

海洋構造物に用いる高強度軽量コンクリートに関する研究

—ポンプ圧送性の改善に関する基礎的研究—

三浦 律彦	十河 茂幸
芳賀 孝成	新村 亮
	(本社 技術開発本部)
	(土木技術第一部)
扇 啓祐	宇梶 賢一
(本社 技術開発本部)	(本社 土木本部 設計部)
(土木技術第一部)	

High-Strength Lightweight Concrete for Offshore Structures

—Experimental Study for Improvement of Pumpability—

Norihiko Miura	Shigeyuki Sogo
Takashige Haga	Akira Shinmura
Keisuke Ohgi	Ken-ichi Ukaji

Abstract

The development of new undersea oil fields in Arctic Ocean in recent years has drawn worldwide attention. High resistance against freezing and thawing, not to mention high strength, is required to lightweight concrete used for oil well drilling platforms, and therefore, artificial lightweight coarse aggregate in oven-dry condition, not pre-wetted, shall be used. However, lightweight aggregate in such condition is known to have a tendency to absorb so much water under pressure of pumping that the concrete loses its fluidity, or pumpability. Therefore, the authors have performed an experimental study for the purpose of improving pumpability of high-strength lightweight concrete containing artificial lightweight coarse aggregate of oven-dry condition, with improving water retention of mortar through the use of admixtures, or adopting a new mixing method of divided-water addition in two.

概 要

近年、氷海域での海底油田の開発が世界的に注目を浴びている。これらの石油掘削用プラットフォームに用いられる軽量コンクリートには高強度かつ耐凍結融解性に優れていることが要求されるため、プレウェッチングしたものでなく、絶乾状態にした人工軽量粗骨材を使用しなければならないが、この種の軽量骨材を用いると圧送中に骨材が圧力吸水を起こしコンクリートは流動性を失って圧送が困難となる。そこで、絶乾状態の軽量粗骨材を用いた高強度軽量コンクリートのポンプ圧送性の改善を目的として、混和材料の使用や分割混練法の採用によりモルタルの保水性を向上させる手法を取り上げ、その効果に関して実験的に検討を加えた。

1. 序

近年、北極海を中心とした氷海域での海底油田掘削用の移動式プラットフォームの建造計画が提案されている。この種の海洋構造物では移動時の氷圧や流氷などの衝撃圧などが設計上支配的な荷重となることから、鋼製のものより耐圧性、耐久性に優れたプレストレスコンクリー

ト製、または鋼とコンクリートの複合構造が合理的と考えられている。また、吃水が問題となる浮体構造物であることから軽量コンクリートであることが望ましい。以上のことから、高強度で軽量かつ耐久性に優れたコンクリートの開発がここ数年来進められてきた。この報告は海洋構造物に用いる高強度軽量コンクリートに関する一連の研究のうち、絶乾状態の人工軽量粗骨材を用いたコ

ンクリートのポンプ圧送性の改善に関して検討したものである。

2. 耐凍結融解性に優れた高強度軽量コンクリート

2.1. 高品質な軽量コンクリートの開発

一般に、氷海域で使用される海洋プラットフォームは大変厳しい環境条件下で移動や設置を繰返しながら長期間使用されるため、そのコンクリートには表-1のような高品質が要求されることが多い。この高品質なコンクリートの開発を目的として、これまでに各種の人工軽量骨材を用いた広範な実験を行ってきたが、その結果以下に示すことが明らかになっている。

- (1) 圧縮強度は良質の軽量粗骨材と普通細骨材の組合せが最も高くなる。
- (2) 単位体積重量は絶乾軽量粗骨材と通常の軽量細骨材の組合せが最も軽い。
- (3) 所要の耐凍結融解性を満足するには絶乾軽量粗骨材と普通細骨材の組合せが最良で、プレウェッチングした軽量骨材を用いると所要の耐凍結融解性を満足できない。

以上のことから、氷海域で使用する海洋構造物に用いる高強度軽量コンクリートの骨材として、絶乾軽量粗骨材と普通細骨材の組合せが最適とみなされた。

2.2. 絶乾軽量粗骨材を用いた高強度軽量コンクリートのポンプ圧送上の問題点とその改善方法

一般に、コンクリートのポンプ圧送性は管内流動のし易さと、圧力下での水分の分離などによる管内閉塞の生じ易さの両者で決まると考えられる¹⁾。軽量骨材コンクリートでは、圧送中にモルタルから分離した水分を軽量

