

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使用した高強度コンクリートの基礎的性質——

青 木 茂 十 河 茂 幸
芳 賀 孝 成

Mix Proportions of Diaphragm-Wall Concrete (Part 2)

——Characteristics of High-Strength Concrete
Containing Large Quantity of Superplasticizer——

Shigeru Aoki Shigeyuki Sogo
Takashige Haga

Abstract

Diaphragm walls are being increasingly used not only as temporary walls but also as structural walls. When using in parts of a structure it is necessary for the diaphragm-wall concrete to be high-strength concrete which is workable and has the characteristic of low heat of hydration. The objective of this study was to investigate the possibility of making diaphragm-wall concrete high-strength using a superplasticizer and low-heat-type cement with the characteristic of reduced heat of hydration. Based on the study results, it was possible to confirm that high-strength concrete that is workable can be made with water-cement ratio of 0.30. In this study, compressive strengths at 4-week age of normal portland cement concrete were 650 kg/cm² and portland blast-furnace slag cement concrete 430 to 630 kg/cm².

概 要

従来、地下連続壁は仮設壁として使用される場合が多かったが、近年、永久構造物としての実施例も多くなってきている。永久構造物として利用する場合は、設計施工上高強度コンクリートとするのが良いが、一方、水和熱による壁体の温度応力の低減を考慮したコンクリートとする必要もある。この研究は、高性能減水剤の単位水量削減効果を利用し、水セメント比を低減することにより壁体コンクリートの高強度化を目標とするとともに、水和熱による壁体温度応力の低減のため、各種低発熱型セメントを用いたコンクリートの諸性状を比較した。この結果、所要のワーカビリティをもった水セメント比30%程度の高強度連壁コンクリートの製造が可能であることが確認でき、標準養生供試体の圧縮強度は普通セメント配合の4週材令で650kg/cm²程度、高炉系セメント配合で400kg/cm²~630kg/cm²であり、強度特性上も満足すべき結果を得ることができた。

1. まえがき

現状の地下連続壁の利用形態は、山留め壁体、建築構造物での地下外壁、場所打ちぐいとしての基礎ぐいなど種々のものがあり、その用途は広い。適用に際しては、土木および建築を含め、配合上の水セメント比を45%~60%程度としていることが多く、これに見合う発現強度の範囲で機能上の目的を達している。

しかし、大深度構造物および特殊構造物など高強度域

での永久構造物への利用が考えられる。これらの用途に対処するためには、トレミー打設に必要なワーカビリティの確保を前提に、壁体コンクリートの高強度化が必要になる。高強度化の方法としては、高性能減水剤の使用による水セメント比の低減が一方策として挙げられる。

このような観点から、地下連続壁コンクリートの高強度化の可能性を材料および配合の面から検討したものである。検討にあたっては、高性能減水剤の使用を条件に、富配合化による水和熱上昇を低減するため各種低発熱型

セメントをパラメーターとし種々の試験を行なった。

2. 実験概要

2.1. 材料

セメントには普通ポルトランドセメントと3種類の低発熱型セメントを用いた。低発熱型セメントは高炉セメントB種 (BB), マスコン型高炉セメント (MKB) およびフライアッシュ混入マスコン型高炉セメント (FMKB) である。なお, 各セメントの性状一覧表を表-1に示す。

粗骨材には最大寸法 20 mm の秩父産砕石 (F・M=6.71, 比重2.78, 吸水率0.84%), 細骨材には木更津産山砂 (F・M=2.69, 比重2.60, 吸水率1.9%) を使用した。

混和剤にはベース用混和剤, 流動化用混和剤ともナフタレンスルホン酸と変性リグニンの縮合物に特殊リグニンを配合した高性能減水剤を用いた。高性能減水剤はプラントから工事現場までの運搬, トレミーによる打設など諸条件を考慮し, スランプロス低減型 (遅延型) とした。特に, ベース用混和剤として用いた高性能減水剤は, 多量添加が可能な高強度用高性能減水剤とした。なお, この報告においては, 流動化に用いる高性能減水剤を流動化剤と呼ぶことにする。

