

# 地下連続壁コンクリートの配合に関する研究 (その1)

——流動化剤を多量使用した各種低発熱型セメント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 1)

——Characteristics of Superplasticized Concrete  
Using Low-Heat-Type Blended Cement——

Shigeru Aoki Shigeyuki Sogo  
Takashige Haga

### Abstract

Diaphragm walls are being used increasingly not only as temporary walls, but also as parts of structures, while being made to extend deeper underground. As a consequence, diaphragm walls are becoming thicker so that, as with mass concrete, thermal cracks due to heat of hydration of cement is now a problem with diaphragm-wall concrete. For this reason, it is necessary for diaphragm-wall concrete to be made with low-heat-type cement and be placed with the workability required of under-water concrete. The authors have attempted to grasp the effects of mix proportions in decreasing thermal cracks using superplasticized concrete made with a low-heat-type cement as diaphragm-wall concrete. From the results obtained in the study it was possible to confirm improvement in flowability of fresh concrete, decrease in heat of hydration of cement at early ages, and the advantage of controlling compressive strength of concrete based on long-term ages.

### 概 要

地下連続壁の用途拡大に伴い重要構造物の本体としても利用される例がふえる一方、大深度化も促進され、部材厚が比較的大きい地下連続壁の施工例が多くなってきた。従って、地下連続壁コンクリートとしては従来から普通ポルトランドセメントが用いられているが、マスコン化による壁体コンクリートの温度ひびわれなどの問題に対処するため、水和熱の小さいセメントを用い、かつ水中コンクリートとして必要なワーカビリティをもったコンクリートを施工することが必要となる。そこで地下連続壁のマスコン化に伴う温度ひびわれの抑制を目的とし、材料および配合面から基礎実験を行なった。この結果、低発熱型セメントを使用し、さらに高性能減水剤を用いて流動化コンクリートとすることにより、フレッシュコンクリートの流動性の向上、初期硬化過程での水和熱の低減、圧縮強度を長期材令で管理した場合の有利性などが明らかとなった。

#### 1. まえがき

地下連続壁においては、強度はもちろんのこと止水性が品質上重要な事項である。

しかし、近年、地下連続壁の大深度化に伴い、壁厚の増大と高強度化によるセメントの多量使用のため、水和熱による温度ひびわれが生じるなどの問題が指摘されている。これを解決するためには種々の方法があるが、一

方策として、高性能減水剤の使用が考えられる。すなわち、高性能減水剤を用いることにより単位水量・単位セメント量の低減を計り、フレッシュコンクリートのワーカビリティを確保するとともに、温度ひびわれを抑制するために、硬化コンクリートの初期硬化特性を改善することなどが可能となる。さらに、低発熱型セメントを使用することにより、減水効果と水和熱抑制効果を期待することができる。

この研究は、地下連続壁コンクリートに高性能減水剤を流動化剤として使用し、かつセメントに各種低発熱型セメントを使用した場合のフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの基礎性状を調査したものである。なお、実験における流動化コンクリートの配合は、単位水量を極力削減する必要からスランプ増大量を標準値<sup>1)</sup>(5cm~8cm)より大きくとり、流動化剤を多量に用いる配合とした。

## 2. 実験概要

### 2.1. 材料

セメントは地下連続壁コンクリートに通常使用されている普通ポルトランドセメントを基準とし、3種類の低発熱型セメントを用いた。使用し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B種(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。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。

混和剤には次の2種類のものを用いた。すなわち、流動化させない軟練りコンクリート用混和剤および流動化コンクリートのベース用混和剤としては、遅延型 AE 減水剤を使用し、流動化剤としてはスランプロス低減型流動化剤を用いた。使用したAE減水剤はリグニンスルホン酸を主成分とし、流動化剤は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ものである。特に、流動化剤についてはトレミー打設を考慮し、コンシステンシーの保持性の良いスランプロス低減型とした。

### 2.2. 配合

配合は各セメントの種類につき、流動化させない軟練りコンクリートと流動化コンクリートの配合の2種類に大別される。目標スランプは軟練りコンクリートおよび流動化コンクリートともトレミー打設を考慮し19cmとした。なお、流動化コンクリートのベーススランプは4cm, 8cm, 12cmの3系列を基準とした。目標空気量は、耐久性を考慮し5%とした。

水セメント比は各配合とも45%とした。細骨材率は、49%を基準とし、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。配合表を表-2に示す。

