

論文

[1033] 高性能地下連続壁のコンクリート配合に関する実験的研究

坂田 昇\*1・田沢雄二郎\*2・大友 忠典\*3・瀬戸謙一郎\*1

1. はじめに

最近、地下空間の有効利用が盛んに行われる中、地下連続壁のコンクリートに、より高い品質が要求されつつある。具体的には、構造物の多様化や高度化に伴い、また、経済性から部材寸法をより小さくすることが望まれることに伴い、設計基準強度600~800kgf/cm<sup>2</sup>程度の高強度が要求されている。また、コストダウンや工期短縮のために、今後さらに地下連続壁を本体に利用されることが予想されることから、安定液中に打込んだコンクリートが気中でバイブレータによって締固めたコンクリートと同程度の均等質のコンクリートとなることが要求されている。これらのことを踏まえて、高強度で充填性が高い高性能地下連続壁のコンクリートの配合について、室内試験によって実験的に検討したので、その結果について報告する。

2. 検討したコンクリート配合の特徴

検討したコンクリートの配合は、高強度が得られるように水セメント比を25~45%とした。また、セメントには、低発熱でマス養生下での強度発現が良好であることから高ビーライト系ポルトランドセメント<sup>1)2)</sup>を使用した。このセメントは中庸熱ポルトランドセメントの規格に合格するものである。さらに、流動性を向上させることを目的として高性能AE減水剤を使用し、分離抵抗性を高め充填性を向上させるとともに、流動性を安定させることを目的として特殊増粘剤(水溶性ポリサッカライド)を使用した。これらの配合条件を基に、基本配合でのフレッシュコンクリートの性状として目標スランプフローを65±5cm、目標空気量2±1%とし、また、配合強度として800~1000kgf/cm<sup>2</sup>を目標とした。ここで、既往の研究事例から目視による分離が生じない最大のスランプフローが70cm程度である

こと、また、充填性の観点より60cm以上が望ましいことから目標スランプフローを65cmとし、その範囲を±5cmとした。

表-1 使用材料

使用材料	摘要
セメント	C社製 高ビーライト系ポルトランドセメント (比重 3.22, ブレーン値 3340cm <sup>2</sup> /g, C <sub>2</sub> S:28%, C <sub>3</sub> S:56%)
細骨材	上野原産川砂と君津産山砂の6:4の混合砂 (比重 2.59, F.M. 2.76, 実積率 70.3%, 吸水率 2.4%)
粗骨材	八王子産硬質砂岩碎石 (G <sub>max</sub> 20mm, 比重 2.65, F.M. 6.66, 実積率 60.6%, 吸水率 0.6%)
高性能AE減水剤	K社製 ポリカルボン酸塩
消泡剤	K社製 シリコン系
AE助剤	N社製 変性アルキルカルボン酸化合物
増粘剤	Y社製 水溶性ポリサッカライド(ウエランガム)

3. 使用材料

使用材料を表-1に示す。ここで用いた増粘剤は気中で打込む高流動コンクリートに使用している特殊増粘剤<sup>3)</sup>と同じ成分を有するものである。

4. 練混ぜ方法がコンクリートの諸性状に及ぼす影響

4.1 試験内容

\*1 鹿島(株)鹿島技術研究所・第二研究部・研究員, 工修(正会員)

\*2 鹿島(株)土木技術本部・技術部・次長, (正会員)

\*3 鹿島(株)鹿島技術研究所・第二研究部・主管研究員, (正会員)

練混ぜ方法を試験の要因として、表-2に示す配合のコンクリートについて試験を行った。コンクリートの練混ぜには強制式二軸ミキサ(100ℓ, 60rpm)を用い、1バッチ当り50ℓを練り混ぜた。練混ぜ方法としては、以下の4ケースとした。

