

# 凝結時間を遅延させた泥水セメント系材料の 凝結硬化特性と適用

藤原 靖<sup>1</sup>・大谷 崇<sup>2</sup>・檜垣貫司<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 農博 大成建設技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

<sup>2</sup>正会員 農修 大成建設技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 大成建設技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

鉄道近接あるいは道路路面下などの施工環境では施工時間を制限した場合が多く、その大部分は夜間数時間施工を繰り返す断続的な施工である。このような施工環境では、固化材の打設が中断したり固化材の打設に引続き応力分担材の挿入が出来ない場合が多いため、固化材の凝結時間を制御する技術が要求される。そこで本研究では超遅延剤を用いて72時間程度まで凝結時間を遅延させた泥水セメント系材料を製造し、その凝結遅延時の特性および硬化特性について検討した。その結果、温度計測で凝結遅延・凝結開始が確認でき、凝結遅延と遅延終了後の強度発現に対して練り上がり温度や再攪拌の影響がないことを確認して遅延型の泥水セメント系材料による山留壁の築造工事に適用した。

**Key Words :** slurry solidification, slurry wall, setting time, retarding admixtures, diaphragm wall

## 1. はじめに

主要道路や幹線道路の交差部の路下に地下駐車場などの地下構造物を建設する場合には、施工における時間的、空間的な制限事項が多く、夜間しか施工できない範囲が相当部分を占める場合が多い。

実際の夜間施工においては、作業帯形成、安全設備設置、復旧に要する時間を考慮すると実質的な夜間作業時間は数時間程度となる場合が想定される。さらに、夜間施工においても道路規制ができない時間帯は、施工を長時間にわたって中断せざるを得ない場合も想定される。

このような施工環境下で、一般に連続して施工される泥水固化壁とは異なる、規制環境下での泥水固化壁の築造方法が必要となった。

その一つが作業時間の制約から、泥水セメント系材料（以下、泥水固化材と称す）を打設したのち応力分担材の建て込みなどに時間を要する場合、固化材の流動性を所定の時間にわたって保持しなければならぬため、固化材の凝結時間を任意に制御する技術が必要となる。

そこで著者らは、超遅延剤を用いた泥水固化材の凝結時間の制御に関する検討を行った。このような施工上の制約から凝結の遅延について検討した例で

は、ソイルモルタルの水中打設時の圧送性能保持のため、カルボン酸塩系遅延剤とほう酸塩を併用したもののリヤシールド裏込め注入材（セメント系固化材）が配管内に留まっていても固結せず、再圧送が可能な圧送性能保持のため、ポリオールを用いたもの<sup>2)</sup>がある。

これらの有機系遅延剤の遅延作用は、沈澱、錯塩、吸着、核生成抑制などの機構があり、これらの複合的な作用と考えられているが、特にグルコン酸では、吸着機構での保護膜形成による遅延効果が主因であると考えられている<sup>3)</sup>。

また、泥水固化材やソイルモルタルなどの土質材料にこれらの遅延剤を用いる場合は、岩石を骨材とするコンクリートとは異なり土や粘土への混和剤の吸着量が多いため、凝結遅延効果が発揮されにくく、また、凝結遅延を行った後の強度発現が不十分であることが施工上で経験されて来た。

近年ソイルモルタルの凝結遅延を目的とした超遅延剤に関する検討がなされ、数日間にわたって凝結を制御でき、かつ長期強度の発現性が良好なオキシカルボン酸塩系の超遅延剤が開発され、室内試験の結果が報告されている<sup>4),5)</sup>。

そこで本研究では、オキシカルボン酸塩系の超遅延剤を用いて、実工事において数日間にわたって凝

結を制御できる泥水固化材について検討した<sup>6,7)</sup>。

遅延および凝結開始を確認するための固化材の発熱特性や硬化特性、外気温度の変化による練り上がり温度が固化材の遅延および硬化特性に与える影響、遅延期間中に応力分担材を挿入する際の再攪拌などの外的作用による遅延および硬化特性への影響、応力分担材への付着特性などについての室内試験・検討を行った。得られた知見を基にして、遅延型泥水固化材を泥水固化壁の実施工に適用した。本報告では、これらの結果について以下に述べる。

## 2. 泥水固化材の使用材料がセメントの水和発熱に与える影響

### (1) 水和発熱の検討

泥水固化材の凝結時間を遅延させるため、固化材に使用するベントナイト、高分子増粘剤がセメントの水和発熱に及ぼす影響と超遅延剤を使用した場合の水和発熱特性の変化について検討した。

#### a) 使用材料と配合

使用した材料は、普通ポルトランドセメント（固化材）、250メッシュの群馬県産ベントナイト（分離防止剤）、アニオン性セルローズ系ポリマー（分離低減剤、以下これを高分子増粘剤と称す）、オキシカルボン酸塩系の超遅延剤（凝結遅延剤）である。

一般に有機系超遅延剤は、化学構造中に水酸基とカルボキシル基を共有する化合物が用いられ、その中でもグルコン酸塩を主成分とするものが多く、本剤も分子量218のグルコン酸ナトリウムを主成分としている。水和発熱量の測定に用いた各材料の配合について表-1に示した。

混練水と希釈水は、各試験ケースの配合に応じて、混練水では水あるいはベントナイト、高分子増粘剤を膨潤させたものとし、希釈水では水あるいは超遅延剤を水で希釈したものとした。高分子増粘剤量はベントナイトの3%相当の重量とした。

#### b) 測定方法

水和発熱量の測定は、東京理工製のツインコンダクションマイクロカロリーメーターを使用した。各ケース測定時の配合は全て、セメント量（2.5g）と水量（12.5g）が常に一定となるような条件とした。

各材料の混合は、前述したように、予め調整しておいた混練水と希釈水が、装置内の保存容器のゴム膜が破れることで別々にかつ同時にセメントに降りかかり、セメントへの接水と全体材料の攪拌混合が同時期となる方法を用いた。

表-1 水和発熱量測定用試料の組成

セメント	混練水組成			希釈水組成	
	水	ベントナイト	高分子増粘剤	水	超遅延剤
C	W1	B	P	W2	R
200kg	900kg	20kg	0.6kg	100kg	1.0kg

