

**投稿論文 (報告)**  
**TECHNICAL**  
**REPORT**

# 大規模地下連続壁のコンクリートに関する実験的研究

藤田信一\*・儀賀俊成\*\*・万木正弘\*\*\*  
・坂田 昇\*\*\*\*

東京湾横断道路川崎換気塔の地下連続壁は、壁厚 2.8 m、深度 135 m と従来のものより大規模で鉄筋が多くしかも高強度が要求されるものである。そこでこのような連壁を施工する上で解決、確認すべき問題点について実験的に検討した。その結果、材料分離を生じない配合でスランプを 24 cm 以上とすることによって品質の高い連壁のコンクリートが得られることを大規模の施工実験を通して確認することができた。

**Keywords:** Concrete, Slurry wall, High strength, Flowability, Super-plasticizer

## 1. はじめに

地下連続壁は従来止水壁や仮設土留壁等の荷重条件の比較的緩やかな構造物に用いられてきた。しかしながら、最近では壁体相互を連結するための継手や壁体の品質向上を図るための安定液及びコンクリートの開発が積極的に進められており、地下連続壁工法の信頼性の向上に伴ってこれを剛体基礎等の本体構造物に利用されるケースが増えている。また、掘削機の改良、開発による掘削精度の向上により大深度の地下連続壁工法の施工が可能となり、壁厚 1.5~2.6 m、深度 100 m 以上の大規模な地下連続壁が構築されるようになってきた。東京湾横断道路川崎人工島においても土留め及び止水壁として地下連続壁の構築を計画しているが、本地下連続壁は厚さ 2.8 m 掘削深度 135 m と従来のものよりさらに大規模でしかも品質的に高強度が要求されるものである。そこでこのような地下連続壁を施工する上で解決、確認すべき配合、施工上の問題点について実験的に検討を行った。

## 2. 川崎人工島の地下連続壁

### (1) 川崎人工島の概要

東京湾横断道路川崎人工島は、直径 13.9 m のシールドトンネル 3 本及び換気施設の収納などを考慮して計画されており、その規模は、図-1 に示すように本体外径 103.6 m、深さ 74.7 m のものであり、鋼管杭の内側を混合処理盛土でリング状に埋立てた後、深さ 135 m の地下連続壁を円形に構築し（内径 98 m）その内側を掘削しながら逆巻き工法による鉄筋コンクリート躯体を構

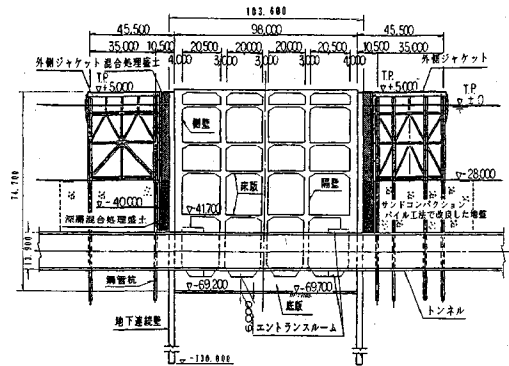


図-1 川崎人工島標準断面

築する計画である（なお、順巻き工法についても検討している）。

検討を行った地下連続壁は壁厚 2.8 m、掘削深度 135 m であり、エレメント長は、先行エレメントで 6.0 m、後行エレメントで 9.0 m である。また、鉄筋は多いところで壁内側は縦筋 D 51、横筋 D 32 を 15 cm ピッチで 1 段に、壁外側は縦筋 D 38、横筋 D 32 を 15 cm ピッチで 2 段に配筋されている。

地下連続壁のコンクリート打込みは、1 エレメントのトレミーの設置本数を、先行で 2 本、後行で 3 本とし、打込み速さは、接合鋼板等への側圧を考慮して 3~5 m/h とすることを計画している。

### (2) 地下連続壁のコンクリートの検討項目

部材厚の厚い大深度の地下連続壁を構築するにあたってのコンクリート材料及び配合上の問題点として次のような項目がある。

#### a) コンクリートの流動性

一般に地下連続壁のコンクリートの品質を確保するためには、できるだけ流動勾配を小さくしかつ安定液中の流動距離を短くする必要がある<sup>1)</sup>。しかし、本地下連続

\* 正会員 日本道路公団東京第一建設局 事業調整部課長  
(〒105 東京都港区虎ノ門 1-18-1 第 10 森ビル)

\*\* 東京湾横断道路(株) 工務部課長

\*\*\* 正会員 工修 鹿島建設技術研究所第一研究部 主管研究員

\*\*\*\* 正会員 工修 鹿島建設技術研究所第一研究部 研究員

壁では、施工上の条件からトレミー1本当りの受持ち面積が約8.4 m<sup>2</sup>と従来の地下連続壁の約3倍とならざるを得ず、このため従来の地下連続壁で用いられてきた以上に流動性のよいコンクリートを使用することが必要となる。本地下連続壁における鉄筋がかなり密になることも高流動性が必要となる要因であるが、分離抵抗性の確保できる範囲でどの程度の流動性が得られるか、また、所要の流動性を確保するため配合及び混和剤の利用、流動性と硬化コンクリートとの関係、さらには、大深度になった場合にコンクリートの流動性状がどう変化するかについても検討する必要がある。

**b) 強度**

本地下連続壁のコンクリートの設計基準強度（材令91日）は360 kgf/cm<sup>2</sup>であり、一般の地下連続壁に比べて高強度である。このような強度のものを安定液中へ打込んだ場合の品質の低下やばらつき増大についても確認しておく必要がある。

**c) 水和熱**

壁厚が厚いこと、高強度であることからコンクリートの温度上昇が高くなることが予想され、低発熱型のセメントの利用及び混和剤を利用することによるセメント量の低減などを検討する必要がある。

**d) 側圧**

低発熱型セメントを用い、長時間の流動性を確保しようとする凝結時間が長くなるが、大深度の場合接合鋼板に対し大きな側圧が作用することが考えられる。側圧には当然のことながら打上り速さの影響も大きいいため、コンクリートの凝結時間、打上り速さなどとの関係も検討項目の一つである。

**3. 検討フロー**

実験は最適配合を選定するための一連の試験及び選定された配合について行った実規模施工実験に大別される。最適配合選定試験では室内配合試験、流動試験、圧力下での流動性試験を行った。検討フローを図-2に示す。

