

論文 高性能軽量コンクリートの配合がポンプ圧送性に及ぼす影響

柳井 修司*1・坂田 昇*2・信田 佳延*3・石川 雄康*4

要旨: 流紋岩系真珠岩を原料とする独立空隙型の高性能軽量骨材を用いたコンクリートの配合がポンプ圧送性に及ぼす影響を検討するために流動性, 水セメント比, 特殊増粘剤ウェランガムの有無などの配合要因を変化させて室内試験およびポンプ圧送試験を行った。その結果, ウェランガムの添加により, 加圧による骨材内部への吸水が抑制され, 流動性の低下, 圧力損失, 吐出効率などのポンプ圧送性が改善されること, コンクリートのスランプフローを550mm程度とすることで円滑なポンプ圧送が可能であること, 水セメント比38%の高強度軽量コンクリートのポンプ圧送が可能であることが明らかとなった。

キーワード: 高性能軽量骨材, ポンプ圧送, 流動性, ウェランガム, 加圧試験

1. はじめに

近年の橋梁やトンネル, 高層建築物などのコンクリート構造物は長大化・大規模化の傾向にあり, 高強度軽量コンクリートの適切な利用により, 死荷重や地震時慣性力の軽減, 下部構造への負担の軽減, 支保工や建設機械の簡略化が可能となり, 建設コストの削減が可能であることが知られている。しかしながら, 従来の軽量骨材は吸水率が大きく, ポンプ圧送する際に十分なプレウェッティングが必要であったことことや, プレウェッティングによって凍結融解抵抗性が低下する傾向にあったこと¹⁾などから, 高い耐久性が要求される土木構造物にはほとんど使用されていないのが現状である。このような状況下で, 近年, 人工軽量骨材の新しい製造技術^{2) 3)}により, 骨材自身の高強度化, 低吸水率化, 高耐久化が可能となってきており, 強度特性, 耐久性および施工性に優れたいわゆる「高性能軽量コンクリート」の実用化が期待され始めている。

高性能軽量コンクリートの性状に関する研究報告は, 室内試験レベルでは活発に行われている

が, 実施工技術に関する研究報告はほとんど行われていない。コンクリートの急速施工が望まれている今日では, ポンプ施工が不可欠となっており, 著者らは高性能軽量コンクリートに関する既往の研究⁴⁾において, 独立空隙型人工軽量骨材(以下, 高性能軽量骨材と記す)を絶乾状態で用いたコンクリートのポンプ圧送試験を行って, ポンプ圧送が可能なる配合を見出した。本研究では, その結果を受けて高性能軽量コンクリートの配合がポンプ圧送性に及ぼす影響について室内試験およびポンプ圧送試験によって評価し, ポンプ圧送に適した材料および配合について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を表-1に示す。使用した粗骨材は流紋岩系真珠岩を造粒・焼成した高性能軽量粗骨材²⁾であり, 24時間吸水率が3%以下のものである。本検討においては, 室内試験ではG1骨材を, ポンプ圧送試験ではGp骨材を使用した。また, 単位水量を極力減じるためにポリカルボン酸エーテ

*1 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・施工グループ 研究員 工修 (正会員)

*2 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・施工グループ 主任研究員 工博 (正会員)

*3 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・施工グループ グループ長 工修 (正会員)

*4 太平洋セメント(株) 研究本部 清澄研究所 グループリーダー 工修 (正会員)

ル系の高性能 AE 減水剤を使用した。特殊増粘剤ウェランガム⁵⁾については、材料分離抵抗性を増加させることおよびコンクリート中の水の粘性を増加させて、骨材の内部気孔に水が侵入しにくくなる効果を期待して使用した。

表-2に検討の対象としたコンクリートの配合を示す。圧縮強度 40N/mm²、単位容積質量 1,800kg/m³程度の高強度軽量コンクリートを想定して、流動性の影響を検討するためにスランブ 21cm およびスランブフロー 550mm の2種類について試験を実施した。また、各々のコンクリートにウェランガムを添加した場合と添加しない場合について検討を行った。さらに、ポンプ圧送試験では、水セメント比を38%とした配合についても試験を実施した。なお、配合記号の数字は水セメント比、SFはスランブフロー、SLはスランブ、Vはウェランガム添加を意味する。