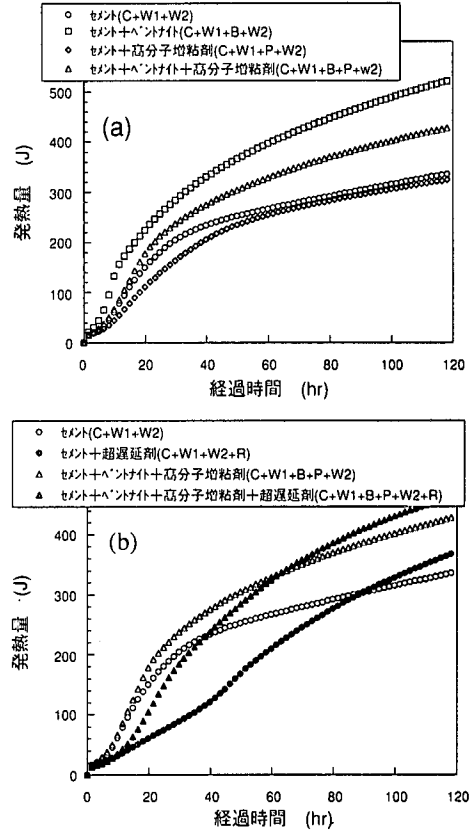


図-1 水和発熱量の経時変化

### (2) 実験結果

セメント単独、およびベントナイト、高分子増粘剤を混合した場合について、接水後120時間までの発熱量を図-1(a)に示した。

図のようにセメントのみの場合の発熱量を基準にすると、ベントナイトを混合した場合には発熱が早まると同時に発熱量が増加している。セメントにベントナイトを混合した場合には水和発熱速度のピークの早まりが観察され<sup>8)</sup>、スメクタイト族鉱物を含有するモルタルでも、この水和発熱の早まりにより過早凝結が起こることが知られている<sup>9)</sup>。したがって泥水固化材では、ベントナイトの使用量が凝結時間と超遅延剤の添加量に及ぼす影響を考慮する必要がある。

一方、高分子増粘剤を単独で混合した場合に

は、水和発熱量は前半部分でやや低下し後半ではほぼ同様となっている。よって、高分子増粘剤は弱いながらも水和発熱の抑制作用を持つと推定されるため、その使用量も考慮する必要がある。

全ての材料の混合系では、ベントナイト量に対し高分子増粘剤がその3%であり、この配合においては、ベントナイトによる水和反応の促進作用が高分子増粘剤による水和反応の抑制作用を上回るため、セメント単独の場合よりも発熱量は増加する。したがって表-1に示した配合では、泥水固化材の凝結時間は早まる状態にあると考えられる。

図-1(b)には超遅延剤を使用した場合との比較を示した。セメント単独の場合と超遅延剤を添加した場合を比較すると、超遅延剤を添加した場合には前半に発熱量が低下するが、後半には発熱量が増大する傾向が見られる。

この傾向は、全ての材料の混合系とこれに超遅延剤を添加した混合系においても同様に観察される。したがって、超遅延剤の添加による水和初期の発熱抑制による凝結遅延が発現していることが確認できる。また、水和後期の発熱促進による強度発現の促進が予想され、超遅延剤を添加した場合においても材令経過時の強度発現に影響を及ぼさないことが予想される。

### 3. 遅延型の泥水固化材における使用材料および超遅延剤の添加量の検討

#### (1) 実験方法

##### a) 使用材料と配合試験方法

使用材料は、高炉セメントB種、250メッシュ群馬県産ベントナイト、比重調整粘土、高分子増粘剤、オキシカルボン酸塩系の超遅延剤である。

泥水固化材の作成方法は、次の通りである。ベントナイト、比重調整粘土、高分子増粘剤を予め溶解・膨潤させ混練用泥水とする。これを表-2の左側に混練用泥水組成として示した。

次に所定量の混練用泥水を混練容器に入れ、その後セメントと超遅延剤を容器に入れ、ハンドミキサーを用いて5分間高速攪拌して遅延型の泥水固化材を作成した。これを表-2の右側の固化材組成として示した。

なお、使用材料の保管と混練、養生は全て20℃の温度環境下で実施した。以下、この条件の場合を20℃条件と本研究では称した。

##### b) 試験方法

使用材料および超遅延剤の添加量の検討は、表-2

表-2 材料組成検討用の固化材の配合

配合	混練用泥水組成			固化材組成			
	ベントナイト (B) -----kg/m <sup>3</sup> -----	比重調整粘土 (B) (B×)	高分子増粘剤 (B×)	混練水	セメント (C)	超遅延剤 (C×)	単位体積重量 kN/m <sup>3</sup>
A	40-80	136-116	0-3%	1048-1044	200	0-2.0%	12.26
B	80	152	3%	1053-1047	250	0-2.0%	12.75
C	80	240	3%	1103-1097	250	0-2.0%	13.24

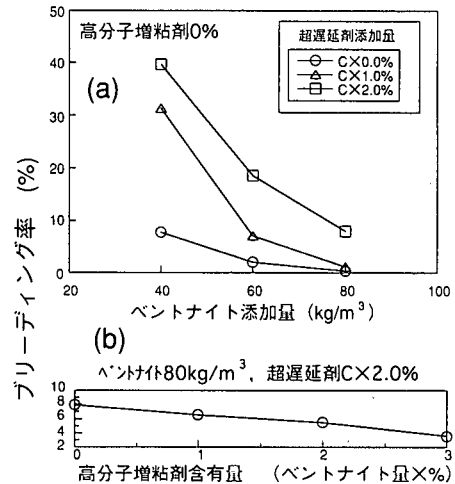


図-2 ベントナイトおよび高分子増粘剤とブリーディング率

に示した単位体積重量12.26、12.75、13.24kN/m<sup>3</sup>の配合A、B、Cについて行った。

配合Aは超遅延剤量をセメント量の0～2%の範囲で添加し、ベントナイトを40、60、80kg/m<sup>3</sup>あるいは高分子増粘剤をベントナイト量の0、1、2、3%の範囲で変化させ、ブリーディング率について測定した。

配合BとCは、ベントナイトを80kg/m<sup>3</sup>、高分子増粘剤をベントナイト量の3%として、超遅延剤量をセメント量の0～2.0%の範囲で添加し、材令3日、5日、7日、10日、28日の一軸圧縮強度を測定した。

#### (2) 実験結果

##### a) ブリーディング率からみた基本配合の設定

オキシカルボン酸塩系の超遅延剤をコンクリートに用いた例では、ブリーディング率は添加量とともに増大する傾向を示し、セメント量に対し0.6%の添加量で通常コンクリートに比べ約3.5倍となったことが報告されている<sup>10)</sup>。

表-2の配合Aでベントナイト量40kg/m<sup>3</sup>の泥水をセメント固化する際、その凝結の遅延時間を50～100時間程度に設定した場合（超遅延剤の添加量はセメント量の2%が目安となる）、図-2(a)に示した