- ①一括練り 90秒；全材料投入後90秒間練り混ぜる。
- ②分割練り 90秒；モルタルを45秒間練り混ぜた後、粗骨材を投入し45秒間練り混ぜる。
- ③分割練り 120秒；モルタルを60秒間練り混ぜた後、粗骨材を投入し60秒間練り混ぜる。
- ④分割練り 180秒；モルタルを90秒間練り混ぜた後、粗骨材を投入し90秒間練り混ぜる。

それぞれ練り上げたコンクリートについて、表-3に示す測定を行った。

#### 4.2 試験結果及び考察

図-1にスランプフロー及びフロー時間の経時変化を示す。また、図-2に各ケースのVロート<sup>4)</sup>の流下時間を示す。分割練りの方が一括練りよりもスランプフローが大きくなり、またフロー時間が小さくなった。この傾向は、練混ぜ後90分経過のコンクリートについても同様であった。分割練りにおいては、練混ぜ時間の長短はスランプフローに影響しなかったが、フロー時間は練混ぜ時間が長いほど短くなった。この傾向はVロートの流下時間についても同様であった。ここで、Vロート試験の流下時間は5秒以上で小さい方が間隙通過性はよいことが既往の文献において示されている<sup>5)</sup>。これらのことから今回検討した配合においては、分割練りとする方がよく練り混ぜられ、さらに練混ぜ時間を長くすることによって間隙通過性が向上するものと考えられる。このようなことから、実施工ではミキサの種類や練混ぜ時間の選定が重要であると考えられる。圧縮強度は、各ケースとも材齢7日で451~462kgf/cm<sup>2</sup>、材齢28日で812~847kgf/cm<sup>2</sup>、材齢91日で1061~1098kgf/cm<sup>2</sup>であり、練混ぜ方法の違いによる有意な差は認められなかった。

以上より、以後の試験の練混ぜ方法をケース④の分割練り180秒とした。

### 5. 配合条件がコンクリートの諸性状に及ぼす影響

#### 5.1 試験内容

表-4に示す事項を要因としてコンクリート試験を行い、表-3に示す測定を行った。試験に

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				SP剤* (C×%)	消泡剤 (C×%)	増粘剤 (W×%)
			W	C	S	G			
30.0	45.0	2±1	165	550	751	939	2.5	0.001	0.05

\*高性能AE減水剤

表-3 測定項目

測定項目	摘要
スランプフロー	JSCCE-1990
フロー時間	スランプフローが50cmに達するまでの時間
空気量	JIS A 1128
Vロート流下時間	文献4)
圧縮強度	JIS A 1108

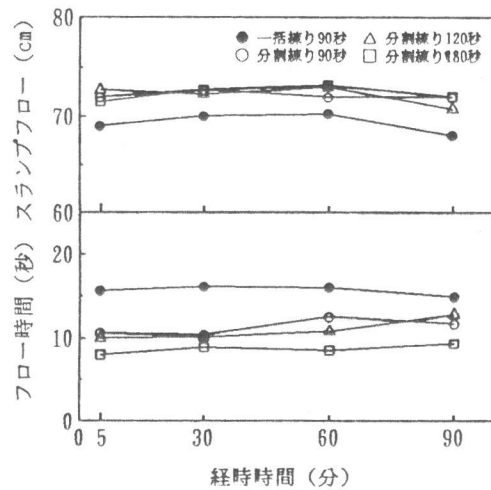


図-1 スランプフロー及びフロー時間の経時変化

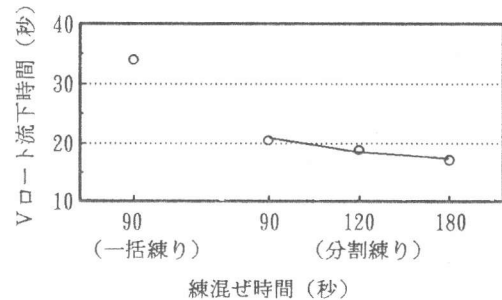


図-2 練り混ぜ方法とVロート流下時間の関係

表-4 試験要因及び水準

ケース	要因	水準
①	SP剤* 増粘剤の添加量	SP剤*: 1.0, 1.05, 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 2.0 (C×%) 増粘剤: 0, 0.05, 0.07, 0.10 (W×%)
②	単位水量	155, 160, 165, 170, 175kg/m <sup>3</sup>
③	水セメント比	25, 28, 30, 35, 40, 45%
④	空気量	2, 4, 6, 8%

