）
- ⑤混和材：粉末スラグ(ブレン 4000)
- ⑥繊維：ビニロン短繊維（長さ 30mm）
- ⑦混和剤：高性能 AE 減水剤レオビルド SP8SBsZ（軽量コンクリート用）
空気連行助剤ヴィンゾル W
AE 減水剤ポゾリス NO. 78S（普通コンクリート用）

* 1） 軽量骨材の製造時に所定の吸水率に調整したもの（軽量骨材は、耐凍害性確保のため吸水率の目標値を 14.5～15.5%とする。）

(4) ポンプ圧送条件

- ①ポンプ車：スクイズ式、ブーム式 90～110 m³/h
- ②管径：5 インチ（125 mm）
- ③配管長：39 m
- ④吐出量：10 m³/h

(5) ポンプ圧送手順

①基本手順

- 手順1) 1 : 3 モルタルをポンプ車へ先行投入 0.3m³
- 手順2) 0.75m³/バッチ混練 (全材料投入後 120 秒混練)
- 手順3) アジ車へ排出し、性状確認 (スランプフロー、空気量、温度)
- 手順4) 上記不合格の場合、廃棄
合格の場合、更に 0.75m³/バッチ混練
- 手順5) アジ車にて、ポンプ車まで運搬
圧送前試料採取、試験 (スランプフロー、空気量、骨材吸水率)
- 手順6) ポンプ車ホッパーに投入し、圧送開始 (10m³/h 設定)
圧送中 : 根元及び 20m 付近管内圧力測定
吐出口 : 吐出量測定 (施工能力)、ビデオ撮影、分離状態目視確認
- 手順7) 圧送後試料採取、
試験 (スランプフロー、空気量、骨材吸水率、外気温度測定、供試体作成)

注) * 1.5m³/h 圧送時間はおおよそ 9 分となる。

* 供試体作成後、直ちに工場内ボイラー室に搬送・保管。

ただし、②上記手順で、短繊維 (ビニロン) 混入の実験ケースは、ビニロンの投入は練混ぜ 1 分後とし、更にビニロン投入完了後 2 分混練し排出する。

7. 2 高靱性コンクリート製 PC 梁の静載荷実験

図-7.2.1 に、PC 梁の形状寸法および配筋状況を示す。本実験に用いた PC 梁は、断面寸法（幅×高さ）は 15 × 40 cm、純スパン長は 2.6 m の複鉄筋矩形 PC 梁である。上端および下端鉄筋には、それぞれ D25 および $\phi 12.7$ の PC 鋼より線を 2 本ずつ配置した。また、スターラップは配置していない。なお、PC 鋼より線には有効緊張率が引張強度の 25 % となるように緊張力を導入している。試験体は普通 (P-N)、軽量 (P-L)、短繊維混入軽量コンクリート (P-LF) 製の 3 種類とした。短繊維混入軽量コンクリートは PVA (ポリビニルアルコール) 30mm の混入率を vol. 0.5% とした。軽量および短繊維混入軽量コンクリートには、2 次製品用の配合のものを用いた。

表-7.2.1 には、各試験体の計算耐力を一覧にして示している。表中には、コンクリートの圧縮強度試験結果、計算曲げ耐力、計算せん断耐力およびせん断余裕度を示している。これらの計算耐力は、土木学会コンクリート標準示方書に準拠して算出した。なお、計算せん断耐力については、コンクリートの分担分、緊張力の作用により生じるデコンプレッションモーメントによるせん断耐力増分、PVA 短繊維の分担分、およびこれらの合計について示している。L 梁 (P-L、P-LF) の計算せん断耐力のコンクリート分担分は示方書で規定されているように、普通コンクリートを用いた PC 梁のせん断耐力の 70 % として評価している。計算せん断耐力を計算曲げ耐力で除した計算せん断余裕度は、いずれの梁も 1.0 を下回っていることから、静載荷時にはせん断破壊が先行することが予想される。

静載荷実験は、容量 500 kN の油圧ジャッキを用い、単純支持状態で実施した。静荷重は、鋼製の載荷治具を用い梁幅方向に全幅、スパン方向中央部に 100 mm の部分分布荷重が作用するように載荷している。載荷は、載荷点変位が純スパン長の 1 % 程度 (30 mm) に達するまで行った。

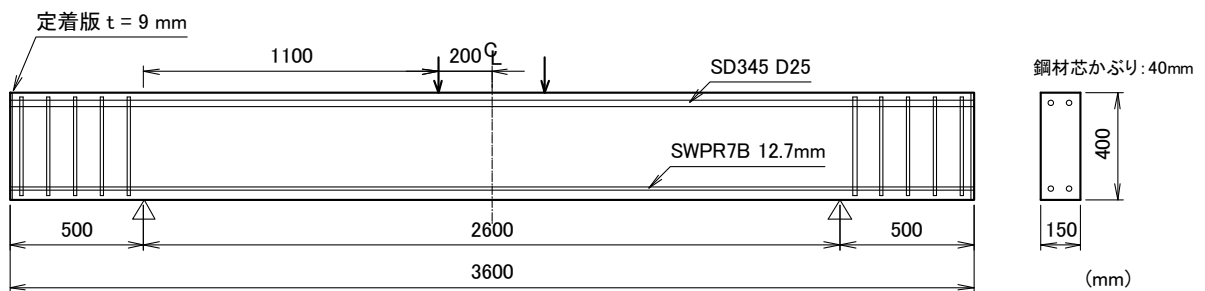


図-7.2.1 試験体の形状寸法および配筋状況

表-7.2.1 計算耐力の一覧

試験体名	コンクリートの種類	短繊維混入率 (vol. %)	圧縮強度* (MPa)	計算曲げ耐力 (kN) ①	計算せん断耐力 (kN)				せん断余裕度 ②/①
					コンクリート分担分	デコンプレッションモーメントによる増分	短繊維分担分	合計 ②	
P-N	普通	-	40	182	68.2	39.2	-	107	0.59
P-L	軽量	-	40	182	47.7	39.2	-	87.0	0.47
P-LF		0.5	40	182	47.7	39.2	33.8	121	0.66

8. 研究結果

8. 1 ポンプ圧送試験

8. 1. 1 現地試験

(1) 軽量骨材吸水率

圧送前後における軽量骨材の吸水率の変化を図-8.1.1に示す。

圧送後の吸水率は、No. 3 のケースでは、圧送前に比べ僅かに(-0.1%)に低くなっているが、No. 4、No. 5 のケースでは、圧送前に比べ0.4~0.7%増加している。また、昨年実施したスラグ 80kg/m³ のデータ (H18) では1.6%増加している。これらの結果を踏まえると、軽量骨材の吸水率は圧送後において吸水率が増加する傾向にあり、圧送時の圧力によって軽量骨材が加圧吸水を受けていることが示された。

(2) スランプフロー

圧送前後のスランプフロー値 (図-8.1.2)、500mm 到達時間 (図-8.1.3)、および流動停止時間 (図-8.1.4) の関係を示す。

スランプフロー値は No. 3 は圧送後が圧送前より大きく、No. 4、No. 5 は圧送後が圧送前より小さい。また、昨年実施した実験のデータは同値であった。本検討においては、圧送前後におけるスランプフロー値の明瞭な傾向は認められなかった。500mm 到達時間は何れのケースも圧送後が圧送前に比べて長くなっている。