ように（図のベントナイト添加量 $40\text{kg/m}^3$ ），ブリーディング率は，超遅延剤添加量 $C \times 0.0\%$ で $7.7\%$ ， $C \times 1.0\%$ で $31.4\%$ ， $C \times 2.0\%$ で $39.7\%$ となり，超遅延剤の添加で極端に増加した。当然，ブリーディング率が大きい場合は，沈降した泥水固化材の単位セメント量と単位土量が相対的に増加し，単位水量が減少するため凝結が促進される。したがって，ブリーディング率が大きい場合は，超遅延剤添加量の補正が必要となる。

そこでブリーディング率を低減させるため，ベントナイトおよび高分子増粘剤の添加および添加量の増加によるブリーディング抑制効果について検討した。

配合Aでベントナイト量と高分子増粘剤量を変えた場合の試験結果を図-2に示した。

ここで，目標とするブリーディング率は $5\%$ 以下とした。図-2(a)のようにベントナイトの混合割合を増加するとブリーディング率が極端に低減できる。しかしベントナイト量が多くなると，先に述べたようにセメントの凝結反応が促進され，また粘性が高くなり過ぎ，混練やポンプ圧送性が著しく困難になる。ベントナイト量 $80\text{kg/m}^3$ で超遅延剤をセメント量の $2\%$ とした場合のブリーディング率は $7.9\%$ であった。目標値に達していないが，ブリーディング率の最低値を示しているため，ベントナイト量は $80\text{kg/m}^3$ に設定した。

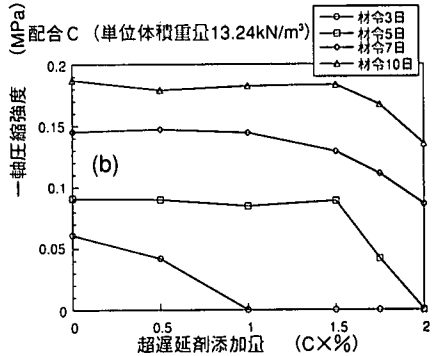
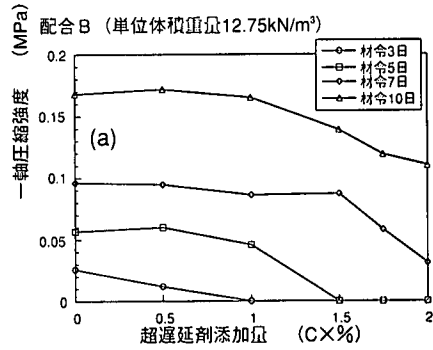
次に高分子増粘剤の添加効果について検討した。その結果，図-2(b)に示した様に，高分子増粘剤の添加量が増加するにしたがいブリーディング率が顕著に低下する。高分子増粘剤もベントナイトと同様に添加量が多くなると粘性が高くなる。水和発熱の検討において，高分子増粘剤は凝結を抑制することが示唆されたが，実際に各種の増粘剤，特に有機系増粘剤はその強度発現の遅延性が認められている<sup>11)</sup>。高分子増粘剤の添加量としては，目標値であるブリーディング率 $5\%$ 以下を満足するベントナイト量 $80\text{kg/m}^3$ の $3\%$ （ $2.4\text{kg/m}^3$ ）とした。

以上の結果から，遅延型の泥水固化材の基本配合は，ベントナイト $80\text{kg/m}^3$ で高分子増粘剤量をベントナイト量の $3\%$ として以降の検討を行った。

b) 超遅延剤添加量と凝結遅延および強度発現性状  
表-2の配合B，Cについて超遅延剤の添加量と材令28日までの一軸圧縮強度との関係について検討した。図-3に超遅延剤添加量と一軸圧縮強度との関係を示した。

図-3(a)のように，一軸圧縮強度からみて配合Bの場合，材令3日の凝結遅延はセメント量の $1\%$ ，材令5日の遅延は $1.5\%$ ，材令7日の遅延は $2.0\%$ となっ

### 材令3日～10日の強度比較



### 材令28日の強度比較

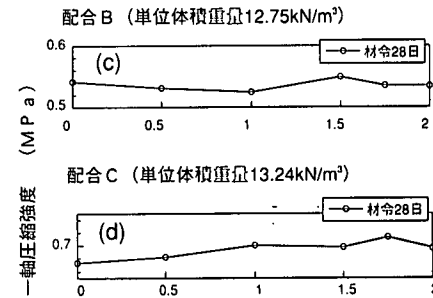


図-3 配合BおよびCでの超遅延剤の添加量と強度発現

た。

これらの超遅延剤の添加量よりも小さい場合は，それぞれの材令が同一であればほぼ同程度の一軸圧縮強度となっていることがわかる。

一方配合Cの場合（図-3(b)），材令3日の遅延はセメント量の $1\%$ ，材令5日の遅延は $2.0\%$ となり，配合Bに比べ同一の遅延期間を得るための超遅延剤添加量がおおよそ $0.5\%$ 多くになっている。

これは，配合Cでは配合Bに比べて単位セメント量は $250\text{kg/m}^3$ と同じであるが，比重調整粘土が増加しているためである。比重調整粘土の増加によって超遅延剤が粘土粒子に吸着され，消費されることで本来セメントに吸着して保護膜を形成する量が相対

的に減少するためと考えられる。

材令28日の一軸圧縮強度は、図-3(c,d)に示したように配合Bと配合Cともに、0~2%の範囲の添加量では、超遅延剤の添加量にかかわらずほぼ無添加の場合と同様となった。いずれの超遅延剤添加量においてもそれぞれ0.55MPa, 0.7MPa前後の強度を発現しており、材令28日の強度に大きな差異がないことが明かである。したがって、材令28日では超遅延剤の添加による一軸圧縮強度の影響を考慮する必要がないと考えられる。

#### 4. 凝結の遅延状態における固化材の性質

##### (1) 実験方法

##### a) 凝結遅延と強度発現・温度変化特性試験

せん断強さと一軸圧縮強度の経時変化について検討した。表-3に示した配合D (20℃条件)で超遅延剤添加量を変えて作成した泥水固化材について、混練後90時間までのベーンせん断強さおよび28日までの一軸圧縮強度の経時変化について測定し、強度発現性状を観察した。

ベーンせん断強さは、15cm×15cm×15cmのモールドに打設し20℃の湿空環境で養生した供試体を用いて、室内ベーンせん断試験機により、幅3.0cm、高さ6.0cmのベーンで回転角速度6.3°/minの条件で測定した。以下、本研究でのベーンせん断試験は本試験機を用いた。一軸圧縮強度は、直径5cm、長さ10cmのモールドに打設し20℃の湿空環境で養生した供試体を用いて測定した。

次に、泥水固化材を地中に打設した場合の固化材の凝結の遅延と凝結の開始を確認する方法として、泥水固化材の温度変化から評価する方法について簡易断熱温度上昇試験により検討した。

