

# 低発熱・超高強度地下連続壁コンクリートに関する研究

—— 実パネル打設における施工性と壁体強度の分布性状 ——

三浦 律彦

青木 茂

神代 泰道

(本社 土木技術本部技術第5部)

河村 秀紀

十河 茂幸

相原 功

(本社 土木技術本部設計第2部)

## 概要

大規模地下構造物への適用を想定し、低発熱で流動性の高い超高強度地下連続壁コンクリートの配合選定と深さ33mの実パネルの打設実験を実施した。その結果、以下に示すことが明らかとなった。

- 1) 高ビーライト系の低熱ポルトランドセメントを使用して水セメント比を22%とし、製造方法を工夫することで、通常のトレミー工法で十分施工できる超高強度連壁コンクリートが実機でも製造できる。
- 2) トレミー打設時の打上り速度は、漏斗流下時間で示されるコンクリートの粘性の違いで概略判定できる。
- 3) 実施工した壁体の調査の結果、躯体の保証強度で110N/mm<sup>2</sup>以上の超高強度地下連続壁が達成できた。
- 4) 地下連続壁コンクリートの強度増進のメカニズムは、温度履歴と自重加圧の相乗効果によるものと思われ、今回の配合では標準供試体以上の躯体強度が得られる結果となった。

## 1. はじめに

近年、地下構造物の大型化や大深度化が進むとともに、基礎構造物としての耐震性向上や本体壁への利用等の観点から、地下連続壁の高強度化（設計基準強度で45～60N/mm<sup>2</sup>）<sup>1)</sup>、超高強度化（同70N/mm<sup>2</sup>程度以上）<sup>2), 3)</sup>が進められている。地下連続壁の高強度化が進むと、水セメント比の低減やセメント量の増加に伴うコンクリートの粘性の増大がトレミー工法での施工性や溝壁内での充填性の低下を招き、発熱量の増大による温度ひび割れの危険性が高まる。このため実施工においては、流動性が高く、より低発熱性の高強度コンクリートが要求される。

筆者らは、これまでに設計基準強度が70～100N/mm<sup>2</sup>程度の超高強度地下連続壁コンクリート（以下連壁コンクリートと略称）の施工性、発熱特性、強度発現性状の改善に関する研究を進めてきた。まず、研究段階の初期においては、低発熱型の混合セメントと流動化剤や高性能減水剤の併用で単位水量が低減でき、低発熱化、高強度化が可能なことを確認した<sup>4), 5)</sup>。さらに、微粉末材料としてシリカフェームや、石灰石粉等の岩石微粉末を少量併用することにより、施工性も改善でき、圧縮強度も10%程度増加できることを把握した<sup>6), 7)</sup>。さらに、新しい高ビーライトセメントの適用により、特殊な微粉末材料を用いなくても100N/mm<sup>2</sup>を越える低発熱・超高強度連壁コンクリートが比較的容易に達成できることを確認し<sup>3)</sup>、我が国では初めてこのセメントを設計基準強度45N/mm<sup>2</sup>の高強

度連壁工事に適用し、厚さ80cmという薄肉でも大変良好な壁体が構築できることを実証した<sup>1)</sup>。

そこで、これまでの研究開発の集大成として、今回新たな研究開発グループの体制の下、仮設構造物の基礎壁を利用した超高強度連壁コンクリートの施工実験を計画した。その内容は、これまでに課題として残されていたコンクリートの実機での製造方法や、トレミーでの施工性、壁体の温度上昇量、それに壁体強度の確認等である。ここでは、まず、地下連続壁の高強度化の技術の現状を簡単に紹介し、次いで、配合選定試験、実機での製造試験、実パネル打設実験の結果について考察を加える。

## 2. 連壁コンクリートの高性能化技術

### 2.1 低発熱セメントの変遷

土木構造物はマスコンクリートとなる場合が多く、温度ひび割れ制御の観点から低発熱セメントが使用される場合が多い。連壁コンクリートにおいても、ひび割れによる漏水が問題となる場合が多く、これまでに各種の低発熱セメントが使用されている。例示すれば、高炉B種、低熱型高炉B種、二成分系・三成分系低発熱、それに高ビーライトセメント等である。特に、高強度になるほど単位セメント量が多くなり、ひび割れの危険性が高まるため、より低発熱型のセメントが使用されるようになってきている。

### 2.2 高強度化と高流動化の関係

ここ15年程度の土木の連壁工事における設計基準強度と目標スランプフローの変遷をFig. 1に示す。十数年前に

は24~30N/mm<sup>2</sup>程度のもものがほとんどであったのに対し、大型地下工事等において37~51N/mm<sup>2</sup>程度の高強度コンクリートが用いられるようになり、最近ではLNG地下タンク工事等で60N/mm<sup>2</sup>のもものが用いられるようになってきた。また、充填性向上の観点から、よりスランプの大きい配合が用いられるようになっている。最近では、高性能A E減水剤の使用により、スランプフローで65 cm程度まで高流動化した配合も適用されるようになってきた。

### 3. 超高強度連壁コンクリートの配合選定

#### 3.1 実験概要

実パネル打設実験に用いる超高強度連壁コンクリートの配合選定の目的で室内試験を実施した。まず、これまでの研究成果<sup>3), 7)</sup>より使用セメントの大まかな選定を行い、次いで実験によりセメントや粗骨材の選定、および水セメント比、単位水量、細骨材率等の配合の詳細の決定を実施した。実験に使用した材料をTable 1に示す。

セメントとしては、C<sub>2</sub>S含有量や粉末度の異なる2種類の高ピーライトセメントを使用した。粗骨材には岩質の異なる2種類の砕石を使用した。また、高性能A E減水剤にはポリカルボン酸系のものを使用した。

フレッシュコンクリートの試験として、スランプフロー試験の他にコンクリートの粘性を評価するためのO漏斗流下試験<sup>2)</sup>と、間隙通過性を評価するためのU型充填試験(鉄筋障害:U1)<sup>8)</sup>を実施した。

