

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——

青木 茂 十河 茂 幸
芳賀 孝 成

Mix Proportions of Diaphragm-wall Concrete (Part 3)

——Properties of Underwater-Placed Concrete Using Various Admixtures and Cements——

Shigeru Aoki Shigeyuki Sogo
Takashige Haga

Abstract

Diaphragm-walls are being used increasingly as parts of structures and foundations of large structures, so that they are being made to extend deeper underground, are thicker, and are higher in strength. In such case, it is necessary for diaphragm-wall concrete to be of higher quality. The object of this study was to confirm the effects of using various admixtures or low-heat cement in diaphragm-wall concrete in order to decrease thermal cracks or segregation. Accordingly, the authors performed underwater concrete placement tests and obtained the following results: (1) Especially in case of underwater concrete, the use of low-heat cement and superplasticizer was more effective in decreasing heat of hydration. (2) For improvement in quality of lower parts of Diaphragm-wall concrete, the use of a segregation control admixture was most effective.

概 要

近年、地下連続壁を重要構造物の本体や大型基礎などに適用する例が増えてきており、大深度化、大壁厚化あるいは高強度化の傾向が著しい。このような工事に適用される地下連続壁には従来に比べて、さらに高品質なコンクリートが要求される。この研究は、地下連続壁コンクリートの打設時の材料分離や水和熱による温度ひびわれの抑制のための各種混和材料や低発熱セメントの適用効果を調査するために、水中打設実験を実施したものである。

実験の結果、①低発熱セメントや高性能減水剤の使用は硬化時の水和熱の低減に有効であること、②地下連続壁の底部コンクリートの品質向上には、分離低減剤の使用が効果のあること、などが明らかとなった。

1. まえがき

地下連続壁コンクリートには、打設時の分離を少なくし、硬化後に十分な品質を確保するために単位セメント量 370 kg/m^3 以上の富配合のものが用いられてきた。しかし、近年、構造物の大型化に伴い地下連続壁の部材厚が大きくなり、水和熱による温度ひびわれの発生が問題となる場合もある。一方、部材耐力を増すためにコンクリートを高強度化する傾向があり、この場合にも温度ひびわれの発生が問題となりやすい。この対策として、低発熱セメントの使用や減水剤による単位セメント量の低減が有効と思われるが、反面、打設時の分離による品質

変動については十分に確かめられていない。

また、最近になり、分離低減剤の水中コンクリートへの適用が急速に拡大されてきているが、地下連続壁コンクリートに適用した工事例はまだない。特に、地下連続壁コンクリートに分離低減剤を用いた場合の、打設時の流動性状や硬化後のコンクリートの品質を調査した例はほとんどない。

この様な観点から、この水中打設実験は、①低発熱セメントの使用、②流動化剤の使用による単位セメント量の低減、③低発熱セメントと高性能減水剤を用いたコンクリートの高強度化、④分離低減剤の使用などを図った各種コンクリートの地下連続壁コンクリートへの適用効

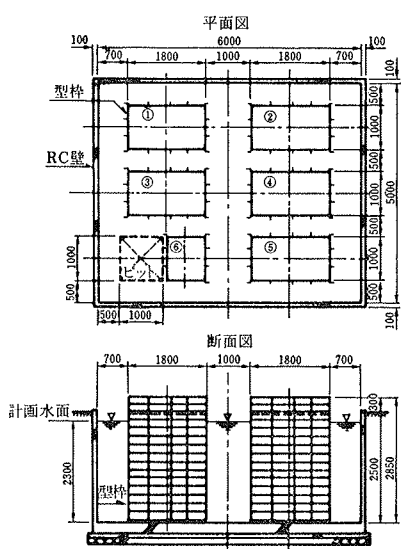


図-1 試験体の配置

果を検討することを目的として実施したものである。

この報告では、各種配合のコンクリートの水和熱低減効果と水中打設に伴う品質変動について、主に述べている。

2. 実験概要

2.1. 水中打設実験

2.1.1. 水中打設試験体 図-1に示すように屋外水槽（平面寸法6m×5m、深さ2.55m）内に6体の合板製型枠を設置し、セメントおよび混和剤を変えた6種類の配合のコンクリート（表-2）を各々1体ずつ打設した。