2.2 室内試験

室内試験では、コンクリートの基本性状を確認するために、練上り直後のスランブ、スランブフロー、空気量および単位容積質量を測定した。また、ポンプ圧送を想定して、加圧に対するフレッシュコンクリートの性状変化を把握するために、非排水状態とした加圧ブリーディング試験容器(φ200×h250mm)を用いてフレッシュコンクリートの加圧試験⁶⁾を実施した。加圧条件は、加圧力を3.5N/mm²、加圧時間を1分間とし、二つの容器に試料を詰め、加圧した試料および加圧しない試料について同時刻にスランブ、スランブフローおよび軽量骨材の含水率を測定した。含水率は、採取したコンクリートを5mmふるい上で水洗いして表乾重量を測定し、24時間炉乾燥させてその質量減少分より算出した。練混ぜには強制パン型ミキサ(容量60ℓ)を使用し、練混ぜ量は50ℓと

表-1 使用材料

使用材料	記号	摘要	
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度:3.13g/cm ³ 、比表面積:4,570cm ² /g
細骨材	S1	粗砂:岩舟郡荒川産川砂	表乾密度:2.58kg/ℓ、吸水率:1.42%
	S2	細砂:太郎代産山砂	表乾密度:2.58kg/ℓ、吸水率:1.85%
		混合比 粗砂:細砂=65:35	粗粒率:2.60
粗骨材 (室内試験)	Gl	真珠岩系独立空隙型 高性能人工軽量粗骨材	絶乾密度:1.20kg/ℓ、24h吸水率:1.06%、 実積率:60.1%、最大寸法:15mm
粗骨材 (圧送試験)	Gp	真珠岩系独立空隙型 高性能人工軽量粗骨材	絶乾密度:1.24kg/ℓ、24h吸水率:2.80%、 実積率:61.5%、最大寸法:15mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系(標準形)
	VIS	特殊増粘剤	ウェランガム

表-2 コンクリートの配合

配合	流動性の 目標値	空気量 (%)	W/C (%)	Gvol (ℓ)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
						W	C	S1	S2	G	SP	VIS
40SFV	スランブフロー 550±50mm	6.0	40.0	310	51.1	170	425	543	293	372 (384)	6.80	0.085
40SF	スランブフロー 550±50mm		40.0	310	51.1	170	425	543	293	384	3.83	0
40SLV	スランブ 21±1.5cm	±	40.0	340	47.9	160	400	523	282	408 (422)	5.20	0.065
40SL	スランブ 21±1.5cm		40.0	340	47.9	160	400	523	282	408	3.60	0
38SFV	スランブフロー 550±50mm		38.0	330	48.1	165	435	513	276	(409)	6.96	0.087

W/C:水セメント比、Gvol:単位粗骨材容積、s/a:細骨材率
G:絶乾状態で表示、()内はポンプ圧送試験時の単位量

した。練混ぜは、全材料投入後120秒間攪拌し、ミキサ内で5分間静置した後、さらに30秒間攪拌して排出した。練混ぜに供した高性能軽量粗骨材(G1)は絶乾状態のものとした。

2.3 ポンプ圧送試験

ポンプ圧送試験は図-1に示す配管条件(配管総延長109m、5B管)で行った。使用したコンクリートポンプは表-3に示す仕様を有する油圧ピストン式のものであり、大容量時の設定で圧送を行った。コンクリートの製造は市中のレディ-ミクストコンクリート工場の強制二軸式ミキサ(容量3.0m³)を使用して行い、1バッチの練混ぜ量を2.5m³として2バッチ分5m³を1台のアジテータ車に積載した。練混ぜ時間は全材料投入後120秒間とした。練混ぜに供した高性能軽量粗骨材(Gp)は、気乾状態のものとした。圧送試験では、コンクリートの設定吐出量を25m³/hとして配合40SLV、38SFV、40SFV、40SFの順序で各5m³ずつ圧送した。また、先送りモルタルおよび配合切替えの目印となる中間モルタルとして、配合40SFVから粗骨材を除いたモルタルを0.5m³ずつ圧送した。試験項目および測定項目は表-4に示すとおりであり、圧送によるコンクリートの性状