2.2. 配合

配合表を表-2に示す。

全配合とも, 高強度用高性能減水剤によりベースコンクリートを練り上げ, これに流動化剤を後添加し流動化させたものである。

目標スランプは, 水中コンクリートのトレミーによる打設実績および富配合コンクリートの粘性を考慮し, 流動化後で 22 cm とした。ベースコンクリートのスランプは 6 cm, 9 cm, 12 cm の3系列とした。目標空気量は耐久性を考慮し, ベース, 流動化とも $5 \pm 1\%$ とした。

水セメント比は30%とした。細骨材率は所要のワーカビリティが得られるように, 単位セメント量の増減に応じて変化させた。

2.3. 混練り方法

混練りは, JIS 規格および土木学会規準「流動化コンクリート指針 (案)」に準拠して行なった。

ミキサーは強制式ミキサー (容量 100 l) を用い, 1 バッチは 70 l とした。混練り時間は, ベースで 90 秒, 流動化で 30 秒とした。流動化剤の添加時期はベースコンクリート注水 15 分後とした。

2.4. 試験項目

試験は, フレッシュコンクリートの性状, 硬化コンク

| 種別 | 比重 | 比表面積 (cm ² /g) | スランプ (%) | FA量 (%) | フロー値 (cm) | 結露 (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 |
| FMKB | 2.78 | 3.430 | 45 | 20 | 270 | 4-39 | 5-52 | 3.8 | 0.9 | 0.5 |

表-1 各セメントの性状一覧表

| 配合 No. | セメントの種類 | 目標値 | | | | W/C (%) | S/a (%) | 示方配合 | | | | ベース混和剤 (C×%) | 流動化混和剤 (C×%) |
|--------|---------|-----------|-----|---------|-----|---------|---------|------|-----|-----|-------|--------------|--------------|
| | | スランプ (cm) | | 空気量 (%) | | | | W | C | G | G | | |
| | | ベース | 流動化 | ベース | 流動化 | | | | | | | | |
| ① | NP | 6 | 22 | 5 | 5 | 30 | 40 | 131 | 437 | 707 | 1.137 | 2.5 | 1.0 |
| ② | | 9 | 22 | 5 | 5 | 30 | 39 | 146 | 487 | 660 | 1.101 | 2.0 | 0.8 |
| ③ | | 12 | 22 | 5 | 5 | 30 | 38 | 164 | 547 | 606 | 1.056 | 1.5 | 0.6 |
| ④ | BB | 9 | 22 | 5 | 5 | 30 | 40 | 140 | 467 | 684 | 1.095 | 2.0 | 0.8 |
| ⑤ | MKB | 6 | 22 | 5 | 5 | 30 | 42 | 116 | 387 | 770 | 1.137 | 2.0 | 1.0 |
| ⑥ | | 9 | 22 | 5 | 5 | 30 | 42 | 120 | 400 | 762 | 1.123 | 2.0 | 0.8 |
| ⑦ | | 12 | 22 | 5 | 5 | 30 | 42 | 124 | 413 | 751 | 1.109 | 2.0 | 0.6 |
| ⑧ | FMKB | 9 | 22 | 5 | 5 | 30 | 42 | 120 | 400 | 749 | 1.106 | 1.8 | 0.8 |

表-2 配合表

リートの強度特性および熱特性について行なった。

フレッシュコンクリートについては, 練上がりコンクリートのスランプ, 空気量, 温度の各測定試験, ブリージング試験および凝結時間測定のためのプロクター貫入抵抗試験を実施した。さらにスランプ, 空気量について, 練上がり直後, 30分後, 60分後, 90分後の経時変化を測定した。

硬化コンクリートについては, 標準養生供試体の圧縮強度試験と静弾性係数の測定を所要材令について実施した。材令は3日, 7日, 56日, 91日の5材令とした。なお, 静弾性係数の測定はコンプレッソメーターを用いて行なった。

熱特性については, 断熱温度上昇試験を実施した。

3. 試験結果と考察

3.1. フレッシュコンクリートの性質

(1) 単位水量と単位セメント量

各種セメントについてベーススランプの単位水量を図-1に示す。普通セメントに比べ高炉系セメントは著しい減水効果が認められる。ベーススランプが 9 cm の配合に着目すると, NP に比べ BB で4%, MKB, FMKB, で18%程度の単位水量の減少となっている。これは, 単位セメント量が $C > 400 \text{ kg/cm}^2$ の富配合の領域であるため, 高炉系セメントとフライアッシュのもつ減水効果が顕著に現われたものと考えられる。