### 2.3. 混練り方法

種別	比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	スラグ (%)	FA量 (%)	フロー値 (mm)	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
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	S	G		
		ベース	流動化	ベース	流動化								
①	NP	19	--	5	--	45	45	167	371	780	1,017	0.25	--
②		4	19	5	5	45	50	143	318	918	981	0.25	1.6
③		8	19	5	5	45	49	151	336	884	981	0.25	1.0
④		12	19	5	5	45	48	159	351	848	984	0.25	0.6
⑤	BB	19	--	5	--	45	45	162	360	785	1,023	0.25	--
⑥		4	19	5	5	45	50	142	316	915	979	0.25	1.6
⑦		8	19	5	5	45	49	148	329	884	984	0.25	1.0
⑧		12	19	5	5	45	48	154	342	853	990	0.25	0.7
⑨	MKB	19	--	5	--	45	45	159	353	788	1,029	0.25	--
⑩		4	19	5	5	45	50	134	298	933	995	0.25	1.4
⑪		8	19	5	5	45	49	141	313	897	1,001	0.25	1.0
⑫		12	19	5	5	45	48	147	327	866	1,004	0.25	0.8
⑬	FMKB	19	--	5	--	45	45	153	344	788	1,029	0.25	--
⑭		8	19	5	5	45	49	136	302	897	1,001	0.25	1.0

表-2 配合表

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施工指針(案)」に準拠して行なった。

ミキサーは可傾式(容量100l)を用い、1バッチ70lとした。混練り時間は、軟練りコンクリートの場合で3分、流動化コンクリートについてはベースで3分、流動化で1分とした。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、練り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を測定する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、練り上がり直後、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、圧縮強度試験および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、28日、56日、91日の5材令とした。静弾性係数の測定にはコンプレッソメーターを使用した。

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状

#### (1) 単位水量と単位セメント量

ベーススランブをパラメータとしたセメント種類と単位水量の関係を図-1に示す。また、セメント種類と単位セメント量の関係を図-2に示す。いずれのベーススランブにおいても低発熱型セメントを用いたものは普通セメントを用いたものより単位水量が少なく、その順はNP, BB, MKB, FMKBであった。NPとFMKBでは同一スランブを得るための単位水量は約  $15 \text{ kg/m}^3$  異なり、フライアッシュ、スラグの流動性改善効果が認められた。流動化剤を使用したコンクリートは、ベーススランブ  $4 \text{ cm} \sim 12 \text{ cm}$  の範囲ではセメント種類にかかわらず、軟練りコンクリートに比べ単位水量と単位セメント量で5%~15%程度の低減が可能となったことがわかった。またベーススランブ  $8 \text{ cm}$  の配合に着目すると、セメント種類にかかわらず軟練りコンクリートに比べ単位水量と単位セメント量で約10%程度の低減効果が認められる。さらに普通セメントを用いた軟練りコンクリートを基準にとると、混合セメントを用いた流動化コンクリートではベーススランブ  $8 \text{ cm}$  の配合において単位水量で約  $20 \text{ kg/m}^3 \sim 30 \text{ kg/m}^3$ 、単位セメント量で約  $40 \text{ kg/m}^3 \sim 70 \text{ kg/m}^3$  程度が低減できた。なお、低減効果についてはBB, MKB, FMKBの順で大きくなる傾向が示されている。以上の単位セメント量の削減はコンクリートのコスト面だけでなく、初期硬化時における水和熱温度の低減に有効である。

図-3に流動化剤添加率とスランブ増大量の関係を示した。流動化剤の添加率とスランブ増大量は、セメント種類にかかわらず、ほぼ比例関係にある。すなわち、同一水結合材比ならスラグおよびフライアッシュはセメント量に含み、流動化剤の添加率はC+ (スラグまたはフライアッシュ) に対する重量%で管理できるものと考えられる。

#### (2) ブリージングと凝結性状

流動化コンクリートのブリージング率は図-4にみられるように、セメント種類にかかわらず軟練りコンクリートの値よりも総じて大きい結果となった。しかし、適当なセメントとベーススランブを選定することにより軟練りコンクリートと同程度のブリージング率とすることは可能であると思われる。ブリージングは地下連続壁の止水性と密接な関係があり、実施工においては十分な配