これは、圧送中の圧送圧力によって軽量骨材の吸水率が増加したことに伴い、コンクリート中の水分が減少し、粘性抵抗が増大したことを示している。流動停止時間は何れのケースにおいても圧送後が圧送前に比べて長くなっている。これは、前述と同様の理由で、圧送中にコンクリートの粘性抵抗が増大したことを示している。

以上のことから、圧送前後のスランプフロー値の変化には明瞭な傾向は認められなかったが、500mm 到達時間や流動停止時間は圧送後が圧送前に比べて長くなる傾向が認められた。このことは、圧送後の吸水率の増加に伴い、コンクリート中の水分が減少し粘性抵抗が増大することを示している。

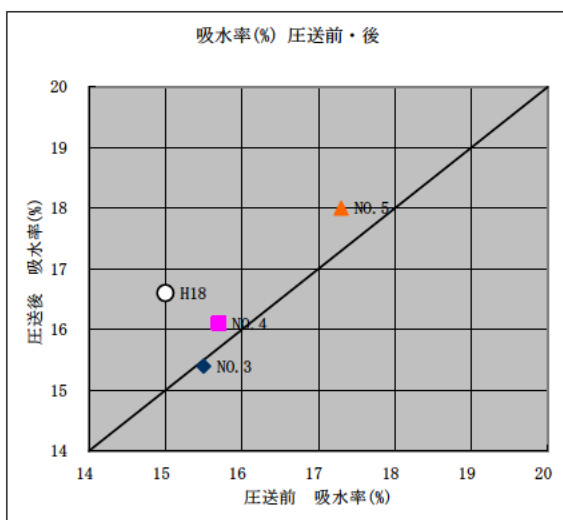


図-8.1.1 圧送前後の吸水率の変化

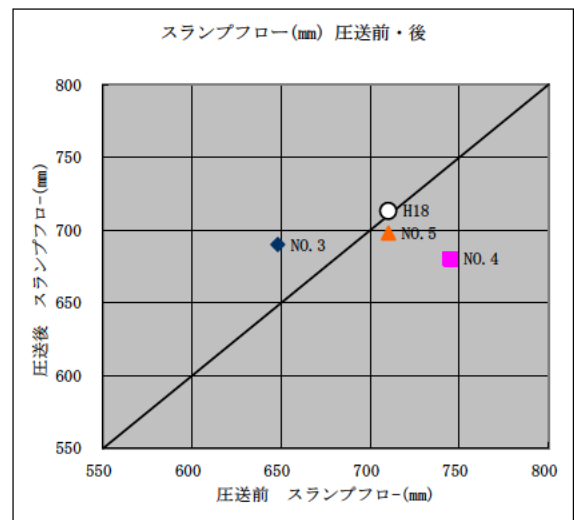


図-8.1.2 圧送前後のスランプフロー値

(3) 空気量

圧送前後における空気量の変化を図-8.1.5に示す。圧送後の空気量は、No. 4、No. 5は圧送前に比べて増加していた。一方、No. 3は減少していた。過年度の実験結果では、圧送後の空気量は圧送前に比べ減少する傾向を示していたが、今回の実験では明瞭な傾向は認められなかった。

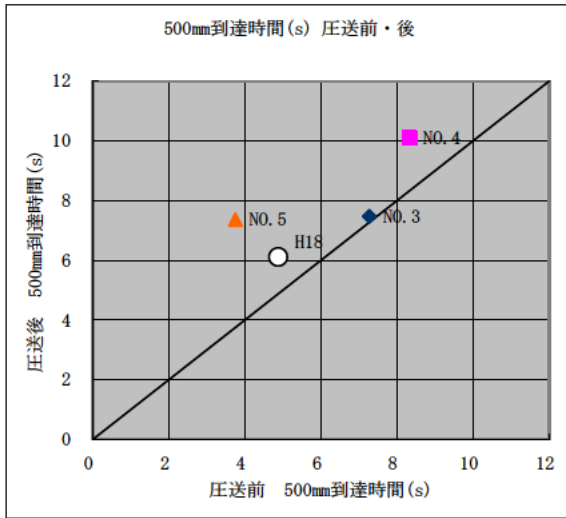


図-8.1.3 圧送前後の500mm到達時間

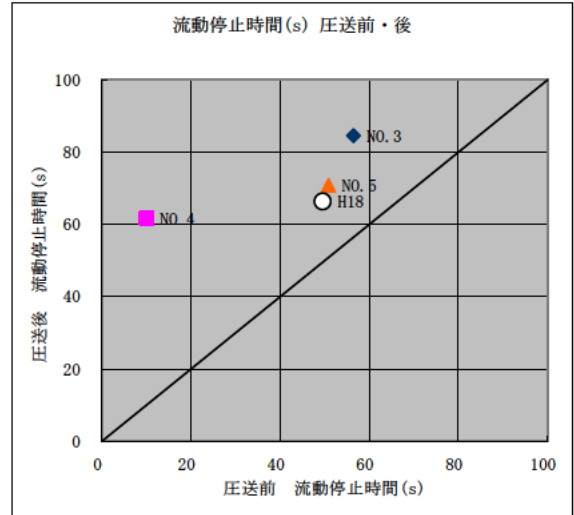


図-8.1.4 圧送前後の流動停止時間

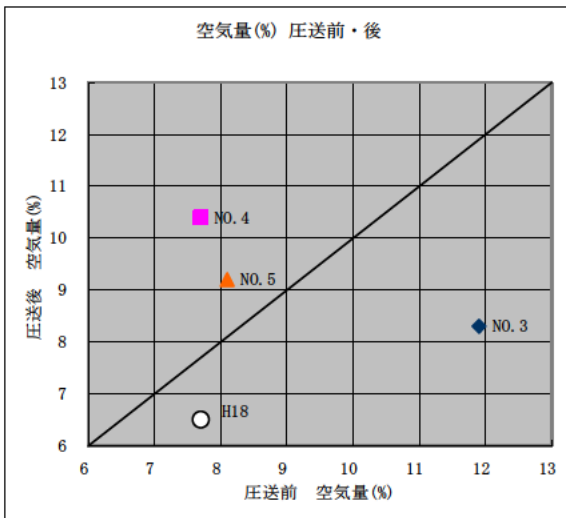


図-8.1.5 圧送前後における空気量

(4) 管内圧力

管内圧力は、配管の根元および中間（両者の距離は 19.5m）で圧送開始から終了まで測定した。圧力波形を図-8.1.6 (No.3)、図-8.1.7 (No.4)、図-8.1.8 (No.5) に示す。

