高強度・高流動コンクリートの地下連続壁への適用に関する研究

坂本淳[1]・大友健[2]・新藤竹文[3]・松岡康訓[4]

[1]正会員　工修　大成建設株式会社技術研究所（〒245-0051　神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）
[2]正会員　工博　大成建設株式会社技術研究所（〒245-0051　神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）
[3]正会員　工博　大成建設株式会社技術研究所（〒245-0051　神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）
[4]フェロー会員　工博　大成建設株式会社技術研究所（〒245-0051　神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）

本研究では，地下連続壁を対象とした配合強度80N/mm²以上の高強度・高流動コンクリートの配合を検討し，地下連続壁を模擬した試験体，および実大規模の地下連続壁への打設実験を行った．その結果，低熱ポルトランドセメントを主体とした結合材とポリカルボン酸系高性能AE減水剤を使用した配合は硬化時の温度上昇量が小さく，長期の強度発現性が良好であること，一般のレディミクストコンクリート工場においても連続的に安定した品質のものが製造可能であり，通常の連壁コンクリートと同様にトレミー工法による打込みが可能であることを示した．また，コンクリートのスランプフロー経時変化を調べることは有効な側圧管理手法となること，構造体の強度は打込み時に採取した標準養生供試体とほぼ同等の強度を有したが，その変動係数はやや増加する傾向がみられることを示した．

Key Words : *high strength, self compacting concrete, underground diaphragm wall*

1．はじめに

地下連続壁工法は土留め壁等の地下工事に欠かすことのできない工法であり，近年はその大深度化・大型化に伴い地下連続壁の壁厚が増大し，配筋が過密になる傾向にある．

しかし，地下タンク構造物等コンクリートの圧縮強度により壁の厚さが支配される構造物においては，従来より使用されてきた設計基準強度370kgf/cm²（36N/mm²）程度より高い強度のコンクリートを使用することで，コンクリート数量や掘削残土を少なくでき掘削機械の小型化も図れることから，省資源化や建設工費の低減が可能となる．

ただし，一般に高強度コンクリートは粘性が高くなるため，地下連続壁の施工で通常採られているトレミー管を用いた自重充てんによる打込みが難しくなり，過密配筋への充てんも困難となる．また，単位結合材量の増大に伴い，硬化時の水和熱が高くなるため，温度ひび割れの発生の可能性が高くなる．このような問題に対する材料および配合上での対応策としては，高性能AE減水剤の使用による高流動化，低熱ポルトランドセメント，フライアッシュ等の使用による低発熱化等が採られている[1)~3)]．

このような高強度・高流動コンクリートの地下連続壁への適用は近年増しているが[4)]，その構造体の品質について検証された例は少ない．本研究は，高強度・高流動コンクリートの地下連続壁への適用性を検証することを目的に行われた，配合選定実験や実規模地下連続壁への打設実験等の結果[5)~9)]をまとめたものである．

2．高強度・高流動コンクリートの配合選定実験

（1）実験内容

a)目標性能

本研究においては，一般的に入手できる材料を使用し，市中のレディミクストコンクリート工場において製造が可能であることを前提条件として，コンクリートの目標性能を設定すると共に，材料選定した．設定した目標性能を，表-1に示す．

強度特性としては，材齢91日で80~90N/mm²の圧縮強

表-1　コンクリートの目標性能

評価項目	評価指標	目標値
流動性	スランプフロー	68±5cm
分離抵抗性	500mmフロー到達時間	3～10秒
充てん性	充てん高さ	30cm以上 (障害条件R2)
強度特性	圧縮強度	80～90N/mm² (材齢91日)

表-3　試験方法

試験項目	試験方法
スランプフロー	スランプフロー試験[注]
500mmフロー到達時間	
空気量	空気量試験[注]
充てん高さ	U形充てん装置による 間げき通過性試験[注]
圧縮強度	圧縮強度試験 (JIS A 1108に準拠)