泥水固化材は表-3の配合D (20℃条件)の超遅延剤添加量C×0.0%, C×0.5%および配合E (20℃条件)を用いた。

固化材温度の測定は、前者では混練後32時間まで、後者は14日まで測定した。温度測定は、直径15cm、高さ30cmの円筒容器に泥水固化材を充填して、その中心に熱電対を設置し、容器を直径45cm、高さ60cmの発泡スチロール製の断熱容器に入れた断熱条件下で行った。なお断熱容器は20℃環境下に設置した。

同様の断熱容器にベーンせん断強さおよび一軸圧縮強度試験用の供試体を保管し、所定の時間経過後毎に供試体を取り出して、手早くそれぞれの試験を行った。

表-3 凝結遅延性状検討用の固化材の配合

配合	混練用泥水組成			固化材組成			
	ベントナイト (B) -----kg/m <sup>3</sup> -----	比重調 整粘土 (B) (B×)	高分子 増粘剤 (B×)	混練水 (C) -----kg/m <sup>3</sup> -----	セメント (C×)	超遅延剤 (C×)	単位 体積 重量 kN/m <sup>3</sup>
D	80	152	3%	1048	250	0.0-2.2%	12.75
E	80	240	3%	1097	250	2.0%	13.24

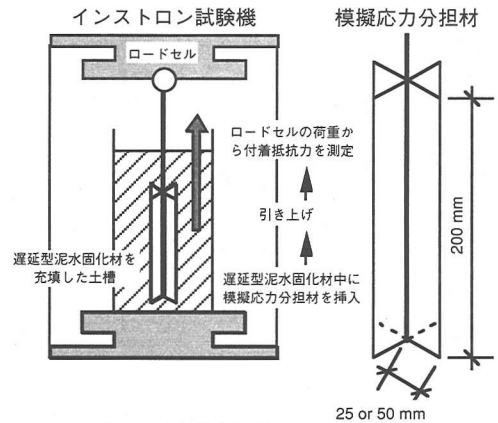


図-4 引き抜き抵抗力の測定器具

##### b) 練り上がり温度の影響試験

泥水固化材の打設工事が長期間にわたる場合は、気温の変化による練り上がり温度の違いが固化材の遅延・強度発現性状に及ぼす影響について把握する必要がある。

表-3の配合E (20℃条件)について、練り上がり温度を変えた泥水固化材の温度変化と強度発現特性について検討した。練り上がり温度の調整は、セメント、水、ベントナイトなどの各材料を15℃、22℃、28℃、35℃の温度に保管して温度調整し、材料温度が一定となってから混練を行うこととした。この後、泥水固化材の適用環境は地盤中であることから温度変化は無いと仮定し、供試体を混練後4日まで環境温度20℃で湿空養生を行い、その間の温度変化を供試体中央に設置した熱電対で測定した。せん断強さおよび一軸圧縮強度についても測定した。

温度測定用およびベーンせん断強さ試験用の供試体は、15cm×15cm×15cmのモールドに、一軸圧縮強度試験用は直径5cm、長さ10cmのモールドに打設したものを用いた。

なお、環境温度を平均的な地中温度よりも数℃高い20℃とした。これは、供試体寸法・量および試験測定などでの利便性から20℃恒温室で実施することにしたためである。

##### c) 再攪拌の影響試験

打設した泥水固化材への応力分担材の挿入による外力が、固化材の凝結遅延・強度発現に与える影響

について検討した。

表-3の配合D (20℃条件)で混練した泥水固化材について流動性試験を行い、固化材の一部から一軸圧縮強度測定用の供試体を作成した。残存試料を混練容器に密封して保存し、24時間経過した後さらに攪拌混合して流動性試験を行い、固化材の一部から一軸圧縮強度測定用の供試体を作成した。さらに48時間後についても同様の試験を行った。試験は20℃環境下で行った。

d) 泥水固化材の引き抜き抵抗力の測定

応力分担材を打設した泥水固化材に挿入する際、応力分担材にかかる泥水固化材の付着力について検討した。

表-3の配合E (20℃条件)で混練した泥水固化材を用いて、図-4に示したH型鋼を模擬した模擬応力分担材を泥水固化材から引き抜く際に、周面にかかる荷重を引き抜き抵抗力として測定した。試験は20℃環境下で行った。

(2) 凝結遅延状態における泥水固化材の性質

a) 凝結遅延と強度発現・温度変化特性

凝結を遅延させた泥水固化材のベンセン断強さの経時変化を図-5に示した。試験に用いた泥水固化材は、超遅延剤量がセメント量(C)の1.8, 2.0, 2.2% (C×1.8~2.2%)で材令3日まで一軸圧縮強度が測定不能となる配合(表-3の配合D)である。

図のように超遅延剤添加量2.0%および2.2%では80時間を超えてもせん断強さの発現は顕著でなく、0.1~0.3kPa程度で推移していた。これに対して添加量の少ない1.8%では、40時間までは0.1~0.3kPaで推移するが、その後は時間の経過とともに、せん断強さが急速に増加した。

以上のように凝結を遅延させた泥水固化材では、凝結の遅延中にはせん断強さの発現がなく、一般的に凝結が開始すると徐々にせん断強さが増加するという傾向とは全く異なっている。また、凝結の遅延が終了すると急速にせん断強さを発現する特性を有している。

図-6には、一軸圧縮強度の経時変化を示した。図のように超遅延剤添加量の1.8%, 2.0%, 2.2%の順に一軸圧縮強度の測定が可能な強度発現が材令7日までの間に観察される。その後、強度の発現は急速に増加し凝結が開始して硬化が始まったことが確認できる。