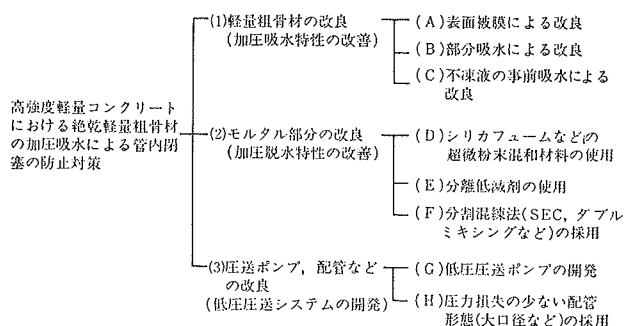


図-1 軽量粗骨材の圧力吸水による管内閉塞の防止対策

骨材が吸収してコンクリートの流動性が著しく低下し、管内閉塞を生じて圧送困難となることがある。この対策として通常は軽量骨材のプレウェッチングを行なうが、耐凍結融解性が要求される場合にはこの方法が適用できない。従って、絶乾軽量粗骨材を用いた高強度軽量コンクリートは粗骨材の圧力吸水による管内閉塞の危険性が高く、十分なポンプ圧送性を確保するには粗骨材の圧力吸水現象を抑制することが最も重要となる。

軽量粗骨材の圧力吸水による管内閉塞を防止するには図-1に示すような方法が考えられる。このうち、Aは軽量粗骨材の表面に不透水性の被膜処理を施すもので、既報²⁾のように幾分良好な結果が得られている。Bは圧力吸水される程度(吸水率で約5~6%)の水量を事前に吸水させる方法であるが、高圧下での効果は比較的少ない。Cは低温でも凍結しない不凍液で事前に吸水させる方法であるが、コンクリートの硬化性状に悪影響があり現状では問題が残る。D~Fは混和材料の使用や混練方法の改善によってモルタルの保水性を高めるもので、比較的容易に実施できる。G、Hは圧送速度の低減、配管形態や管径の改善、中継による配管長の短絡化などにより圧送中にコンクリートに作用する最大圧力を低減させる方法で、組合せて実施することで改善効果が期待できるが、確認のために大規模な圧送実験が必要となる。以上より、この研究では容易に実施できて改善効果も十分に期待できるD~Fの方法に重点を置いて検討を行なった。

3. ポンプ圧送性の改善に関する実験

3.1. 実験概要

3.1.1. 実験方法 コンクリートの流動性やポンプ圧送性を判定する試験方法として表-2のようなものがある。このうち、圧送中の軽量粗骨材の吸水に伴う管内閉塞の危険性を判定できるのはd~fであるが、fはかなり大規模な試験となるため数多い配合要因の比較には適さない。従って、この研究では、まず配合要因の異なるモルタルの加圧ブリージング試験により保水性の定量的

試験方法	指標
(a) スランプ試験	スランプ、スランプフロー
(b) スプレッド試験	落下振動下での広がり(スプレッド)
(c) 回転粘度計による試験	レオロジー定数(降伏値、塑性粘度)
(d) 加圧ブリージング試験	加圧初期脱水性状
(e) 模擬圧送試験	コンクリートの変形性能(圧力損失)
(f) 実機による試験圧送	圧力損失、圧力勾配、圧送の可否

表-2 コンクリートの流動性、ポンプ圧送性の試験方法

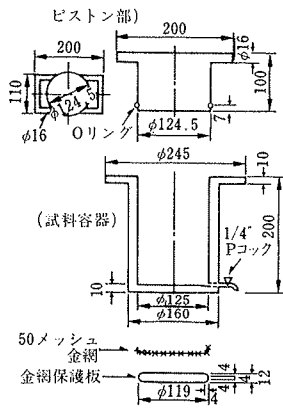


図-2 加圧ブリージング試験装置

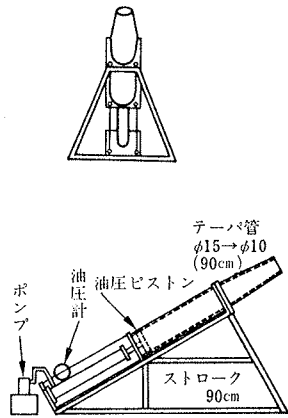


図-3 模擬圧送試験装置

な比較を行ない、次にその中で顕著な効果を示した配合についてコンクリートの模擬圧送試験により圧送性の改善効果を検討した。これらの試験方法の概要は以下に示すとおりである。