注）参考文献10）に示される土木学会規準(案)に準拠

表-2　配合および使用材料

配合 No.	G_{max} (mm)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³) 水 W	結合材 B OBF	OP	LP	F	S	G	高性能(AE)減水剤 SP1	SP2	増粘剤
1-1	20	30	45	165	350	200	-	-	707	908	13.8	-	0.5
1-2											-	11.0	
2-1					-	-	500	50	717	921	12.1	-	
2-2											-	10.5	

種　類	記号	品　質
結合材	OBF	密度2.86g/cm³, 比表面積3750cm²/g 普通ポルトランドセメント(35%)，高炉スラグ微粉末(45%),フライアッシュ(20%)の混合品
	OP	普通ポルトランドセメント、密度3.16g/cm³,比表面積3270cm²/g
	LP	低熱ポルトランドセメント、密度3.22g/cm³,比表面積3390cm²/g
	F	フライアッシュ、密度2.26g/cm³,比表面積3020cm²/g
細骨材	S	木更津産陸砂,表乾比重2.58,粗粒率2.55,実積率66.1%
粗骨材	G	八戸産石灰砕石,表乾比重2.71,粗粒率6.49,実積率65.9%
高性能(AE)減水剤	SP1	ナフタレン系高性能減水剤
	SP2	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
増粘剤	-	多糖類ポリマー

度を目標とした．また，フレッシュ時の性能は流動性についてはスランプフロー，分離抵抗性については500mmフロー到達時間，および充てん性については充てん高さにより評価することとした．各々の目標値は表-1に示すとおりである．

b)検討配合および使用材料

高強度コンクリートは水結合材比を小さくする必要があるが，一般的には水結合材比が小さいとコンクリートの粘性が過大になるため，高流動コンクリートとして必要な流動性と分離抵抗性のバランスを保つことが困難となる．

そこで，本実験では表-1に示す目標性能が達成可能な結合材，および高性能(AE)減水剤の材料選定を行うことを目的とし，これらの材料の種類を検討要因とした数種の配合について，フレッシュ時の品質，強度特性，および断熱温度上昇量について検討した．本実験において検討した配合，および使用材料を表-2に示す．

結合材としては，普通ポルトランドセメント，高炉スラグ微粉末，およびフライアッシュから構成された三成分系プレミックスセメント（OBF）と普通ポルトランドセメントを組合せたもの，および低熱ポルトランドセメントとフライアッシュを組合せたものを使用した．また，高性能(AE)減水剤としてナフタレン系，およびポリカルボン酸系のものを使用した．さらに，全ての配合において多糖類ポリマー系の増粘剤を0.5kg/m³使用し，併用系高流動コンクリートの配合とした．なお，空気量については4±1%とした．

表-2に示すように水結合材比，細骨材率，単位水量は

各配合において同一とし，所要のスランプフローとなるように高性能(AE)減水剤の添加量を調整した．

c)試験方法

本実験で実施した各種試験の試験方法を，表-3 に示す．フレッシュ時の品質評価試験として，スランプフロー試験，充てん装置を用いた間げき通過性試験等を実施し，また，硬化後の強度特性は圧縮強度試験により評価した．さらに，硬化時の発熱特性を評価するため，空気循環式の試験機を用いて配合 1-2, 2-2 について断熱温度上昇試験を行った．

（2）実験結果

a)フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-4 に示す．高性能(AE)減水剤の添加量を調整してスランプフローが各配合においてほぼ同等となるようにした結果，500 mmフロー到達時間は高性能(AE)減水剤の種類により顕著に異なる値となった．すなわち，ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用すると，ナフタレン系の高性能減水剤に比較して 500 mmフロー到達時間は半分程度に短くなった．この現象には，セメント等のコンクリート中の微粉末材への高性能(AE)減水剤の分散作用機構が，その種類により異なっていることが影響しているものと考えられ，ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤の使用により，ナフタレン系の高性能減水剤に比較して少ない添加量で同等以上の分散効果が得られるものと考えられる[5)]．

b)強度発現性

圧縮強度試験結果を図-1 に示す．同図から分かるように，各ケースの強度発現性は使用した結合材，および高性能(AE)減水剤の種類により異っている．

まず，結合材の種類に着目すると，初期および長期の強度発現の伸びに差がみられる．三成分系セメントと普通ポルトランドセメントを混合した配合（1-1, 1-2）は，材齢 28 日までの強度の増進が非常に大きくなっており，フライアッシュを混入した低熱ポルトランドセメントを使用した配合（2-1, 2-2）は，材齢初期の段階から非常に緩やかに強度が増進している．この現象には，各配合の単位結合材量の 50%以上を占める，ポルトランドセメントの種類の相違（普通または低熱），すなわち各ポルトランドセメントの組成化合物の相違が大きく影響しているものと考えられる．