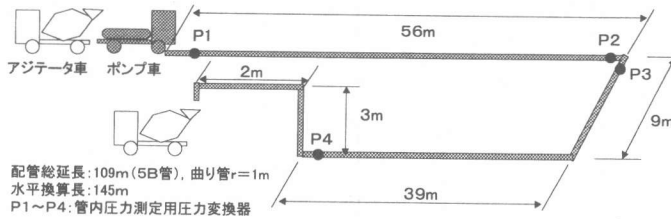


図-1 ポンプ圧送試験の配管状況

表-4 試験および測定項目

項目	出荷時	現着時	圧送前	圧送後(簡先)
スランブ(フロー)	○	○	○	○
空気量	○	○	○	○
単位容積質量	○	○	○	○
コンクリート温度	○	○	○	○
粗骨材含水率	-	-	○	○
圧縮強度	-	-	○(7,28日)	○(7,28日)
ポンプ主油圧	-	-	圧送中に連続して計測	
管内圧力	-	-	圧送中に連続して計測	
実吐出量	-	-	荷卸しに要した時間をポンプ稼働時間で除して算出	

変化を評価した。また、配合の相違がポンプ圧送性に及ぼす影響を評価するために配管上に設置した圧力変換器(P1~P4, 図-1参照)で管内圧力を連続的に計測するとともに、ポンプ主油圧および実吐出量を測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 室内試験

練上り直後のフレッシュコンクリートの試験結果を表-5に示す。いずれの配合も目標品質をほぼ満足するものであった。加圧前後の流動性の比較を図-2に、加圧前後の骨材含水率の比較を図-3に示す。図-2より、いずれの配合も加圧によって流動性の低下が認められたが、ウェランガムを添加した場合には、流動性の低下が軽減されていた。また、図-3に示すように、ウェランガムを添加した場合には加圧前の骨材含水率が小さくなっており、練混ぜによる骨材の吸水が抑制されていた。さらに、加圧前後における骨材含水率の変化も小さくなっていった。これらのことから、水溶性の増粘剤ウェランガムの添加によって、フレッシュコンクリート中の水の粘性を増加させて骨材内部への吸水を抑制し、その結果、加圧に対する流動性の低下を軽減できると考えられた。ま

表-3 ポンプの仕様

ストローク長	1600mm	
シリンダ数	2	
ホッパ容量	0.35m ³	
輸送シリンダ径	φ210mm	
	大容量時	高圧時
吐出量	15~110m ³ /h	15~68m ³ /h
ピストン前面圧	4.90N/mm ²	7.85N/mm ²
水平輸送距離	-	1050m
垂直輸送距離	-	200m

表-5 フレッシュコンクリートの試験結果

配合	コンクリート温度(°C)	スランブ [*] (cm)	スランブ*フロー(mm)		空気量(%)	単位容積質量(kg/m ³)
			平均			
40SFV	20.3	26.0	519 × 514	517	7.0	1819
40SF	20.2	24.5	472 × 470	471	4.7	1839
40SLV	20.2	24.0	416 × 415	416	6.2	1784
40SL	20.6	22.0	385 × 364	375	4.5	1834

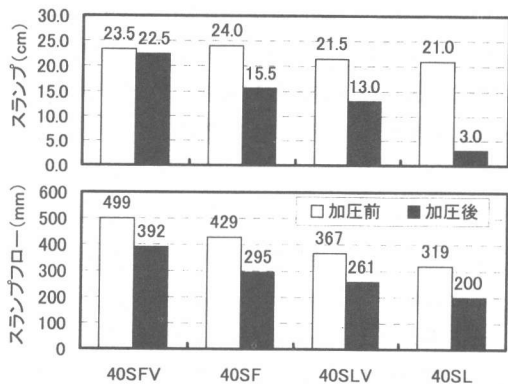


図-2 加圧前後の流動性の比較

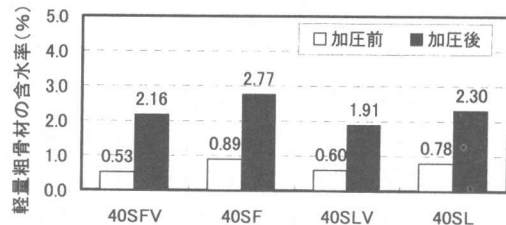


図-3 骨材含水率の比較

た、ウェランガムを添加した場合には、同等の流動性を得るための高性能 AE 減水剤の添加量が増加するため、軽量骨材内部への吸水による水量変化に対して、コンクリートの流動性の変化が生じにくくなっていることにも起因していると考えられた。