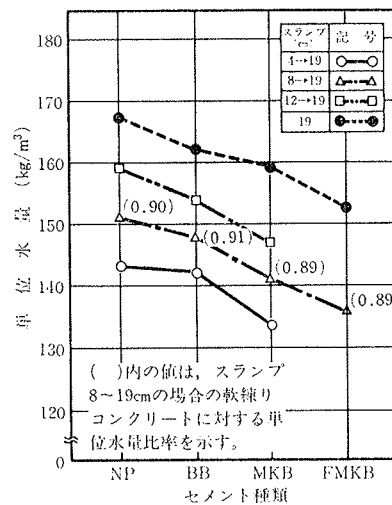


図-1 セメント種類と単位水量

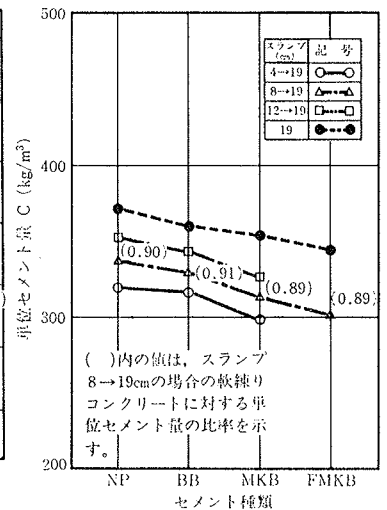


図-2 セメント種類と単位セメント量

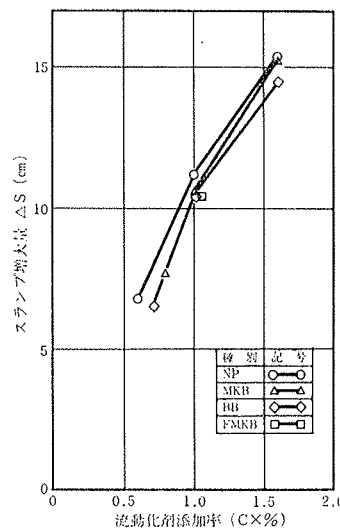


図-3 流動化剤添加率とスランブ増大量

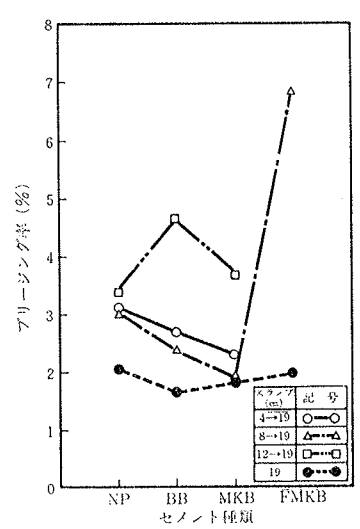


図-4 ブリージング率

合検討が必要である。図-5にプロクター貫入抵抗試験結果を示す。流動化コンクリートについてはベーススランブが  $8 \text{ cm}$  の場合を示した。軟練りコンクリートおよび流動化コンクリートとも NP, BB, MKB, FMKB の順で始発と終結が遅くなっており、スラグとフライアッシュの凝結遅延性が顕著に現われている。流動化コンクリートと軟練りコンクリートを比較すると、NP, BB では軟練りコンクリートの方が、また MKB, FMKB では流動化コンクリートの方が凝結が早い傾向にある。

なお、この報告では割愛したが、流動化コンクリートにおいてはベーススランブが小さいほど凝結時間が長くなっている。これはスランブ増大量すなわち流動化剤の添加量による流動化剤の中の遅延成分の増加に伴う遅延効果の差であると考えられる。

#### (3) スランブと空気量の経時変化

流動化コンクリートおよび軟練りコンクリートのスランブと空気量の経時変化を図-6に示す。練り上がり後

の時間経過に伴うスランプ低下量はセメントの種類にかかわらず、流動化コンクリートの方が軟練りコンクリートより小さい結果となった。従来型の流動化コンクリートはむしろスランプロスが大きい、今回の実験では逆にスランプロスが小さくなっており、これは流動化剤に含まれるスランプロス低減剤の効果によるものと考えられる。空気量については、軟練りコンクリートより流動化コンクリートの方が低下が若干はやい傾向にはあるが、ほとんど有意差は認められなかった。

3.2. 硬化コンクリートの性質

(1) 圧縮強度

各種のセメントを用いた標準養生供試体の圧縮強度と材令の関係を図-7に示した。流動化コンクリートについてはベーススランプが8cmの場合を示した。これらの材令28日および材令91日の圧縮強度の値を表-3に示す。流動化コンクリートおよび軟練りコンクリートとも材令28日以前はNP, BB, MKB, FMKBの順で強度が高いが、材令91日ではBBがNPより高く、総じて高炉系セメントコンクリートの長期材令での強度発現の伸び率が大きいことが認められた。

セメント種類 圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	軟練りコンクリート				流動化コンクリート			
	NP	BB	MKB	FMKB	NP	BB	MKB	FMKB
材令28日	405	392	312	272	385	392	305	262
材令91日	469	491	433	398	500	554	466	402