単位セメント量 (図-2) については, NP に対し BB では 20 kg/m^3 , MKB, FMKB では 90 kg/m^3 程度のセメント量の減少となっている。低発熱特性を考え合わせ

ると、高炉系セメントとフライアッシュの使用は水和熱の温度上昇抑制に有効であると考えられる。

NP と MKB の単位水量とベーススランプの関係を図-3 に示す。NP ではベーススランプが6~12 cm の範囲で、単位水量は 30 kg/m³ の変動を示し、MKB では 10 kg/m³ 程度の変動を示している。このことより、MKB を用いる単位水量で所要のワーカビリティを得ようとする、若干の単位水量の変動で、ベーススランプの変動が相当大きくなることが考えられる。

(2) 流動化剤添加率

流動化剤添加率とスランプ増大量の関係を図-4 に示す。スランプ増大量と流動化剤添加率の関係は若干のパラッキはあるが、ほぼ比例関係にあると考えられる。すなわち同一水結合材比なら、スラグはセメントと考えると、流動化剤の添加率はC+スラグに対する重量%で管理できるようである。なお、図-4 には W/C=45% (C=300~340 kg/m³) の場合の流動化剤添加率とスランプ増大量の関係をも示した。同一添加率でも W/C=30% と 45% ではスランプ増大量がかなり違うが、これは単位セメント量の差に伴う流動化剤の絶対混入量の差によるものと考えられる。

(3) スランプと空気量の経時変化

各種のセメントを用いた場合のスランプと空気量の経時変化を図-5 および図-6 に示す。スランプはセメントの種類にかかわらず全体的にロスが少なく、90分経過後でも 1 cm~3 cm のロスとなった。これは、単位セメント量が多く、スランプロス低減型流動化剤の混入量が多くなったことによるものと考えられる。空気量は経過時間とともに直線的に減少する傾向にあり、その傾向はセメントの種類にほとんど影響されない。

(4) ブリージング

ブリージングはこの実験においては全く認められなかった。高性能減水剤を用いない軟練りコンクリートのブリージング率と水セメント比の関係に、実験結果をプロットしたものを図-7 に示す。なお、スランプを一定とし、単位水量および単位セメント量の両者をパラメータとしたため、これらとブリージング率との関係を調査することはこの実験ではできなかった。しかし、同一スランプ、同一空気量の条件で行なった実験結果では、水セメント比とブリージング率の関係は比例関係にある。この原因として、水セメント比が小さくなるにつれ、余剰水が減少することが考えられる。

(5) 凝結性状

ベーススランプ 9 cm でのプロクター貫入抵抗試験結果を各種のセメントについて図-8 に示す。始発は MKB が速く、NP, BB, FMKB の順となっている。MKB が