\*高性能AE減水剤

供したコンクリートの配合は表-5に示すとおりである。

### 5.2 試験結果及び考察

#### (1) 高性能AE減水剤及び増粘剤の添加量

図-3に高性能AE減水剤の添加率とスランプフローの関係を示す。また、図-4に増粘剤の添加率とスランプフロー、フロー時間及びVロート流下時間の関係を示す。増粘剤無添加のものはスランプフローが60~

70cmの範囲において、高性能AE減水剤の添加率の変化に対し、スランプフローが急激に変化する結果となった。これに対し、増粘剤を少量(0.05~0.10W%)添加することによって、高性能AE減水剤の添加率の変化に対するスランプフローの変化が小さくなった。また、増粘剤の添加量によって、スランプフローが安定する値があり、その値は、今回の配合では増粘剤の添加率が0.05W%でスランプフロー70cm程度、増粘剤の添加率が0.10W%でスランプフロー65cm程度であった。これは高性能AE減水剤が粉体を鋭敏に分散する効果を増粘剤がある程度緩和するためであると考えられる<sup>6)</sup>。増粘剤の添加率が大きくなるほどスランプフローが小さくなり、また、フロー時間は大きくなる結果となった。これに対し、Vロート流下時間は、増粘剤の添加率が大きくなるほど、フロー時間とは逆に小さくなる傾向を示した。Vロート流下時間が間隙通過性を表現していることから、増粘剤の添加により変形性及び変形速度は低下するが間隙通過性は向上するものと考えられる。図-5に充填性試験<sup>7)</sup>(高さ30cm×長さ50cm×幅30cmの容器にφ16mmの塩ビ管を水平方向に7.5cm間隔で配置した中に片側からコンクリートを打ち込む実験)の結果を示す。図に示すように増粘剤を添加することによって流動勾配が小さくなり、間隙通過性が向上する結果となった。圧縮強度については、高性能AE減水剤及び増粘剤の添加率の変化による有意

表-5 コンクリートの配合

ケース	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				SP剤* (C×%)	消泡剤 (C×%)	AE助剤 (C×%)	増粘剤 (W×%)
				W	C	S	G				
①	30.0	45.0	2±1	165	550	751	939	X	0.001	0	Y
②	30.0	45.0	2±1	155	517	774	969	1.7	0.001	0	0.10
	30.0	45.0	2±1	160	533	763	954	1.7	0.001	0	0.10
	30.0	45.0	2±1	165	550	751	939	1.7	0.001	0	0.10
	30.0	45.0	2±1	170	567	739	924	1.7	0.001	0	0.10
	30.0	45.0	2±1	175	583	727	909	1.7	0.001	0	0.10
③	25.0	41.3	2±1	165	660	662	939	1.7	0.001	0	0.10
	28.0	43.4	2±1	165	589	719	939	1.7	0.001	0	0.10
	30.0	45.0	2±1	165	550	751	939	1.7	0.001	0	0.10
	35.0	47.0	2±1	165	471	832	939	1.7	0.001	0	0.10
	40.0	48.3	2±1	165	413	879	939	1.7	0.001	0	0.10
④	45.0	49.4	2±1	165	367	916	939	1.7	0.001	0	0.10
	30.0	45.0	2±1	165	550	751	939	1.7	0	0.0006	0.10
	30.0	45.0	4±1	165	550	728	910	1.7	0	0.0009	0.10
	30.0	45.0	6±1	165	550	704	864	1.7	0	0.0012	0.10
	30.0	45.0	8±1	165	550	681	851	1.7	0	0.0012	0.10