強度発現は、材令の経過とともに増大するが材令14日程度ではほぼ同程度となり、材令28日までの発現性状は同じ傾向を示している。

このことは、図-3(c,d)に示した超遅延剤添加量を

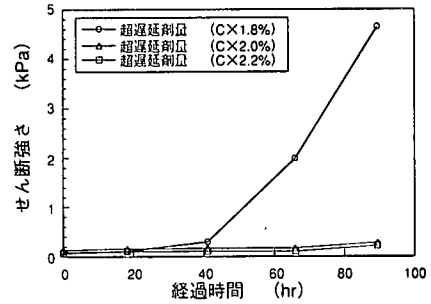


図-5 凝結遅延期間のせん断強さの変化

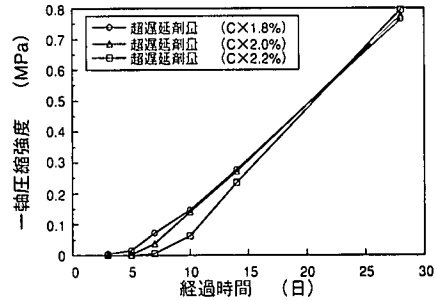


図-6 材令経過と強度発現

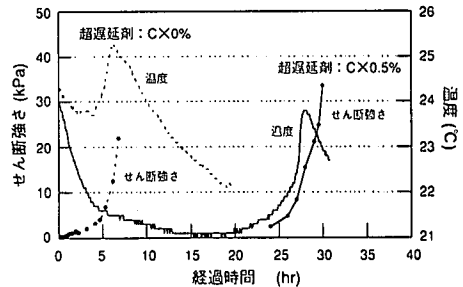


図-7 簡易断熱下での温度変化とせん断強さの発現

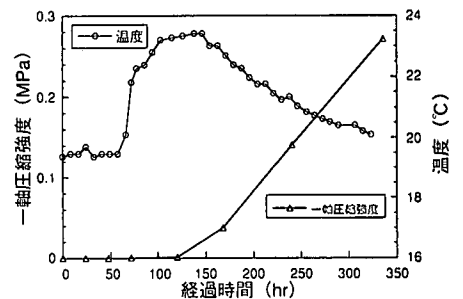


図-8 簡易断熱下での温度変化と一軸圧縮強度の発現

変えても材令経過時(材令28日)の強度発現が、同程度であることと一致している。

凝結遅延と凝結開始の確認を行う際に供試体(試料)を採取して、せん断強さあるいは一軸圧縮強度の試験により確認することは、泥水固化壁のように地中に泥水固化材を打設した場合には困難である。温度観測などの非破壊・遠隔での調査手法が必要と

なる。そこで、表-3の配合Dで超遅延剤添加量0.0%と0.5%の場合の温度変化とせん断強さの関係について検討を行い、図-7にその結果を示した。

図のように、簡易断熱条件での温度変化において、温度上昇が明瞭に観察される時点でせん断強さの増加が見られ、温度が最高温度に達する時に、せん断強さの増加が明瞭となり、持続していた。

図-8には、72時間凝結を遅延させた表-3のE配合（超遅延剤添加量がセメント量の2.0%）の場合の簡易断熱状態での温度変化を示した。図のように泥水固化材の温度は、混練後70時間まで練り上がり温度19.5℃を維持し、温度上昇は全く観察されない。したがって、この間の水和反応が完全に抑制されていることが明らかである。その後温度が上昇して120時間（5日）程度で最高温度に達し、以後最高温度で推移して150時間経過後に温度低下が生じた。

一軸圧縮強度で評価可能な強度発現は、図のように混練後120時間程度経過してから明瞭になっている。この時期は、温度が最高温度に到達した時期にほぼ相当している。これは、図-7で、せん断強さの変化が顕著になり持続し始めた時期で、せん断強さが20kPa前後に相当している。この時点以降で、泥水固化材は一軸圧縮強度として計測することが可能な硬化状態になっている。

遅延型泥水固化材の温度変化について、一次元の有限差分法による数値解析結果と比較した。構造モデルは、図-9に示した温度15℃の地盤中に設置される3.2m×0.8mの壁の断面方向について、壁中心を対称軸として地盤方向に半無限の熱流を評価した。

ここで、温度解析に必要な地盤および遅延型泥水固化材の特性値である比熱は、地盤1.83J/(kg・K)ならびに固化材3.07J/(kg・K)とした。これらの比熱は、土、ベントナイト、セメントの比熱をそれぞれ0.84J/(kg・K)とし、水の比熱を4.19J/(kg・K)として以下に示した計算法で算出した値を用いた。

- <地盤>単位体積重量16.67kN/m<sup>3</sup>
  - 土 1.20×0.84=1.01
  - 水 0.50×4.19=2.10
  - 地盤 (1.01+2.10)÷1.7=1.83J/(kg・K)
- <遅延型固化材>単位体積重量13.24kN/m<sup>3</sup>
  - (表-3, 配合E)
  - セメント 0.25×0.84=0.21
  - 土 0.20×0.84=0.17
  - 水 0.90×4.19=3.77
  - 固化材 (0.21+0.17+3.77)÷1.35=3.07J/(kg・K)

熱伝導率は、地盤と遅延型泥水固化材それぞれと

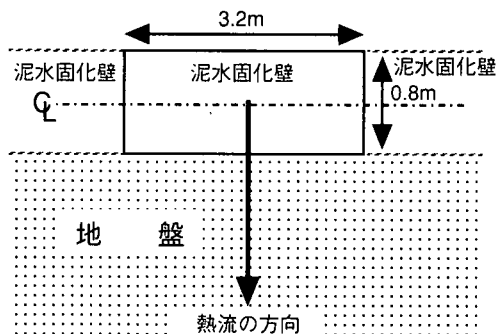


図-9 解析用構造モデル（平面図）

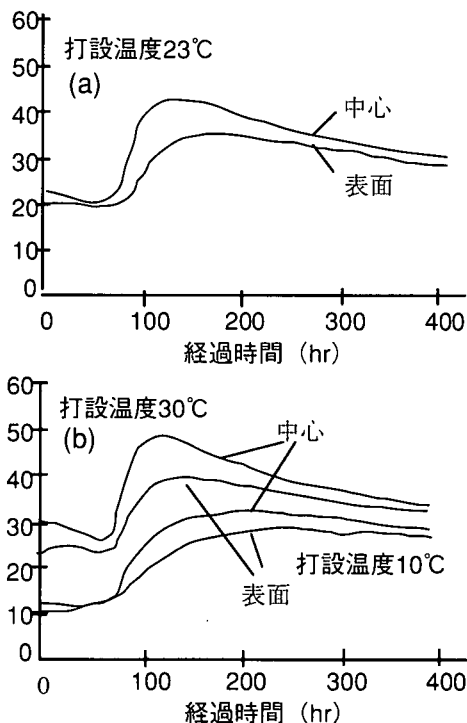


図-10 温度解析結果

もに2.0W/(m・K)とし、最初の72時間は水和発熱が生じないものとした。

温度上昇特性は、コンクリート標準示法書17.5.4熱物性値の解説<sup>12)</sup>に準拠して以下の式で表すものとした。

$$Q_0 = Q_\infty (1 - e^{-r(t-t_0)})$$

- $Q_0$ : 材令 t 日における断熱温度上昇量 (°C)
- $Q_\infty$ : 終局断熱温度上昇量 (°C)
- r: 温度上昇速度に関する定数
- t: 材令 (日)
- $t_0$ : 遅延時間 (日)