No.3は、圧送中の管内圧力の変動は少なく、ほぼ一定値を示しており、安定した圧送状況である。根元の最大圧力 14.0kgf/cm^2 (1.37MPa)、中間の最大圧力 3.53kgf/cm^2 (0.35MPa)であった。根元から中間にかけての圧力勾配は $0.537\text{kgf/cm}^2/\text{m}$ (0.0523MPa/m)であった。No.4は、圧送開始直後から根元圧力は急激に上昇し 30kgf/cm^2 程度に達した後、緩やかな増加を示しながらほぼ収束した。最大圧力は 38.9kgf/cm^2 (3.81MPa)であった。中間圧力も同様な傾向を示し最大圧力 23.4kgf/cm^2 (2.29MPa)であった。根元から中間にかけての圧力勾配は $0.795\text{kgf/cm}^2/\text{m}$ (0.0779MPa/m)であり、測定した3ケースの中で最も大きかった。No.5は、管内圧力の変動は少なくほぼ一定値を示しており安定した圧送状況であった。管内圧力は、測定した3ケースの中で最も小さかった。根元最大圧力 7.48kgf/cm^2 (0.73MPa)、中間の最大圧力 2.59kgf/cm^2 (0.254MPa)であった。根元から中間にかけての圧力勾配は $0.251\text{kgf/cm}^2/\text{m}$ (0.0246MPa/m)であり測定した3ケースの中で最も小さかった。

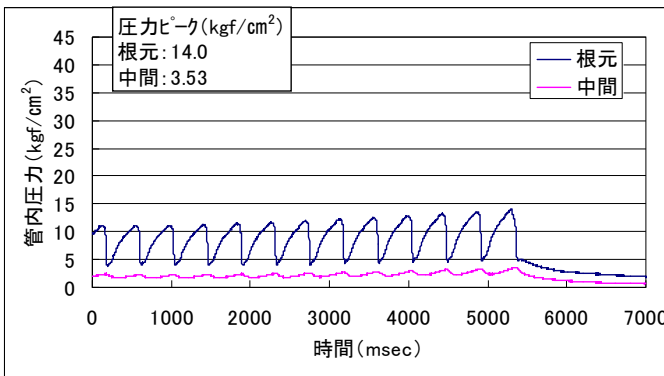


図-8.1.6 圧力波形 (No.3)

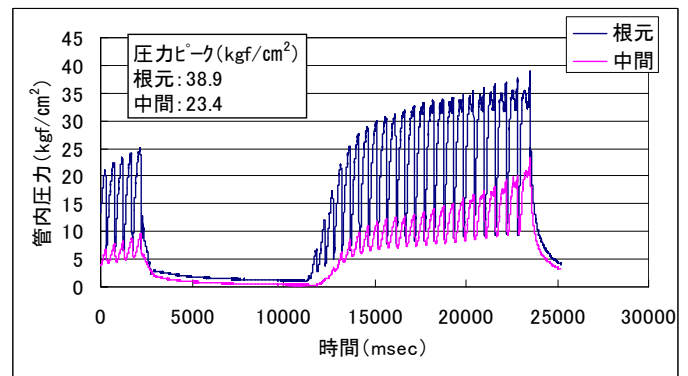


図-8.1.7 圧力波形 (No.4)

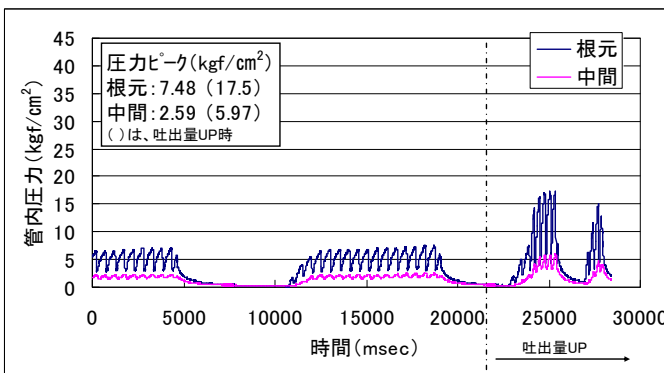


図-8.1.8 圧力波形 (No.5)

8. 1. 2 室内試験

(1) 圧縮強度

A) 材令と圧縮強度

材令 7 日および材令 28 日の圧縮強度を図-8.1.9 に示した。

材令 28 日の圧縮強度は、No. 3(41.83N/mm²)、No. 4(46.94N/mm²)は目標強度 40 N/mm² を満足しているが、No. 5(25.06N/mm²)は目標を下回っている。

圧縮強度は、No. 4 が最も大きく、スラグ混入量の増量の効果が表れている。

一方、No. 5 が目標強度を下回った要因としては、“低含水品”の軽量骨材の吸水率が目標値よりも 3%高く、骨材表面水の影響 (=W/C の低下) があつたこと等が推察される。

また、材令 7 日→材令 28 日の強度増加率 (σ_{28}/σ_7) とスラグ混入量との関係を図-8.1.10 に示す。強度増加率は、No. 3 で $\sigma_{28}/\sigma_7=1.25$ 、No. 4 で $\sigma_{28}/\sigma_7=1.12$ 、No. 5 で $\sigma_{28}/\sigma_7=1.13$ であつた。今回の実験ではスラグ混入量と強度増加率との間に明瞭な関係は認められなかったものの、スラグ混入量が多いケース (No. 4) で材令 7 日の強度発現が大きいことから、スラグの強度増加への寄与効果は初期段階で大きいことが示唆される。

B) 空気量、スラグ混入量と圧縮強度の関係

圧縮強度に及ぼす影響が大きいと考えられる空気量およびスラグ混入量に着目し、圧縮強度 (σ_{28}) と空気量およびスラグ混入量との関係を図-8.1.11、図-8.1.12 に示す。スラグ混入量は、No. 4 (スラグ 240kg/m³、水粉体比 W/P=25.6%)、No. 3、No. 5 (スラグ 160kg/m³、W/P=25.6%)、H18 のケース (スラグ 80kg/m³、水粉体比 W/P=27.9%) である。圧縮強度は空気量の増加に伴って減少するのが一般的な傾向であるが、図-8.1.11 では圧縮強度と空気量との間にこのような関係は示されなかった。一方、図-8.1.12 に示すように、圧縮強度はスラグ混入量の増大に伴い増加する顕著な傾向を示した。これらの結果から、圧縮強度に及ぼす空気量およびスラグ混入量の影響については、スラグ混入量の方が空気量に比べて顕著で、スラグ混入量と圧縮強度との間には明瞭な正の相関が見られ、一方で空気量の影響についてはスラグの作用によって相殺されて不明瞭な傾向が示されたものと推察される。

C) 単位体積重量

圧縮強度試験用供試体を用いて単位体積重量を測定した。単位体積重量は、No. 3 で 1825kg/m³、No. 4 で 1795kg/m³、No. 5 で 1690kg/m³ であつた。実測した単位体積重量と配合より計算した理論単位体積重量との関係を図-8.1.13 に示す。No. 3 および No. 4 では、両者の単位体積重量は概ねよい関係を示すが、No. 5 は、実測単位体積重量が理論単位体積重量に比べ極端に小さい値を示している。これは、No. 5 のケースの軽量骨材の吸水率が高く、配合設計で想定したよりも軽量骨材の表面水が多かつたためにさらなる軽量化が引き起こされたこと等が推察される。