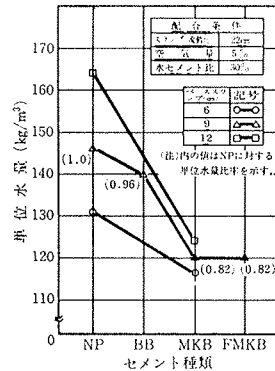


図-1 セメント種類と単位水量

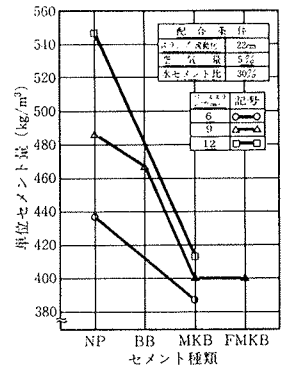


図-2 セメント種類と単位セメント量

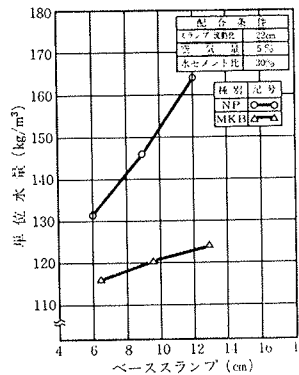


図-3 単位水量とベーススランプ

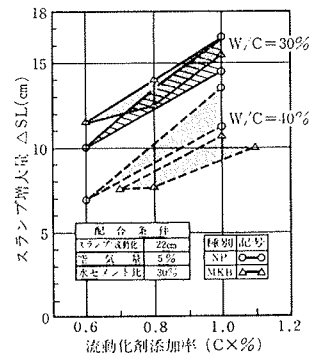


図-4 流動化剤添加率とスランプ増大量

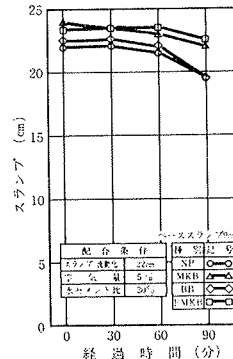


図-5 スランプ経時変化

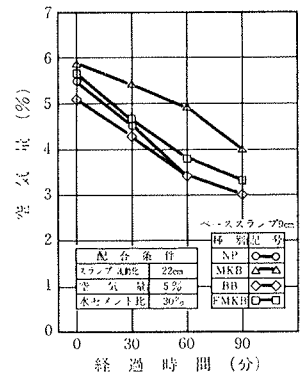


図-6 空気量経時変化

NP より速いのはスランプロス低減型流動化剤の添加量が少なく、結果として遅延成分の混入量が少なかったためと考えられる。ベーススランプが 6 cm および 12 cm の場合においても同様な傾向が認められた。ちなみに、ベーススランプが 9 cm の場合の流動化剤の混入量は、MKB で約 3.2

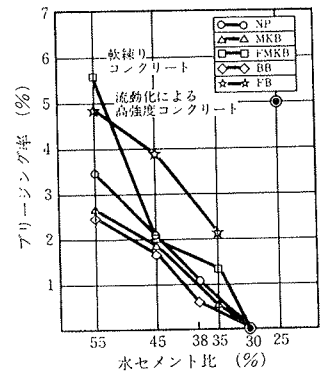


図-7 ブリージング率と水セメント比

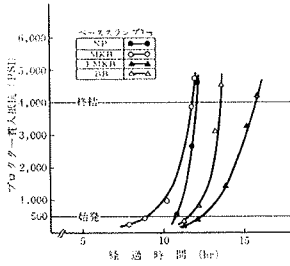


図-8 プロクター貫入抵抗試験結果 (その1)

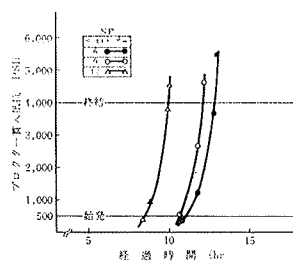


図-9 プロクター貫入抵抗試験結果 (その2)

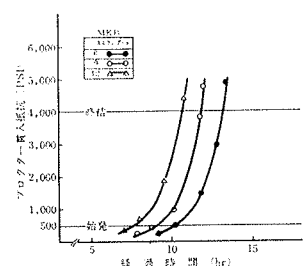


図-10 プロクター貫入抵抗試験結果 (その3)

kg/m³, NP, BB で約 3.8 kg/m³, FMKB で約 3.2 kg/m³であった。FMKB が遅いのはフライアッシュの添加による凝結遅延の影響のためと考えられる。なお, NP と MKB について各ベーススランプごとのプロクター貫入抵抗試験結果を図-9 および図-10 に示した。両者とも始発はベーススランプが大きいほど速くなっており, 高性能減水剤の混入量の差が現われている。なお, 始発から終結に至るまでの時間にはベーススランプによる差はほとんど現われていない。

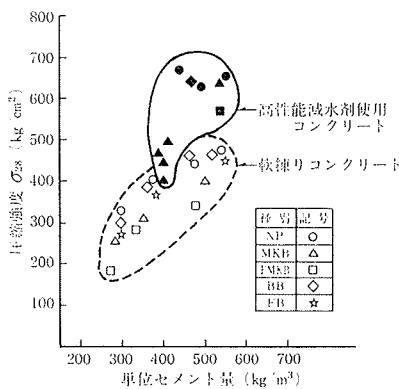


図-11 圧縮強度と単位セメント量

3.2. 硬化コンクリートの性質

(1) 圧縮強度と単位セメント量

高性能減水剤を用いない軟練りコンクリートおよび低水セメント比の流動化コンクリートの圧縮強度(材令28日)と単位セメント量の関係を図-11に示した。同じ単位セメント量でも高性能減水剤を用いることにより, W/C を減少させ強度発現を軟練りコンクリートよりも高くすることが可能であることがわかる。