**4. 配合選定試験**

**(1) 各試験の概要**

**a) 室内配合試験**

**i) 目的**

セメントの種類及び流動性を变化させたコンクリートについて試験練りを行って配合条件を満足する配合を定めるとともに、フレッシュコンクリート、硬化コンクリートの各種物性試験を行った。

**ii) 試験ケース及び配合条件**

セメントの種類は普通ポルトランドセメント、低発熱型高炉セメントB種（以下、低熱高炉セメントと称する）

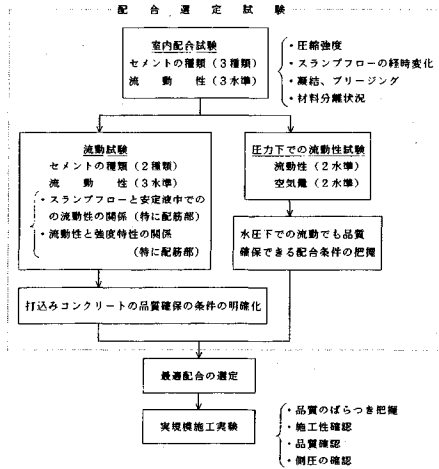


図-2 検討フロー

表-1 試験ケース

配合 No.	セメントの種類	スランプフロー [スランプ] (cm)	室内配合試験	流動試験	圧力下での流動試験
1	普通	[21 ± 1.5]	○		
2	低熱高炉	[21 ± 1.5]	◎	○	○+)
3	三成分系	[21 ± 1.5]	○		
4	普通	50 ± 5	○		
5	低熱高炉	50 ± 5	○	○	
6	三成分系	50 ± 5	○	○	
7	普通	60 ± 5	○		
8	低熱高炉	60 ± 5	◎	○+)	○+)
9	三成分系	60 ± 5	◎	○	

◎については断熱温度上昇試験も行った。  
+) 打込み時のスランプフローは88cmとなった。  
\*\*) 空気量2%及び4%について試験を行った。

及び三成分系セメントの3種類とし、流動性については、従来の地下連続壁のコンクリートと同程度のもの（スランプ21 cm）、従来の地下連続壁のコンクリートの範囲で流動性を最大にしたもの（スランプ24 cm、スランプフロー50 cm）及び従来のものよりさらに流動性を高めたもの（スランプフロー60 cm）の3水準とした。試験ケースを表-1に示す。

コンクリートの配合強度は、設計基準強度360 kgf/cm<sup>2</sup>に対し540 kgf/cm<sup>2</sup>としたが、これは生コン工場における品質のばらつきを変動係数10%の割増し係数1.2、安定液中への打込みによる強度低減率を0.8として定めたものである。

目標空気量は2 ± 1%とし、施工時のトラブル等を考慮して60分程度コンクリートの流動性を維持することを目標とした。

**iii) 試験方法**

練りまぜは、水平二軸型強制練りミキサ（練りまぜ量0.1 m<sup>3</sup>、回転数：60 RPM）を用いて、粗骨材、細骨材、セメント、水、混和剤の順でミキサに投入し、全材料投入後90秒間練りまぜた。混和剤はスランプ21 cmのものにはAE減水剤を、スランプフロー50 cm、60 cmの

表-2 試験項目

試験項目	摘要
スランプ	JIS A 1101に準拠し、120分までの経時変化を測定
スランプフロー	スランプ試験における広がり幅を120分まで測定
空気量	JIS A 1128に準拠
ブリージング	JIS A 1123に準拠
凝結硬化速度	ASTM C 403に準拠
圧縮強度	JIS A 1102に準拠し、材令7日、28日、91日で測定
断熱温度上昇	打込み温度20℃とし、空気循環式カロリメータにより測定

表-3 セメントの試験結果 (1)

種類	比表面積 ブレン方法 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	凝 結		酸化マグ ネシウム (%)	三酸化硫 黄 (%)	強 熱 減量 (%)	スラグ量 (%)
		始 発 時-分	終 結 時-分				
普 通	3200	2-25	3-51	1.4	2.0	0.7	—
低熱高炉	3790	3-40	5-07	4.7	1.0	1.1	56
三成分系	3690	4-08	5-47	4.4	0.9	1.4	49

表-4 セメントの試験結果 (2)

種類	フロー値 (mm)	圧縮強さ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )			水和熱 ( $\text{cal}/\text{g}$ )	
		3日	7日	28日	7日	28日
普 通	265	140	239	417	76.2	87.0
低熱高炉	261	84	172	390	54.5	72.3
三成分系	269	73	142	346	52.6	66.0

表-5 骨材の試験結果

種 別	ふるいを 通 る も の の 重 量 百 分 率 (%)										顆粒率 比 重	吸水率 (%)	実積率 (%)		
	30	25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3					
粗骨材	100	100	93	83	39	6	0	0	0	0	0	6.62	2.67	1.68	63.9
細骨材					100	96	87	74	59	17	2	2.65	2.62	0.58	64.2

ものには高性能減水剤をそれぞれ用いた。コンクリートの練上り温度は $20 \pm 2^\circ\text{C}$ とした。実施した試験を表-2に示す。

iv) 使用材料

使用した3種類のセメントの化学成分及び物理試験結果は表-3, 4のとおりである。三成分系セメントとして低熱高炉セメントにフライアッシュを10%混入したセメントを使用した。

粗骨材は高知県鳥形山産の石灰碎石 ( $G_{\text{max}} 20\text{mm}$ ) と静岡県浜岡産の川砂利 ( $G_{\text{max}} 25\text{mm}$ ) を1:1に混合したものを、細骨材は千葉県君津産の山砂を使用した。その骨材試験結果を表-5に示す。

混和剤はリグニンスルホン酸塩を主成分とするAE減水剤、 $\beta$ -ナフタリンスルホン酸カルシウムを主成分とするスランブロス低減型の高性能減水剤を使用した。