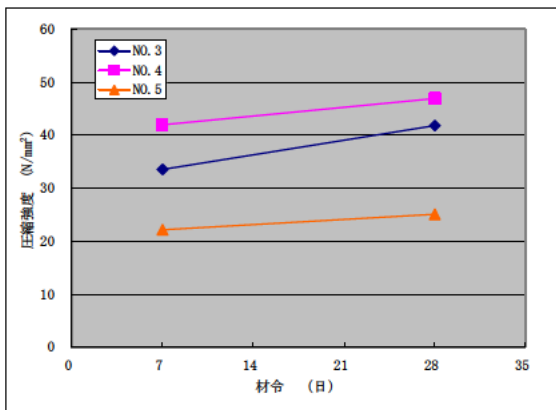


図-8.1.9 材令と圧縮強度の関係

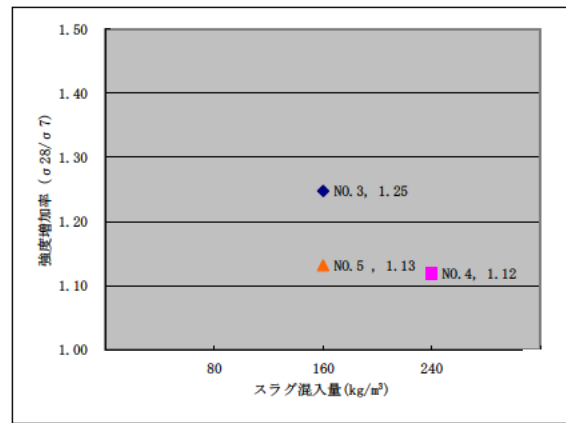


図-8.1.10 強度増加率

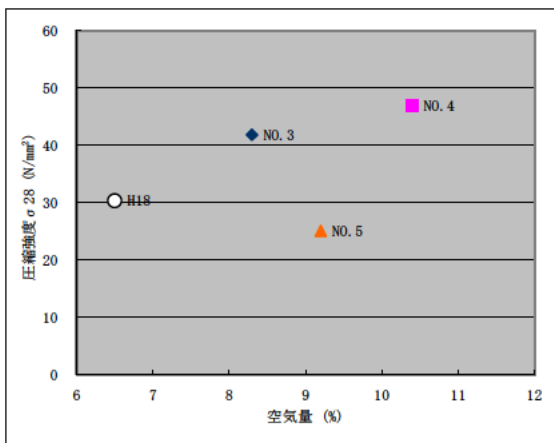


図-8.1.11 圧縮強度と空気量との関係

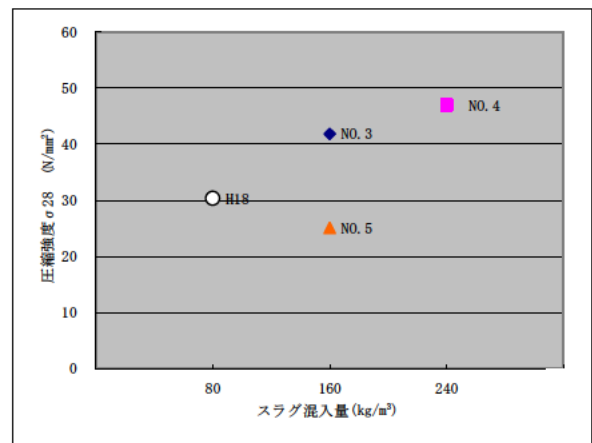


図-8.1.12 圧縮強度とスラグ混入量との関係

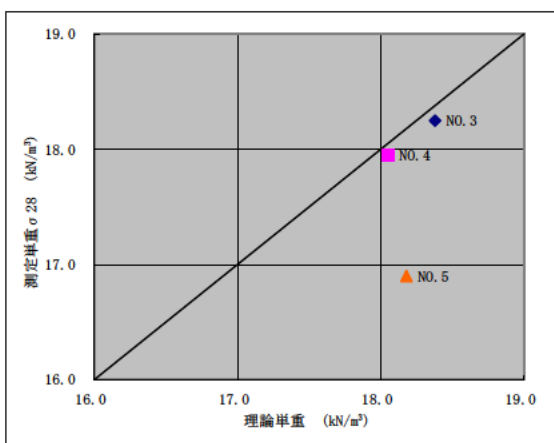


図-8.1.13 単位体積重量の実測値と理論値の関係

(2) 凍結融解試験結果

凍結融解試験は、No. 3、No. 4、No. 5 について実施した。相対動弾性係数および質量減少率と凍結融解サイクルとの関係を図-8.1.14、図-8.1.15 に示す。なお、昨年のデータ (H18) も併せて示した。H18 は、今回の結果とあわせて比較すると、相対動弾性係数の減少割合が最も大きく、300 サイクル終了時で相対動弾性係数は 75.2% となっており、目標耐久性指数を下回っている。一方、No. 3 および No. 4 の相対動弾性係数の減少割合はこれに比べると緩やかで、300 サイクル終了時においては各々 95.4%、97.6% となり、目標耐久性指数 DF85% 以上となった。No. 5 は、他の 2 ケースに比べ、180 サイクル付近より相対動弾性係数の減少割合がやや大きく、300 サイクル終了時で相対動弾性係数は 87.7% となっているが、目標耐久性指数は上回っている。質量減少率は何れのケースも凍結融解サイクルの増加に伴い、質量は増加する傾向を示し、300 サイクル終了時に No. 3 および No. 4 で 0.3%、No. 5 でやや大きく、1.0% の増加となっている。H18 が最も大きく 1.1% の増加である。