次に，高性能(AE)減水剤の種類に着目すると，同じ結合材を使用した場合にポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用した配合は，ナフタレン系の高性能減水剤を使用した配合に比べ（1-2 と 1-1，および 2-2 と 2-1 の比較），材齢28 日以降の強度が約 9N/mm²ほど高くなっている．本実験結果は，高性能(AE)減水剤の主成分の相違は強度

表-4　フレッシュコンクリート試験結果

配合 No.	測定項目		
	スランプフロー(cm)	500mmフロー到達時間(秒)	充てん高さ(cm)
1-1	67.5	6.1	36.5
1-2	72.5	3.3	37.0
2-1	70.5	7.1	36.0
2-2	69.0	4.0	37.0

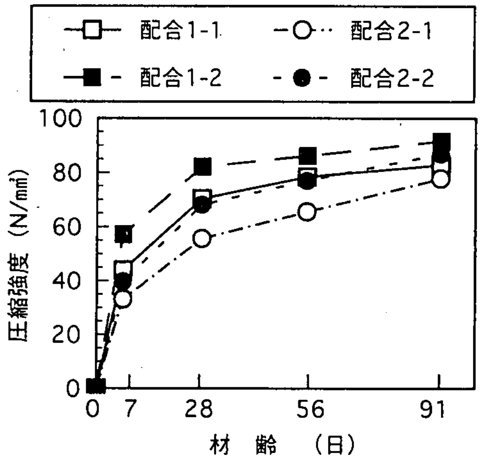


図-1　圧縮強度試験結果

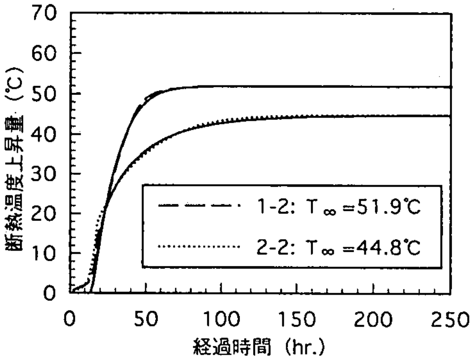


図-2　断熱温度上昇試験結果

発現性に若干の影響を及ぼす可能性もあることを示唆している[5)]．

以上の結果より，ほとんどの配合において所要の強度は得られたが，高性能(AE)減水剤の種類の相違は，フレッシュコンクリートの品質に影響を及ぼすだけでなく，硬化後の結合材の水和反応にも影響を及ぼすことが推察された[11)]．

表-5　コンクリートの仕様，配合および使用材料

配合強度 (材齢91日)	スランプフロー	500mmフロー到達時間	空気量	充てん高さ (R2障害)
81N/mm²	65±5cm	3～8秒	4±1%	30cm以上

配合 No.	G_{max} (mm)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³) 水 W	結合材 B OBF	OP	LP	F	S	G	高性能AE減水剤	増粘剤
1	20	30	45	165	350	200	-	-	704	899	11.0	0.5
2					-	-	500	50	733	900	9.8	

種　類	記号	品　　質
細骨材	S	君津産山砂,表乾比重2.58
粗骨材	G	八戸産石灰砕石,表乾比重2.70
高性能AE減水剤	-	ポリカルボン酸系

注）結合材，増粘剤については表-2に示す品質のものを使用した

c)断熱温度上昇

練上がり温度を20℃とした，配合1-2，2-2の断熱温度上昇試験の結果を図-2に示す．図中に示した実線は，実験結果を式（1）を用い近似させたものである．

$$T(t) = T_{\infty}(1 - \exp(-r(t - t_0)^s)) \quad (1)$$

T(t)：材齢t時間における断熱温度上昇量
T_{∞}, r, t_0, s：実験により定まる係数
r=0.027（配合1-2）,0.104（配合2-2）
s=1.263（配合1-2）,0.761（配合2-2）

t_0は低熱タイプの結合材ならびに高性能(AE)減水剤を使用しているための，初期の温度上昇の遅れを表現しており，ここでは同バッチの試料で凝結試験を行って求めた凝結始発時間をt_0として用いた（1-2は12.4hr，2-2は12.1hr）．T_{∞}については，同図に示す値を使用した．