コンクリートの練混ぜは容量0.05m<sup>3</sup>の二軸強制練りミキサーを使用して1バッチ0.035m<sup>3</sup>で行った。モルタル先練り方式で50~90秒練り混ぜた後、粗骨材を投入してさらに60~100秒程度練り混ぜた。この場合、練混ぜ水はモルタルに9割、残りをコンクリートに、高性能A E減水剤はモルタルとコンクリートで半々に分割して投入した。

#### 3.2 コンクリートの配合選定

配合における検討要因のうち、水セメント比(以下W/Cと略)は20, 22, 25, 30%の4段階とした。単位水量は160, 165, 170, 175kg/m<sup>3</sup>のうちの2~3段階に変化させて、最適なものを選定した。細骨材率は、W/Cが30%で単位粗骨材容積を0.335, 0.350, 0.365m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>の3段階に変化させた試験を行い、各W/Cに最適な値を選定した。

**3.2.1 使用材料の選定** セメントと粗骨材の種類がフレッシュコンクリートの性状に及ぼす影響を調べた結果をFig. 2に示す。セメントの種類では、ピーライトBのスランプフローは増大し、漏斗流下時間も長くなった。これは、粉末度やC<sub>2</sub>S含有量の違いの影響と思われる。

粗骨材の種類では、粗骨材Bを用いた時にスランプフローが低下し、流下時間も長くなった。これは骨材の形状や微粒分量等が影響したと思われる。以上の結果から、セメントは比較的粘性の低いピーライトA、粗骨材は流動性の良い粗骨材Aを選定した。

**3.2.2 水セメント比の選定** W/Cの低下によるフレッシュコンクリートの性状への影響をFig. 3に示す。W/Cの

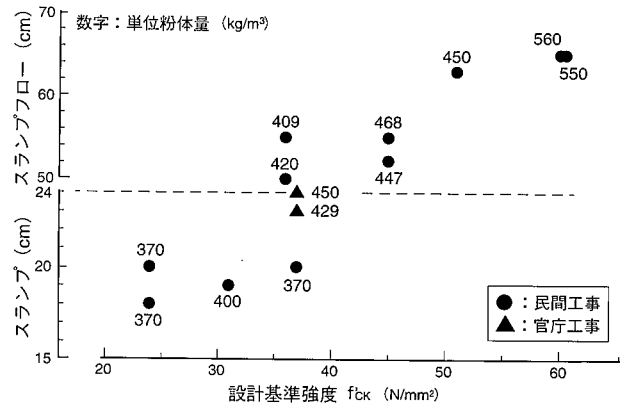


Fig. 1 高強度化と高流動化の関係  
Relationship between High Strength and High Flowability

Table 1 使用材料  
Materials for Concrete

種類	略称	名称	比重	摘要
セメント	ピーライトA	高ピーライトセメントA	3.22	比表面積 3,440 cm <sup>2</sup> /g, C <sub>2</sub> S=54%, C <sub>3</sub> S=29%, C <sub>3</sub> A=3%
	ピーライトB	高ピーライトセメントB	3.20	比表面積 4,080 cm <sup>2</sup> /g, C <sub>2</sub> S=46%, C <sub>3</sub> S=35%, C <sub>3</sub> A=3%
粗骨材	粗骨材A	硬質砂岩砕石 2005	2.65	吸水率 0.70%, 粗粒率 6.58, 実積率 60.0%
	粗骨材B	石灰岩砕石 2005	2.77	吸水率 0.53%, 粗粒率 6.57, 実積率 63.2%
細骨材	S	鹿島産山砂(粗目砂)	2.61	吸水率 0.77%, 粗粒率 2.80, 実積率 65.8%
減水剤	S P	高性能A E減水剤	—	ポリカルボン酸系化合物

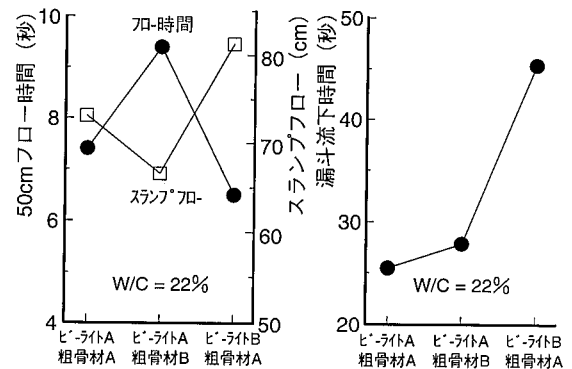


Fig. 2 セメント、粗骨材の種類の影響  
Influence of Cement and Aggregate on Fresh Properties

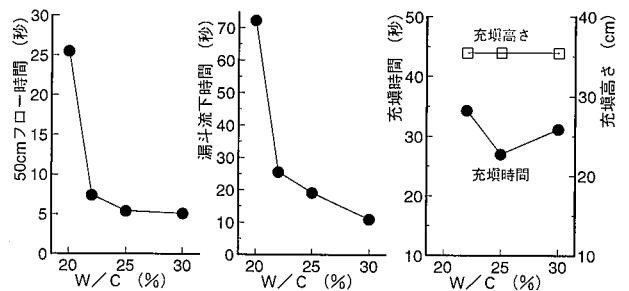


Fig. 3 水セメント比がフレッシュ性状に及ぼす影響  
Influence of W/C on Fresh Properties

低下に伴い粘性が増大するが、特に22%から20%に低下すると、50cmフロー時間や漏斗流下時間は著しく長くなり粘性が急激に上昇する結果となった。過去の施工経験から、漏斗流下時間が50秒程度以上になるとトレミーでの施工性がかなり低下することが知られている。また、W/Cが20%では、減水剤添加率を30%の2倍程度と多くしても目標スランプフローは得られなかった。このことから、今回の使用材料では実施工に適した粘性から見たW/Cの最小値は22%程度と判断された。

各材齢におけるW/Cと圧縮強度の関係をFig. 4に示す。材齢7日まではC/Wの増大にほぼ比例して圧縮強度が増加する傾向が認められたものの、材齢28日以降の長期材齢では、W/C:20%の配合で22%より強度が低下した。これは、W/Cの著しい低減で練混ぜが十分には行われず、セメントが十分に反応できなくなったためと思われる。