X:1.1, 1.05, 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 2.0(C×%) Y:0, 0.05, 0.07, 0.10(W×%) \*高性能AE減水剤

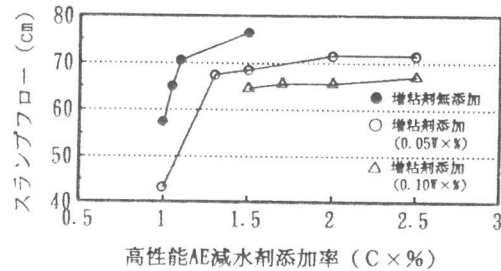


図-3 高性能AE減水剤の添加率とスランプフローの関係

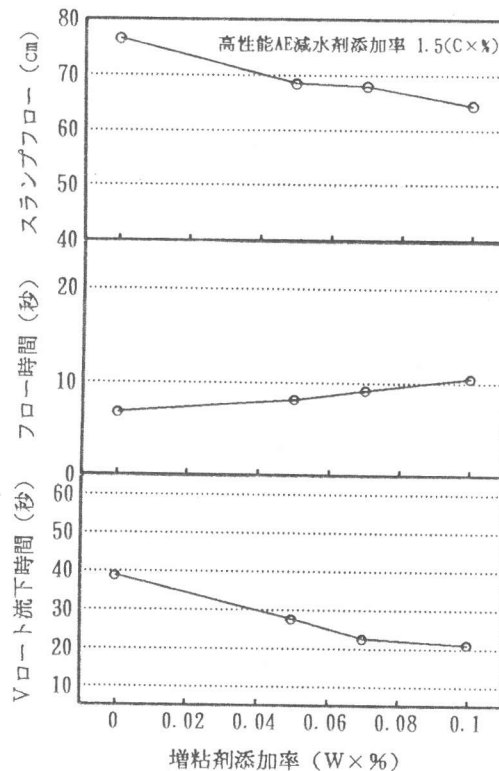


図-4 増粘剤の添加率とスランプフロー、フロー時間及びVロート流下時間の関係

な差はなかった。

### (2) 単位水量

図-6に単位水量とスランプフロー、フロー時間及びVロート流下時間の関係を示す。

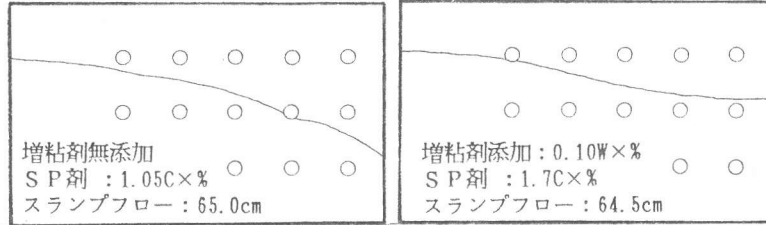


図-5 充填性試験結果

を示す。水セメント比一

定、細骨材率一定、高性能AE減水剤及び増粘剤の添加率一定のもとで単位水量を変化させた場合、単位水量を大きくするほどスランプフローが大きくなり、フロー時間及びVロート流下時間ともに小さくなった。これは、単位水量を大きくするほど、変形性及び変形速度が大きくなるとともに、間隙通過性もよくなることを示すものである。これらの結果の理由としては、単位水量が増えるほどペースト分が増え、逆に粗骨材量が減ることによるものと考えられる。圧縮強度については、単位水量の変化による有意な差はなかった。

