

論文

[1066] 混和材を多量添加した超低熱特殊水中コンクリートの性質

正会員○十河茂幸 (大林組技術研究所)

正会員 小沢郁夫 (大林組土木技術部)

正会員 新開千弘 (大林組技術研究所)

芳賀孝成 (大林組技術研究所)

1. まえがき

特殊水中コンクリートは、従来のプレバッドコンクリートにかわり、大規模プロジェクト工事への採用が増加しつつある。特殊水中コンクリートの大きな特徴は、水中分離抵抗性が大きいことであるが、より均一なコンクリートを施工するためには、水中での打継ぎは極力少なくすることが望ましく、一回に打設されるコンクリート量は必然的に多くなる。一方、その配合は、特殊混和剤を使用するといえども、流動性や品質を確保するために、単位セメント量を無制限に少なくすることはできず、セメントの水和熱に伴う温度ひびわれの発生が懸念される。

そこで、本研究では、高炉スラグやフライアッシュを高添加し、結合材量が多いが温度上昇の小さい超低発熱性の混合セメントを使用した特殊水中コンクリートを提案し、そのフレッシュ性状、硬化性状および断熱温度上昇量の実験結果をもとに、超低発熱性混合セメントの特殊水中コンクリートへの適用性を検討した。

2. 実験概要

2.1 超低発熱性混合セメント

使用した超低発熱性混合セメントは、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを、普通、中庸熱、早強ポルトランドセメントに高添加したもので、それらの混合比率を表一に示す。

表一 使用セメントの化学分析結果

| No | セメントの種類 | 略号 | 結合材比率 (%) | | | 化 学 成 分 (%) | | | | | | | | 7日量 (%) R ₂ O | |
|----|---------|----------|-----------|----|----|-------------|------|--------|----------|-----|---------|----------|-------|-----------------------------|------|
| | | | P | B | F | 強熱減量 | 不溶残分 | 二酸化ケイ素 | 酸化アルミニウム | 酸化鉄 | 酸化カルシウム | 酸化マグネシウム | 三酸化硫黄 | | 合計 |
| 1 | 普通系 | NB50 | 50 | 50 | 0 | 1.2 | 0.1 | 28.0 | 10.2 | 1.3 | 50.8 | 5.0 | 1.6 | 98.2 | 0.41 |
| 2 | 二成分 | NB90 | 10 | 90 | 0 | 0.8 | 0.2 | 31.2 | 13.4 | 0.8 | 43.1 | 6.1 | 2.0 | 97.6 | 0.34 |
| 3 | 中庸熱系 | MB40-F20 | 40 | 40 | 20 | 0.4 | 16.2 | 23.4 | 8.4 | 1.8 | 42.8 | 3.4 | 2.0 | 98.4 | 0.47 |
| 4 | | MB25-F50 | 25 | 25 | 50 | 1.7 | 37.9 | 17.2 | 6.9 | 2.0 | 29.0 | 2.3 | 1.5 | 98.5 | 0.43 |
| 5 | 三成分 | MB20-F60 | 20 | 20 | 60 | 2.3 | 45.9 | 14.8 | 6.5 | 2.2 | 23.6 | 2.0 | 1.4 | 98.7 | 0.39 |
| 6 | 早強系 | HB60-F25 | 15 | 60 | 25 | 0.5 | 19.1 | 24.2 | 10.3 | 1.1 | 36.3 | 4.5 | 1.9 | 97.9 | 0.52 |
| 7 | 三成分 | HB48-F40 | 12 | 48 | 40 | 1.2 | 29.7 | 21.1 | 8.6 | 1.5 | 30.3 | 3.9 | 1.8 | 98.1 | 0.49 |