(2) 圧縮強度と材令

圧縮強度試験結果を表-3に示す。材令28日をみると, 普通ポルトランドセメント(NP)で650 kg/cm², 高炉セメントB種(BB)で630 kg/cm²程度と高い強度発現を示し, マスコン型高炉セメント(MKB)は470 kg/cm²程度の強度発現を示した。なお, フライアッシュ混入マスコン型高炉セメント(FMKB)は400 kg/cm²程度と若干低い値を示した。しかし, 材令91日の長期材令をみると, FMKBで550 kg/cm², MKBで600 kg/cm²程度と高い強度の伸びを示している。NP, BBは700 kg/cm²~750 kg/cm²程度と非常に高い強度発現を示した。

各種セメントを用いた圧縮強度と材令の関係を図-12

| セメント種 | スランプ(cm) | | 材 令 | | | | | |
|-------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| | ベース | 流動化 | 3日 | 7日 | 28日 | 56日 | 91日 | |
| NP | 6 | 22 | 365 | 520 | 666 | 724 | 764 | |
| | 9 | 22 | 374 | 500 | 626 | 678 | 716 | |
| | 12 | 22 | 396 | 492 | 643 | 666 | 704 | |
| MKB | 6 | 22 | 187 | 317 | 464 | 548 | 590 | |
| | 9 | 22 | 179 | 299 | 444 | 519 | 566 | |
| | 12 | 22 | 206 | 343 | 495 | 605 | 643 | |
| BB | 9 | 22 | 277 | 435 | 634 | 721 | 763 | |
| FMKB | 9 | 22 | 132 | 250 | 401 | 493 | 549 | |

表-3 圧縮強度試験結果

に示す。材令28日までの強度発現はNPが高く, それ以後はBBの強度が高い結果となった。強度の伸びは, BBが7日以後, MKB, FMKBは28日以後長期にわたり高いのに比べ, NPは他のセメントより長期強度の伸びが小さい結果となった。

これは, 高炉スラグの潜在水硬性, フライアッシュのポゾラン反応によるものと考えられ, 圧縮強度を長期材令でとらえた場合の高炉系セメントの有利性を現わすものといえる。

NP, MKBについて各ベーススランプごとの圧縮強度と材令の関係を図-13と図-14に示した。両者ともベーススランプの違いによる圧縮強度の有意差はほとんど認められなかった。

(3) 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係

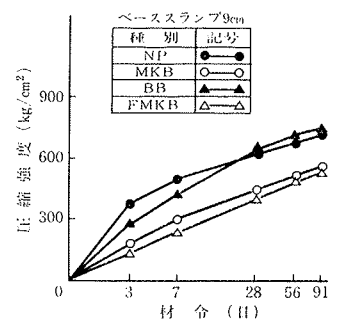


図-12 圧縮強度と材令 (1)

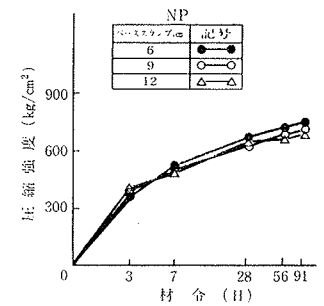


図-13 圧縮強度と材令 (2)

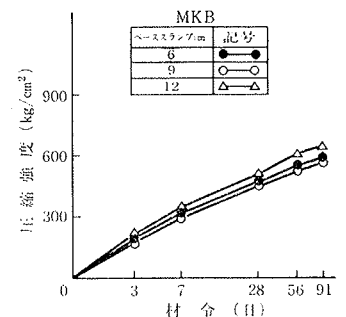


図-14 圧縮強度と材令 (3)