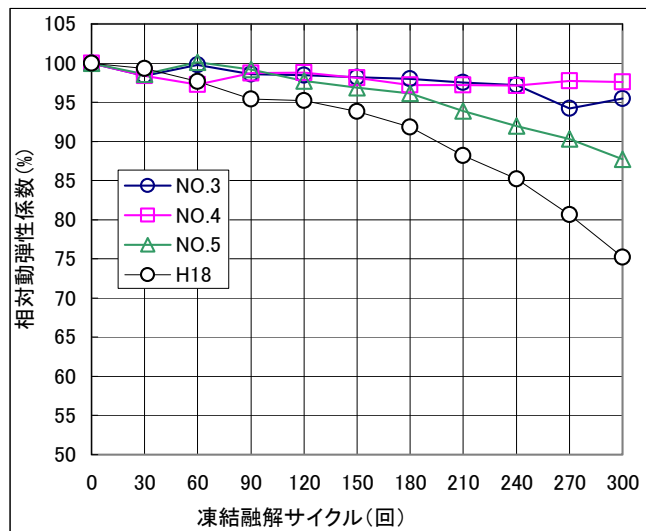


図-8.1.14 相対動弾性係数と凍結融解サイクルとの関係

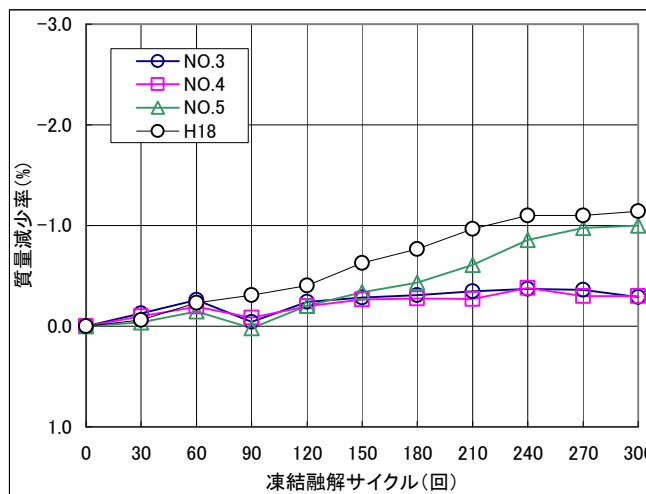
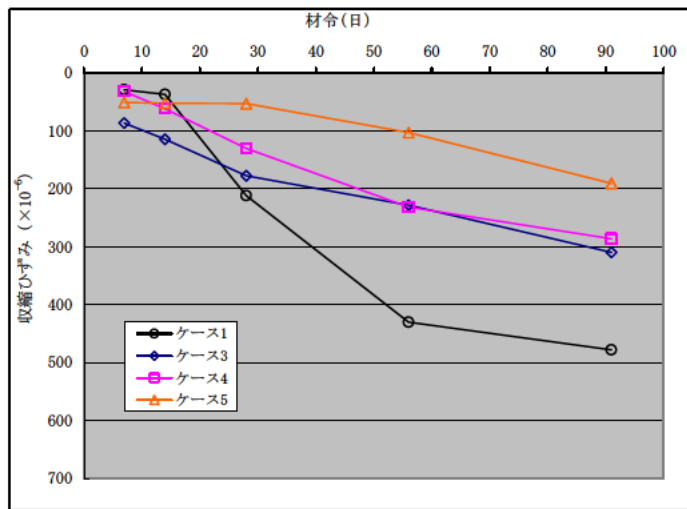


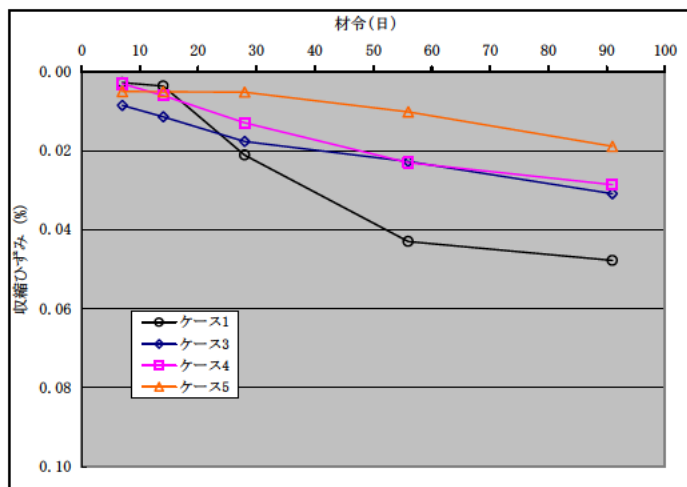
図-8.1.15 質量減少率と凍結融解サイクルとの関係

(3) 長さ変化試験結果

ここでは No. 1、No. 3、No. 4、No. 5 において試験を実施した。No. 1 のケースは普通コンクリートで、No. 3～No. 5 の軽量コンクリート（何れもビニロン混入率 0.5%）との比較のために実施した。材令と収縮ひずみとの関係を図-8.1.16 に示した。何れのケースにおいても、材令の増加に伴い収縮ひずみは増加している。普通コンクリートの No. 1 は、材令 56 日付近まで収縮ひずみの増加割合が大きいですが、以降、緩やかな増加に転じている。No. 3～No. 5 の軽量コンクリートのケースは、材令 91 日時点までにおいて、何れも直線的な増加傾向を示し、収縮ひずみの収束は認められない。No. 3～No. 5 の軽量コンクリートのケースは、No. 1 の普通コンクリートに比べて収縮ひずみが小さい。これは、ビニロンの混入は収縮ひずみの抑制に効果があることを示唆している。スラグ混入量と長さ変化との関係については、No. 3(スラグ 160kg/m³)、No. 4(スラグ 240 kg/m³)、No. 5(スラグ 160 kg/m³)の比較から、スラグ混入量 160 kg/m³～240 kg/m³ の増減に伴う長さ変化に及ぼす影響は小さかったことが伺える。



* (圧縮ひずみ (×10⁻⁶) 表示)



* (圧縮ひずみ (%) 表示)

図-8.1.16 材令と収縮ひずみとの関係

8. 2 高靱性コンクリート製 PC 梁の静載荷実験

図-8.2.1 に荷重-変位関係を示す。図より、いずれの試験体においても、最大荷重到達後、荷重が急激に低下していることより、せん断破壊により終局に至っていることが分かる。軽量 PC 梁の場合には、普通 PC 梁の場合よりもひび割れ発生後の荷重が小さく、最大荷重も小さいことが分かる。これは、軽量コンクリートの引張強度が普通コンクリートの場合よりも小さく、PC 梁のせん断耐力も低下することによるものである。このような結果は、過去の短繊維混入軽量 RC 梁の実験結果と同様である。

一方、短繊維を混入した軽量 PC 梁は、普通 PC 梁と同様の荷重-変位関係を示している。これは、短繊維の混入により軽量 PC 梁のせん断耐力が向上し、普通 PC 梁と同程度の荷重レベルに至ったためと考えられる。

なお、本実験では、コンクリートの種類および短繊維混入の有無に関わらず、いずれの試験体もせん断破壊により終局に至っている。これは、実験パラメータが PC 部材のせん断耐力に及ぼす影響を定量的に検討するため、全ての梁においてせん断破壊により終局に至るように設計したことによるものである。具体的には、プレストレス力導入によるデコンプレッションモーメントや短繊維の効果を加味した計算せん断耐力が曲げ耐力を下回るように設計している。

図-8.2.2 に実験終了後における各試験体の破壊性状を示す。いずれの試験体も斜めひび割れが大きく開口してせん断破壊で終局に至っていることがわかる。特に、軽量 PC 梁では、他の試験体よりも、著しい破壊性状を示している。実験時には、大きな音とともに、上縁コンクリートと左側の圧縮ストラットの部分が一気に破壊したことを確認している。

また、短繊維を混入した軽量 PC 梁では、普通および軽量 PC 梁と異なり、かぶりコンクリートの剥落が見られない。これは、短繊維の架橋効果が発揮されたことによるものと考えられる。