P:ポルトランドセメント, B:高炉スラグ, F:フライアッシュ, N:普通系セメント, M:中庸熱系セメント, H:早強系セメント

表二 セメントの物理試験結果

| セメントの略号 | 比重 | 比表面積 ブレン (cm ² /g) | フロー 値 (cm) | 曲げ強さ (kgf/cm ²) | | 圧縮強さ (kgf/cm ²) | | 水 和 熱 (cal/g) | | |
|----------|------|-------------------------------------|------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|-----|------------------|------|------|
| | | | | 28日 | 91日 | 28日 | 91日 | 7日 | 28日 | 91日 |
| | | | | NB50 | 3.03 | 3460 | 251 | 68 | 75 | 319 |
| NB90 | 2.93 | 3500 | 272 | 54 | 61 | 209 | 296 | 33.3 | 36.6 | 42.7 |
| MB40-F20 | 2.85 | 3550 | 282 | 60 | 65 | 316 | 470 | 50.0 | 64.9 | 66.8 |
| MB25-F50 | 2.63 | 3520 | 281 | 40 | 48 | 183 | 286 | 43.9 | 50.3 | 51.7 |
| MB20-F60 | 2.56 | 3510 | 280 | 35 | 46 | 139 | 223 | 28.8 | 42.9 | 44.8 |
| HB60-F25 | 2.77 | 4660 | 276 | 67 | 71 | 343 | 444 | 40.8 | 47.8 | 56.0 |
| HB48-F40 | 2.67 | 3900 | 281 | 54 | 59 | 269 | 350 | 37.6 | 46.5 | 54.4 |

なお、比較のために高炉セメントB種(NB50)についても試験した。各セメントの化学分析結果を表-1に、物理試験結果を表-2に示す。また、混和材を混合したセメントの粒度分布を図-1に示す。

2.2 骨材および混和剤

特殊水中コンクリートのマスコンへの適用は海洋環境であることが多く、また、最近の骨材事情を考慮して、使用骨材は海砂および砕石とした。表-3に使用骨材の性質を示す。海砂は水洗いするため、0.3mm以下の微粒分が少なく、これを補う目的で石粉を30kg/m³内割添加した。石粉の性質を表-4に示す。

混和剤としては、リグニンスルフォン酸とポリオールとの複合体のAE減水剤標準形と高縮合トリアジン系の流動化剤、水溶液セルロースエーテル系の特殊水中コンクリート用混和剤(分離低減剤と称す)を用いた。

2.3 コンクリート配合

配合条件は、目標スランプフローを50cm、目標空気量を4%、単位結合材量を330kg/m³とし、骨材の最大寸法はコンクリートの流動性を考えて20mmとした。この条件で各々のセメントを用いたコンクリートの配合は、

表-5に示す通りとなった。予備練りの結果、細骨材が海砂の単一使用のため、石粉なしの練上り状態は、若干粘性にかけた状況となったため、微粒分を補う目的で石粉を細骨材の内割で30kg/m³使用した。なお、コンクリートの練上り温度は15℃~18℃で行い、試験は全て恒温条件で行った。

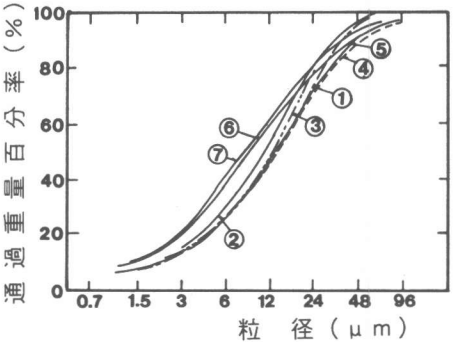


図-1 セメントの粒度曲線

表-3 使用骨材の性質

| | 細骨材 | 粗骨材 |
|----------|----------|----------|
| 産地 | 香川県広島沖海砂 | 兵庫県赤穂産砕石 |
| 最大寸法(mm) | 5 | 20 |
| 表乾比重 | 2.57 | 2.64 |
| 吸水率(%) | 1.70 | 0.51 |
| 粗粒率(%) | 2.72 | 6.70 |
| 粒度分布 | | |