(1) モルタルの加圧ブリージング試験

この試験法は本来コンクリートのポンプ圧送性を判定する簡易試験法として提案された³⁾もので、図-2に示すような排水コック付きの円筒容器内にコンクリートを詰め、ピストン部で加圧(圧力は35 kgf/cm²)を行なって脱水量の経時変化を調べるものである。普通コンクリートでは、加圧ブリージング水量が多いと圧送中に水

分だけが先に抜けて閉塞に至り、極端に少な過ぎても管壁面での摩擦力が過大となり圧送が困難となる⁴⁾。しかし、高強度軽量コンクリートは富配合で高性能減水剤の使用量も多く管内流動性が高いため、管壁面での摩擦力はそれほど大きくなり、加圧ブリージング水量が少ないものほど閉塞の危険性が低減でき、圧送性が改善できると思われる。なお、軽量コンクリートで加圧ブリージング試験を行なっても粗骨材中への吸水により脱水量を正しく把握できないので、粗骨材を除きモルタルで試験を行なった。

(2) コンクリートの模擬圧送試験

この試験装置は図-3に示すような油圧ピストンとテーパー管から成るもので、コンクリートを充てんした後1ストローク圧送して油圧の変化から圧送性の良否を判定するものである⁵⁾。この研究においては、軽量粗骨材の圧力吸水に伴う圧送性の変化を調べるために、コンクリートに高圧が加えられるよう先端にバルブを付け、テーパー管の前後に圧力計を設置した。なお、圧送速度は無負荷状態(コンクリートが無い状態)で10 cm/secとなるように油圧を調整し、負荷に伴う油圧やコンクリート圧力、圧送速度の変化の程度を測定した。

3.1.2. モルタル実験の比較検討項目 モルタルの配合要因や混練方法、加圧力の違いが加圧ブリージング性状に及ぼす影響を調べる目的で表-3に示す組合せで実験を行なった。モルタルの配合は混和材量の種類や使用量の異なる6種類(表-5参照)、混練

混練方法	加圧力 (kgf/cm ²)	配合 (混和材の種類)					
		無し	シリカフェーム C×10%	シリカフェーム C×20%	シリカフェーム10%+高性能減水剤	分離低減剤 0.15%	分離低減剤 0.30%
SM	10	AS-10	BS-10	CS-10	DS-10	ES-10	---
	20	AS-20	BS-20	CS-20	DS-20	ES-20	---
	35	AS-35	BS-35	CS-35	DS-35	ES-35	---
DUAL	10	AD-10	BD-10	CD-10	DD-10	ED-10	---
	20	AD-20	BD-20	CD-20	DD-20	ED-20	---
	35	AD-35	BD-35	CD-35	DD-35	ED-35	---
SEC	35	A'SEC-35	B'SEC-35	---	---	---	F'SEC-35
DM	35	---	B'DM-35	---	---	---	---

(注) A', B', F'はサンドコントローラーで湿潤処理した砂を使用

表-3 モルタル実験の比較要因の組合せと実験ケース

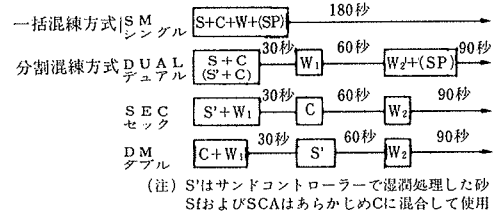


図-4 モルタルの混練方法

種類	銘柄・産地	比重	性状・成分
セメント (C)	Nセメント社製 普通ポルトランドセメント	3.16	比重面積(ブレン) 3,230cm ² /g SiO ₂ 21.7% CaO 64.2%
細骨材 (S)	木更津産山砂	2.58	S:吸水率1.87%, FM2.57 (サンドコントローラー処理) S':吸水率1.82%, FM2.62
粗骨材 (G)	M金属社製 人工軽量粗骨材 (遠粒型絶乾品)	1.28	最大寸法15mm, FM6.41 吸水率:1時間4.6%, 24時間6.8% 実積率61.4%
シリカフェーム (Sf)	NJ社製 シリカフラワー	2.25	SiO ₂ 含有率 92.59%
分離低減剤 (SCA)	SK社製 (水中コンクリート用)	見掛	セルロースエーテル系 (消泡剤を含む)
高性能減水剤 (SP)	SF社製 (スランプロス低減型)	1.15	ナフタレンスルホン酸とリグニンスルホン酸の共縮合物に変成リグニンを混合
流動化剤 (FL)	SF社製 (スランプロス低減型)	1.14	ナフタレンスルホン酸とリグニンスルホン酸の共縮合物に変成リグニンを混合
A E 剤	SF社製	1.01	特殊アニオン系