終局断熱温度上昇量 ( $Q_{\infty}$ ) および温度上昇速度に関する定数 ( $r$ ) は、単位セメント量  $250\text{kg/m}^3$ 、高炉セメントB種、打設温度  $23^{\circ}\text{C}$  とし、コンクリート標準示法書解説表17.5.2 (解17.5.5) <sup>12)</sup> により算出して、それぞれ  $40^{\circ}\text{C}$ 、 $0.690$  に設定した。ただし、温度上昇速度に関する定数 ( $r$ ) は、コンクリート用遅延剤の例 <sup>13)</sup> を参考にして、遅延時間 ( $t_0$ ) が3日の場合の係数  $0.73$  を乗じたものとした。

解析結果は、図-10(a) (打設温度  $23^{\circ}\text{C}$ ) に示したように中心部と表面で温度上昇は多少異なるが、70~80時間までは  $20^{\circ}\text{C}$  付近で推移した後、100~120時間で最高温度に達して150~170時間後に温度低下となった。これらの温度変化の傾向は、簡易断熱温度上昇試験の実測値とほぼ一致していた。また、温度変化は、図-10(b)のように打設温度が高い場合 ( $30^{\circ}\text{C}$ ) は、最高温度が観察される時期がやや早くなり、低い場合 ( $10^{\circ}\text{C}$ ) は、遅くなると同時に最高温度の位置が不明瞭となる傾向が見られた。

以上から超遅延剤により凝結を遅延させた泥水固化材の遅延状況は温度変化 (上昇) がなく、凝結の開始は温度上昇性状で確認・把握することが可能であることが明らかとなった。

#### b) 練り上がり温度の影響

材料温度を  $15^{\circ}\text{C}$ 、 $22^{\circ}\text{C}$ 、 $28^{\circ}\text{C}$ 、 $35^{\circ}\text{C}$  の4段階に調整して混練した泥水固化材 (表-3の配合E) について検討した。

練り上がり後のテーブルフロー値は順に  $182\text{mm}$ 、 $197\text{mm}$ 、 $198\text{mm}$ 、 $219\text{mm}$  であり、練り上がり温度が高くなるにしたがってテーブルフロー値が大きくなっていった。これは、超遅延剤により凝結を遅延しているため、一般的に見られる高温条件で水和反応が助長される現象が生じることなく、単に粘性流体としてより高温条件で粘性が低下することによって流動性 (テーブルフロー値) が高くなったと考えられる。

図-11にこれらの泥水固化材を  $20^{\circ}\text{C}$  に設定した実験室内の湿空養生箱に入れて養生した際の温度の経時変化を示した。練り上がり温度が  $15^{\circ}\text{C}$  と  $22^{\circ}\text{C}$  の場合には徐々に温度が上昇し、材令72時間で  $21^{\circ}\text{C}$  前後の室温付近となった。  $28^{\circ}\text{C}$  と  $35^{\circ}\text{C}$  の場合には温度が徐々に低下し、材令72時間で  $21^{\circ}\text{C}$  前後となった。

図-12には90時間までのベーンせん断強さの変化を示した。せん断強さは、約70時間までいずれも  $0.1\text{kPa}$  前後でほとんど変化がなく、70時間を超えると僅かにせん断強さの増加が生じていた。せん断強さに変化の無い期間は、上述の環境温度に近づく期間の温度変化と一致している。

図-13には材令28日までの一軸圧縮強度の変化に

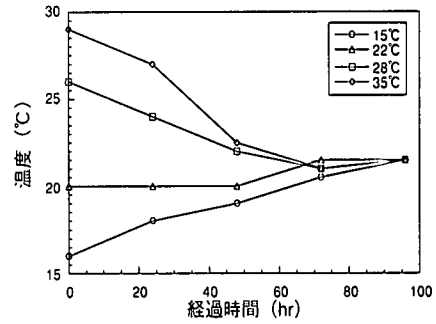


図-11 練り上がり温度と温度の経時変化

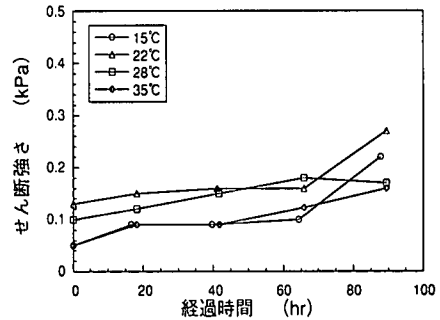


図-12 練り上がり温度とせん断強さの変化

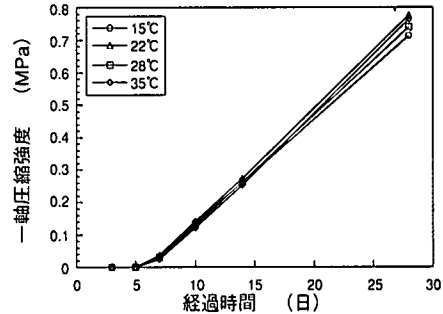


図-13 練り上がり温度と一軸圧縮強度発現

について示した。一軸圧縮強度の発現は材令5日以降は、練り上がり温度の違いに関わらず、全く同じ傾向を示していた。したがって超遅延剤による3日程度の遅延では、養生環境の温度が同一の場合には一軸圧縮強度の発現への練り上がり温度の影響は、全く見られないことが明らかである。

#### c) 凝結遅延期間の再攪拌の強度発現への影響

凝結を遅延している期間の攪拌などの物理的な作用が、凝結の遅延や遅延終了後の強度発現に与える影響について表-3の配合Dで検討した。

図-14に最初の混練 (0時間後混練とした) のみ、24時間後に再攪拌混合した場合、24時間後と48時間後に再攪拌混合した場合の泥水固化材の材令と一軸圧縮強度との関係を示した。



図のようにいずれの場合においても、材令72時間までには凝結が遅延しており、再攪拌による遅延時間への影響は小さいことが明らかとなった。

一方、遅延終了後の強度発現はいずれの場合もほとんど同様の発現傾向を示しており、再攪拌による強度発現への影響は小さいことが明らかとなった。

したがって超遅延剤による凝結遅延では、遅延期間に攪拌混合のような物理的な作用が働いても、凝結遅延あるいは遅延終了後の強度発現への影響を考慮する必要がないことを確認した。

#### d) 凝結遅延期間の泥水固化材の鋼材引き抜き抵抗

泥水固化材に応力分担材としてH鋼などの構造材を建て込む場合の構造材にかかる力の経時変化について表-3の配合Dで検討した。

検討は図-4に示した模擬応力分担材を凝結遅延させた泥水固化材に一旦挿入し、10分経過してから引き抜く際に、応力分担材にかかる力をロードセルを用いて測定した。

図-15に試験結果を示した。混練直後では引抜き抵抗力は小さく、引抜き速度を10～100cm/minの範囲に変化させても大きな相違はなく0.05kPa程度であった。これに対して混練後72時間経過した場合には、引抜き抵抗力は引抜き速度が増加するに連れて増加した。引抜き速度100cm/minでは、引抜き抵抗力は0.33kPaであった。