表-4 石粉の性質

| 比重 | 水分(%) | 石灰純度(%) | ふるい目通過重量百分率(%) | | | |
|------|-------|---------|----------------|-------|--------|---------|
| | | | 0.6mm | 0.3mm | 0.15mm | 0.075mm |
| 2.73 | 0.1 | 91 | 100 | 100 | 93 | 80 |

表-5 コンクリートの配合

| No | セメントの略称 | w/c (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | SCA** |
|----|----------|---------|---------|--------------------------|-----|------------|------|-------------------------------|-------|
| | | | | W | C | S | G | Adm | |
| 1 | NB50 | 65.2 | 40 | 215 | 330 | 624 (30)*1 | 1008 | NO.70 C×0.25% UC150 C×2.0% | 2.3 |
| 2 | NB90 | 62.1 | 40 | 205 | 330 | 630 (30) | 1018 | " | 2.3 |
| 3 | MB40-F20 | 63.6 | 40 | 210 | 330 | 622 (30) | 1005 | " | 2.3 |
| 4 | MB25-F50 | 62.1 | 40 | 205 | 330 | 616 (30) | 995 | " | 2.3 |
| 5 | MB20-F60 | 62.1 | 40 | 205 | 330 | 612 (30) | 989 | " | 2.3 |
| 6 | HB60-F25 | 62.1 | 40 | 205 | 330 | 623 (30) | 1005 | " | 2.3 |
| 7 | HB48-F40 | 62.1 | 40 | 205 | 330 | 617 (30) | 997 | " | 2.3 |

*1 ()内は石粉 *2 SCA:特殊水中コンクリート用混和剤(分離低減剤)

表-6 フレッシュコンクリートの性質

| No | セメントの略号 | スランブフロー (cm) | 空気量 (%) | 練上り温度 (°C) | 単位重量 (kg/ℓ) | 凝結時間 (h-m) | | 分離抵抗性 | |
|----|----------|--------------|---------|------------|-------------|------------|-------|-------|-----|
| | | | | | | 始発 | 終結 | PH | 濁度 |
| 1 | NB50 | 48.5×47.0 | 3.1 | 15.2 | 2.24 | 19-20 | 25-50 | 9.6 | 86 |
| 2 | NB90 | 47.0×49.0 | 3.2 | 15.5 | 2.25 | 25-10 | 33-10 | 8.6 | 90 |
| 3 | MB40-F20 | 51.5×49.5 | 3.4 | 17.5 | 2.23 | 29-00 | 35-50 | 9.5 | 83 |
| 4 | MB25-F50 | 52.0×52.0 | 4.3 | 17.5 | 2.19 | 41-20 | 52-50 | 9.4 | 83 |
| 5 | MB20-F60 | 50.0×50.0 | 4.3 | 16.8 | 2.17 | 47-00 | 58-50 | 9.3 | 75 |
| 6 | HB60-F25 | 52.0×50.5 | 3.5 | 17.0 | 2.22 | 30-00 | 35-20 | 9.4 | 148 |
| 7 | HB48-F40 | 55.0×52.0 | 4.0 | 16.8 | 2.19 | 36-00 | 41-10 | 9.1 | 68 |

2.4 試験項目と方法

コンクリートの練りまぜは、二軸強制練りミキサを用い、空練り30秒、混練り60秒とした。フレッシュコンクリートについては練上り直後からのスランブフローの経時変化、空気量、分離抵抗性、凝結時間を測り、硬化後は水中作成および気中作成供試体の圧縮強度、静弾性係数および断熱温度上昇特性について試験した。試験方法は、特殊水中コンクリート・マニュアル¹⁾に従って行った。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの性質

各種の超低発熱性混合セメントとも目標スランブフローを得るのに要する単位水量は205 ~ 210kg/m³と、従来タイプの高炉セメントB種の215 kg/m³より若干少なくなった。この差は高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの減水効果によるものと思われる。フレッシュコンクリートの試験結果を表-6に示す。