表-4 使用材料とその性状

配合名	混和材料	W/C+Sf (%)	S/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
				C	W	S	Sf	SCA	SP
A, A'	なし	30	102.8	955	287	982	0	0	0
B, B'	シリカフェーム外割10%	30	95.5	912	301	871	91	0	0
C	シリカフェーム外割20%	30	88.1	874	315	770	175	0	0
D	シリカフェーム外割10% 高性能減水剤C×1.8%	30	95.5	912	301	871	91	0	16.42
E	分離低減剤 C×0.15%	30	102.8	855	287	982	0	1.43	0
F'	分離低減剤 C×0.30%	30	102.8	955	287	982	0	2.86	0

表-5 モルタルの配合 (空気量は3%で設計)

配合名	目 標 空気量 (%)	目 標 スランパ (cm)	W/C+Sf (%)	Sf/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						W	C	Sf	S	G	SP	FL
No.1	6	流動化 9→21	30	0	43	155	515	0	708	453	4.3	1.1
No.2	6	流動化 9→21	30	20	43	155	412	103	693	443	8.5	1.2

表-6 コンクリートの配合

方法は通常の一括混練方式(SM)の他に混練水を2度に分割して混入する分割混練方式(DUAL, SEC, DMなど、図-4参照)について検討した。また、加圧力は低圧ポンプを想定して10, 20 kgf/cm²のものも実施した。

3.1.3. 使用材料および配合 実験に使用した材料の種類とその特性を表-4に示す。なお、分割混練方式の一部にサンドコントローラーで湿潤処理した砂を使用し、普通の砂との比較も実施した。

モルタルおよびコンクリートの配合をそれぞれ表-5, 表-6に示す。シリカフュームの混入はモルタルでは増量使用, コンクリートはセメントでと置換して使用した。

3.2. モルタルの加圧ブリージング特性

3.2.1. 各種混和材料がモルタルの加圧ブリージング特性に及ぼす影響 各種の混和材料を使用した高強度モルタルの加圧ブリージング試験結果の一例を図-5に示す。この結果より標準のA配合に比べシリカフュームを混入したB, C, D配合や分離低減剤を添加したE, F配合は、混練方法や加圧力の違いによらずいずれも加圧ブリージング率が小さくなっており、特に加圧初期での差が著しい。加圧ブリージング率が最も小さくなった配合は分離低減剤を0.3%添加したF配合で、次いでシリカフュームを20%混入したC配合や分離低減剤を0.15%添加したE配合が小さくなった。高性能減水剤を併用

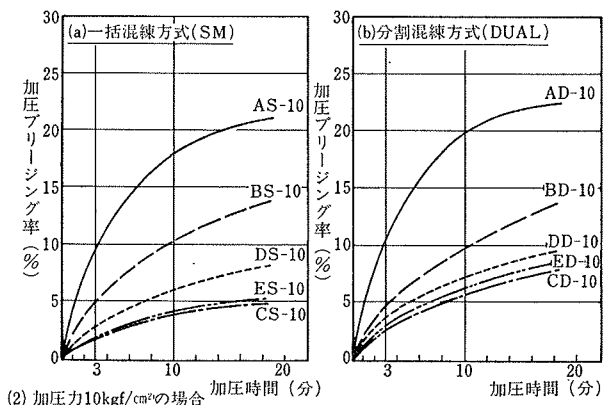
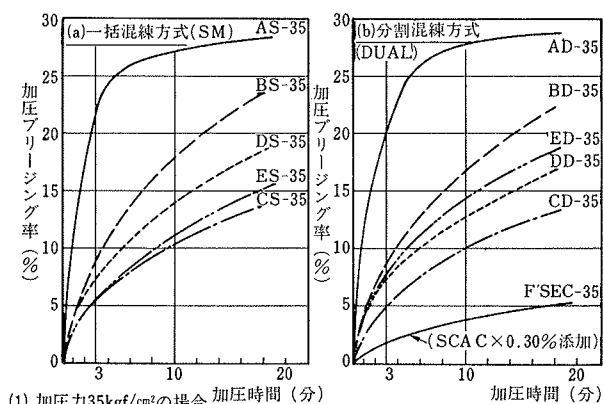