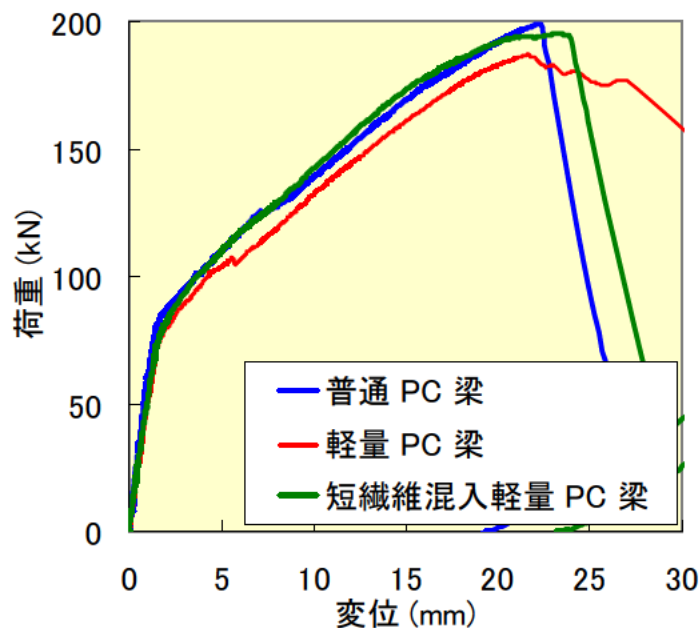


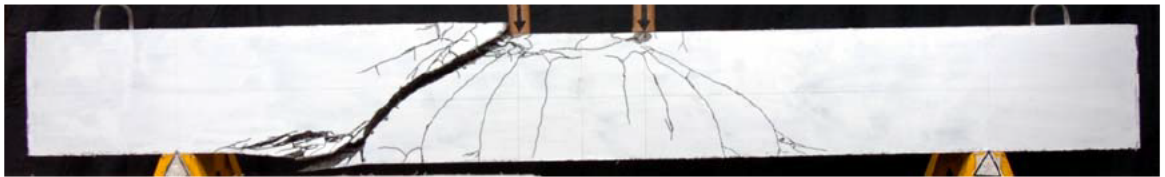
図-8.2.1 荷重-変位関係



(a) 普通 PC 梁



(b) 軽量 PC 梁



(c) 短繊維混入軽量 PC 梁

図-8.2.2 実験終了後における各試験体の破壊性状

8.3 考察

8.3.1 ポンプ圧送試験

(1) 現地試験

根元部→中間部の圧力低下（圧力勾配）と吐出量との関係を図-8.3.1 に示す。圧力勾配と吐出量との間にはよい負の相関、すなわち、圧力勾配が小さくなるほど吐出量は増加するという傾向が示された。圧力勾配が小さいということは圧力損失が小さいということであり、よりスムーズな圧送が行われ吐出量が增大するという当然の結果に帰結していると判断される。

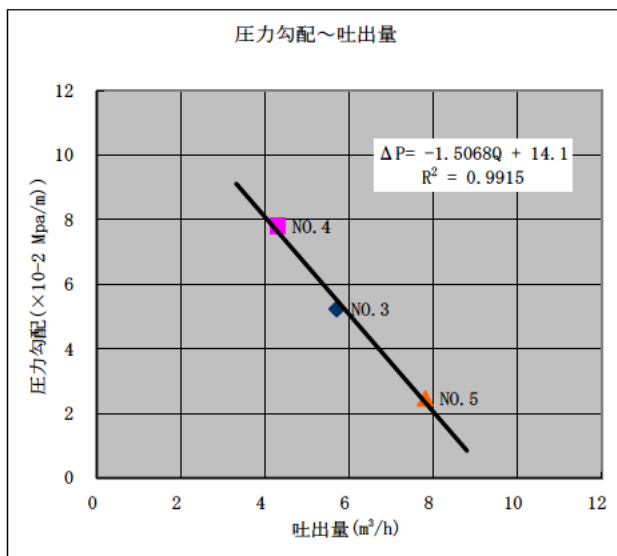


図-8.3.1 圧力勾配と吐出量との関係

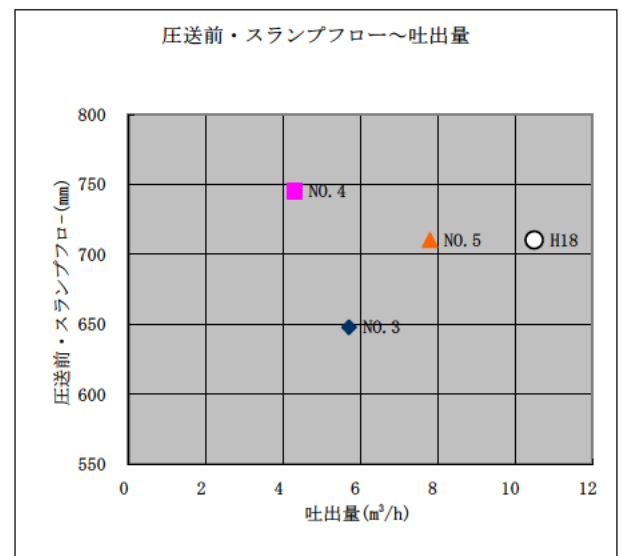


図-8.3.2 スランプフロー値と吐出量との関係

圧送中の管内圧力低下（圧力勾配）と吐出量との関係から、圧力勾配が小さいほど、圧送中の管内圧力損失が小さく、よりスムーズな圧送が行われ、設定吐出量の実現が可能になるものと判断できる。

ここで、圧力勾配 ΔP 、吐出量 Q とすると、今回の圧送実験より下記の関係式が得られた。

$$\Delta P = -1.5068Q + 14.1 \quad (R^2=0.9915) \quad (\text{式 } 8.3.1)$$

ここで、吐出量は、ポンプ圧送性の良否判断の目安となるものであり、フレッシュコンクリートの流動性状に大きく依存することが想定される。実験は、設定吐出量 $10\text{m}^3/\text{h}$ で実施したが、実際の吐出量（実吐出量）は No. 3 で $5.7\text{m}^3/\text{h}$ 、No. 4 で $4.3\text{m}^3/\text{h}$ 、No. 5 で $7.9\text{m}^3/\text{h}$ であった。なお、H18 のケースは $10.5\text{m}^3/\text{h}$ であった。ここでは、コンクリートの流動性状を表す指標としてスランプフローに着目して、圧送前におけるスランプフローと吐出量との関係を整理した（図-8.3.2）。No. 3、No. 5、H18 に着目すると、圧送前スランプフロー値が大きくなるほど、吐出量は増加する傾向を示している。一方、No. 4 は、スランプフロー値は 745mm と大きく上記の傾向から見れば、吐出量はもっと増大すると予想されたが、スラグ量が最も多かったことから、スラグ混入に伴う粘性抵抗の増大の影響が大きく、吐出量が小さかった（傾向が外れた）ことが推察される。