以上の結果を総合して、今回の使用材料ではW/Cの実用上の限界値は22%と判断した。

**3.2.3 単位水量, 単位粗骨材量の選定** 単位水量が変化した場合のフレッシュコンクリートの性状の変化をFig. 5に示す。スランプフローが70cm程度となるように減水剤の添加率を変化させた場合、50cmフロー時間, 漏斗流下時間, U型充填時間は単位水量が多くなるほど短くなる傾向を示した。練上り時の目視観察やセメント量低減の観点から、単位水量はW/C:30%で165kg/m<sup>3</sup>程度が妥当と思われた。W/C:25%以下では練混ぜ時間が長くなることを考慮して単位水量を5~15kg/m<sup>3</sup>程度増量させ、その効果を確認して単位水量を決定した。

粗骨材量が変化した場合のフレッシュコンクリートの性状の変化をFig. 6に示す。スランプフローや50cmフロー時間はほぼ一定であったが、漏斗流下時間は粗骨材量が多いほど長くなり、U型充填時間は粗骨材量0.365m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>の場合に増大した。この結果から、W/C:30%の粗骨材量は0.350m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>程度以下が適当と判断した。なお、W/C:25%以下では粉体量の増加に伴い粗骨材量を0.015m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>分だけ低減させた。

#### 4. 実機における製造方法の検討

##### 4.1 モルタル先練り・二段ミキサの採用

コンクリートの製造はレディーミクストコンクリート工場の実機ミキサで行った。採用した工場のミキサは二軸強制練りタイプの二段ミキサで、モルタル先練り方式の採用により超高強度コンクリートの製造に適したものであった。上段のモルタルミキサが容量1.75m<sup>3</sup>, 下段のコンクリートミキサが容量3.00m<sup>3</sup>で、1バッチの練混ぜ量は余裕と実際の出荷量を見込んで、1.83m<sup>3</sup>と一定にした。

##### 4.2 最適な練混ぜ時間の選定

実パネル打設への適用が予定されたW/C:30% (A配合)とW/C:22% (B配合)の2配合について、実機製造時の練混ぜ時間の検討を実施した。フレッシュコンクリートの試験結果をFig. 7に示す。この結果より、A配合

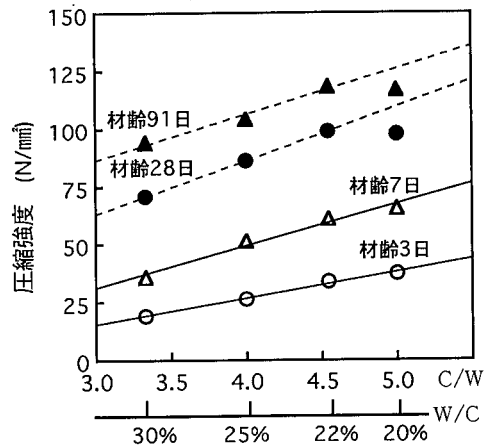


Fig. 4 水セメント比と圧縮強度の関係  
Relationship between C/W and Compressive Strength

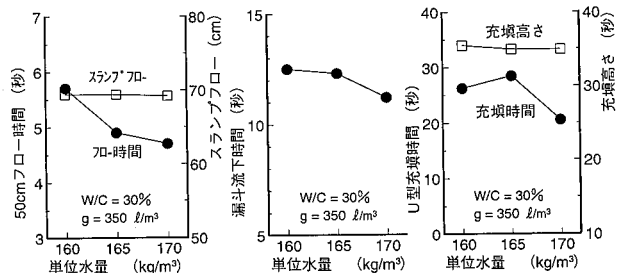


Fig. 5 単位水量がフレッシュ性状に及ぼす影響  
Influence of Unit Water Content on Fresh Properties

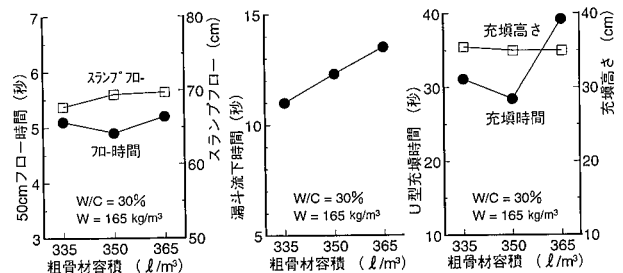


Fig. 6 単位粗骨材容積がフレッシュ性状に及ぼす影響  
Influence of Unit Aggregate Volume on Fresh Properties

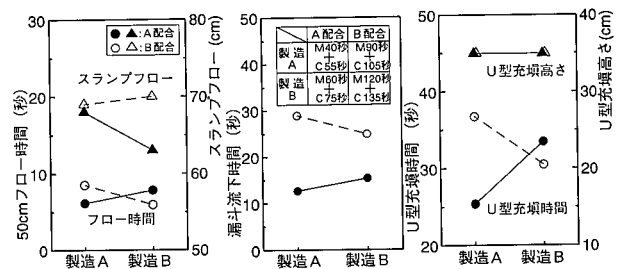


Fig. 7 練混ぜ時間がフレッシュ性状に及ぼす影響  
Influence of Mixing Time on Fresh Properties

では練混ぜ時間の短い製造時間A, またB配合では練混ぜ時間の長い製造時間Bの方が流動性が高く粘性が低く、それぞれ適当な練混ぜ時間であると判断した。ミキサ消費電流の記録や経時変化性状の安定性などからもこれらの練混ぜ時間の妥当性が確認された。

## 5. 実パネル打設実験

### 5.1 実験概要

5.1.1 壁体の形状と施工概要 基礎壁となる連壁パネルの形状寸法と、温度計測およびコアボーリングの概要を Fig. 8 に示す。パネルは 2 配合で 2 体分施工した。配筋条件は、主筋（鉛直筋 D29）が 25～30cm ピッチで 22 本、横筋（帯筋 D16）が 30cm ピッチである。