図-5 各種混和材料を用いたモルタルの加圧ブリージング試験結果

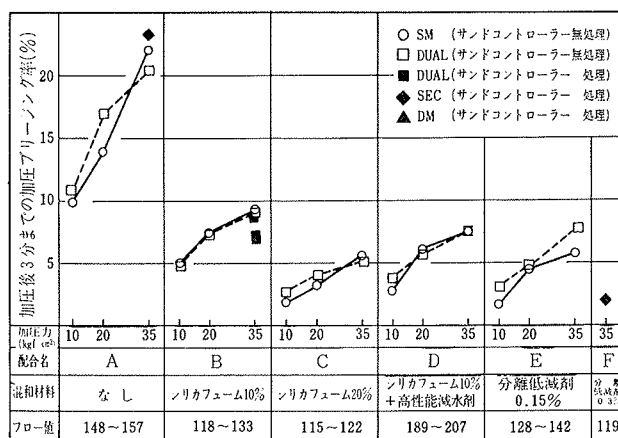


図-6 各種モルタルの加圧後3分までの加圧ブリージング率

したD配合は使用していないB配合よりフロー値が大きかったにもかかわらず、加圧ブリージング率は若干小さくなった。

圧力下でのモルタルの保水性は加圧後3分までの加圧ブリージング率で定量的に評価できる。図-6はその結果を示したもので、シリカフューム、分離低減剤、高性能減水剤の保水性改善効果が明らかである。シリカフュームのような超微粉末の粒子を混入するとセメント粒子の間隙を埋めて透水性が低減するとともに、固体粒子の表面積が著しく増加して粒子表面に水を保持する力が増加し、加圧下での保水性も著しく高まる。一方、分離低減剤を添加するとセルロース系の高分子が溶解して水の粘度が増し、分離抵抗性が高くなって加圧下での保水性も著しく改善される。なお、これらの混和材料を用いるとモルタルの流動性は著しく減少するので、管内流動性を保つためには高性能減水剤の併用が不可欠となる。

3.2.2. 混練方法の違いが高強度モルタルの加圧ブリージング特性に及ぼす影響 混練方法の異なるモルタルの加圧ブリージング試験結果の一例を図-7に示す。この結果より、標準のA配合ではあまり顕著な差は認め

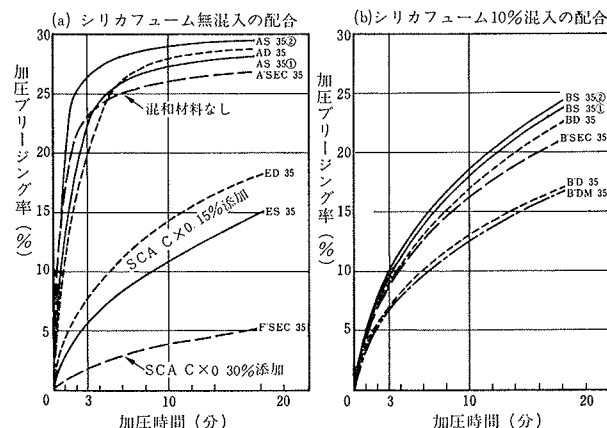


図-7 混練方法の異なるモルタルの加圧ブリージング試験結果

られないが、シリカフュームを使用したB配合では分割混練したものの方がやや小さめの値を示し、サンドコントローラーで湿潤処理した砂を用いたものが特に小さくなっている。分離低減剤を0.15%添加したE配合では、逆に一括混練したものの方が少し小さめの値となった。このように配合によって分割混練による保水性の改善効果が全く現われなかったのは、モルタルの配合が低水セメント比で単位水量も少なく、分割混練方式の特徴である1次水による混練が十分に行なわれなかったためと思われる。また、B配合で認められた分割混練による保水性改善効果は混和材料使用によるものより少なく、高強度配合のものでは分割混練による保水性の向上は普通配合のものほど効果的ではない。

3.2.3. 加圧力の低減によるポンプ圧送性の改善 絶乾軽量粗骨材を用いた高強度軽量コンクリートの圧送中の管内閉塞の危険性はモルタルの保水性、すなわち加圧後3分までの加圧ブリージング率で判定できるが、図-6の結果から明らかなように、その値は加圧力が大きくなるほど大きくなる。従って、圧送圧力が高くなるほど管内閉塞の危険性が高まると判断できる。換言すれば、低圧で圧送できれば閉塞の危険性が低減でき、圧送性が改善できると言える。低圧圧送システムとしては、テーパ管やベント管の削減や大口径配管の使用、中継圧送による配管長の短絡化、低圧大容量ポンプの採用などの組合せが考えられ、十分実現可能と思われる。