以上の結果から、20℃条件に比較的溫度条件に近い図-12の15℃および22℃の例に見られるように、材令72時間以前のせん断強さの変化が見られない凝結遅延期間では、引抜き抵抗力が小さく、引抜き抵抗力は引き抜き速度に依存しない。一方、混練後72時間経過してせん断強さが発現し増加してくる段階では引抜き抵抗力は増加し、また引き抜き速度に依存して増加する性質を示すことが明らかとなった。

## 5. 施工への適用

溫度計測で凝結遅延・凝結開始が確認でき、凝結遅延と遅延終了後の強度発現に対して練り上がり溫度や応力分担材の挿入などの要因が影響を与えないことを確認して、規制環境下での山留壁の築造工事に遅延型泥水固化材を適用した。

泥水固化壁の施工フローを図-16に示した。図のように垂直多軸回転カッター機で掘削し、超遅延型泥水固化材を打設する。配合の選定は、泥水との置換に十分な密度で、28日材令時の一軸圧縮強度が0.5MPa以上、ブリーディング率5%以下で地中連続壁の内部掘削時の壁体（泥水固化材硬化体）の耐久

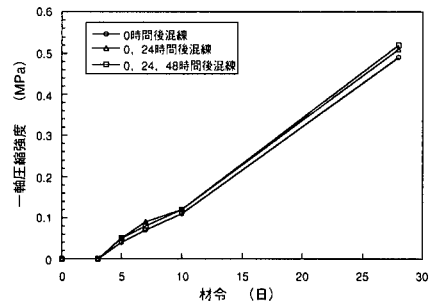


図-14 再攪拌と一軸圧縮強度発現

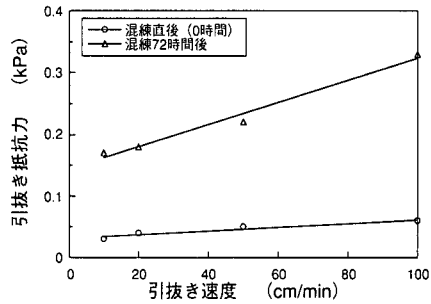


図-15 引き抜き速度と引き抜き抵抗

性からより密度の大きいものが適当と判断し、表-3に示した配合Eを実施配合とした。

固化材は、現場に設置した固化材製造プラントで製造し、圧送距離が120mと比較的長いので打設機まではモノポンプ2台を介して圧送し打設した。応力分担材の建込み方法は、両端の応力分担材にスペーサを取り付けて先行して建込む。本工事では応力分担材長が47.5～48.0mと長いので2カ所の継手を設けて、建込みながら継手接続を行った。泥水固化壁による地中連続壁工事概要は以下の通りである。

#### 超遅延型泥水固化材（表-3、配合E）

- 高炉セメントB種250kg
- 超遅延剤5kg
- 高分子増粘剤2.4kg
- 掘削幅0.8m、深度48.0～48.5m
- 造壁面積8,800m<sup>2</sup>
- 応力分担材 H588×300×12×10 550本

実際の施工では、応力分担材の挿入は超遅延型泥水固化材の打設後最大でも48時間までに完了した。その間の応力分担材の挿入はいずれも円滑に行うことができた。

遅延型泥水固化材の凝結が所定の計画通りに72時間遅延しているか否かの判断については、室内試験

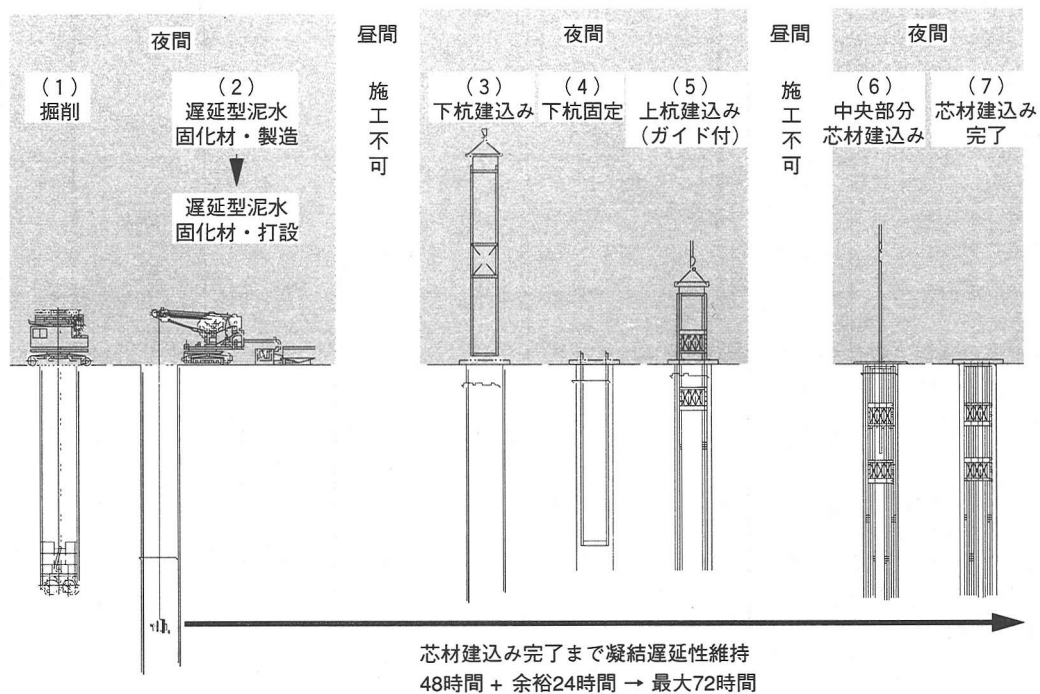


図-16 泥水固化壁の施工フロー

での実測と解析で検討を行った温度変化特性と打設した泥水固化材の温度変化特性が同様の性状になるか否かにより行った。

図-17に深度25mでの温度計測結果を示した。図のように打設後3日（約70時間）までは温度上昇が見られず、その後急激に温度が上昇し6日（約120時間）で最高温度となっている。したがって、打設後3日は凝結遅延し、その後の発熱に伴って強度が発現し硬化したと推定され、所定の凝結遅延性能を満足するものであったと考えられる。一方強度発現は、泥水固化材のプラント製造時に採取し、20℃湿空養生した供試体においても、材令24日時のボーリングコア採取供試体においても、0.5MPa以上の一軸圧縮強度を有しており、強度性能においても品質的に満足するものであった。