連壁コンクリートの打設は、φ 250mm のトレミー管をパネル中央に 1 本設置し、上部に若干大きめ（容量が通常の約 1.5 倍）のホッパを設置して行った。この場合、排出速度を上げる目的で生コン車の後部レベルの嵩上げ（約 40cm）を実施した。コンクリートの製造は実機試験と同じプラントで同様に行い、平均 30～35 分で現場まで運搬し、14 台分を連続してトレミー打設を行った。

5.1.2 試験計測項目 壁体の温度計測は、地盤面下 15m の位置において熱電対を用いて行い、壁体コンクリートの硬化過程での温度履歴を把握した。また、壁体の温度と同じ温度履歴を供試体に与えて養生するシステム（温度履歴養生システムと呼称）により、壁体と同一積算温度での強度特性を調査し、標準養生供試体との対比を行った。標準養生供試体では圧縮・引張強度以外にも静弾性係数、曲げ・せん断強度の試験や、クリープ、乾燥収縮、凍結融解試験等を実施した。

壁体の硬化後、材齢 12 週から 13 週にかけて連続コアボーリング（コア径 φ 100mm）を行い、材齢 91 日の圧縮強度、引張強度、静弾性係数等を計測を実施した。

5.1.3 コンクリートの配合 打設した連壁コンクリートの配合を Table 2 に示す。A 配合は W/C:30%，B 配合は W/C:22% とした（壁体をそれぞれ A パネル、B パネルと呼称）。

5.1.4 フレッシュコンクリートの試験結果 荷卸し時のコンクリート温度は A 配合が 21～22℃、B 配合が 25～27℃ で、練混ぜ時間が長くなった影響が現れた。外気温は 15～18℃ であった。荷卸し時の空気量は 1.7～2.1% と安定していた。

出荷時と荷卸し時におけるスランプフローの変化は、A 配合では荷卸し時で若干増加、B 配合では若干減少する傾向が認められた。荷卸し時のスランプフローは A 配合で 68～73cm、B 配合で 68～72cm と安定していた。

漏斗流下時間は、両配合とも荷卸し時で若干減少する傾向が認められ、A 配合が 10～17 秒、B 配合が 22～30 秒であった。

### 5.2 トレミーでの打上り速度

溝壁内のコンクリート天端の打設開始から打終わりまでの平均的な打設速度は、A 配合で 20.6m<sup>3</sup>/h、B 配合で 19.8m<sup>3</sup>/h であった。各パネルの平均的な打上り速度は A 配合で 9.5m/h、B 配合で 9.2m/h で、過去の施工事例（10～18m/h<sup>1)</sup>）に比べて幾分小さくなった。トレミー工法の施工時間には、コンクリート打設時間の他にトレミーの切

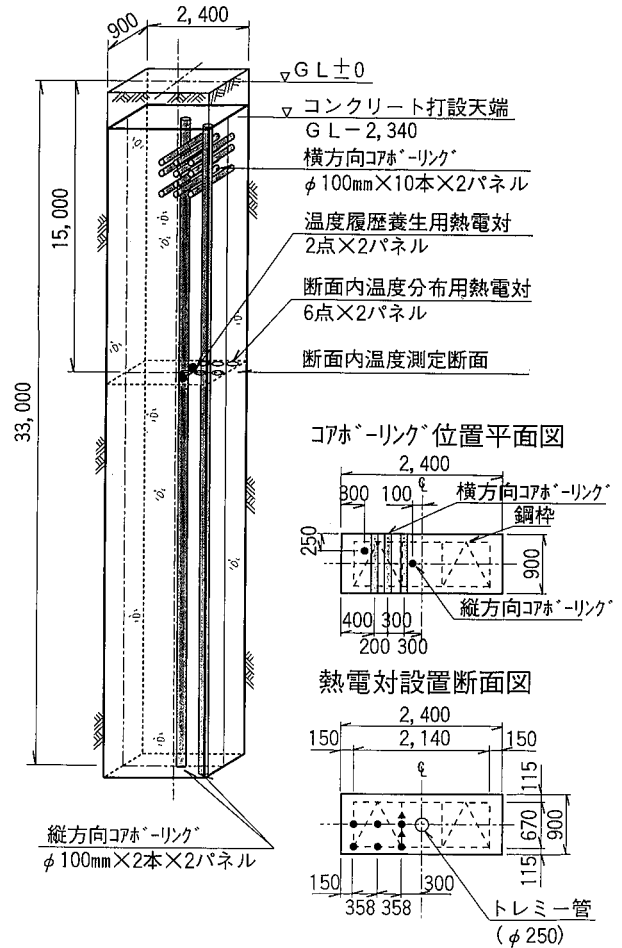


Fig. 8 連壁パネルの形状寸法と各種測定概要  
Size of Wall Panel and Outline of Measurements

Table 2 打設したコンクリートの配合  
Mix Proportion of Concrete for Panel Construction

配合	目標スランプ高 (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) (*下段 φ/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	SP
A	60～73	2	30	45.7	165	550	771	928	11.0 (2.0%)
					*165	*171	*294	*350	
B	65～75	2	22	40.0	175	795	584	888	21.5 (2.7%)
					*175	*247	*223	*335	

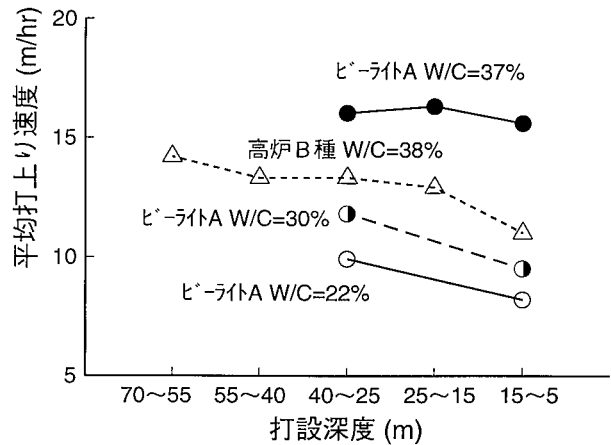


Fig. 9 連続打設時の打上り速度  
Rising Velocity of the Top of Concrete in Trench

断や生コン車の入替え、待ち時間等を含む。今回の施工では、後述するように粘性増大で実質の打設時間が増加したことや、通常より長い製造時間が原因で生コン車の待ち時間がやや長くなったことなどが影響したと思われる。