使用した材料は、配合試験、流動試験、圧力下での流動性試験及び実規模施工実験ですべて同じとした。

a) 流動試験

i) 目的

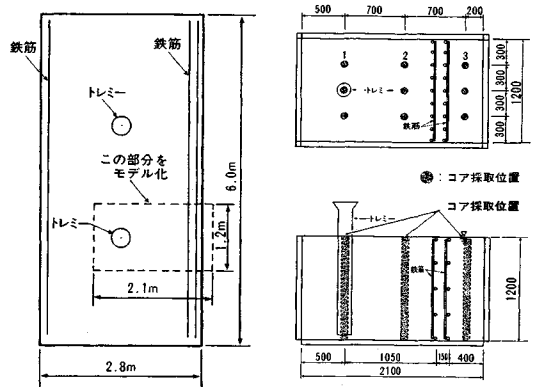


図-3 試験体の寸法

配合試験で選定した5種類のコンクリートについて、鉄筋を配置した安定液中にコンクリートを打込み、流動性状及び流動性と強度等の品質との関係を調べた。

ii) 供試体及び試験ケース

型わくは図-3に示すように実際の地下連続壁のトレミーを含む一部分を想定した長さ2.1m、幅1.2m、高さ1.2mのものを使用し、流動性状が観察できるように一面を透明のアクリル板とした。コンクリートが鉄筋を越えて流動した場合の品質変化を確認することを目的に、図-3に示す位置に実際の地下連続壁と同程度の鉄筋(縦筋D38を15cmピッチ、横筋D22を30cmピッチ)を配置した。

試験は、表-1に示すとおり、低熱高炉セメントについて流動性を3種類に変化させたもの、三成分系セメントについて流動性を2種類に変化させたものの合計5ケースとした。

iii) 試験方法

コンクリートは、生コン工場でコンクリート練上り直後にスランプフロー等を測定し、所定の品質を満足していることを確認の上アジテータ車で現場に運搬し、流動試験を行った。

試験は直径25cmのトレミーを用い、トレミー根入れ深さ30~40cm、打込み速さ5m/h (1.2m/15min) でコンクリートを打込み、トレミーの設置位置でコンクリートの打上り高さが1.2mとなったところで終了した。ここで、トレミーの根入れ深さは、試験体の規模から実施工に比べて短くせざるを得なかったが、ここでは各配合の相対的な流動性状を比較することとした。

コンクリート打込み3週間後に図-3に示す位置から鉛直方向に直径10cmのコアを採取し、表面状況を観察すると共に $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の供試体に成形し、JIS A 1107に準じ、材令28日において圧縮強度試験を行った。

c) 圧力下での流動性試験

i) 目的

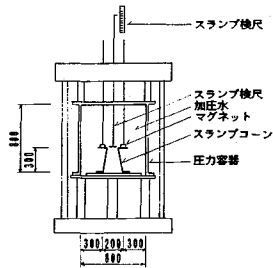


図-4 試験装置の概要

表-6 コンクリートの配合

配合 No.	セメント	G <sub>m</sub> (mm)	スランプ (cm)	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	W/C	s/a	配合量 (kg/m <sup>3</sup> )				スランプ フロー (cm)	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )			
								水 W	セメント C	砂 S	骨材 G		圧縮強度 28 日	圧縮強度 90 日		
1	普通	25	21±1.5	—	2.±1	38	45	185	487	705	935	0.25	—	19.5	443	526
2	低熱高炉	25	21±1.5	—	2.±1	37	45	180	486	702	935	0.25	—	19.5	433	528
3	三成分系	25	21±1.5	—	2.±1	36	45	185	514	678	918	0.25	—	21.0	414	504
4	普通	25	(24±1.5)	50±5	2.±1	38	46	160	421	800	1019	—	1.6	(51.5)	453	639
5	低熱高炉	25	(24±1.5)	50±5	2.±1	37	46	155	419	798	1016	—	1.6	(45.0)	434	570
6	三成分系	25	(24±1.5)	50±5	2.±1	36	46	155	431	787	1002	—	2.0	(50.0)	424	530
7	普通	25	(24以上)	60±5	2.±1	38	46	160	421	800	1019	—	2.0	(61.3)	541	657
8	低熱高炉	25	(24以上)	60±5	2.±1	37	46	155	419	798	1016	—	2.0	(61.5)	493	650
9	三成分系	25	(24以上)	60±5	2.±1	36	46	155	431	787	1002	—	2.0	(57.0)	380	513

100 m を越える大深度の地下連続壁の場合、最下部では 10 気圧以上の水圧が作用する。このため、コンクリート中の空気体積の減少に伴う流動性の低下が考えられる。その程度を確認し、品質低下の少ないコンクリートを得るために必要な流動性を把握することを目的とし、空気量及びコンクリートの流動性を要因とし、水圧 0～10 気圧でのスランプフロー試験を行った。

ii) 試験方法及び試験ケース

試験は、図-4 に示す加圧試験装置を用いてスランプ及びスランプフロー試験を行った。この装置は、大気中でコンクリートをスランプコーンに詰め、そのまま圧力容器内に移動した後注水加圧し、水圧を作用させたまま圧力容器の外からの操作でスランプコーンを引上げてスランプ及びスランプフロー等を測定できるようにしたものである。試験では圧力による影響及び水中での試験による影響を分離して考えられるように同じコンクリートに対し、大気中、水中（静水圧下 0 kgf/cm<sup>2</sup>）及び水中圧力下（1 kgf/cm<sup>2</sup>、3 kgf/cm<sup>2</sup>、5 kgf/cm<sup>2</sup> 及び 10 kgf/cm<sup>2</sup>）の条件で試験を行った。試験は配合 No. 2 及び No. 8 の 2 ケースでそれぞれ空気量を 2% 及び 4% としたコンクリートについて行った。

(2) 実験結果及び考察

a) 室内配合試験

セメント 3 種類、流動性 3 水準の 9 ケースの配合を練りませ試験によって表-6 に示すように選定した。これらの配合について行った各種試験結果を示す。

i) スランプフローの経時変化

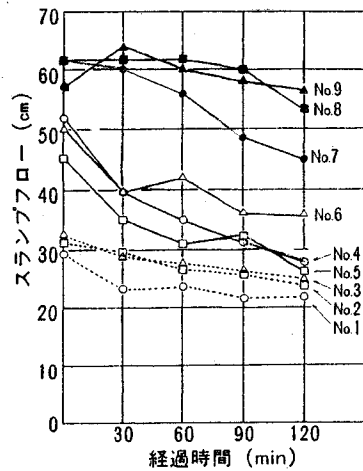


図-5 スランプフローの経時変化

表-7 プリージング及び凝結試験結果

配合 No.	配合内容	ブリージング		凝結時間	
		量 (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )	率 (%)	始発	終結
1	普通 スランプ21cm	0.134	2.83	6:50	8:50
2	低熱高炉 スランプ21cm	0.304	6.27	10:20	12:50
3	三成分系 スランプ21cm	0.182	3.86	10:40	13:30
4	普通 フロー50cm	0.079	1.84	11:00	12:50
5	低熱高炉 フロー50cm	0.164	4.43	14:30	17:10
6	三成分系 フロー50cm	0.081	2.01	22:50	26:50
7	普通 フロー60cm	0.039	0.93	11:40	13:10
8	低熱高炉 フロー60cm	0.202	5.30	17:30	19:40
9	三成分系 フロー60cm	0.069	1.85	36:50	49:00