表-3 圧縮強度測定結果

流動化コンクリートと軟練りコンクリートの圧縮強度を比較すると図-8にみられるように、材令28日以前は最大7%程度の差異が認められる。しかし、材令28日以後は流動化コンクリートの方が軟練りコンクリートよりセメントの種類にかかわらず強度が高く、長期材令における良好な強度発現性状を示している。これは実験で用いた流動化剤の遅延効果によるものと考えられる。

なお、この報告においては割愛したが、流動化コンクリートのベーススランプの違いによる圧縮強度の差異については、初期材令におけるNP, BBのベーススランプが4cmの場合が他より若干低い結果となったものの、ほとんど同じ値を示した。

(2) 弾性係数

流動化コンクリートの静弾性係数を図-9に示す。静弾性係数と圧縮強度の関係は図中に示す曲線に近似される。得られた近似式はACIの提案式より若干大きな値となった。

3.3. 熱特性

断熱温度上昇試験の測定結果を図-10に示す。流動化コンクリートについてはベーススランプ8cmの場合の

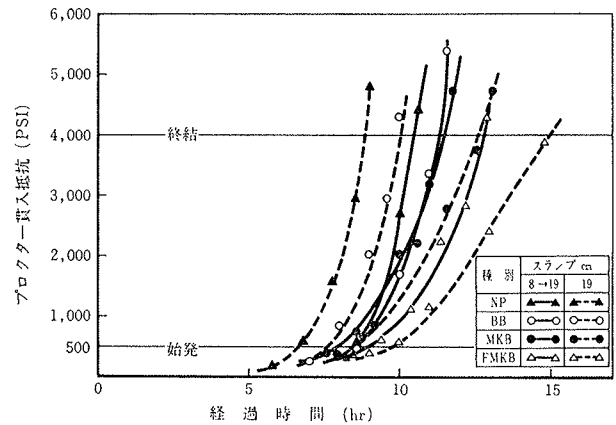


図-5 プロクター貫入抵抗試験結果

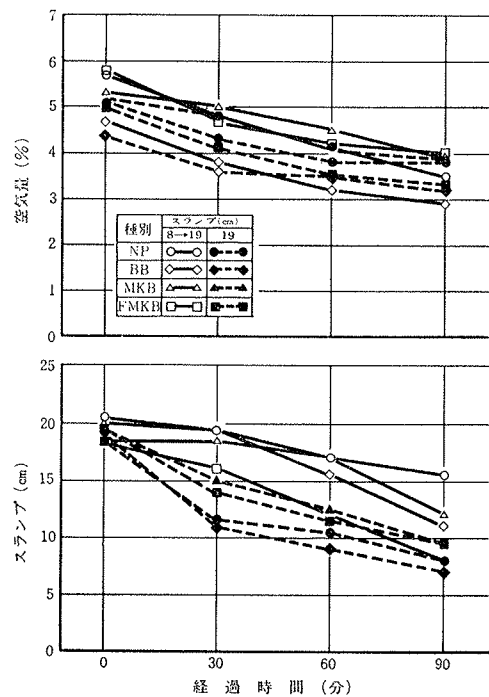


図-6 スランプと空気量の経時変化

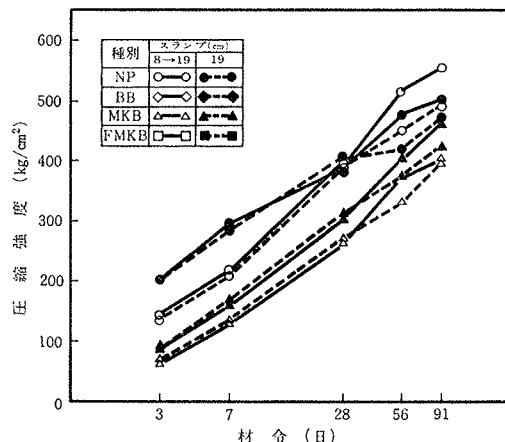
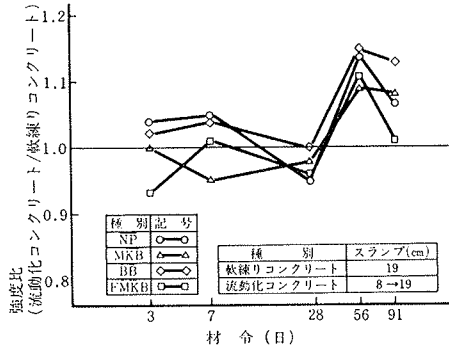
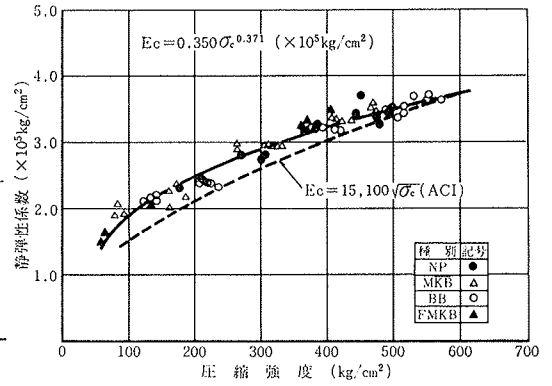