連壁コンクリートの施工性を評価する場合、生コン車の待ちが無い状態(トレミー切断有)での連続打上り時の平均速度で比較すればコンクリートの粘性の違いの影響を概略評価できる。Fig.9はその一例として、今回の打設結果を従来の連壁コンクリートの連続打上り速度<sup>1)</sup>と対比したもので、トレミー管径がφ200mmで1本当たりの打設面積が1.80m<sup>2</sup>の場合に面積比換算した結果である。打設深度が25~40mの条件で比較すると、A配合の打上り速度は高炉セメントB種を用いた配合強度60N/mm<sup>2</sup>の超高強度連壁コンクリートの約90%と近い値となった。一方、超高強度のB配合はA配合の約85%と遅くなった。

Fig.9の打上り速度とO漏斗の平均流下速度との関係をFig.10に示す。この結果から、連壁コンクリートの連続打上り時の平均打上り速度は漏斗流下速度や打設深度との関係が深く、漏斗流下速度でトレミー工法での施工速度をある程度評価できることが判明した。

### 5.3 壁体温度とコンクリートの強度発現

**5.3.1 壁体の温度履歴** 壁体温度の履歴をFig.11に示す。Aパネルの最高温度は50℃、このときの温度上昇量は28℃であり、Bパネルの最高温度は65℃、このときの温度上昇量は39℃であった。A、B配合の壁体レベルでの温度上昇量の差(11℃)はTable 3に示す断熱試験における最高温度上昇量Kの差(約11~12℃)にほぼ等しくなった。断熱温度上昇試験結果より、単位セメント量10kg/m<sup>3</sup>の増減で、K値は約0.5℃の増減となっている。

**5.3.2 温度履歴養生下の強度発現性状** 温度履歴養生システムにより温度履歴を受けたコンクリートの強度発現性状を調査した。供試体の養生は湿潤養生の他に、封緘養生も行った。これは、地中構造物でもマスの壁体の中央部は封緘養生に近い養生条件と考えたためである。

このシステムを用いた温度履歴養生下での圧縮強度と積算温度の関係をFig.12に示す。図中には、同一バッチで採取し20℃で標準水中養生(以下標準養生と略記)した供試体強度も示した。これより、Aパネル、Bパネルとも、同一積算温度であっても温度履歴養生および標準養生した供試体の圧縮強度は異なることが分かる。なお、温度履歴養生供試体で湿潤養生と封緘養生での有意な強度差は認められなかった。また、Aパネルにおいては積算温度が1,000(D・D)を境に、Bパネルにおいては積算温度が1,500(D・D)を境に、温度履歴養生供試体強度と標準養生供試体強度の大小関係が逆転している。これは、材齢初期に高温履歴を受けた場合の硬化体の細孔構造の変化<sup>9)</sup>が高ビークメントを用いた低水セメント比の領域においても生じたためと思われる。

温度履歴養生と標準養生での引張強度と圧縮強度との関係をFig.13に示す。引張強度はφ100×200mmの供試体を割裂試験により求めたものである。引張強度と圧縮

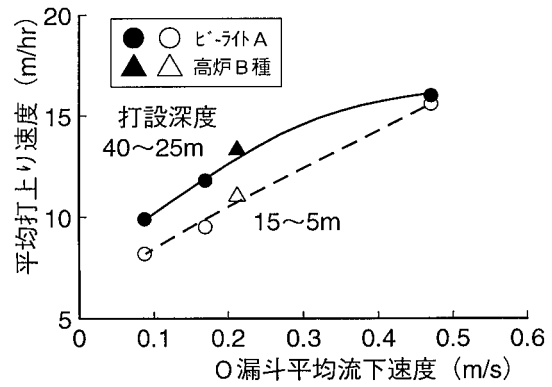


Fig. 10 打上り速度と漏斗流下速度  
Relationship between Rising Velocity and Flow-out Velocity with a Funnel

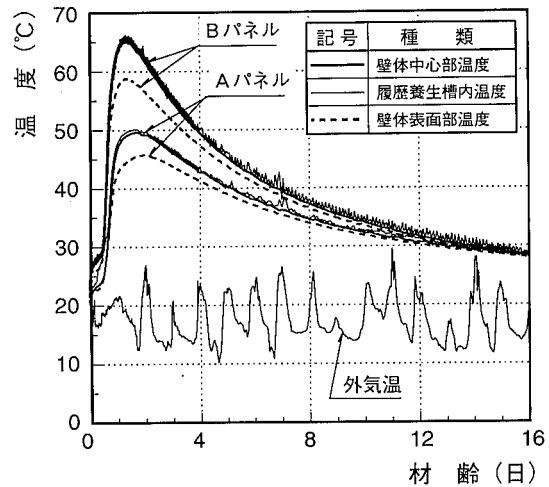


Fig. 11 壁体温度の履歴  
Temperature Record of Panel Wall after Placing

Table 3 断熱温度上昇試験結果  
Results of Adiabatic Temperature Rise Test

配合区分	$T=K(1-e^{-\alpha t})$		$T=K\{1-e^{-\alpha(t-t_0)}\}$		
	K	$\alpha$	K	$\alpha$	$t_0$
A	58.46	0.81	57.79	1.00	0.21
B	69.54	0.94	69.87	1.11	0.38