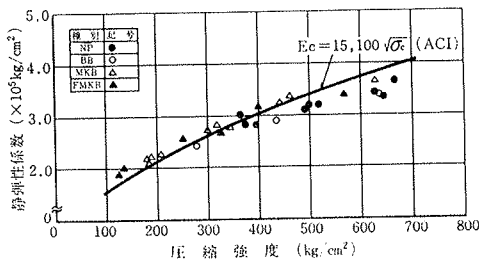


図-15 圧縮強度と静弾性係数

数の関係を図-15に示す。圧縮強度と静弾性係数の関係は ACI の提案式に近似できるようである。

3.3. 熱特性

断熱温度上昇試験結果を図-16に示す。地下連続壁コンクリートとして実績の多い普通セメント(NP)を用い、スランブを同一条件とした水セメント比45%程度の軟練りコンクリートの試験結果も合わせて図中に示した。水セメント比を低減させた高強度コンクリートの断熱温度上昇は、普通セメントを用いた軟練りコンクリートに比べ NP, BB については高強度化したものが高く、MKB, FMKB については逆に低い結果が得られた。温度上昇量を最小二乗法により材令の指数関数に近似させた場合の係数を図-17に示した。温度上昇式の諸係数を用い、同一単位セメント量での最高上昇温度を略算すると、NP と MKB はほぼ同一の値を示し、BB は高く、FMKB は低い結果となった。これは、MKB の温度低減効果はセメント量の削減効果、FMKB はフライアッシュの低発熱特性によるものと推定できる。

各セメントにつき、単位強度当りの水和熱温度の計算値を図-18に示す。材令7日では、高炉系セメントは、NP に比べ高い数値を示すが、材令91日では両者はほぼ近似し、FMKB では低い値となっている。これは、圧縮強度を長期材令でとらえた場合、高炉系セメントの使用が水和熱低減に有利であることを示すものと思われる。

4. まとめ

地下連続壁コンクリートに高性能減水剤を使用することにより、高強度でかつ所要のワーカビリティをもったコンクリートの製造が可能であり、材令28日の圧縮強度が普通セメントで 650 kg/cm² 程度、高炉系セメントで 400 kg/cm²~630 kg/cm² 程度の高強度化が可能であることが判明した。さらに高炉系セメントの使用は高強度コンクリートにおいても水和熱の低減に有効であることが確認できた。

この実験で得られた諸事項を以下に示す。

(1) 高強度コンクリートを製造する場合、高炉系セメントとフライアッシュの使用が単位水量と単位セメント

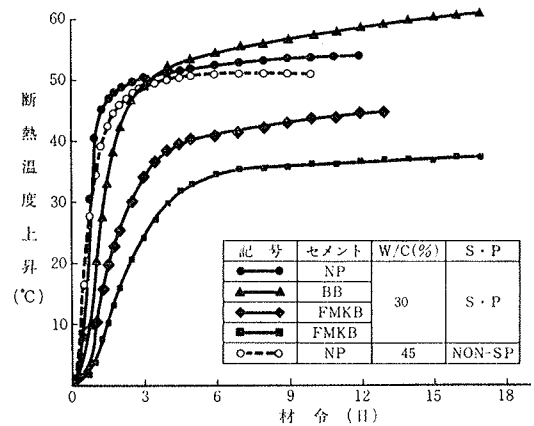


図-16 断熱温度上昇試験結果

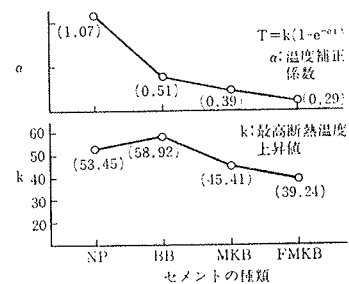


図-17 断熱温度上昇式の諸係数

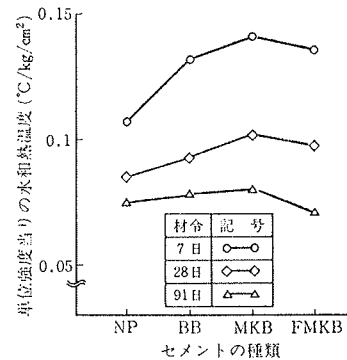


図-18 単位強度当りの水和熱温度

量の削減に有効であり、低発熱性を考慮すると、水和熱の低減に役立つものと考えられる。

(2) 高強度コンクリートに高炉系セメントを用いた場合、普通セメントに比べてベーススランブの変動割合が大きいことを考慮して、スランブの目標値を設定する必要がある。

(3) 流動化剤の添加率とスランブ増大量は一般に比例関係にあるが、同一添加率でも富配合の場合には流動化剤の混入量が多くなり、結果としてスランブ増大効果が通常の場合より大きくなる傾向にある。

(4) 水セメント比が30%の領域ではブリージングはほとんどない。これは地下連続壁コンクリートの品質の面で有利な事項であると思われる。

(5) 高強度コンクリートでも高炉系セメントを使用する場合は、強度を長期材令でとらえた方が有利である。