試験体の形状寸法を図-2に示す。試験体は平面寸法1.0m×1.8m、高さ2.5mとし、鉄筋回りの流動性を調査するため短辺部に鉄筋籠を設置した。計画水位は2.3mとし、パネル内外で水を連通させるため、型枠にスリット（幅3mm）を高き方向に約10cmごとに設けた。なお、スリットには不織布を被せ、モルタルの流出を防いだ。

2.1.2. コンクリートの製造と打設 コンクリートの混練りは半自動式バッチャープラント（容量330lの横軸強制練りミキサ）を用い、1バッチ300lとして行なった。混練り時間は注水後2分30秒とし、流動化コンクリートの場合はベースコンクリートで1分30秒、流動化剤添加後1分とした。

練り上ったコンクリートはバケット式フォークリフトで運搬し、水槽横に仮置きしたグランドホップ（容量2m³）に所定量を貯蔵した後、クレーンで吊り上げ、模型パネル中央に設置したトレミー管上部のホップ内に投入した。なお、トレミー管の管径は8インチとし、打設にはウィングタイプのゴム製プランジャーを使用した。ト

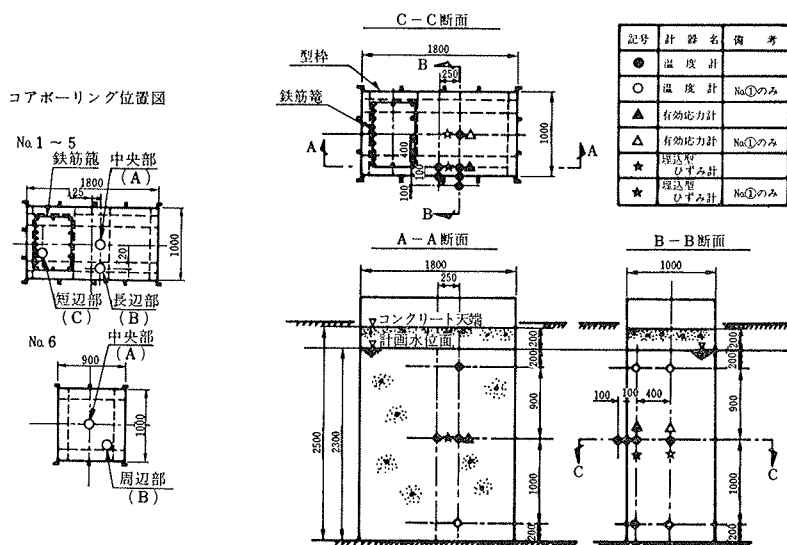


図-2 試験体の形状寸法と計器の配置

レミー管は下端より各々、2m、1m、1mの単管を継ぎ合わせ、合計4mとし、コンクリートの打上りに伴って、切離しを行なった。

2.1.3. 計測および試験項目 コンクリートの硬化過程での熱特性を把握する目的で、図-2に示すような位置にCu-Co熱電対、埋込み型ひずみ計、有効応力計を設置し、コンクリート温度が外気温に近くなるまで測定を行なった。

フレッシュコンクリートの性状を把握するために、約5バッチに1回の頻度で、コンクリート温度、スランプ、空気量の測定を実施した。また、硬化コンクリートの品質を調査するために、標準養生供試体φ10cm×20cmの圧縮試験と静弾性係数の測定（材令3, 7, 28, 56, 91日）、水中打設試験体から採取したφ10cmコア供試体の目視観察と圧縮試験、静弾性係数の測定（材令28, 91日）を実施した。なお、コアは図-1に示すように、試験体中央部、長辺部付近、鉄筋籠内の短辺部付近から各試験材令直前に深さ方向に1本ずつ採取した。

2.2. 使用材料および配合

2.2.1. 使用材料 セメントには普通ポルトランドセメント（NP）を基準に、高炉セメントB種（BB）とマスコン型高炉セメントB種（MKB）の2種類の低発熱セメントを用いた。表-1に使用したセメントの性状を示す。粗骨材には最大寸法20mmの秩父産砕石（比重2.71, FM 6.71）、細骨材には木更津産山砂（比重2.69, FM 2.57, 吸水率2.44%）を用いた。

混和剤には次のものを使用した。減水剤には、リグニンスルホン酸誘導体を主成分とする遅延形のAE減水剤（R）と、ナフタレンスルホン酸と変性リグニンの共縮合物に特殊リグニンを配合したスランプロス低減型の高性能減水剤（HR）、および高縮合トリアジン系化合物を主