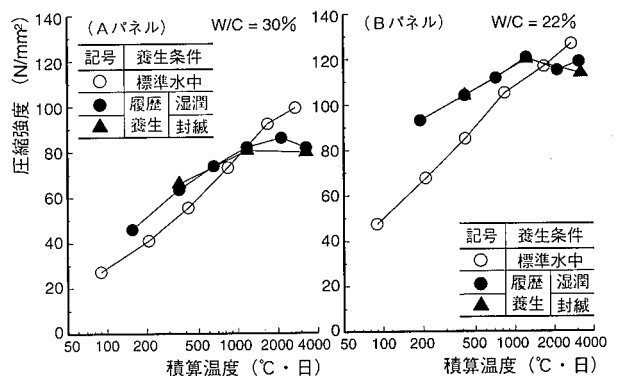


Fig. 12 圧縮強度と積算温度の関係  
Relationship between the Maturity and Compressive Strength

強度の関係は、温度履歴養生および標準養生ともほぼ同一の関係式で整理できると考えられる。なお、引張強度の圧縮強度に対する強度比は1/14~1/19で、圧縮強度が高くなるに従い強度比は小さくなる傾向を示している。

5.4 各種強度特性

5.4.1 静弾性係数 静弾性係数と圧縮強度の関係をFig.14に示す。静弾性係数と圧縮強度の関係は、A配合(W/C:30%), B配合(W/C:22%)とも同一の関係式で近似できる結果が得られた。なお、図中にNew RCでの提案式<sup>10)</sup>(ここで、コンクリートの単位容積質量 2.4 t/m<sup>3</sup>, 粗骨材の種類により定まる補正係数K1:1.0, 混和材の種類により定まる補正係数K2:1.0と仮定)を示した。両者は若干異なるものの、ほぼ同様の傾向となった。

5.4.2 曲げ強度, せん断強度 曲げ強度と圧縮強度の関係をFig.15に示す。曲げ強度の圧縮強度に対する強度比は1/9~1/14となった。

せん断強度と圧縮強度の関係をFig.16に示す。せん断強度は100×100×400mmの角柱供試体を用いた直接2面せん断試験の結果である。せん断強度の圧縮強度に対する強度比は1/2~1/3で、かなり高い値を示している。図中には、圧縮強度と引張強度の値からモールの応力円の式(Fs=(Fc・Ft)<sup>0.5</sup>/2)を用いて間接的に求めたせん断強度と圧縮強度の関係を示した。直接2面せん断試験はせん断破壊とは別の形態で破壊を生ずる場合もあり、断面設計での特性値としては、モールの応力円で間接的に求めたせん断強度を用いるのが安全側と思われる。

5.4.3 クリープ性状 載荷応力度を圧縮強度(載荷開始材齢3ヵ月)の1/6と1/3~1/4の2段階に変化させて1年間のクリープ試験を実施した。この場合の単位クリープひずみとクリープ係数の値をTable 4に示す。1年後の単位クリープひずみは、A配合で1.6~1.75程度と従来の高強度コンクリートの値とほぼ同じ値だったのに対し、圧縮強度の高いB配合では1.3程度と少し小さくなった。1年後のクリープ係数も同様に、A配合が0.65程度、B配合が0.50程度で、載荷応力度の影響は比較的少なく、強度が高いほど小さな値となった。

Table 4 単位クリープひずみとクリープ係数  
Unit Creep Strain and Creep Index

配合	圧縮強度に対する 載荷 応力レベル	単位クリープひずみ (μ/kgf/cm <sup>2</sup> )				クリープ係数			
		3ヵ月	6ヵ月	8ヵ月	12ヵ月	3ヵ月	6ヵ月	8ヵ月	12ヵ月
		A	1/6	1.17	1.45	1.55	1.76	0.41	0.51
A	1/4	0.95	1.35	1.55	1.62	0.37	0.54	0.62	0.64
B	1/6	0.95	1.13	1.24	1.29	0.33	0.39	0.42	0.44
B	1/3	0.75	1.04	1.14	1.28	0.31	0.43	0.47	0.53

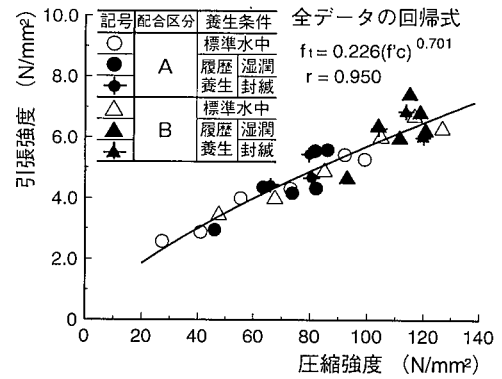


Fig. 13 圧縮強度と引張強度の関係  
Relationship between Compressive Strength and Tensile Strength

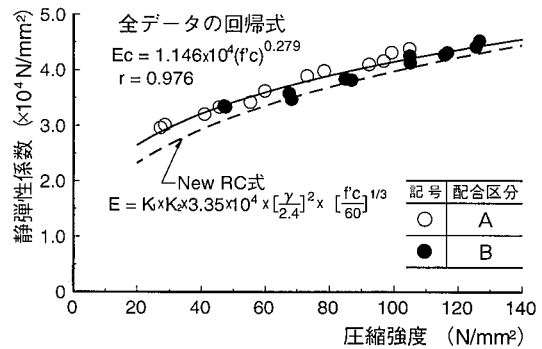


Fig. 14 圧縮強度と静弾性係数の関係  
Relationship between Compressive Strength and Young's Modulus

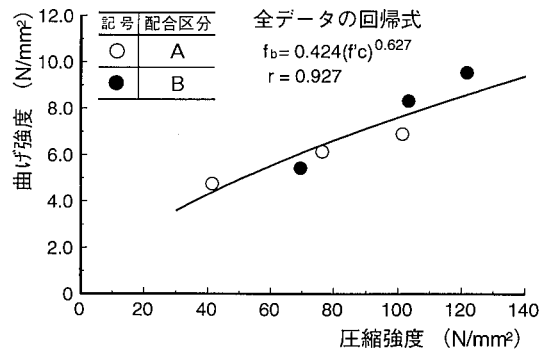


Fig. 15 圧縮強度と曲げ強度の関係  
Relationship between Compressive Strength and Flexural Strength