結合材として低熱ポルトランドセメントを主に使用した配合2-2は，普通ポルトランドセメントを主な結合材とした配合1-1に比べ，断熱温度上昇量は低く，発熱速度もやや遅い結果となった．

図-1に示した圧縮強度試験結果からも分かるように，配合2-2で使用した低熱ポルトランドセメントは初期強度が低く，長期の強度発現性が大きい．このことから，結合材の水和反応が緩やかに進んだことが推察でき，同配合の温度上昇特性からも明らかである．また，高強度コンクリートにおいては水和熱に起因する温度ひび割れが懸念されるが，このような水和発熱特性を示す低熱ポルトランドセメントを適用することは，その対策の一つとして有効であるものと言える．

3．高強度・高流動コンクリートの地下連続壁模擬試験体への打設実験

（1）実験内容

a)実験概要

本実験では，前章で検討された二種類の高強度・高流動コンクリートの地下連続壁への適用性を確認することを目的に，連続壁を模擬した試験体への打設実験を行った．検討内容は，高耐力の地下連続壁の過密配筋状態を模擬して配筋された型枠内へのコンクリートの充てん性および硬化後の強度と密実度の評価等である．

b)配合および使用材料

本実験では，使用結合材の異なる二種類の高強度・高流動コンクリートを使用した．コンクリートの仕様，配合および使用材料を表-5に示す．結合材は前章に示した実験で使用したものと同等のものを用い，配合1では三成分系プレミックスセメント（OBF）と普通ポルトランドセメントを組合せたものを，配合2では低熱ポルトランドセメントとフライアッシュを組合せたものを使用した．

高流動性を付与するための混和剤として，前章に示した実験において高い強度が得られたポリカルボン酸系高性能AE減水剤を使用した．また，分離抵抗性を高め，品質の安定性を高めることを目的として多糖類ポリマーの増粘剤を使用した．

c)コンクリートの製造および運搬方法

コンクリートは，市中のレディミクストコンクリート工場において水平2軸式強制練りミキサ（練混ぜ容量3m³）を使用して製造した．1バッチ当りの練混ぜ量を1.5

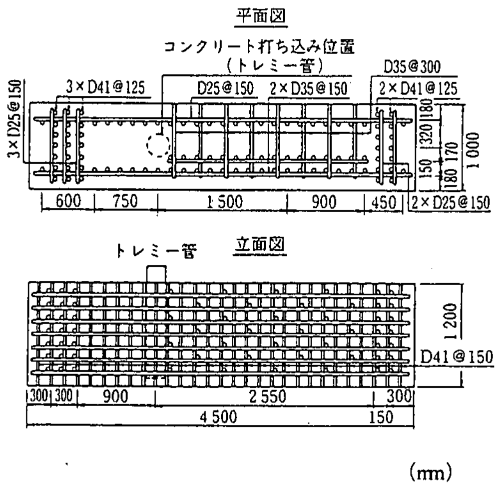


図-3　試験体の形状・寸法および配筋状態

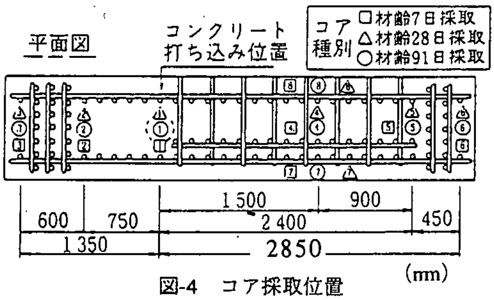


図-4　コア採取位置

表-6　打込み時の品質
（各配合共，トラックアジテータ車2台について行った試験の平均値）

配合 No.	練上がりからの経過時間(分)	コンクリート温度(℃)	スランプフロー(cm)	500mmフロー到達時間(秒)	充てん高さ(cm)	空気量(%)
1	55	21	67.0	4.1	35.0	4.5
2	90	19	66.0	3.0	37.0	3.6