スランブフローの経時変化は低熱性の混合セメントとすることでかなり長時間にわたり低下の少ないことが確認された。しかし、図-2に示すごとく高炉系の二成分混合セメントは、比較的スランブフローの低下が早く生じ、スランブフローが5cm低下するまでの時間は4~5時間であった。これに対し

三成分系の混合セメントはスランブフローの低下が比較的小さく、スランブフローが5cm低下するのは練上り後7~11時間となり、フライアッシュの混入が長時間の流動性を保たせる効果をもたらすものと思われる。凝結時間は、図-3に示すように高炉B種の始発が19時間20分であるのに対し、他の混合セメントでは25時間10分~41時間20分と、混和材の添加が凝結の遅れにつながり、分離低減剤の凝結遅延効果を助長する。凝結時間には、ポルトランドセメントの種類、ス

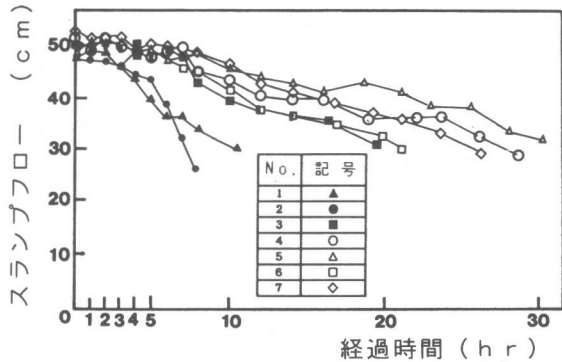


図-2 スランブフローの経時変化

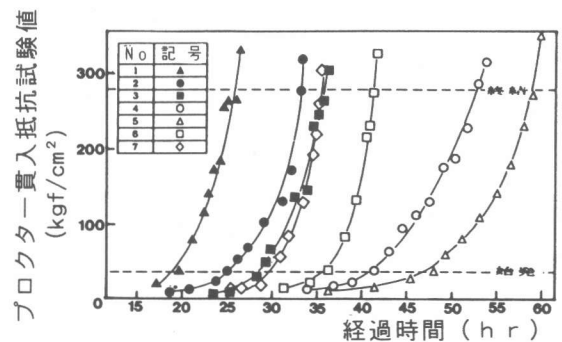


図-3 プロクター貫入抵抗試験結果

表一七 硬化コンクリートの試験結果

| No | セメントの略号 | 圧縮強度 (kgf/cm ²) | | | | | 弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²) | | | | |
|----|----------|-----------------------------|--------------|--------------|------|------|--|----------------|----------------|------|------|
| | | 7日 | 28日 | 91日 | 182日 | コア*2 | 7日 | 28日 | 91日 | 182日 | コア*2 |
| 1 | NB50 | 129 | 288 (253) | 389 (346) | 420 | 313 | 1.67 | 2.90 (2.69) | 3.52 (3.25) | 3.66 | 3.21 |
| 2 | NB90 | 134 | 220 (192) | 302 (268) | 357 | 293 | 1.91 | 2.78 (2.45) | 3.23 (2.87) | 3.17 | 3.32 |
| 3 | MB40-F20 | 104 | 260 (225) | 361 (321) | 422 | 298 | 1.66 | 2.70 (2.53) | 3.38 (3.15) | 3.64 | 3.33 |
| 4 | MB25-F50 | 45 | 173 (156) | 233 (209) | 267 | 233 | 1.36 | 2.47 (2.31) | 2.59 (2.40) | 2.87 | 2.83 |
| 5 | MB20-F60 | 31 | 141 (112) | 186 (152) | 213 | 191 | 1.14 | 2.15 (1.88) | 2.25 (2.06) | 2.53 | 2.40 |
| 6 | HB60-F25 | 192 | 308 (271) | 385 (336) | 425 | 343 | 2.46 | 2.83 (2.64) | 3.42 (3.12) | 3.49 | 3.11 |
| 7 | HB48-F40 | 130 | 246 (205) | 304 (261) | 337 | 293 | 2.05 | 2.71 (2.41) | 3.16 (2.82) | 3.29 | 3.05 |