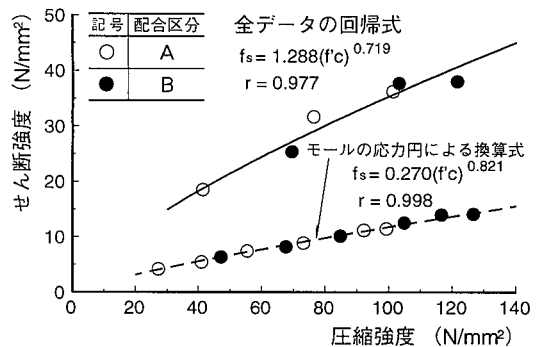


Fig. 16 圧縮強度とせん断強度の関係  
Relationship between Compressive Strength and Shear Strength

5.5 耐凍結融解抵抗性に関する検討

LNG地下タンクなどの低温貯槽では耐凍結融解抵抗性が問題となるため、凍結融解試験を実施した。ここで、高ビーライトセメントは材齢初期の水和反応が遅いため、初期の水中養生期間を材齢14日（JIS準拠）と28日の2通りに変化させた。相対動弾性係数の変化をFig.17に示す。今回は設計空気量が2%以下と少なかったため、A配合では良好な結果は得られなかった。しかし、B配合では養生期間によらず良好な耐凍結融解抵抗性が示された。なお、A配合では養生期間が長いほど少し改善されるようであり、適正空気量の設定により、実用上は良好な耐凍結融解抵抗性が達成可能と思われる。

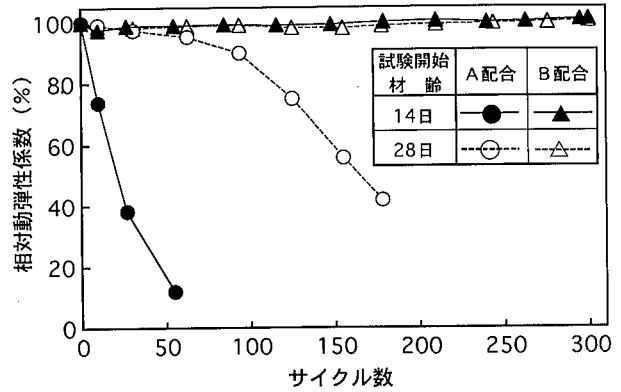


Fig. 17 凍結融解試験結果  
Results of Freezing and Thawing Test

6. 壁体品質の深さ方向の分布性状

6.1 単位体積質量の分布

壁体から採取したコアの単位体積質量の深さ方向の分布をFig.18に示す。ばらつきはあるものの、単位体積質量は深さ方向に増加する傾向を示した。これらの理由は、硬化前のコンクリートの自重加圧により、空気泡が圧縮されるとともに、硬化組織が緻密化したためと考えられる。

6.2 圧縮強度、静弾性係数の分布

Aパネル（W/C:30%）、Bパネル（W/C:22%）から採取したコア供試体の圧縮強度の深さ方向の分布をFig.19に示す。コア供試体は連続して採取されたものを約3m毎に切り出し、φ100×200mmのサイズ（各3本）に成形したものである。

Aパネルでは、コア強度が深さ方向に増大する傾向が認められた。この場合、深さ20mでの地表面部（深さ3mの位置）に対する強度の増加割合は約14%であった。一方、Bパネルでは、深さ5～15m程度の区間で若干強度増加が認められ、深さ20mでの地表部に対する強度増加の割合は、9%とAパネルに比べて小さくなった。このような深さ方向での強度増加は、コンクリートの自重加圧による硬化組織の緻密化が原因と考えられ、水セメント比によってその影響が異なるためと思われる。

コア供試体の弾性係数の深さ方向の分布はばらつきが少なく、深さ方向に若干の増加が認められるだけでほぼ一定の値となった。A配合で $4.3\sim 4.6 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、B配合では $4.6\sim 4.8 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ であった。

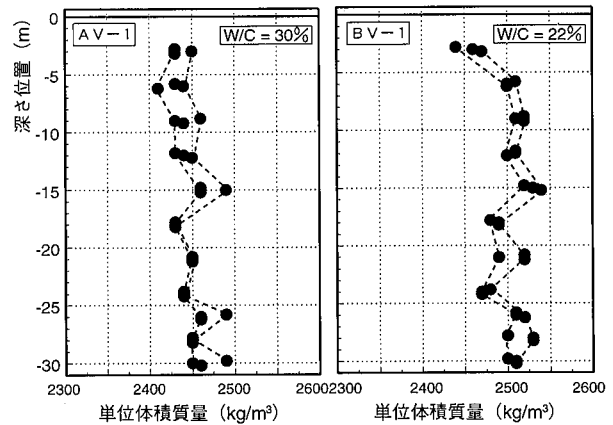


Fig. 18 コアの単位体積質量の深さ方向の分布  
Distribution of Unit Volume Weight of Cored Specimen

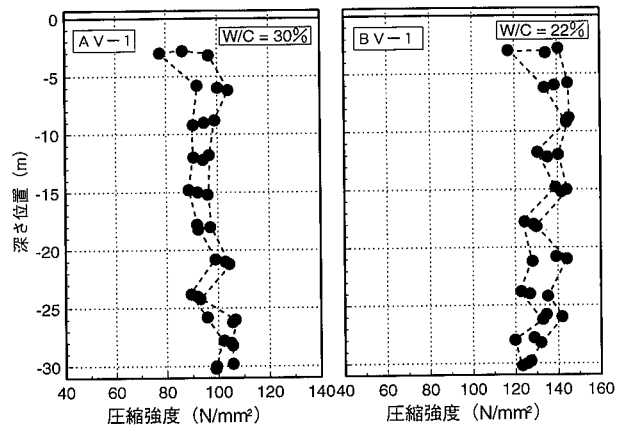


Fig. 19 コア強度の深さ方向の分布  
Distribution of Compressive Strength of Cored Specimen

Table 5 圧縮強度の統計処理結果  
Statistical Data Analysis of Compressive Strength

	標準養生供試体		コア供試体	
	A配合	B配合	Aパネル	Bパネル
個数 n (個)	21	21	66	63
最大値 (N/mm <sup>2</sup> )	107	131	119	146
最小値 (N/mm <sup>2</sup> )	96.8	107	79.2	117
平均値 m (N/mm <sup>2</sup> )	102	122	98.8	129
標準偏差 σ (N/mm <sup>2</sup> )	3.11	5.62	6.71	8.21
変動係数 (%)	3.05	4.59	6.83	6.35