成分とする高性能減水剤 (HN) を各々用いた。流動化剤には、スランプロス低減型流動化剤 (FR: 主成分は HR と同様) を使用し、空気量調整用に特殊アニオン系 AE 助剤を併用した。また、分離低減剤には、セルロースエーテルを主成分とするもの (SCA) を用いた。

2.2.2. コンクリートの配合 コンクリートの配合は表-2 に示す 6 種類である。No. 1, 2, 6 は普通セメント (NP) を用いた配合であり、このうち No. 6 は分離低減剤を混入させた配合となっている。No. 3, 4, 5 は低発熱セメントを用いた配合であり、No. 3, 4 は高炉セメント (BB), No. 5 はマスコン型高炉セメント (MKB) を用いたものである。水セメント比については、No. 1~No. 4 は従来の大深度地下連続壁コンクリートと同程度で、 $W/C=45\%$ 、No. 5 は高強度配合で $W/C=30\%$ 、No. 6 は分離低減剤の適用効果を考慮して単位セメント量を低減させ、 $W/C=60\%$ とした。なお、No. 1, 3 は従来軟練りコンクリート、No. 2, 4, 5 は流動化コンクリートとなっている。スランプは、No. 1~No. 4 については従来地下連続壁コンクリートの実績を考慮して 19 cm としたが、No. 5, 6 については比較的粘性が大きいため、施工性を考慮して目標スランプを 22 cm~23 cm と若干大きくした。

3. 実験結果と考察

3.1. フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの性状

3.1.1. フレッシュコンクリートの性状 フレッシュコンクリートの試験結果を表-3 に示す。各配合ともスランプは目標値 (表-2 参照) を上回っているが、これは、打設時の気温が高く、スランプロスが大きいことを懸念し、単位水量を若干大きくとったためである。また、空気量については、試験結果が目標値を下回っている配合があるが、これは練り上り温度が高く、AE 剤の空気連行効果が低下したためと考えられる。なお、試験は各配合とも 3~4 回ずつ実施したが、その変動はスランプで最大約 2 cm、空気量で最大約 1°C であり、製造時のバッチ間の品質変動は比較的小さいことが確認された。

3.1.2. 硬化コンクリートの性状 各種コンクリートでの標準養生供試体の圧縮強度と材令の関係を図-3 に示す。同一水セメント比 ($W/C=45\%$) の配合に着目すると、NP を用いた No. 1, No. 2 に比べて、BB を用いた No. 3, No. 4 は軟練りコンクリート (No. 3) および流動化コンクリート (No. 4) とともに 7 日以後の強度発現が大きく、高炉セメントを用いた場合の長期強度における有利性が認められる。また、水セメント比を 30% と小さくした MKB を用いた No. 5 についても NP を用い

種別	比重	比表面積 (cm ² /g)	スランプ量 (%)	フロー値 (cm)	始発 (h-min)	終結 (h-min)	酸化マグネシウム (%)	三酸化イオウ (%)	強熱減量 (%)
NP	3.16	3.170	—	258	2-29	3-47	1.3	2.0	0.6
BB	3.05	3.580	40	268	3-02	4-30	3.8	1.5	0.9
MKB	3.00	3.750	56	269	3-43	4-56	4.1	1.1	1.0

表-1 セメントの物理性状および化学成分

配合 No.	セメントの種類	目標値				配合								
		スランプ (cm)		空気量 (%)		W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				水和剤		分離低減剤 (kg/m ³)
		ベース	流動化	ベース	流動化			水	セメント	細材	粗材	減水剤 C X %	遅効化剤 C X %	
1	NP	19	—	5	—	45	167	371	780	1.017	R	—	—	
2	NP	8	19	5	5	45	49	151	336	884	981	R	FR	—
3	BB	19	—	5	—	45	162	360	785	1.023	R	—	—	
4	BB	8	19	5	5	45	148	329	884	984	R	FR	—	
5	MKB	9	22	5	5	30	42	120	400	762	1.123	HR	FR	—
6	NP	23	—	5	—	60	45	192	320	806	1.050	HN	—	SCA