M: 中鷹熱クリンカー, N: 普通クリンカー, H: 早強クリンカー, B: 高炉スラグ, F: フライアッシュ
 *1 () 中は水中作成供試体強度 *2 試験材令は91~94日

ラグ、フライアッシュなどの品質や、その粉末度および結合材としての混合比率などの要因と特殊混和剤の特性などが互いに影響しており、各因子の影響度は明確にできなかったが概して、スランプフローの低下の小さい配合、かつ、フライアッシュの添加率の多いもの程凝結は遅かった。

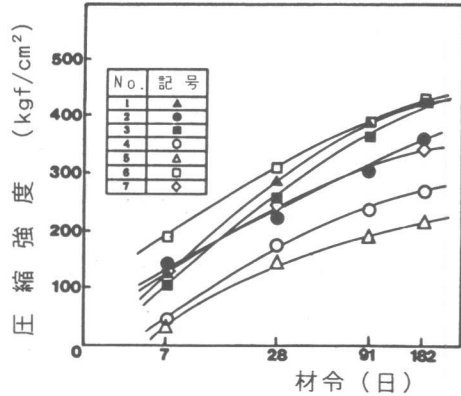
水中にコンクリートを落下した時の水中分離抵抗性を示す水のpH、濁度の値は混合セメントの種類の影響はほとんどなくpHが8.6~9.6、濁度が75~149であった。

3.2 硬化コンクリートの性質

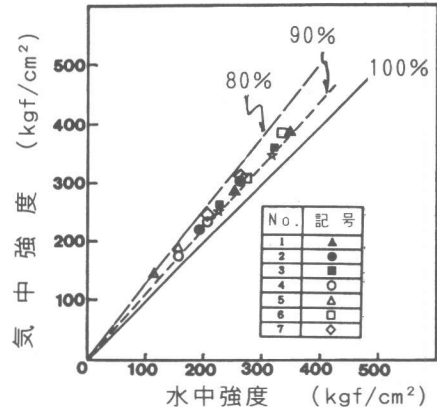
圧縮強度試験結果を表一七および図一四に示す。

各配合とも単位結合材量を同一としたため、セメントの違いにより、若干水セメント比が異なるが、62.1~65.2%の範囲であった。しかし、圧縮強度は、水セメント比の変動以上にセメントによって大きな差があり、材令91日において186kgf/cm²~389kgf/cm²であった。早強系の三成分セメントは混和材混入率が85%でも高炉B種と同等の強度が得られたが、混和材混入率が約90%の二成分系セメントおよび早強系三成分セメントは高炉B種と比較して材令91日で約80%の強度しか得られなかった。

混和材を多く含む混合セメントは混和材が有効な反応をする様、セメントの成分調整を行えば、さらに長期的な強度の増加が期待できるものと思われる。なお、断熱温度上昇試験を行った供試体から採取したコア強度は、温度履歴を受けているため、標準養生供試体の強度とは異なった傾向を示す。表一七にその結果を示すように、高炉B種(NB50)、早強系三成分(HB60-F



図一四 圧縮強度の発現性状



図一五 気中作成供試体強度と水中作成供試体強度

25)、中庸熱系三成分(MB40-F20)は温度履歴の影響を受け若干強度低下を生じたのに対して、二成分系のスラグ90%添加のセメント(NB90)、中庸熱系三成分(MB25-F50、MB20-F60)、早強系三成分(HB48-F40)はほぼ同等の強度となった。水和熱の高いセメントほど、温度履歴の影響により強度低下が認められ、有効な強度を得るには、低発熱性のセメントの利用が好ましいと考えられる。