6.3 壁体の保証強度に関する考察

6.3.1 壁体の保証強度 標準養生供試体とコア供試体の圧縮強度の統計処理結果をTable 5に示す。標準養生供試体では、A配合、B配合とも変動係数は3～5%の範囲にある。今回のような超高強度コンクリートでも品質管理をうまく行えば、市中のレディーミクストコンクリート工場であっても品質変動を小さくできることが確認できた。一方、コア供試体の変動係数は6～7%の範囲にあるが、安定液中に打設された壁体のコアであることを考慮すると、強度の変動は比較的小さいと判断できる。

統計処理結果をもとに、標準養生供試体およびコア供試体の保証強度を換算したものをTable 6に示す。この場合の保証強度は不良率を4%以下として換算した。コア供試体の換算保証強度は、Aパネルで87N/mm<sup>2</sup>、Bパネルで115N/mm<sup>2</sup>であり、この程度の値を壁体の保証強度として十分とり得るものと考えられる。

なお、標準養生供試体とコア供試体での換算保証強度の比は、W/C:22%のBパネルにおいては1.0以上となる結果が得られた。この結果は、W/C:22%の超高強度領域においては、壁体の設計基準強度と品質管理上での呼び強度をほぼ同一と評価してもよいことを示唆しているが、この値の適用についてはさらなる検討が必要である。

6.3.2 壁体の強度増進のメカニズム 壁体から採取したコアの強度が標準養生供試体の強度とほぼ等しくなった理由としては、自重加圧による空隙組織の緻密化と、高ビーライトセメントで高温履歴を受けた場合に特有の硬化体の細孔構造の変化の影響が考えられる。非排水三軸加圧下で強度が増加するのは、ペースト中の圧縮体である空気泡やある大きさ以上の毛細管空隙の総量が減少するため、また、加圧力がある値以上になると強度増加が見られなくなるのは、コア採取による圧力解放時に骨材とペーストの弾性係数の違いで内部応力が発生し、骨材界面付近に損傷を受けた影響が現れたと思われる。

## 7. まとめ

今回の超高強度連壁コンクリートの施工実験において、明らかになったことをまとめると以下の通りである。

- 1) 高ビーライト系のセメントとポリカルボン酸系の高性能A E減水剤の組合せと製造方法の改善により、110N/mm<sup>2</sup>以上の超高強度コンクリートが実機でも製造できた。
- 2) W/C:22%の超高強度コンクリートでも、粘性管理を十分に行い、十分な排出速度を保つことで、従来のトレミー工法を用いた連壁の施工が可能となった。
- 3) トレミーでの打上り速度はコンクリートの粘性との関係が深く、超高強度連壁コンクリートの場合には、漏斗流下速度の低下に比例して実質の打上り速度は遅くなる。
- 4) 壁体から採取したコア供試体の単位体積質量や圧縮強度は深さ方向に増加する傾向を示したが、その増加の程度は水セメント比の違いによって異なり、高強度の配合ほど増加は少なくなった。これは、自重加圧の影響が異なるためと思われる。
- 5) コア供試体の圧縮強度の統計解析の結果、壁体の保証強度として、W/C:30%の配合で87N/mm<sup>2</sup>、W/C:22%の配合で115N/mm<sup>2</sup>の値が確認できた。
- 6) 標準養生供試体に対するコア供試体での換算保証強度比は、水セメント比が30%の場合には0.91と通常の水中低減率(0.90)に近い値であったのに対し、22%の場合には1.0以上となることが確認できた。

Table 6 換算保証強度の算定  
Calculation for Guarantee Strength of Structure

種別	パネル区分	換算保証強度	
		記号	Fci (N/mm <sup>2</sup> )
コア供試体	A	F <sub>cc</sub>	87.2
	B		115
標準養生供試体	A	F <sub>cm</sub>	96.3
	B		113
換算保証強度比	A	F <sub>cc</sub> /F <sub>cm</sub>	0.91
	B		1.02

\* 不良率4%以下 (Fci=m-1.73σ)

## 参考文献

- 1) 三浦, 青木, 吉野, 谷口: 高ビーライトセメントを用いた高強度連壁コンクリートの実施工におけるフレッシュ性状, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, 第5部, p.124~125, (1995)
- 2) 青木, 近松, 芳賀: 超高強度連壁コンクリートの基礎的性質, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, p.493~498, (1992)
- 3) 三浦, 峯岸, 関, 岩井: 高ビーライトセメントの高強度地下連続壁コンクリートへの適用性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, p.271~276, (1994)
- 4) 青木, 十河, 芳賀: 地下連続壁コンクリートの配合に関する研究(その2)高性能減水剤を多量添加した高強度コンクリートの基礎的性質, 大林組技術研究所報, No.32, p.102~106, (1986)
- 5) 青木, 十河, 芳賀: 地下連続壁コンクリートの配合に関する研究(その3)水中打設実験, 大林組技術研究所報, No.36, p.40~44, (1988)
- 6) 三浦, 青木, 芳賀: 超高強度コンクリートの施工性改善に関する基礎研究, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, 第5部, p.530~531, (1991)
- 7) 青木, 三浦, 十河: 各種鉱物質微粉末を用いた低発熱超高強度連壁コンクリートに関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, p.37~41, (1993)
- 8) 土木学会高流動コンクリート研究委員会分科会中間報告, 1.性能評価分科会報告, p.222~224, (1996)
- 9) 森本丈太郎, 魚本健人: 初期高温養生したセメントの細孔構造に関する研究, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, 第5部, p.22~23, (1995)
- 10) 国土開発技術センター: 平成4年度NewRC研究開発概要報告書, 高強度コンクリート分科会性能評価WG, 3-1-54, (1993)