表-2 コンクリートの種類と配合

配合 No.	セメントの種類	フレッシュコンクリートの試験結果					
		温度 (°C)		スランプ (cm)		空気量 (%)	
		ベース	流動化	ベース	流動化	ベース	流動化
1	NP	29.0	—	20.0	—	3.5	—
2	NP	—	27.8	12.0	21.5	5.5	5.0
3	BB	28.0	—	20.5	—	3.5	—
4	BB	28.0	23.8	8.5	20.0	5.0	5.1
5	MKB	28.5	28.5	11.0	21.5	4.2	3.4
6	NP	27.9	—	23.0	—	3.6	—

表-3 フレッシュコンクリートの試験結果

たものに比べて 7 日以後で大きな強度発現を示している。分離低減剤を混入した No. 6 は水セメント比が大きいため、他の配合より発現強度は小さいが、強度増加の割合は No. 1 と近似した傾向がみられる。図-4 に各種コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。圧縮強度と静弾性係数の関係は、セメントの種類や水セメント比にかかわらずほとんど変わらない傾向にあることが認められた。

3.2. 水中打設に伴うコンクリートの品質

3.2.1. 採取コアの外観からみたコンクリートの品質

コンクリートを水中打設する場合、トレミー管を使用しても最初のコンクリートは直接水に接触することになり、品質の変動が生じやすい。なお、この実験ではトレミー管内部のコンクリート自重と外部の水圧との圧力差が少ないため、実際より流動性が小さい条件となってい

る。図-5に、採取したコアの状態からみた各試験体の品質変動を示す。トレミー管を設置した中央部(A)付近のコンクリートは配合の種類にかかわらずほぼ下端まで良好な品質を示している。これに対し、長辺部(B)や短辺部(C)付近のコンクリートは、分離低減剤を添加したNo. 6を除き、下端付近において品質変動が認められる。その程度は、No. 1~No. 4ではセメントの種類や流動化剤の有無に起因するセメント量の相異の影響は認められずほぼ同様であるが、No. 5では品質変動がみられる部分は他の試験体より少ない。No. 5の品質変動が少ないのは、単位セメント量が400 kg/m³と多く、水セメント比が小さく高性能減水剤や流動化剤を多量に使用したため粘性が増加し、分離抵抗性が高まったためと思われる。なお、分離低減剤を使用したNo. 6は単位セメント量が320 kg/m³と他の試験体よりも少ないにもかかわらず品質が良好であった。

3.2.2. コアの圧縮強度 各種コンクリートの水中打設試験体から採取したコアの長さ方向の強度の変動を図-6に示す。強度の変動は、長さ約2.5mのコアを上、中、下段に3分割して各段での平均強度を求め、標準養生供試体に対する強度比で示したものであり、図-6はこれらをコアの平面採取位置ごとにまとめ、各配合で比較したものである。中央部(A)では各配合とも水中打設時の分離の影響はみられず、No. 1~No. 4においては下段ほど強度が高くなる傾向が認められる。この傾向は、ブリージングや自重による圧密作用によるものと思われ、ブリージングのほとんど生じないNo. 5, No. 6では下部の強度増加は少ないものの深さ方向に強度が一定している。長辺部および短辺部では配合によっては下段部において強度比の低下や、コアの採取不能などが生じており水中打設による分離の影響がみられる。長辺部をみると、No. 3, No. 6を除き、下端から約60cm以下の部分で強度の低下が認められる。さらに、鉄筋籠が挿入されている短辺部では各試験体とも下端部の強度が低下している。これらは、直接水中を流動することによる分離、鉄筋による流動性の阻害などの影響を受けたためと考えられる。なお、分離低減剤を使用したNo. 6は水中での流動距離の長い周辺部においても材料分離に伴う下端部の強度低下はみ

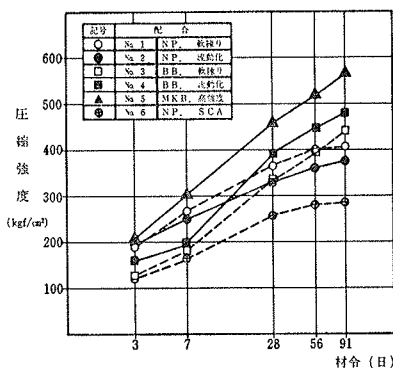


図-3 各種コンクリートの強度発現性状 (標準養生)