水中作成供試体の気中作成供試体に対する強度比は、超低発熱性混合セメントも従来のセメントと同等で約90%であった(図-5)。

また、細骨材に石粉を添加しないコンクリートについては、石粉を用いたコンクリートとほぼ同等の強度特性を示し、石粉の強度に及ぼす影響は認められなかった。しかし、フレッシュコンクリートのワーカビリティの改善効果は認められた。なお、圧縮強度と静弾性係数の関係は図-6に示すように一般的なコンクリートの性質と同等であり、セメントの種類による影響は認められなかった。

3.3 断熱温度上昇

各混合セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇特性を図-7に近似式を表-8に示す。混和材混入率の小さい、NB50、MB40-F20の順に温度上昇量は大きくなり、混入率の多いコンクリートほど断熱温度上昇量が小さい傾向を示す(図-8)。

温度上昇の勾配は、中庸熱系がゆるやかで、早強系混合セメントが初期に早く温度上昇する傾向があるが、これは、セメントの粉末度との関係もあり必ずしもクリンカーの性質で判断はできないと思われる。

圧縮強度と断熱温度上昇量の関係を見ると、図-9に示すように、必ずしも相関性はなく、このことは、温度ひびわれ低減に有効なセメントすなわち、発熱が少ないが強度の高いセメントがあることを示唆する。なお、溶解熱方法²⁾により測定したセメントの水和熱と断熱温度上昇量との関係は図-10に示すように相関性は小さく、セメントの水和熱によるコンクリートの断熱温度上昇量の評価は適切とは言えない。これは、セメントの水和熱試験が20℃の条件で行われ、自己

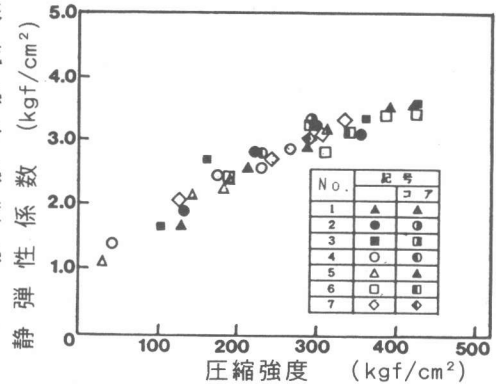


図-6 圧縮強度と静弾性係数

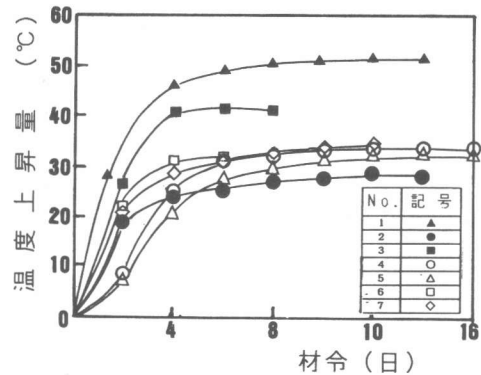


図-7 断熱温度上昇特性

表-8 断熱温度上昇試験結果

| 近似式 | | T = K (1 - e ^{-αt}) | | T = K {1 - (1 + αt) e ^{-αt} } | |
|-----|----------|-------------------------------|------|--|------|
| | | K | α | K | α |
| 1 | NB 50 | 51.9 | 0.43 | 50.6 | 0.95 |
| 2 | NB 90 | 27.7 | 0.47 | 27.1 | 1.04 |
| 3 | MB40-F20 | 43.1 | 0.48 | 41.4 | 1.13 |
| 4 | MB25-F50 | 36.7 | 0.25 | 34.3 | 0.61 |
| 5 | MB20-F60 | 36.7 | 0.20 | 33.3 | 0.52 |
| 6 | HB60-F25 | 34.2 | 0.46 | 32.0 | 1.18 |
| 7 | HB48-F40 | 33.6 | 0.45 | 32.7 | 1.03 |

発熱による促進養生の影響を受けないことに起因していると考えられる。そのため、断熱温度上昇量をセメントの品質によって把握するためには、モルタルあるいはペーストを用いる簡易な断熱試験が必要と思われ、今後の研究が待たれる。