スランプフローの経時変化を図-5 に示す。目標スランプフロー 50 cm（配合 No. 4～No. 6）と 60 cm（配合 No. 7～No. 9）の高流動コンクリートを比較した場合、スランプフロー 60 cm では 120 分後のスランプフローは 45～56 cm の範囲にあり、流動性の経時変化は小さかったのに対し、スランプフロー 50 cm では流動性の経時変化が大きい結果となった。これは目標スランプフローを 60 cm としたものは高性能減水剤の添加量が多く、その効果によってスランプロスが低減したものと考えられる。また、目標スランプ 21 cm のコンクリート（配合 No. 1～No. 3）は、スランプの経時変化が大きく 120 分後のスランプは 7～12.5 cm であった。

目視によるスランプの形状については、すべてのケースでモルタルと粗骨材の材料分離はなく、粗骨材が均等に広がっているのが観察された。

ii) プリージング及び凝結硬化速度

表-7 にブリージング及び凝結硬化速度試験の結果を示す。ブリージング量及び率は、従来の一般的な地下連

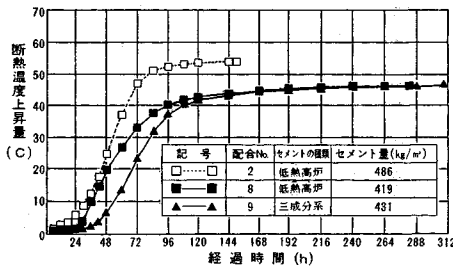


図-6 断熱温度上昇量

続壁のコンクリートよりも高流動コンクリートの方が少ない結果となった。これは高性能減水剤の使用により単位水量を  $25 \text{ kg/m}^3$  減じていること、高性能減水剤の分散効果により保水性が大きくなったこと<sup>2)</sup>等によるものと考えられる。

凝結時間は高性能減水剤を使用した方が長くなる結果となった。特に三成分系セメントを使用した場合、目標スランプフロー 50 cm で始発 22 h、目標スランプフロー 60 cm で始発 36 h であり、打込み時の側圧がかなり大きくなることが予想された。

iii) 圧縮強度

表-6 に示すとおり、各配合の材令 91 日の圧縮強度は、 $500 \sim 660 \text{ kgf/cm}^2$  であり、配合によっては目標強度  $540 \text{ kgf/cm}^2$  を下回るものがあったが、概ね満足していることから表-6 に示す配合について一連の試験を実施することとした。

iv) 断熱温度上昇

使用したコンクリートの発熱性状を確認することを目的とし、低熱高炉セメントでスランプ 21 cm (配合 No.2) 及びスランプフロー 60 cm (配合 No.8)、三成分系セメントでスランプフロー 60 cm (配合 No.9) の 3 ケースについて断熱温度上昇試験を行った。結果は、図-6 に示すとおりであり、AE 減水剤を用いた従来の一般的な地下連続壁のコンクリート (配合 No.2) では単位セメント量が多く、低熱高炉セメントを用いても終局温度上昇量は  $55^\circ\text{C}$  であったのに対し、高性能減水剤を用いて、高流動性を保ちながら単位水量を減じた配合では、低熱高炉セメント及び三成分系セメントともに終局温度上昇量は  $46^\circ\text{C}$  と配合 No.2 に比べて  $10^\circ\text{C}$  程度小さくなった。

b) 流動試験

i) 流動性

試験に用いたコンクリートの打込み時のスランプフローを表-8 に示す。試験体側面の透明型わくからスケッチしたコンクリートの打上り状況を図-7、図-8 に、またスランプフローと流動勾配の関係を図-9 に示す。ここで、流動勾配とはトレミー位置から流動先端部までのコンクリートの最終打上り表面の高低差を流動距

表-8 流動試験に使用したコンクリートのスランプフロー [スランプ]

ケース No.	セメントの種類	目標スランプフロー [スランプ] (cm)	練り時のスランプフロー [スランプ] (cm)	打込み時のスランプフロー [スランプ] (cm)
1	低熱高炉	$21 \pm 1.5$	$20.0$	$19.5$
2	低熱高炉	$50 \pm 5$	$46.5$	$52.5$
3	三成分系	$50 \pm 5$	$45.5$	$47.0$
4	低熱高炉	$60 \pm 5$	$62.5$	$68.0$
5	三成分系	$60 \pm 5$	$60.0$	$62.0$

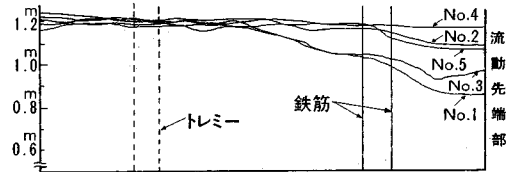


図-7 最終打上り面の形状

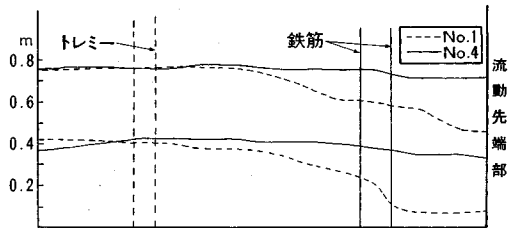


図-8 打上り高さ 40 cm 及び 80 cm 打上り面の形状の比較

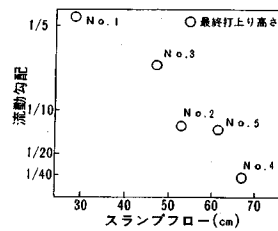


図-9 スランプフローと流動勾配の関係

離で除した値を示す。図に示すように、セメントの種類にかかわらずスランプフローが大きいほど流動勾配は小さくなり、スランプフローと流動勾配との間に直線関係のあることが認められた。特にスランプフロー 60~70 cm では流動勾配は小さくトレミーから 1.4 m の位置に配置された鉄筋によっても流動阻害されることなく、最終打上りの形状はほぼ水平であった。

ii) 流動性とコンクリートの品質

流動距離とコア圧縮強度の関係を図-10 に示す。図に示すように、実構造物とはほぼ同じ距離を流動させることにより、配合によっては最大  $100 \text{ kgf/cm}^2$  の強度低下を生じたがほぼ水平に打上られたケース No.4 では強度の低下はほとんどなかった。流動勾配とコア圧縮強度の均等性指数<sup>1)</sup>の関係を図-11 に示す。