## 6. まとめ

遅延型泥水固化材の室内試験により、以下の知見が得られ、遅延型泥水固化材の基本配合を得た。

- 1)72時間の凝結遅延とブリーディング率5%以下の性能を満足する配合は、ベントナイト量80kgで高分子増粘剤量がベントナイト量の3%となった。
- 2)上記の配合では、超遅延剤添加量がセメント量の2%であるが、2%までの範囲で凝結時間を任意に

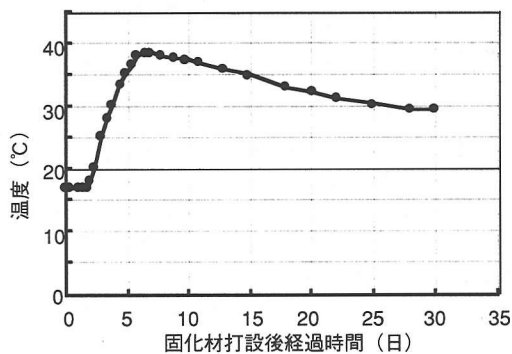


図-17 打設泥水固化材の温度変化

制御することが可能で、28日材令の一軸圧縮強度は、常に同程度の強度が得られ凝結遅延の影響がないことが認められた。

基本配合をもとに固化材の性質について検討し、以下の知見が得られ、温度計測で凝結遅延と凝結開始の確認することが可能で、品質管理に適用できると考えられた。

- 3)72時間凝結遅延した固化材は、混練後70時間まで練上り温度を維持した後、温度が上昇して120時間で最高温度に達し、150時間経過後に温度の低下が生じた。
- 4)強度発現は混練後120時間経過してから明瞭で、一軸圧縮強度として測定可能な強度発現は、最高

温度に到達した時間に相当していた。

5) 温度解析では、壁中心部の温度変化は室内試験の温度変化とほぼ一致した。

さらに、以下の知見から練り上がり温度の変化や応力分担材の挿入など、実施工で想定される要因により凝結遅延と凝結開始が影響を受けないことが確認され、実施工に適用できると考えられた。

6) 練り上がり温度が異なっても約70時間までは環境温度に近付き、その後温度が上昇し凝結が開始することから、練り上がり温度は、凝結遅延と凝結開始に影響を与えないことが明らかとなった。

7) 遅延期間の再攪拌は、凝結遅延と終了後の強度発現に影響を与えないことが明らかとなり、応力分担材の挿入などの外作用による凝結遅延と凝結開始への影響は小さいと考えられた。

8) 混練直後では応力分担材の引抜き抵抗力は小さく引抜き速度に依存せず、混練後72時間経過した場合では引抜き抵抗力は大きくなると同時に引抜き速度に依存する傾向を示した。

以上の検討結果を踏まえ、泥水固化壁による地中連続壁の実施工に遅延型泥水固化材を適用した。その際、以下の知見を得ることができた。

9) 実施工での固化材の温度上昇性状は室内試験および解析結果とほぼ同様で、約70時間の凝結遅延が推定され、応力分担材の挿入は混練後48時間経過しても円滑に実施できたが、72時間経過については挿入する機会がなく確認できなかった。

10) 実施工で製造した固化材から採取した供試体およびボーリングコア供試体の材令28日の一軸圧縮強度の試験結果から、凝結が開始し所定の強度発現が発現していることを確認した。

#### 参考文献

1) 久保博, 漆原知則, 川地武: 水中打設ソイルセメント工法の研究(その9)-再圧送を容易にするための硬化遅延剤の検討-, 第27回土質工学研究発表会, pp.2353-2354, 1992.

2) 長岡誠一, 上原伸郎, 青山要, 玉井達郎, 五十嵐寛昌: 超遅延型安定剤を用いた裏込め注入材料, 土木学会第54回年次学術講演会, III-B, pp.398-399, 1999.

3) 伊藤真純, 竹内徹: 遅延および超遅延のメカニズム, セメント・コンクリート, No.4721, pp.31-37, 1986.

4) 西田光昭, 杉田真一, 遅延剤を使用したセメント改良土の基礎的研究, 第32回地盤工学研究発表会, pp.2441-2442, 1997.

5) 稲田弘二, 松居克: 超遅延剤を用いたソイルセメントの諸性状, 第34回地盤工学研究発表会, pp.853-854, 1999.

6) 藤原靖, 檜垣貫司, 湯田坂貞利, 橋典: 遅延型泥水固化材の未硬化時の性状と硬化特性, 土木学会第53回年次学術講演会, III-B, pp.594-595, 1998.

7) 藤原靖, 檜垣貫司, 大谷崇, 大友健: 凝結時間を制御した泥水固化材の性質, 第34回地盤工学研究発表会, pp.835-836, 1999.

8) Albenque, M., Collon, L., Lorec, S., Bomble, J.P., Mortureux, B., Regourd, M. and Volant, M.: Etude et mise au point de produits en argile stabilisée par le ciment, *Ciments Betons Plâtres Chaux*, No.737, pp.217-226, 1986.

9) 脇坂安彦, 藤原靖, 前田照信, 三谷哲: モンモリロナイト含有骨材とセメントとの鉱物化学的反応, コンクリート工学年次論文報告集, No.12-1, pp.739-744, 1990.

10) 竹下治之: 超遅延剤を添加したコンクリートの基礎的特性に関する研究, 土木学会論文集, No.278/V-6, pp.221-229, 1987.

11) 三浦重義, 吉田清司: ベントナイト廃泥水の固化に及ぼす分散剤の影響, 土木学会第38回年次学術講演会, III, pp.593-594, 1983.

12) コンクリート標準示方書施工編, 土木学会, pp.185-186, 1998.

13) 技術資料「コンクリート超遅延剤パリック T」, エフ・ピー・ケー株式会社, pp.4, 1995.

(2000.7.5受付)

## PROPERTIES AND APPLICATION OF RETARDED BENTONITE CEMENT SLURRY MATERIAL

Yasushi FUJIWARA, Takashi OOTANI and Kanji HIGAKI

Exothermic and hardening properties of 72 hours retarded bentonite cement slurry material to maintain installation time of the material for stress distribution produced by retarding admixtures was investigated. Through these investigations, it was confirmed that temperature rising of the material could not be observed during the retarded term, strength development could be recognized by temperature rising and the maximum temperature of the material and the retarded term and strength development after retardation could not be influenced by temperature difference of the slurry after mixing and by mechanical action. The retarded material has been smoothly applied to the execution time restricted construction of deep earth retaining wall.