図-7 圧縮強度と材令

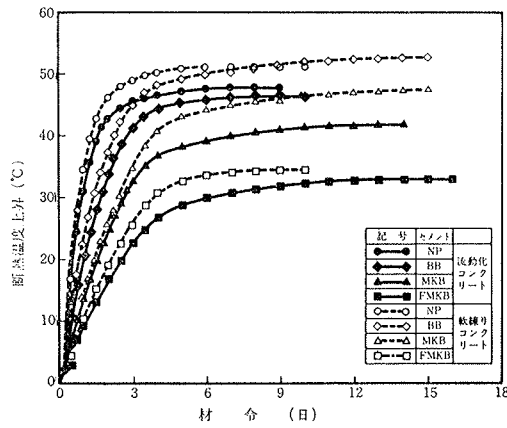
試験結果である。温度上昇を最小二乗法により材令の指数関数に近似し、その係数を表一4に示した。セメントの種類にかかわらず、流動化コンクリートを用いた場合のセメント量削減による水和熱低減効果が明確に認められる。軟練りコンクリートにおける断熱温度上昇はBBが高く、NP、MKB、FMKBの順で低くなっている。これは表一4の値を用い、同一単位セメント量で最高温度を試算した結果、使用したセメント自体の発熱特性によるものと判断される。各セメントにつき、単位強度当りの水和熱温度の計算値を図一11に示す。材令7日では高炉系セメントはNPに比べ高い数値を示すが、材令91



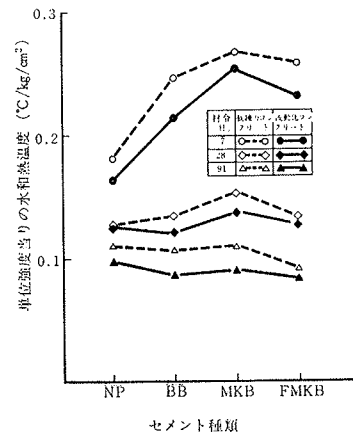
図一8 高性能減水剤の有無による圧縮強度比



図一9 流動化コンクリートの静弾性係数



図一10 断熱温度上昇試験結果



図一11 単位強度当りの水和熱温度

日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。

以上より、流動化剤と低発熱型混合セメントを用いた適正な配合は、地下連続壁コンクリートの温度ひびわれ低減に有効であるとみなされる。

#### 4. まとめ

地下連続壁コンクリートに低発熱型セメントを用い、これにスランプロス低減型流動化剤を添加した流動化コンクリートは次の特性があることが判明した。

(1) 単位セメント量を削減することができ、さらにセメントの低発熱性と合わせ、水和熱温度の低減が可能となる。これは地下連続壁のマスコン化による温度ひびわれの抑制に効果がある。

(2) 圧縮強度は材令28日以後の強度発現性が良く、圧縮強度を長期材令でとらえた場合、普通セメントを用いた軟練りコンクリートより有利である。

セメント種類	軟練りコンクリート		流動化コンクリート	
	最高温度上昇値 K°C	温度補正係数 α	最高温度上昇値 K°C	温度補正係数 α
NP	51.55	1.022	48.603	0.896
BB	52.395	0.599	47.527	0.602
MKB	47.873	0.396	42.081	0.456
FMKB	36.493	0.383	33.190	0.365

Y = K(1 - e<sup>-αx</sup>)  
 Y: 温度上昇量(°C)    α: 温度補正係数  
 K: 最高温度上昇量(°C)    x: 材令(日)

表一4 温度上昇式の係数

(3) 練り上がり後のスランプロス抑制、凝結の遅延などの効果があり、施工性を改良できる。

さらに、流動化コンクリートの製造に必要な流動化剤の添加率、ベースからの適性なスランプ増大量などの諸データを得ることができた。これらは今後の配合条件の選定に資するものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 土木学会: 流動化コンクリート施工指針(案), コンクリートライブラリー第51号, (1983. 10)