### (3) 水セメント比

図-7に水セメント比とスランプフロー、フロー時間及びVロート流下時間の関係を示す。また、図-8にセメント水比と圧縮強度の関係を示す。単位水量一定、単位粗骨材量一定、高性能AE減水剤及び増粘剤の添加率一定のもとで、水セメント比を変化させた場合（セメント量を増減させ、それに応じて細骨材量を減増させた場合）、水セメント比が25～35%の間ではスランプフローはほぼ同じであったのに対し、水セメント比が35%以上では水セメント比が大きくなるほど、即ち単位セメント量が少なくなるほどスランプフローは小さくなった。これはスランプフロー60cm以上の変形性を得るためには、ある程度以上の微粉末量が必要であることを示すものである。また、フロー時間は水セメント比25～35%の範囲で水セメント比が大きいほど小さくなった。これは微粉末量が少なくなることによって変形速度が大きくなることを示すものである。ここで水セメント比40%でフロー時間が大きくなっているが、これは最終到達のスランプフローの値が小さくなったためであり、水セメント比45%ではスランプフローが50cmに達しなかったためフロー時間の測定ができなかった。Vロートの流下時間はフロー時間とは逆に

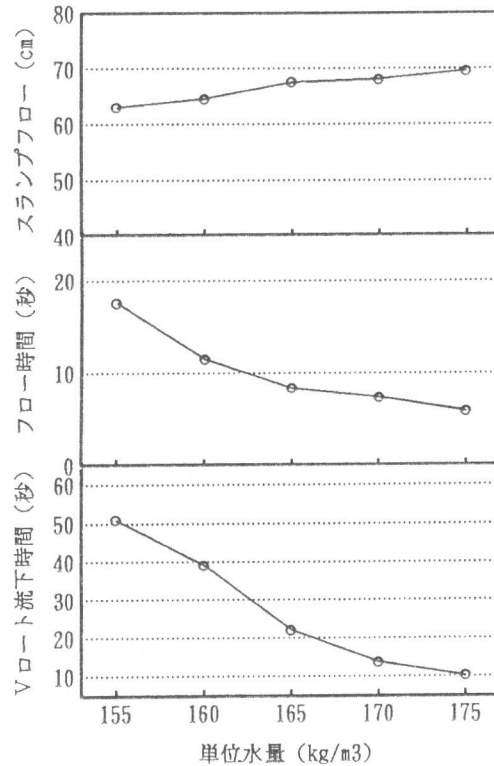


図-6 単位水量とスランプフロー、フロー時間及びVロート流下時間の関係

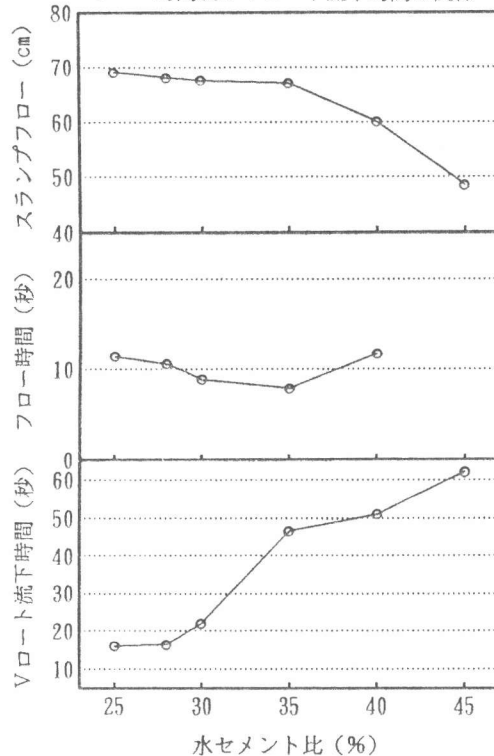


図-7 水セメント比とスランプフロー、フロー時間及びVロート流下時間の関係

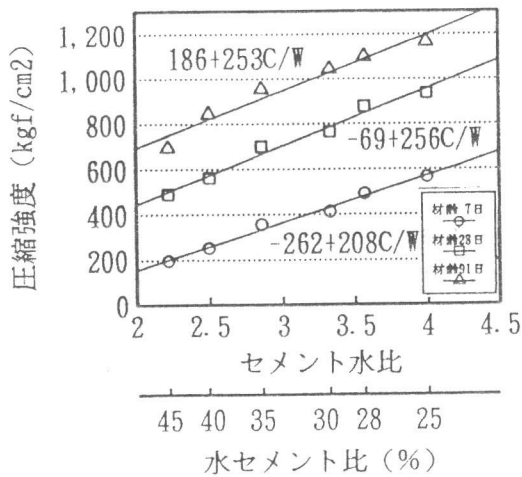


図-8 セメント水比と圧縮強度の関係

水セメント比が大きくなるほど大きくなり、微粉末量が少なくなることによって間隙通過性が低下するものと考えられる。圧縮強度は普通コンクリートと同様にセメント水比に比例し、 $W/C=28\%$ で $1100\text{kgf}/\text{cm}^2$ が得られる結果となった。