ここで、均等性指数  $I_h$  とは、圧縮強度の均等性を表

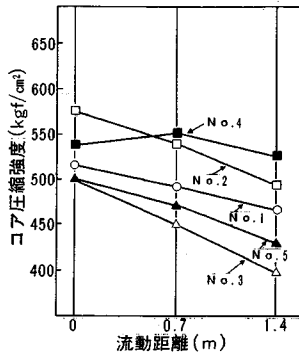


図-10 流動距離とコア圧縮強度の関係

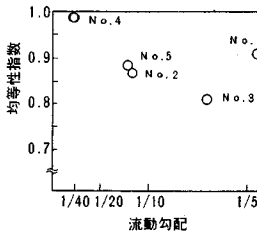


図-11 流動勾配と均等性指数の関係

表-9 コアが折れた箇所の数

№	1 (トレミー 位置)	2 (トレミーから 70cm)	3 (鉄筋通 過部)	総 数
1	0	0	8	8
2	0	0	1	1
3	3	2	7	12
4	0	0	0	0
5	1	0	1	2

す一つの指標として考えたものであり、トレミー位置でのコアの平均強度  $\sigma_t$  とトレミーから 1.4 m 離れて鉄筋を越えた位置での平均強度  $\sigma_e$  の比で表したものである。図に示すように、ケース No. 1 を除いて流動勾配を小さくするほど打込んだコンクリートの均等性指数は大きくなった。ケース No. 1 では均等性指数は大きかったが、鉄筋通過部で採取したコアは 8 箇所折れており、全体的には脆弱部があったものと考えられる。コア採取時にコアが折れるかどうかは採取作業にもよると思われるが、コンクリートに未充填部やスライムの巻き込みによる脆弱部があればコア採取時にその位置で折れ易くなることから、コアの折れた箇所数もコンクリートの品質を示す一つの指標と考えられたため、各ケース毎各位置で採取したコアの破損箇所を調べた。結果は表-9 に示すとおり、鉄筋を通過しない部分では流動勾配にかかわらず折れた箇所は 0~3 箇所であった。一方鉄筋通過部では流動勾配が 1/10 以下と小さかった 2, 4, 5 ケースでは折れた箇所は 0~1 箇所であったのに対し、流動勾配が 1/5~1/6 と大きかった 1, 3 ケースでは 7~8 箇所と多く、品質の低下していることが予想された。

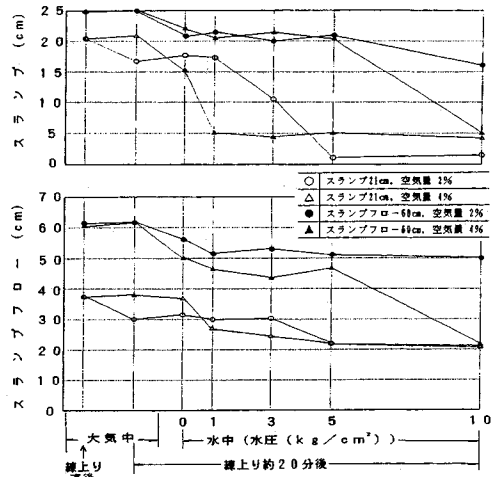


図-12 水圧とスランプ（フロー）の関係

このように、流動勾配が小さいほど打込んだコンクリートの品質低下が小さくなる理由として、コンクリート表面に堆積したスライム等のコンクリート中への巻き込みが少なくなることが考えられる。

高流動コンクリートを長距離流動させた場合に圧縮強度が均一であっても、流動先端部におけるモルタルと粗骨剤の分離が生じることが考えられる。しかし、流動距離 1.4 m の範囲の本実験では、コアを観察した結果スランプフローを 50~70 cm としてもモルタルと粗骨材の分離は認められなかった。実際の施工における安定液の劣化程度やスライムの量は型わく内に打込んだ今回の実験より多く、したがってコンクリートの流動に伴う品質低下も実施では大きくなることも考えられるが、以上の実験の結果から判断して、鉄筋が密に配置された地下連続壁のコンクリートの品質を確保するためには、少なくとも流動勾配は 1/10 以下となるよう、すなわち配合条件としてはスランプフローを 50 cm 以上とすることが必要と考えられる。

c) 圧力下での流動性試験

10 kgf/cm<sup>2</sup> まで水圧をかけたときのスランプ、スランプフロー試験の結果は図-12 に示すとおりである。

図に示すように、試験に供した 4 ケースのコンクリートとも大気中と静水圧水中下で、それぞれスランプ試験を行った結果、静水圧水中下では、大気中に比べスランプは 0~5 cm、スランプフローは 0~10 cm 程度小さくなる傾向が認められた。スランプ 21 cm のコンクリートで空気量が 4% のものでは水圧 1 kgf/cm<sup>2</sup> でスランプが 5 cm と大幅に低下した。これに対し、空気量 2% のものは水圧が 1 kgf/cm<sup>2</sup> から 5 kgf/cm<sup>2</sup> の間で水圧が大きくなるにしたがってスランプは徐々に低下し 5 kgf/cm<sup>2</sup> でスランプ 1 cm となった。また、スランプフロー 60 cm の高流動コンクリートについては、空気量 2%、4%