吐出量と 500mm 到達時間および流動停止時間との関係は、図-8.3.3、図-8.3.4 の通りである。吐出量との関係をみると、ともに負の相関、すなわち、圧送前の 500mm 到達時間の減少に伴い吐出量は増大する傾向が読み取れる。以上のように、圧送前におけるスランプフロー性状と吐出量との間には良好な関係があることが示唆された。ここで、 500mm 到達時間 (T_{500})、吐出量 Q とすると以下の関係が得られた。

$$T_{500} = -0.63Q + 10.48 \quad (R^2=0.6401) \quad (\text{式 } 8.3.2)$$

一方、流動停止時間 (T_s)、吐出量 Q とすると以下の関係が得られた。

$$T_s = -1.94Q + 68.32 \quad (R^2=0.8781) \quad (\text{式 } 8.3.3)$$

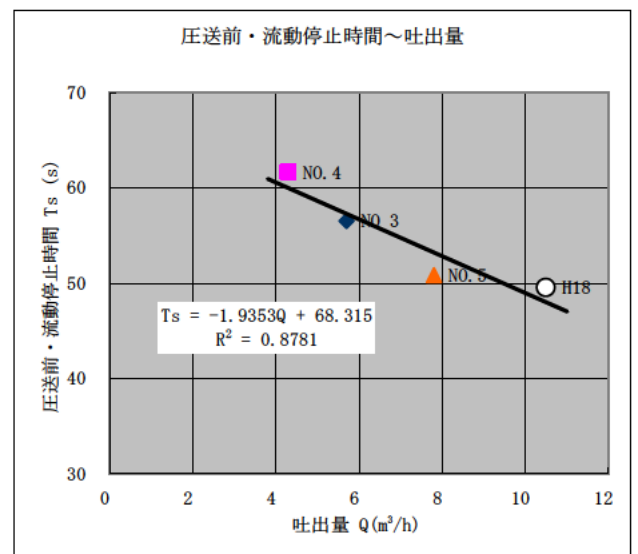
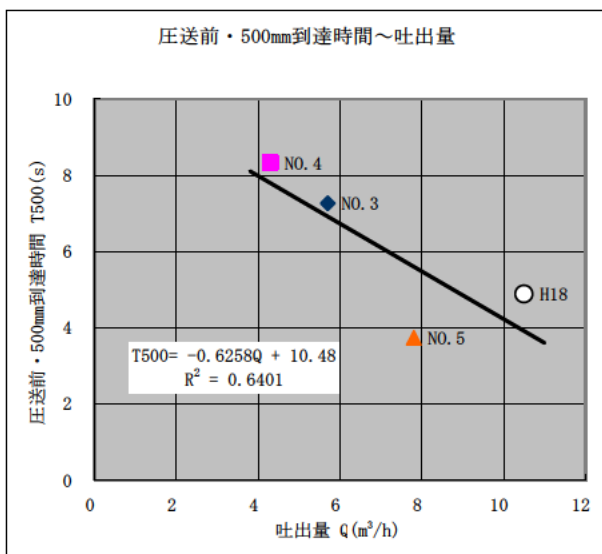


図-8.3.3 圧送前の 500mm 到達時間と吐出量との関係 図-8.3.4 圧送前の流動停止時間と吐出量との関係

(2) 強度

材令と圧縮強度との関係は図-8.3.5 に示すとおりであった。圧縮強度 σ 、材令 t とすると、今回の実験ケースでは下記のような関係が得られた。

$$\sigma = (0.14 \sim 0.40) t + (21.17 \sim 40.24) \quad (\text{式 } 8.3.4)$$

また、スラグの混入量が圧縮強度に及ぼす影響は顕著であり、図-8.3.6 に示すような関係が得られた。なお、No. 5 は単位体積重量が著しく小さいため、特異値として除外した。

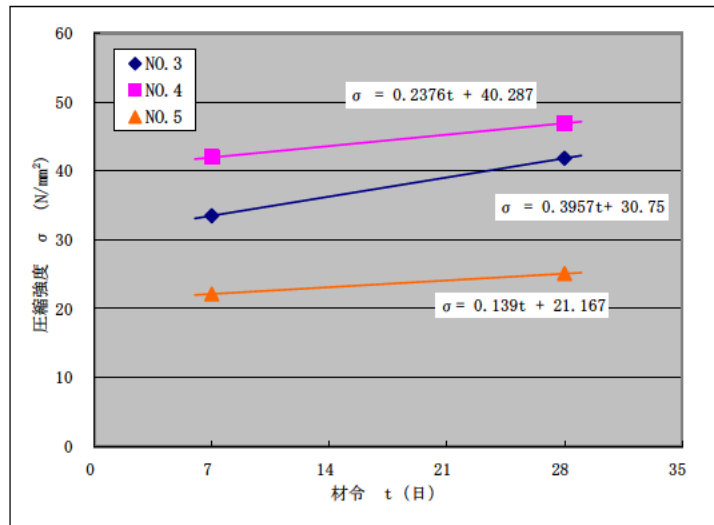


図-8.3.5 材令と圧縮強度との関係

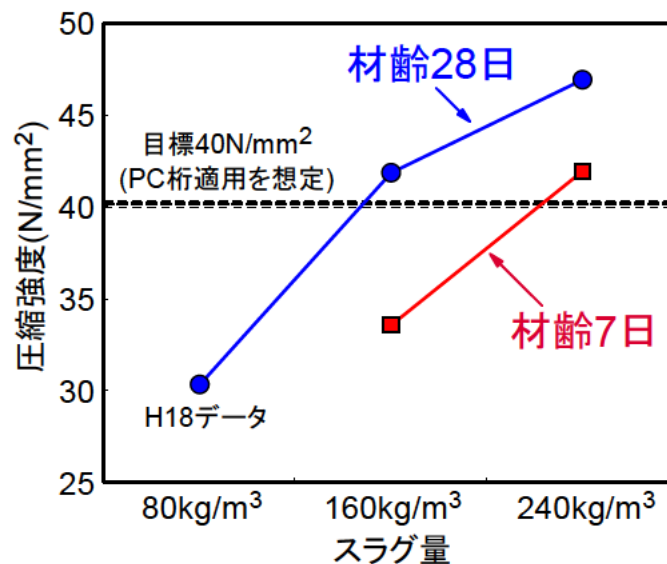


図-8.3.6 スラグ混入量と圧縮強度との関係

(3) 耐凍害性

コンクリートの耐凍害性の向上に寄与する大きな要因として空気量が挙げられる。空気量と耐久性指数との関係は図-8.3.7 に示すとおりであった。実験ケースの空気量の範囲は 6.5%~10.4%であり、耐久性指数 DF と空気量 A の関係式は次式により近似できる。

$$DF = 5.2A + 44.6$$

(式 8.3.5)

目標 DF ≥ 85% を満足するには、空気量 7.8% 程度以上であれば耐凍害性に問題はないと判断される。

(4) 収縮特性

材令と収縮ひずみとの関係は、図-8.3.8 に示すとおりであった。No. 3~No. 5 の軽量コンクリートのケースは収縮ひずみの収束は認められないが、普通コンクリートの No. 1 に比べると収縮ひずみが小さく、ビニロン混入が収縮ひずみ抑制に効果があることが示唆される。スラグ混入量 160kg/m³~240kg/m³ の増減に伴う長さ変化に及ぼす影響は小さかったことが伺える。