なお、目標スランブ 21cm のコンクリートは加圧によってワーカビリティが極端に損なわれてお

り、特にウェランガムを添加しない場合にはスランプが 21cm から 3cm まで低下した。これは、単位水量が少ない上、粗骨材量が多いために、加圧による骨材内部への吸水の影響が顕著に現れたものと考えられた。

3.2 ポンプ圧送実験

ポンプ圧送試験に先立って、配合 40SFV および 40SLV について実機による練混ぜ試験を行った。実機試験におけるコンクリートの流動性の経時変化を図-4 に示す。なお、試験値はアジテータ車から採取した試料によるものである。図に示すように、両配合とも練上りから 60 分経過しても流動性はほとんど変化しなかった。これは、冬季の試験(外気温 9.0°C, コンクリート温度 12.0~13.0°C 程度)であったこと、ウェランガムの添加によって経時に伴う性状変化が軽減されたこと⁵⁾によるものと判断された。軽量粗骨材の含水率は図-5 に示すように、練上りから 60 分経過してもほとんど増加しておらず、練混ぜ時を除いて、圧力が作用しない状態では高性能軽量骨材がモルタル中の水をほとんど吸水しないことが確認された。

次にポンプ圧送試験における測定結果について記す。図-6 にポンプ主油圧から換算したピストン前面圧の時刻歴を示す。目標スランプ 21cm の 40SLV については、4 m³ 程度圧送した頃(圧送開始から 9 分後)からピストン前面圧が容量の 8 割を超え、ポンプが正常に作動しなくなった。そこで 4.4 m³ 圧送した時点でこれ以上の圧送は困難と判断し、圧送を終了した。しかしながら、ほぼ同一の条件で実施した既往の実験⁴⁾では、目標スランプ 21cm のコンクリートは圧送開始直後から閉塞状態になったのに対し、40SLV は多少なりともポンプ圧送性が改善されていた。その理由としては、過去の配合よりも単位水量を 5 kg/m³ 増加させ、単位粗骨材容積を 10 ℓ/m³ 減じたこと、およびウェランガムを添加したことによるものと推察された。目標スランプフロー 550mm とした配合については、ピストン前面圧がほぼ一定値を示し、円滑なポンプ圧送が可能であった。

図-7 に圧送が定常状態となった時の管内圧力

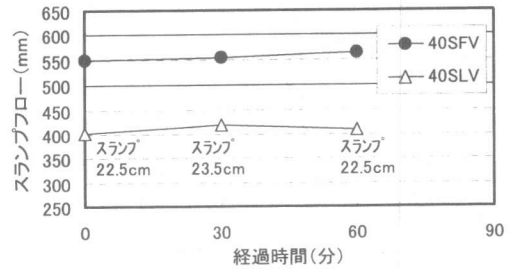


図-4 スランプフローの経時変化

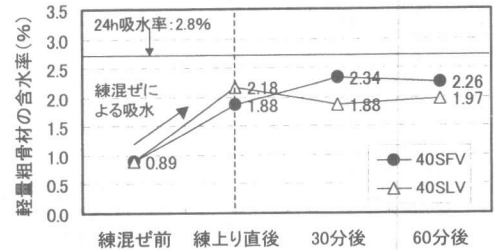


図-5 軽量粗骨材の含水率の変化

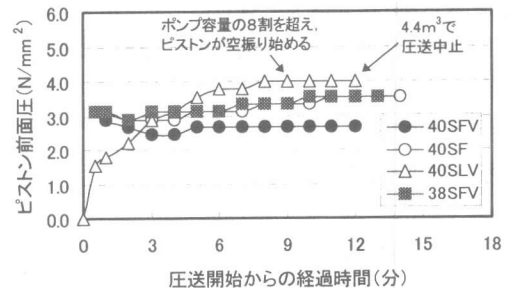


図-6 ピストン前面圧の時刻歴

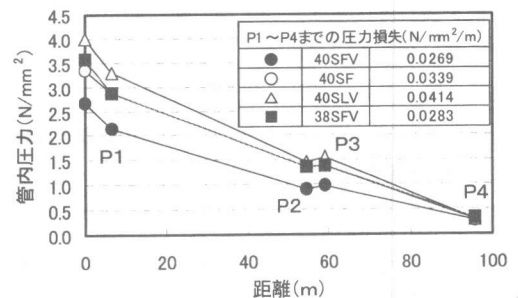


図-7 管内圧力と管内圧力損失量

と圧力損失の測定結果を示す。P 1~P 4 間の単位長さ当たりの圧力損失は 40SFV<38SFV<40SF<40SLV の順に小さく、目標スランプ 21cm の 40SLV は目標スランプフロー 550mm の他の配合に比べて圧力損失が大きい結果を示した。また、40SFV と