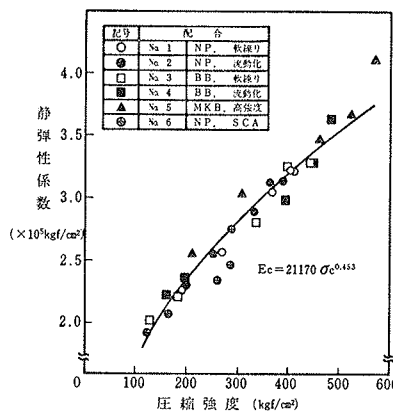


図-4 圧縮強度と弾性係数

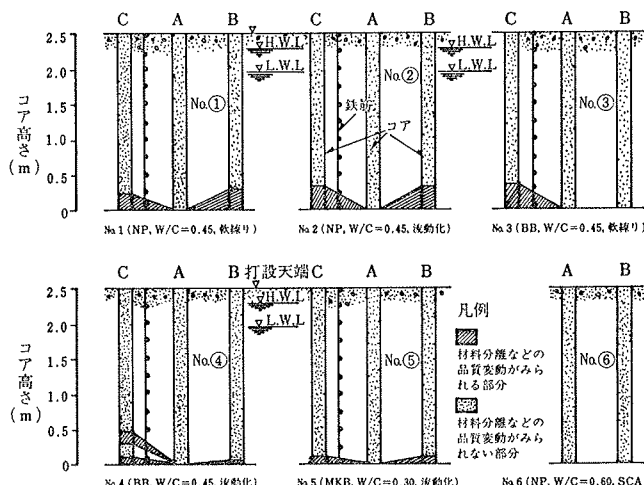


図-5 採取コアの外観からみたコンクリートの品質

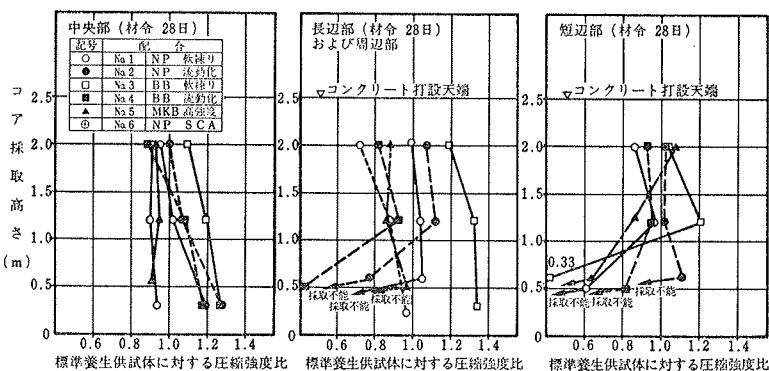


図-6 各種コンクリート試験体の上下方向の品質変動

れない。従って、分離低減剤の使用は、トレミー管を用いた水中コンクリートの下端部の品質を確保する上で有効であると思われる。

3.3. 水中コンクリートの熱特性

3.3.1. 低発熱セメントの使用による水和熱の低減

各試験体のコンクリートの温度変化を図-7に示す。打設後の温度上昇量は普通セメントを用いたNo. 1が最も高く約37°Cであるのに対し、低発熱セメントを用いた

No. 3~No. 5 では高強度配合も含め、約20℃と低い値を示した。また、同種のセメントであっても流動化コンクリートの方が軟練りコンクリートより温度上昇量が小さくなる傾向が認められる。図-8に各種コンクリートの断熱温度上昇試験結果を示す。最高断熱温度上昇は軟練りコンクリートではNo. 3がNo. 1を若干上回り、流動化コンクリートではNo. 2, 4, 5と