3.3. 模擬圧送試験によるコンクリートの圧送性の検討

シリカフュームや分離低減剤の使用によりモルタルの保水性が改善でき、高性能減水剤の併用により十分な流動性が確保できることが3.2.で明らかになった。そこで次にコンクリートの模擬圧送試験を行ない、これら混和材料のポンプ圧送性改善効果を検討した。コンクリートの配合は表-6に示した標準配合 No. 1とシリカフュームと高性能減水剤を併用した No. 2の2種類で、施工性を考慮してどちらも流動化コンクリートとした。試験方

法はコンクリート充てん後バルブを閉めて約40秒間加圧し（圧力は約25 kgf/cm²）、その後バルブを開いて再度圧送できるか否かを判定した。図-8はその結果の一例を示したもので、配合 No. 1は加圧後テーパ管の所で閉塞を生じ圧送できなかったのに対し、配合 No. 2では加圧後も安定した圧送ができ、ポンプ圧送性の改善効果が認められた。また、閉塞部のコンクリートは流動性を失い硬くなっていたのに対し、配合 No. 2のコンクリートは圧送後も良好な品質を保っていることが確認された。

4. 結 び

この研究において明らかになったことは以下のとおりである。

- (1) 絶乾軽量粗骨材を用いた高強度軽量コンクリートのポンプ圧送性を改善するにはモルタルの保水性を高め圧送中の粗骨材の吸水を抑制する方法が有効である。
- (2) モルタルの保水性を高めるにはシリカフュームや分離低減剤の使用が有効であるが、これらの混和材料を使用したモルタルは流動性が低下するので、それを改善するために高性能減水剤を併用する必要がある。
- (3) 高強度配合（W/C=30%）のモルタルでは分割混練方法の導入による保水性の改善効果は比較的少ない。
- (4) 低圧圧送システムの開発も有効と思われる。

このように、この研究では基礎的な実験により高強度軽量コンクリートのポンプ圧送性の改善効果を検討してきたが、今後は試験圧送による検討を行ない、実構造物への適用をはかっていく所存である。

謝 辞

高強度軽量コンクリートの研究を進めるにあたり御協力いただいた本社 土木本部設計部 加藤正三職員、武内邦文職員、本社 技術開発本部土木技術第一部 入矢桂史郎職員、本店 Aルートプロジェクトチーム 原田曉課長代理ほか関係者各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 芳賀，十河，三浦：コンクリートの圧送性の改善に関する基礎研究，フレッシュコンクリートに関する第2回シンポジウム，土木学会，(1986.3)，pp. 125～130
- 2) 新開，芳賀，十河，青木：被膜処理人工軽量骨材を用いたコンクリートの性質，大林組技術研究所報，No. 32，(1986)，pp. 121～125
- 3) Browne, R. D. and Banforth, P. B.: Tests to Establish Concrete Pumpability, Journal of ACI, Vol. 74, No. 5 (May. 1977), pp. 193～203
- 4) 田沢，松岡，坂本：貧配合コンクリートのポンプ圧送性について，第2回コンクリート工学年次講演会論文集，(1980)，pp. 181～184
- 5) Best, J. D. and Lane, R. O.: Testing for Optimum Pumpability of Concrete, Concrete International Vol. 2, No. 10 (Oct. 1980), pp. 9～17

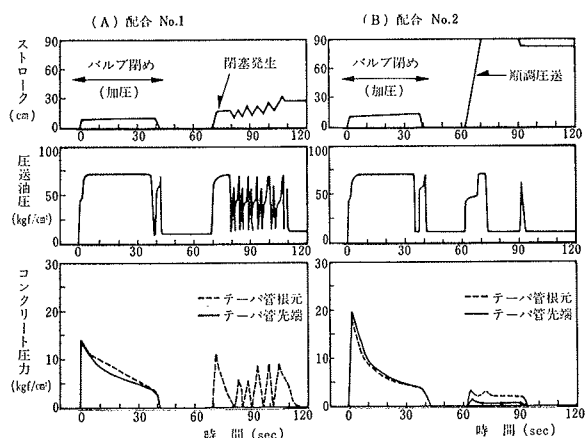


図-8 高強度軽量コンクリートの模擬圧送試験結果