40SFを比較すると、40SFVの方が1割程度圧力損失が小さい結果となった。これは、図-8に示すように、40SFVの方が40SFよりもスランブフローが大きかったこと、およびウェランガムを添加することで圧送中の流動性の変化が抑制されていたことによるものと推察された。なお、ほぼ同一の圧送条件における従来の軽量骨材を用いたコンクリートの圧力損失は、単位セメント量 350～400kg/m³、スランブ 18cm のもので0.02N/mm²/m程度である⁷⁾。この値と比較すると、圧力損失が最も小さい40SFVでも1.3倍程度の値であり、大きな値を示した。これは、水セメント比が小さく、かつ単位セメント量が多いためであると考えられた。なお、曲がり配管による圧力損失(P2～P3)はほとんど認められなかった。

図-9に実吐出量の測定結果を示す。配合40SLVは圧送を中止する4.4m³までの結果であるが、実吐出量が他の配合に比べて大幅に小さい値であった。40SFVと40SFを比較すると、ウェランガムを添加した40SFVの方が実吐出量が大きく、ウェランガムを添加することで圧送効率が向上するものと考えられた。水セメント比38%の38SFVは、40SFVと比べて圧送効率がわずかに低下する程度であった。

ポンプ圧送試験におけるコンクリートの流動性の変化は、図-8に示すとおりであり、実機試験と同様、いずれの配合も練上りから圧送前までの流動性の変化はわずかであった。ポンプ圧送に伴う流動性の低下は、40SFV<38SFV<40SF<40SLVの順に小さくなる結果を示した。40SFVと40SFを比較すると、圧送前のスランブフローが若干異なるものの、ウェランガムを添加した40SFVはスランブフローの低下が23mmと非常に小さかったのに対し、ウェランガムを添加しない40SFは93mmの低下を示し、室内試験と同様、ウェランガムを添加することで流動性の低下が抑制されていた。また、骨材含水率についても、図-10に示すようにウェランガムを添加した40SFVは含水率の増加が小さく、骨材内部への吸水も抑制されていた。40SLVは、ポンプ圧送を終了した際のスランブが