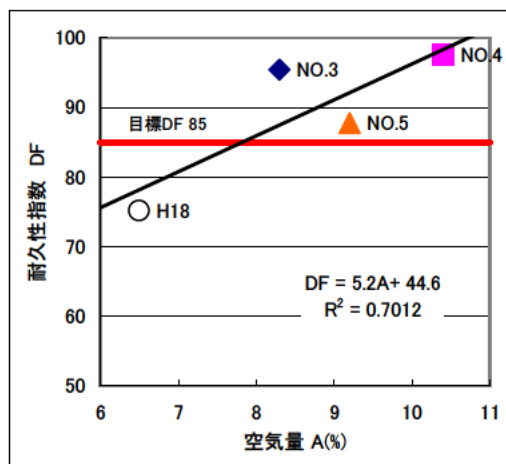


図-8.3.7 空気量と耐久性指数との関係

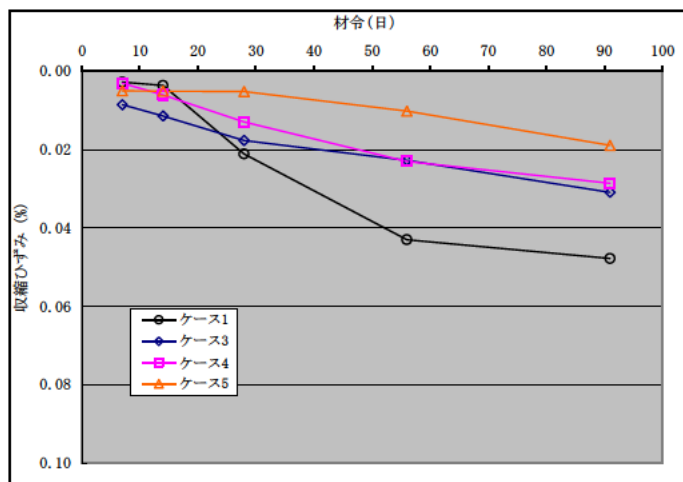


図-8.3.8 材令と収縮ひずみとの関係

8. 3. 2 高靱性コンクリート製 PC 梁の静載荷実験

ここでは、高靱性コンクリート製 PC 梁のせん断耐力の計算結果を実験結果と比較する。なお、高靱性コンクリート製 PC 梁の計算せん断耐力 V_{yd} は、下式により算出した。

本式において、 V_{sf} は短繊維が受け持つせん断耐力であり、高靱性軽量コンクリートの残存引張強度を用いて算出するものである。

$$V_{yd} = V_c + V_s + V_{sf} \quad (\text{式 } 8.3.6)$$

ここに、

V_c ：せん断補強筋等の補強材を有しない RC 棒部材のせん断耐力で、コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕に準拠する。

V_s ：せん断補強筋が受け持つせん断耐力でコンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕に準拠する。

V_{sf} ：短繊維が受け持つせん断耐力で、以下の式による。

$$V_{sf} = b \cdot (z/\tan \theta) \cdot f_r$$

b ：ウェブ幅

z ：圧縮合力作用位置から主鉄筋の図心までの距離、 $d/1.15$ としてよい。

d ：有効高さ

：軸方向と斜めひび割れ面のなす角度 (= 45°)

f_r ：短繊維混入コンクリートの残存引張強度

表-8.3.1 には、各試験体の計算せん断耐力と実測せん断耐力の一覧を示している。表より、いずれの試験体においても実測せん断耐力が計算せん断耐力を大きく上回っていることが分かる。このことから、高靱性軽量 PC 梁のせん断耐力は、前出の計算式により安全側に評価できるものと考えられる。

ただし、安全余裕度を見ると、各試験体において異なっていることから、普通 PC 梁と軽量 PC 梁の耐荷性状の違い、軽量 PC 梁と高靱性軽量 PC 梁の耐荷性状の違いについて詳細な検討が必要であると考えられる。

表-8.3.1 各試験体の計算せん断耐力と実測せん断耐力の一覧

	計算せん断耐力 ① (kN)	実測せん断耐力 ② (kN)	安全余裕度 ②/①
普通 PC 梁	107	199	1.86
軽量 PC 梁	87	187	2.15
高靱性軽量 PC 梁	121	195	1.61

9. 結論

今回実施した圧送試験結果より以下の知見が得られた。

- (1) 軽量骨材の吸水率は圧送後において吸水率が1%程度増加しやすい。また、これによってコンクリートの粘性抵抗は増大しやすい傾向にある。
- (2) 圧縮強度に及ぼす空気量およびスラグ混入量の影響については、スラグ混入量の方が空気量に比べて顕著であり、スラグ混入量と圧縮強度との間に明瞭な正の相関が見られた。
- (3) 圧縮強度は単位体積重量と概ねよい整合を示す。軽量骨材の吸水率が高い場合は、配合設計で想定したよりも軽量骨材の表面水が多くなり、軽量化を引き起こしやすい傾向にある。
- (4) 空気量7.8%程度以上であれば目標DF \geq 85%を満足できる。
- (5) ビニロン混入は収縮ひずみ抑制に有効で、このことが効果的に作用し、スラグ混入量160kg/m³～240kg/m³の増減に伴う長さ変化に及ぼす影響は小さかった。
- (6) 実測せん断耐力は計算せん断耐力を大きく上回っていた。ただし、安全余裕度は各試験体において異なり、普通PC梁と軽量PC梁の耐荷性状の違い、軽量PC梁と高靱性軽量PC梁の耐荷性状の違いの考慮が必要であることが示された。

10. 今後の問題点等

今回の検討で、管内圧力については、No.3およびNo.5は波形が安定していたが、No.4は圧力が急増し閉塞兆候もみられ、圧送性は難と評価された。一方、圧送後の圧縮強度は、スラグ量と圧縮強度は比例関係にあったが、No.3は7日強度が目標を下回り、28日強度は目標を上回った。このことから、施工性と強度特性を両立できるスラグ量は160～240kg/m³間に存在すると考えられる。今後は、配合設計法の確立に向けて最適なスラグ量の明確化を図る必要がある。さらに吐出量のアップなど、施工性の向上に向けた検討も必要と言える。各試験体の安全余裕度に違いが見られたことから、普通PC梁と軽量PC梁の耐荷性状の違い、軽量PC梁と高靱性軽量PC梁の耐荷性状の違いについて詳細な検討が必要であると考えられる。

今後も、施工性、力学特性の整理に向けた研究を進め、実用化および設計要領とりまとめに向けて研究を進める。

<参考文献>

- 1) 遠藤裕丈、田口史雄、竹本伸一、松井敏二：頁岩系軽量骨材の吸水率が軽量コンクリートの耐久性および物性に及ぼす影響、土木学会第 58 回年次学術講演概要集、pp. 1075-1076、2003. 9
- 2) 遠藤裕丈、田口史雄、竹本伸一、松井敏二：耐凍害性を考慮した軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する基礎的研究、土木学会第 59 回年次学術講演概要集、pp. 945-946、2004. 9
- 3) 遠藤裕丈、田口史雄、竹本伸一、松井敏二：頁岩系非造粒型軽量骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送性と耐凍害性、土木学会第 60 回年次学術講演概要集、pp. 727-728、2005. 9
- 4) 「軽量コンクリート」笠井芳夫編
- 5) 「平成 17 年度 高韌性軽量コンクリートの材料特性に関する試験業務 報告書」
- 6) 「ビニロン短繊維混入吹付けコンクリートの耐久性に関する実験的研究」（北海道開発土木研究所月報 NO. 620 号 2005 年 1 月 栗橋ら）
- 7) 遠藤裕丈、田口史雄、栗橋祐介、市川聖芳：PVA 短繊維混入軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する実験的研究、寒地土木研究所月報、No. 654、pp. 9-16、2007. 11

共同研究報告書
COOPERATIVE RESEARCH REPORT of P.W.R.I.
No.425 November 2011

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所
寒地土木研究所 寒地技術推進室

〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号 電話 011-590-4046