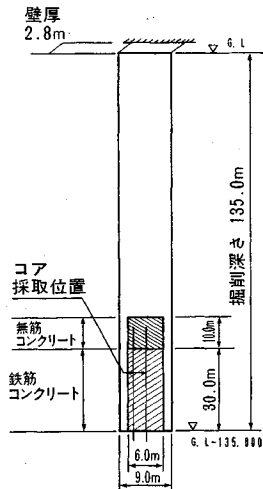


図-13 試験体構築図

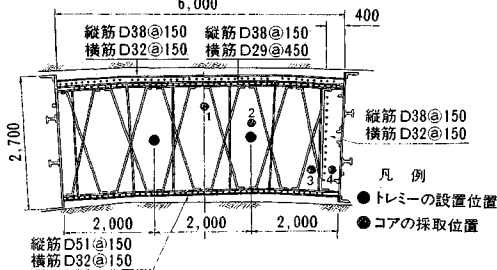


図-14 鉄筋籠断面図

ともに水圧が 5 kgf/cm<sup>2</sup> まで流動性の低下は僅かであったが、水圧 10 kgf/cm<sup>2</sup> では空気量 4% のものがスランブフロー 20 cm と大幅に低下したのに対し、空気量 2% ではスランブフロー 50 cm とその低下は少なかった。

以上から、空気量の少ない方が圧力下での流動性の低下が少ないこと、空気量 2% の場合でもスランブ 21 cm では水圧 3~5 kgf/cm<sup>2</sup> で流動性が大幅に低下するのに対し、スランブフロー 60 cm では水圧 10 kgf/cm<sup>2</sup> でもその低下は僅かである結果となった。本試験は、少ないケースによる限られた範囲の結果であるが、本試験からは大深度においてスランブフロー 50 cm を確保するためには、配合設定時のスランブフローを 60 cm 以上とし、空気量を 2% 以下とする必要があるものと考えられた。

### 5. 実規模施工実験

#### (1) 目的

実施工において、高強度高流動コンクリートを用いた場合の、フレッシュコンクリートの品質のばらつき、施工性、強度及び側圧等を把握することを目的とし、実構造物と同規模の施工実験を行った。

#### (2) 実験方法

表-10 コンクリートの配合

セメントの種類	G <sub>max</sub> (%)	スランブフロー (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	w/c	s/a	単位数 (kg/m <sup>3</sup> )				高性能減水剤 C <sub>1</sub> %
							W	C	S	G	
低熱高炉	25	24以上	65±5	2±1	37	45	158	418	190	116	2.3

実験は実施工における先行パネルを想定して長さ 9.0 m、幅 2.8 m の断面を地表より 135 m 掘削し、そのうち長さ 6.0 m、幅 2.8 m の断面に対し、図-13 に示す安定液中 GL-135 m~95 m の 40 m の間にトレミーからコンクリートを打込んだ。コンクリートの総打込み量は 660 m<sup>3</sup> である。鉄筋籠は図-14 に示すように壁内側に縦筋 D 51、横筋 D 32 を 15 cm ピッチで配置し、壁外側に縦筋 D 38、横筋 D 32 を 15 cm ピッチで 2 段に配置したものを図に示す GL-135 m~105 m の間に設置した。また、接合鋼板から 40 cm 離れた位置に鉄筋籠と同様な鉄筋を配置 (縦筋 2-D 38@150、横筋 D 32@150) し、その鉄筋の外側のコアを採取することにより、鉄筋を越えて流動したコンクリートの品質を調査した。

安定液は、ベントナイトを主剤とし、増粘剤として CMC を加えた配合とし、打込み前日に溝底のスライム処理を行うと共に新鮮な安定液に置換して実験に供した。

実験に用いたコンクリートは低熱高炉セメントを用いスランブフロー 65 cm とした表-10 に示す配合とした。実施工においては深大度であることやフレッシュコンクリートの品質のばらつきを考慮した上で充填性を重視し、目標スランブフローを一連の試験で検討したスランブフロー 60 cm より 5 cm 大きくした。コンクリートは生コンプラントにて製造し、アジテータ車で現場まで運搬して試験を行った。プラントのミキサーは 2 m<sup>3</sup> のパンプ型強制練りである。トレミーは直径 250 mm のもの 2 本を図-14 に示す位置に設置し、両方のトレミーからほぼ同時に打込んだ。打込み時のトレミーの根入れ深さは、3~5 m となるように管理した。打込み速度は 3 m/h とした。

#### (3) 測定項目

スランブフロー試験をアジテータ車全車 (110 台) について、凝結試験を 60 m<sup>3</sup> に一回の頻度で行った。

打込んだコンクリートの温度を T 型熱電対によって GL-120.0 m 及び GL-124.5 m の各深度にそれぞれ 15 点、計 30 点で計測した。打込み時のコンクリートの側圧を GL-122.5 m、GL-127.5 m 及び GL-132.5 m の各深度にそれぞれ 4 点、計 12 点に土圧計を鉄筋に固定して設置し計測した。

打込んだコンクリートの強度等の品質を調査するため、打込みから 2 か月後に図-14 に示す 4 か所から直径 8.5 cm のコアを鉛直方向に採取した。採取したコアは φ 8.5×17 cm の供試体に成形した後、標準養生を行



表-11 スラumpfロー試験結果

サンプル数	110
平均	64.8 cm
最大値	69.5 cm
最小値	60.0 cm
標準偏差	2.22 cm

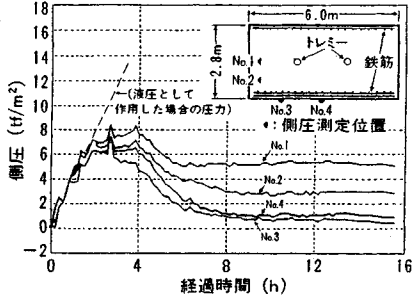


図-15 実大規模実験における側圧計測結果

い、材令 91 日において圧縮強度試験を行った。

(4) 実験結果

a) コンクリートの製造及び打込み

現場到着時の全車のスラumpfローの測定結果は表-11 に示すとおり全て目標とする 65±5 cm の範囲に入っており、このように流動性を大きくした高流動コンクリートでもフレッシュコンクリートの品質が安定したコンクリートを製造できることを確認した。

コンクリートは計画打込み速さ 3 m/h で打込んだが、トレミー内にコンクリートが閉塞することなく、極めて順調に施工することができた。また、コンクリートの打上り面は、試験体各所に設置した土圧計や温度センサーの作動時刻や、採取したコアの長さ等から判断してほぼ水平であったものと考えられる。

b) コンクリート打込み時の側圧

計測結果の一例 (GL-132.5 m) を図-15 に示す。図に示すように、側圧はコンクリートが計測点に達してから 2 時間程度 (3 m/h で打込んでいるため計測点からの打上り高さは 6 m) まではコンクリートが液圧として作用し、その後液圧よりも小さい値となり、4~5 時間後にピークに達した。各点の側圧の最大値は 6~10 t/m<sup>2</sup> であった。