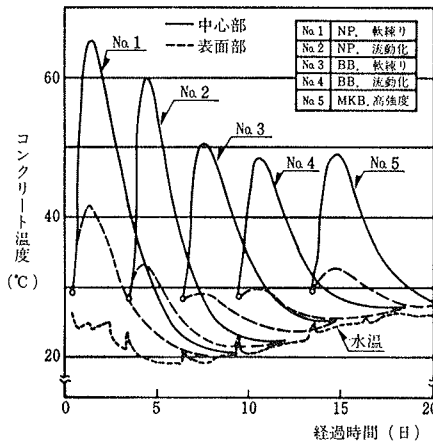


図-7 各試験体の温度上昇

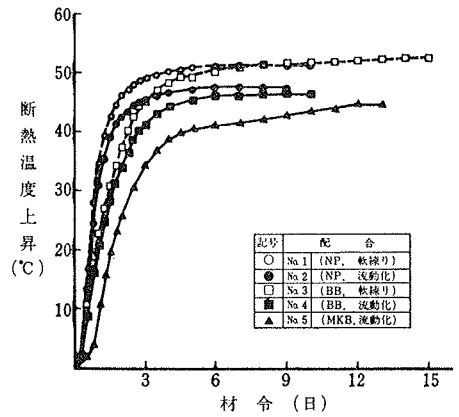


図-8 断熱温度上昇試験結果

もほぼ同等であり、試験体の計測結果と異なる傾向を示す。しかし、断熱温度上昇試験より得られる発熱速度係数 α と試験体の温度上昇量との関係を示した図-9をみると、低発熱セメントを用いたコンクリートの発熱速度は普通セメントを用いたものより小さく、放熱条件下における試験体の温度上昇量は発熱速度に影響を受けることが認められる。図-10に各試験体の単位強度および単位セメント量当りの温度上昇量を示す。BBおよびMKBを用いたコンクリートはNPを用いたものに比べ、温度上昇量が5割程度低くなっており、温度ひびわれの低減上これらの低発熱セメントの使用が有効と思われる。

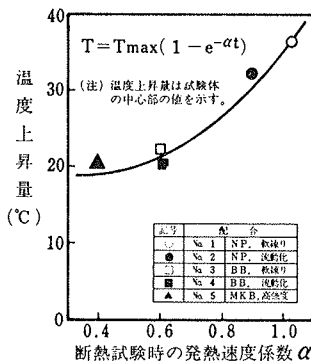


図-9 温度上昇と断熱試験結果の関係

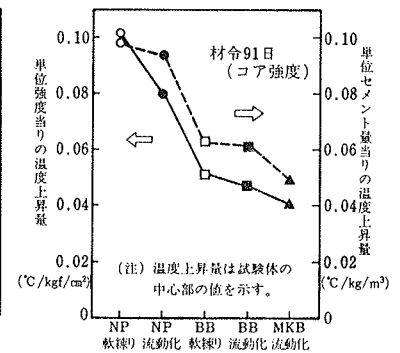


図-10 単位強度、単位セメント量当りの温度上昇量

3.3.2. 温度応力 各試験体の有効応力の測定結果を図-11に示す。試験体内外の温度差すなわち内部拘束により温度応力が生じ、NPを用いたNo. 1では温度上昇時に表面部で約2 kg/cm²、下降時に中心部で約9 kgf/cm²の引張応力が生じる。これに対し、低発熱セメントを用いたNo. 3, 4, 5の表面部の引張応力は1 kgf/cm²以下となっている。なお、内部拘束状態での中心部の引張応力は温度降下量に比例すると考えると、普通セメントを用いた試験体に比べ、低発熱セメントを用いた試験体の中心部の引張応力はさらに小さいものと推定される。

4. まとめ

この研究で得られた事項をまとめると以下のとおりである。

- (1) 水中打設時のコンクリート下端の強度の変動はトレミー管の先端から離れた所で生じるが、流動化コンクリートとしてセメント量を減少させたものや低発熱セメントを用いたものでも、普通セメントを用いた軟練りコンクリートに比べて、その程度はほとんど変わらない。
- (2) 分離低減剤を使用したコンクリートは水中流動時の品質変動がほとんどなく、硬化コンクリートの強度は深さ方向、水平方向で均一である。

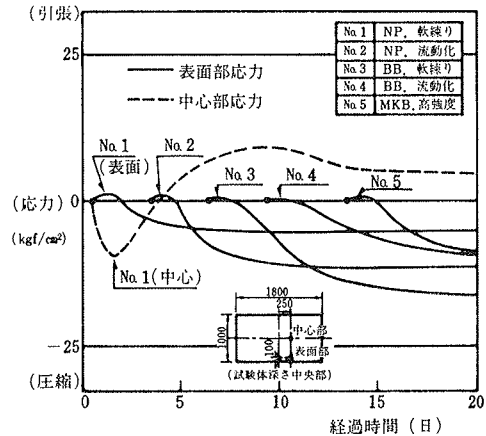


図-11 各試験体のコンクリート応力

(3) 低発熱セメントを用いた水中コンクリートは温度上昇量が小さく、温度ひびわれの低減上有効である。特に水セメント比30%程度の高強度水中コンクリートであっても、低発熱セメントを使用することにより、温度低減効果が認められる。

参考文献

- 1) 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1), (その2), 大林組技術研究所報, No. 32, (1986), pp. 97~106