4. まとめ

高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを多量に添加した超低発熱性混合セメントを特殊水中コンクリートに適用するに際して、フレッシュコンクリートの性状、硬化後の強度、発熱特性について検討した。この結果、以下のことが明らかになった。①混和材の添加率を増加させるにつれ断熱温度は小さくなる。②強度と断熱温度の関係は強い相関が認められず、強度発現性が良く、発熱の小さい混合セメントがあるものと考えられる。これは、③混合セメントの粒度が良いと高い強度が得られることなどが起因していると考えられる。一方、④高い温度履歴を受けたコンクリートの長期コア強度は、標準養生供試体より強度が小さくなり、このことから、有効な長期強度を得るには、温度上昇をできるだけ低減することが好ましい。その他、⑤気中供試体強度に対する水中養生供試体強度の比はセメントが超低発熱性の混合セメントであっても特に小さくなるものではないこと ⑥水中落下時の分離抵抗性は特に低下しないこと ⑦凝結は低発熱にすることで遅れる傾向を示すが、始発は25~41時間の範囲である。また、⑧スランプフローが5cm低下するのは二成分系で練上り後4~5時間で、三成分系で7~11時間である。なお、石粉はワーカビリティを若干改善するが、強度への影響は小さい。以上、超低発熱性混合セメントを用いた特殊水中コンクリートの性質を調べ、特に悪影響がないことを確認し、むしろ温度ひびわれ対策として有効であると考えられるが、実施工に先がけ、さらに、練上り温度や気象作用の影響、耐久性に対する検討などの確認が必要と思われる。

《参考文献》

- 1) 特殊水中コンクリート・マニュアル (設計・施工) : (財) 沿岸開発技術研究センター、(財) 漁港漁村建設技術研究所, 1986
- 2) フライアッシュセメントの水和熱測定方法 (溶解熱方法) : セメント協会標準試験方法, 1975

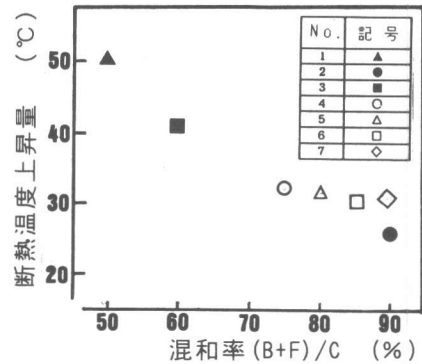


図-8 混和材置換率と断熱温度上昇量

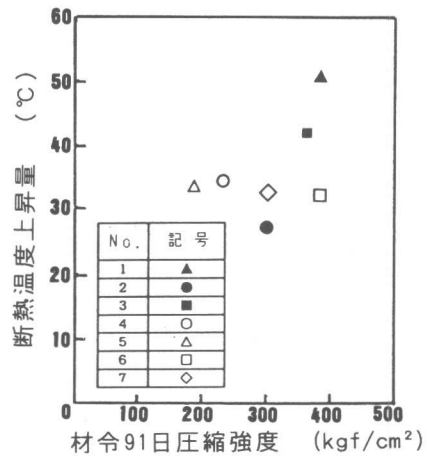


図-9 圧縮強度と断熱温度上昇

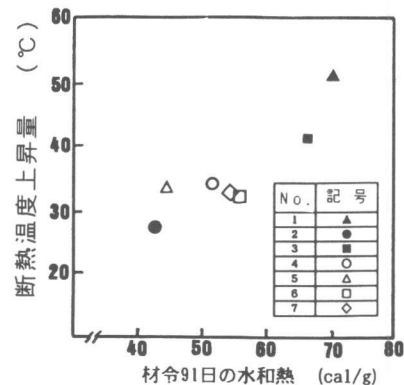


図-10 セメントの水和熱と断熱温度上昇量