本実験に供したコンクリートの凝結時間は始発で 18~20 h であり、一般のコンクリートよりかなり長いことから、大きな側圧の作用することが予想されたが、最大実測値としては従来のコンクリートとほぼ同等なものであった。これは、かなりの高さまで連続的に打込まれた場合、コンクリートは自重によって加圧脱水され、比較的速い時期に自立できるような強度になることによるものと考えられるが、詳細については基礎的な実験を行って確認する必要がある。

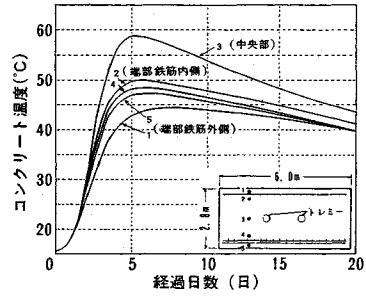


図-16 コンクリートの温度履歴

表-12 材令 91 日の圧縮強度の比較

	サンプル数	平均値 (kgf/cm <sup>2</sup> )	標準偏差 (kgf/cm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)	コア強度/ 標準強度
標準養生供試体	14	62.4	30.2	4.1	0.84
コア供試体	244	52.2	62.1	11.9	

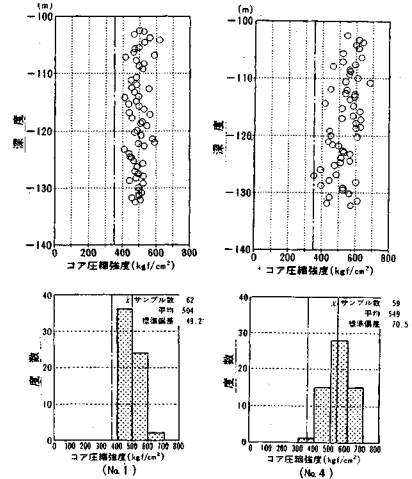


図-17 コア圧縮強度の深度方向分布

c) 打込んだコンクリートの温度

計測結果の一例 (GL-124.5 m) を図-16 に示す。打込み温度 15°C、最高温度 59°C から中央部の温度上昇量は 44°C であった。これは前述の断熱温度上昇試験における温度上昇量 46°C にほぼ一致した。

d) 圧縮強度

表-12 及び図-17 に標準養生供試体とコア供試体の圧縮強度とそのばらつき、及び打込み深度とコア圧縮強度の関係の一例を示す。なお、標準養生供試体については変動係数の算定に 3 つの供試体の圧縮強度の平均値を 1 回の試験値として用いた。これに対しコア供試体については、コア供試体が各深度ごとの 1 本ずつのサンプリングであったことから、深度によるばらつきを検討するため、変動係数の算定に 1 つの供試体の圧縮強度を 1 回の試験値として用いた。その結果、通常の 3 本の平均値を試験値とする品質管理に比べてコア供試体の変動係数

表-13 各位置におけるコア圧縮強度 (材令 91 日)

採取位置 No.	サンプル数	平均値 (kgf/cm <sup>2</sup> )	標準偏差 (kgf/cm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)
1	62	504	49.2	9.8
2	59	488	50.4	10.3
3	64	546	54.8	10.0
4	59	549	70.5	12.8

は、大きくなることが考えられる。

標準養生供試体の圧縮強度は平均 624 kgf/cm<sup>2</sup>、変動係数 4.8% に対し、コア供試体の強度は平均 522 kgf/cm<sup>2</sup>、変動係数 11.9% であった。地下連続壁コンクリートの配合強度については安定液中への打込みに起因する強度低下及びばらつきの増大に対してどのように考えるべきか、未だ定まったものはなく、今回の実験では前述のように考えて設計基準強度 360 kgf/cm<sup>2</sup> に対して配合強度 540 kgf/cm<sup>2</sup> を定めた。しかし、コア供試体で得られた強度試験の結果から、不良率 5% に対する保証強度を求めると、420 kgf/cm<sup>2</sup> であり設計基準強度より高くなっている。これは標準供試体の強度が 624 kgf/cm<sup>2</sup> と目標とした 540 kgf/cm<sup>2</sup> を大きく上回っている結果と思われる。標準供試体強度が目標どおり 540 kgf/cm<sup>2</sup> として、今回の実験の結果を参考に、すなわちコア供試体における変動係数 11.9% を用いて構造体の保証強度を算出すると 364 kgf/cm<sup>2</sup> であり、ほぼ設計基準強度と同等のものが得られている。このことは、ここで採用した配合強度の定め方がほぼ妥当であったことを示しているものと思われる。

i) 各部の強度等の品質

コアを採取した各部の圧縮強度は表-13 に示すとおり平均 490~550 kgf/cm<sup>2</sup>、標準偏差 50~70 kgf/cm<sup>2</sup> であり、トレミーから離れた方が僅かに強度が大きくなる傾向が認められた。この理由の一つとしてトレミー付近よりトレミーから離れた部分の方が温度上昇量が小さく、材令初期に受ける温度の差が材令 91 日での圧縮強度に影響したことが考えられる。なお、前述の流動試験においてもケース No. 4 の配合についてはトレミー付近の強度よりもトレミーから離れたところの強度の方が大きいと同程度である結果となっており、施工実験においても同様の結果が得られた。