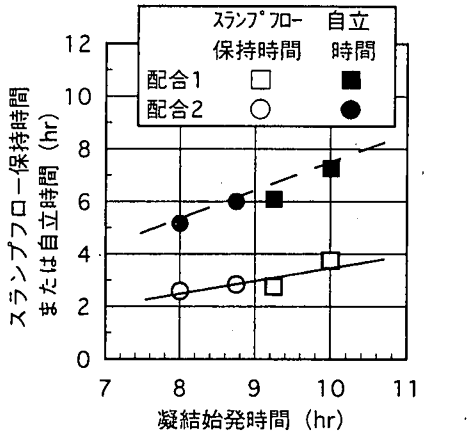


図-5　凝結始発時間とスランプフロー保持時間および自立時間との関係

m³とし，全材料を投入後180秒間練混ぜ，トラックアジテータ車に排出した．トラックアジテータ車の積載量は3～4.5 m³とし，1試験体の打込み実験には2台のトラックアジテータ車のコンクリート（7.5～9 m³）を使用した．

トラックアジテータ車による打込み場所までの運搬時間は30分程度であったが，打込み前のコンクリート品質試験や待機等の関係から，練上がりから最長100分程度までトラックアジテータ車のドラム内でアジテートさせたものを試験体へ打込んだ．

d)コンクリートの打込み方法

コンクリートを打込んだ試験体の形状・寸法および配筋状況を図-3に示す．

ブーム付きコンクリートポンプ車により圧送されたコンクリートを，トレミー管を介して泥水（ベントナイト2%，CMC0.4%）で満たされた型枠内へ打ち込んだ．なお，コンクリートの圧送速度は30 m³/hr，型枠内でのコンクリートの打上がり速度は実構造物への打設速度を想定して6～7m/hrとした．

e)コンクリート打込み後の養生方法

コンクリート打込み後の試験体は材齢7日までは外気温（平均10℃），7日以降28日まではシートによる保温養生，28日以降は再び外気温（平均7℃）で養生した．

f)打込みコンクリートの品質に関する試験項目

コンクリート出荷時，および打込み時にスランプフロー試験，空気量試験等を行い，また，圧縮強度試験用供試体を採取した．なお，これらの試験は表-3に示す方法に準じて行った．

g)試験体コンクリートの品質に関する試験項目

試験体コンクリートの品質は，主に試験体から採取したコア試料により評価した．打込み後，材齢7，28，91日の時点で図-4に示す位置からコアを採取し，圧縮強度，単位容積質量を測定した．

（2）打込みコンクリートに関する実験結果

a)フレッシュコンクリートの品質

打込み時に実施した，フレッシュコンクリートの品質管理試験結果を表-6に示す．各配合共に，ほぼ目標とした品質のコンクリートが打ち込まれた．

b)スランプフロー経時変化と凝結特性

図-5は打込み時に採取したコンクリートについて，スランプフロー経時変化，凝結時間を測定した結果をまと

めたものである．同図は，凝結始発時間とスランプフローが 50 cm以下となる時間（以下，スランプフロー保持時間と称す），およびスランプが 10 cm以下となりコンクリートが自立するまでの時間（以下，自立時間と称す）との関係を示した結果であるが，結合材の種類に関わらず各々一本の直線で示され，相関性が認められる．

また，配合 1 に比べて配合 2 はやや自立時間が早い傾向がみられ，その原因の一つとしては配合 2 の混和剤添加量が配合 1 の場合に比べて少ないことが考えられる．地下連続壁に用いる高流動コンクリートは，施工性の面から所要の流動性を一定時間保持する必要があるが，エレメント継手部の接合鋼板等に作用する側圧は液圧で作用するため，打込まれた後は速やかに流動性を失い，自立することが望ましい．このような観点からは，配合 1 に比べて配合 2 の方が適当な流動性の経時変化特性を有しているものと考えられる．

c)圧縮強度

図-6 に打込み時に採取し，標準養生を行った供試体の圧縮強度試験結果を示す．どちらの配合も配合強度 81N/mm²を満たす結果となっている．また，結合材として三成分系プレミックスセメントと普通ポルトランドセメントを組合せた配合 1 に比べ，低熱ポルトランドセメントとフライアッシュを組合せた配合 2 は長期材齢での強度増進が大きい傾向にあり，前章の配合選定実験における結果と同様の傾向がみられた．