#### (4) 空気量

図-9に空気量とスランプフロー及び圧縮強度との関係を示す。スランプフローは、空気量が1.5～8.9%の範囲でほとんど変化しなかった。圧縮強度は空気量が多くなるほど小さくなった。具体的には、空気量が1.5～4.9%の範囲で空気量1%の増加に対し圧縮強度は1%減少し、空気量が4.9～8.9%の範囲で空気量1%の増加に対し圧縮強度は3%減少した。普通コンクリートの場合、一般に空気量1%の増加に対し圧縮強度は4～6%減少すると言われており、今回の結果はそれよりも小さいものであった。

#### 6. 発熱特性及びマス養生下での強度発現

空冷式断熱温度上昇試験装置を用いて断熱温度上昇試験を行った。試験に供したコンクリート配合は表-5のケース③の水セメント比30%とした。図-10に断熱温度上昇試験結果を示す。この結果を用いて壁厚1.2mの地下連続壁のコンクリートについて温度解析を行い、その結果を図-11に示す。図-11に示す温度履歴で養生(マス養生)した場合の圧縮強度発現と標準養生における圧縮強度発現を図-12に示す。一般にマス養生を行うことによって初期強度が大きくなるが長期強度では逆に小さくなる。既

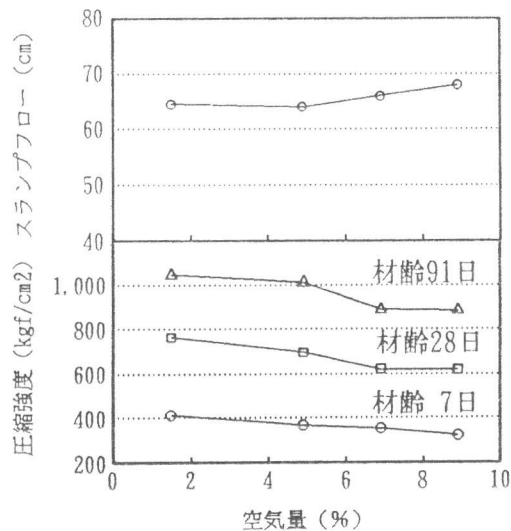


図-9 空気量とスランプフロー及び圧縮強度の関係

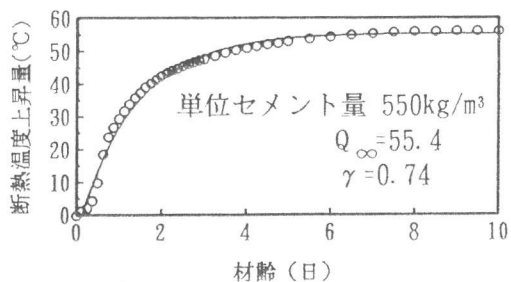


図-10 断熱温度上昇試験結果

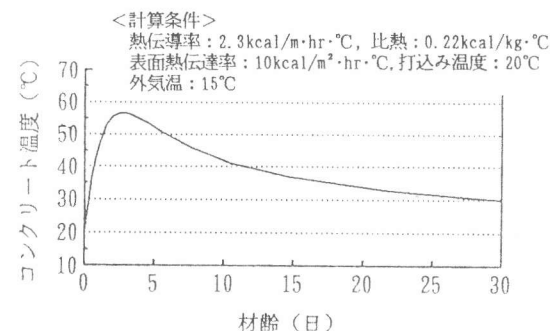


図-11 壁体中心部の温度履歴(解析結果)