鉄筋内側のコア供試体の強度の変動係数 9.8~10.3% に対して、鉄筋を通過した部分 (No. 4) のコア供試体の強度の変動係数が 12.8% であった。トレミーからの距離がほとんど変わらない No. 3 と No. 4 の標準偏差はそれぞれ 55, 70 kgf/cm<sup>2</sup> であり、コアの折損箇所数は、No. 3 で 7 箇所、No. 4 で 21 箇所であった。すなわち、1.4 m 程度の流動によるコンクリートの品質の変化はわずかであるが、鉄筋を通過することにより、ばらつきが多少大きくなる結果となった。

ii) 既往の実験との比較

表-14 本実験結果と既往の施工実験結果の比較

項目	本実験	既往の実験	
		A	B
$f_{c,0}$	$\frac{540}{360} = 1.50$	$\frac{560}{400} = 1.33$	$\frac{580}{480} = 1.21$
セメントの種類	低熱高炉	三成分系	高炉B種
量 (W/C)	41.9 (3.7%)	45.0 (3.2%)	44.7 (3.4%)
採取深さ (m)	GL-95~	GL	GL
(コア深さ)	-1.35	-1~-3.0	-1~-3.1
断面寸法 (m)	2.8×6.0	2.4×3.2	2.4×3.2
トレミー本数	2本×φ250	2本×φ250	2本×φ250
×径	2本×φ250	2本×φ250	2本×φ250
トレミー1本の受持ち面積	8.4m <sup>2</sup>	3.84m <sup>2</sup>	3.84m <sup>2</sup>
打設速度 (m/h)	3.0	5.2~6.4	5.3
データ数*	244	175	60
n	14	12	20
平均値*	$\frac{522}{624} = 0.84$	$\frac{663}{656} = 1.01$	$\frac{597}{602} = 0.99$
x (kgf/cm <sup>2</sup> )	522	663	597
変動係数*	$\frac{11.9}{5.4} = 2.16$	$\frac{12.7}{5.2} = 2.35$	$\frac{8.2}{3.4} = 2.41$
V (%)	11.9	12.7	8.2
スランプ (cm)	27.0	**	**
(フロー)	(65.0)	24.0	24.5
空気量 (%)	2.3	4.0**	5.4
打込み速度	1.5	1.5	2.0
最高温度 (°C)	5.9	6.3	7.9.5
温度上昇量	4.4	4.8	5.9.5

\* 上段はコア、下段は標準供試体、\*\* 目標値  
f<sub>c,0</sub>: 設計基準強度, f<sub>c</sub>: 配合強度

表-15 単位容積重量及び空気量の比較

	単位容積重量 (kg/m <sup>3</sup> )		空気量 (%)		空気減少量 (%)
	標準供試体	コア供試体	標準供試体	コア供試体	
本実験	2391	2430	2.3	0.7	1.6
B	2285	2375	5.4	1.7	3.7

\* 空気量と理論単位容積重量から算出した。  
\*\* コア供試体の単位容積重量から算出した。

本実験と既往の大規模な地下連続壁の実規模の打込み実験結果<sup>3),4)</sup>との比較を表-14 に示す。表より、既往の実験のコア供試体の強度と標準養生供試体の強度との比は 0.99~1.0、変動係数は 8~12% であり、本実験結果をこれと比較すると変動係数はほぼ同じであったものの、強度の比は既往の実験より若干小さかった。その理由としては、本実験でのトレミー 1 本当りの受持ち面積が一般的なものの 2~3 倍であったこと、既往の実験が無筋であったのに対し、本実験が密な配筋部での実験であったこと、本実験においてコンクリートの設定空気量が小さかったこと等が考えられる。特に空気量の影響に関しては、表-15 に示すように本実験の打込み前の空気量が 2.3% であり、コア供試体の単重から算定した空気量 (0.7%) との差が 1.6% であったのに対し、既往の実験 (B) では、打込み前の空気量が 5.4% であり、コア供試体の空気量 (1.7%) との差は 3.7% と大きかった。すなわち、既往の実験では安定液中にコンクリートを打込むことにより強度低下が生じるが、同時に空気量が減少する結果、標準養生供試体強度からの強度変化は少なくなったのに対し、本実験では、打込み前後の空気量の差が余りなかったため、強度低下が既往のものより大きくなったものと考えられる。

本実験では、前述のようにトレミーからの流動距離の増大による圧縮強度の低下がほとんどないこと、また、コア供試体の強度の変動係数が既往の実験結果とほぼ同じであったことから考えて、大深度で部材厚が厚く、し

かも鉄筋量の多い地下連続壁においても配合を適切に選定することにより、既往の実験と同程度の品質のコンクリートが得られることが実証できたものと思われる。

## 6. おわりに

東京湾横断道路川崎人工島の地下連続壁を施工する上で解決すべき配合上の技術的課題について検討した結果、従来のスランプの許容範囲である 24 cm を越えて高流動しても材料分離を生じない配合とすることによって品質の高い地下連続壁のコンクリートが得られることを確認することができた。しかし、地下連続壁は目に見えない地下深い場所でコンクリートを打込むわけであり、その品質には施工方法の良否が大きく影響するものである。したがって今後は構造体におけるコンクリートの品質保証の観点から、品質管理、施工管理方法を確立していく必要があるものと思われる。

最後に、本実験研究は、東京湾横断道路会社より地下連続壁実験共同企業体が受けて実施した実験の一部であ

り、多くの方々の御協力の下に初めて実施できたものであること、さらに、論文の取りまとめにあたっては、清水建設黒田正信氏（当時 東京湾横断道路（株））から貴重な御指導御意見をいただいたことをここに記し、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 大友・坂田：高品質地中連続壁コンクリート工法の開発－流動性及び分離抵抗性からみた適正な配合に関する実験研究－，鹿島建設技術研究所年報第 35 号，1987.
- 2) 坂田・大友・水沼：分散剤の添加時期が異なる流動化コンクリートのブリージング，土木学会第 44 回年次学術講演会，1989.
- 3) 木村・岡田・若山・後藤：実大壁による高強度地中連続壁に関する実験的研究，土木学会論文集 No. 397, VI-9, 1988.
- 4) 青木・芳賀・吉尾：高強度化した大深度地下連続壁コンクリートの品質，土木学会第 43 回年次講演会論文集，1988.

(1990. 11. 1 受付)

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON LARGE SCALE SLURRY WALL CONCRETE

Shin-ichi FUJITA, Toshinari GIKI, Masahiro YURUGI and Noboru SAKATA

Slurry walls have till now been used largely in temporary structures in the construction of retaining walls and underground water screens. But as a result of recent developments in concrete and in the field of excavation equipments it has become possible to construct very deep slurry walls. However, this necessitates development of improved methods of quality control and high strength slurry wall concrete.

This paper describes the research undertaken to study the feasibility of constructing a 2.8 m thick and 135 m deep slurry wall to serve as a water screen and retaining wall in the artificial island in the Trans-Tokyo Bay Highway project.

To begin with, laboratory studies were carried out to determine the mix proportion of the concrete for adequate flowability, segregation resistance and compressive strength. The results obtained from the laboratory tests were verified in a full scale field test.