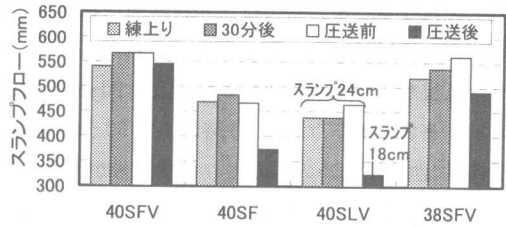


図-8 試験における流動性の変化

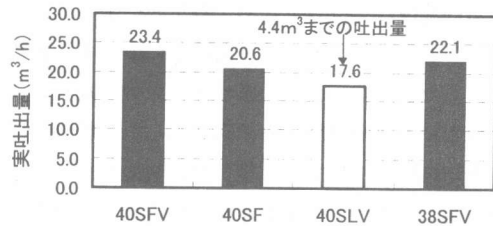


図-9 実吐出量の比較

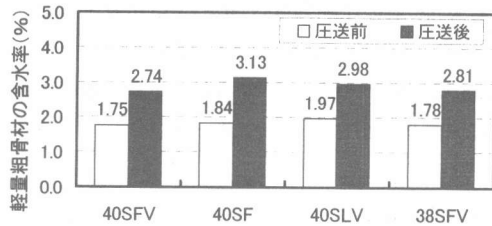


図-10 圧送前後の軽量骨材含水率の変化

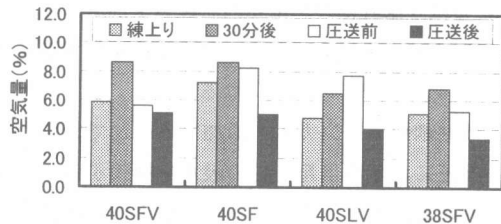


図-11 試験における空気量の変化

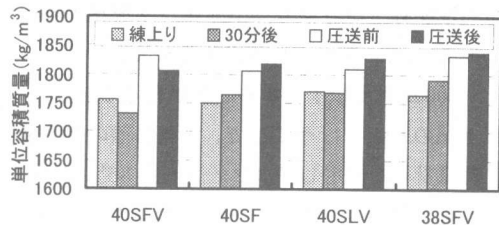


図-12 試験における単位容積質量の変化

18cmであり、約6cmスランブロスが生じていた。また、水セメント比38%の38SFVのスランブフローの低下は73mmであった。このように、ウェランガムを添加した場合でも、配合によって流動性の

低下が異なる理由としては、単位水量や粗骨材量の相違が影響しているものと考えられた。

空気量および単位容積質量の変化は図-11、12に示すとおりであり、練上り時および30分後の試験値は、他の試験時のものよりも空気量が大きく、単位容積質量が小さくなる傾向を示した。これは、練上り時および30分後のものはアジテータ車による高速攪拌を行ったため、巻込みによるエントラップトエアが混入されたことによるものと考えられた。また、圧送によって空気量が減少し、単位容積質量が増加する傾向を示した。単位容積質量の増加については、空気量が減少したことと圧送負荷を受けてモルタル中の自由水が骨材中へ吸水されたことが主な原因であると考えられた。

材齢28日の圧縮強度は図-13に示すように、水セメント比40%のもので 55N/mm^2 、水セメント比38%のもので 60N/mm^2 であり、圧送前後の圧縮強度の変化は小さいものであった。

4. まとめ

高性能軽量コンクリートの配合がポンプ圧送性に及ぼす影響について室内試験およびポンプ圧送試験を行って検討した。本研究で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1) 増粘剤ウェランガムを添加することで、ポンプ圧による軽量粗骨材の吸水を抑制することが可能であり、ポンプ圧送性および圧送後の流動性の低下を軽減できる。
- (2) 高性能軽量コンクリートをポンプ圧送するには、コンクリートの流動性をスランプフロー500mm程度以上とすることが有効である。
- (3) 上記の対策を行うことで、気乾状態の高性能軽量骨材を使用して水セメント比38%程度の高強度軽量コンクリートの円滑なポンプ施工を行うことができる。
- (4) 非排水加圧ブリーディング試験により、ポンプ圧送後のコンクリートの流動性をある程度評価できる。

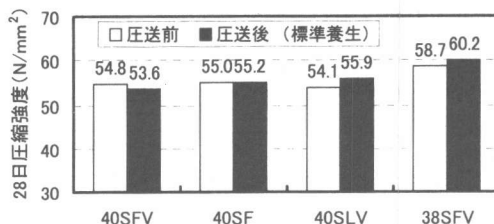


図-13 圧送前後の圧縮強度の比較

謝辞

本研究を実施するにあたり、日本道路公団北陸支社および日本海沿岸東北道路阿賀野川橋（PC上部工）工事事務所の方々に多大な御指導、御協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 橘大介, 大野義郎, 黒木一実, 岡田武二: 高強度軽量コンクリートの耐凍結融解性に関する研究, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.237-240, 1984
- 2) 岡本享久, 早野博幸, 柴田辰正: 超軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.36, No.1, pp.48-52, 1998.1
- 3) 曾根徳明: 石炭灰を主原料とした高強度人工骨材, コンクリート工学, Vol.36, No.12, pp.3-10, 1998.12
- 4) 坂田昇, 柳井修司, 石川雄康, 榎木隆: 高性能軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.355-360, 1999.7
- 5) 坂田昇, 丸山久一, 南昌義: 増粘剤ウェランガムがフレッシュコンクリートの自己充填性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.538/V-31, pp.57-68, 1996.5
- 6) 石川雄康, 児玉明彦, 坂田昇, 柳井修司: 高性能軽量骨材の吸水特性がコンクリートのポンプ圧送に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.349-354, 1999.7
- 7) 人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル, 土木学会コンクリートライブラリー第56号, 1985.5