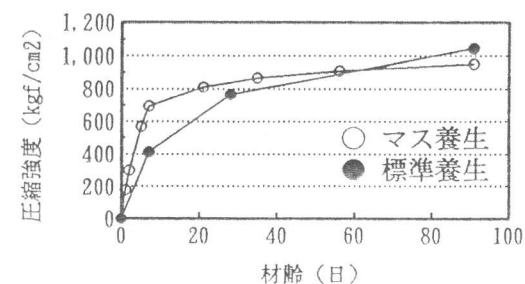


図-12 圧縮強度の発現

往の研究において、三成分系の低発熱形セメントを用いた高強度の高流動コンクリートの場合、材齢91日の圧縮強度がマス養生の場合、標準養生に比べて70%程度となっている<sup>8)</sup>。これに対し、今回の結果は、マス養生を行うことによって初期強度は大きくなり、また長期材齢においても標準養生に比べて90%以上の強度が得られた。これは高ビーライト系セメントが初期に高温を受けても長期に渡って良好な水和反応を示すといった特性によるものと考えられる。

## 7. 水中不分離性

コンクリートの水中不分離性を調べるため、 $\phi 15\text{cm}$ 、高さ30cmのビーカの中に深さ15cmまでコンクリートを入れ、コンクリート上面を乱さないように水を500cc（深さ約3cm）注ぎ込み、5分後にその水のPHを測定した。試験に供したコンクリートは表-5のケース①の高性能AE減水剤の添加率が1.7Cx%で増粘剤の添加率が0.0と0.10Wx%の2つとした。その結果、増粘剤無添加のものはPH=13であり水が濁っていたのに対し、増粘剤を0.10Wx%入れたものはPH=10であり水は透明であった。このことから、増粘剤を適量添加することによって水中不分離性が向上するものと考えられる。

## 8. まとめ

以上の結果より、セメントに高ビーライト系ポルトランドセメントを用い、水セメント比を30%程度とすることによって、マス養生下においても材齢91日で圧縮強度 $1000\text{kgf/cm}^2$ が得られ、充填性の観点からも水セメント比を30%以下（単位微粉末量  $550\text{kg/m}^3$ 以上）とすることが望ましいことが分った。また、特殊増粘剤を適量添加することによって、コンクリートの充填性が向上するとともに、特殊増粘剤の添加量によってスランプフローの安定する値があることが分った。さらに、特殊増粘剤を添加することによって水中不分離性が向上する結果となった。

### (参考文献)

- [1] 名和豊春, 深谷泰文, 鈴木清孝, 柳田克己: 高ビーライト系セメントを用いた高流動・高強度コンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 15-1, 1993.6
- [2] 依田和久, 桜本文敏, 閑田徹志, 名和豊春: 高流動・高強度コンクリートの実構造物への適用に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, 15-1, 1993.6
- [3] 万木正弘, 坂田 昇, 岩井 稔: 特殊増粘剤を用いた締固め不要コンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 14-1, 1992.6
- [4] 坂田 昇, 伊藤孔一, 若松 岳, 小沢一雅, 岡村 甫: フレッシュコンクリートの充填性評価のためのロート試験, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, 第5部, 1992.9
- [5] 小沢一雅, 坂田 昇, 岡村 甫: ロート試験を用いた締固め不要コンクリートの充填性評価, 土木学会論文集第V部門, 投稿中
- [6] 坂田 昇, 万木正弘, 岩城 実: 特殊増粘剤が高流動コンクリートの流動性を安定させる効果, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, 第5部, 1992.9
- [7] 坂田 昇, 万木正弘, 山本博之, 古澤靖彦: 高流動コンクリートの充填性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, 1990.6
- [8] 万木正弘, 坂田 昇, 中下兼次, 深田敦宏, 高強度・高流動コンクリートの現場施工実験, コンクリート工学協会超流動コンクリートに関するシンポジウム, 1993.5.