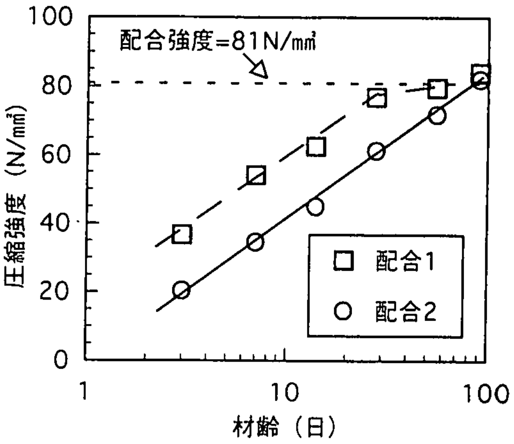


図-6　標準養生供試体の圧縮強度

（3）試験体コンクリートに関する実験結果

a)試験体の温度上昇

コンクリート打込み後の，試験体中央部の温度測定結果を図-7 に示す．

主な結合材として低熱ポルトランドセメントを使用した配合 2 は，三成分系プレミックスセメントと普通ポルトランドセメントを組合せた配合 1 に比べて最高温度が低く，15℃程度の差がみられた．これは，図-2 に示すような各配合の断熱温度上昇特性が影響したものと考えられる．

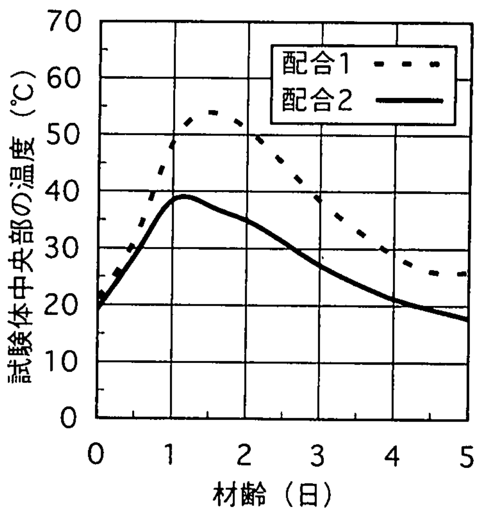


図-7　試験体中央部の温度測定結果

b)試験体のコア強度

試験体の図-4 に示す位置において，鉛直方向に一括ボーリングしてコアを採取した後，上部，中部，および下部（各々試験体底面から 80～100 cm，50～70 cm，10～30 cmの位置）とに分けて強度試験を行ったが，上中下のコア強度差に一定の傾向がみられなかったため，ここでは上中下の測定値を平均した強度を，そのボーリング位置でのコア強度として整理した．また，コンクリート流動時の鉄筋の有無が圧縮強度に及ぼす影響を検討するため，コア採取位置に応じて場合分けを行い，各位置のコア強度の平均値を求めて，各場合のコア強度としてまとめた．

したがって，図-8 に示すコアの圧縮強度試験結果は，以下に示す四つの場合分けに従って，表示したものである．打込み位置①に対して，②，④，⑤から採取されたコアはコンクリートが流動した時に過密配筋の影響を受けない場合とした．これに対して③，⑥はそれぞれ 3 段，2 段の過密配筋を流れ越した場合である．さらに，⑦，⑧はコンクリートの流動方向に対して側方にある格子配筋の影響を受けた場合である．

各々の配合において，過密配筋の影響を受けない位置（②，④，⑤）と打込み位置とで比較すると，強度は同等であり，流動による強度低下は認められない．これに対し，配合 1 においては過密配筋部を流れ越した場合，および格子配筋の影響を受けた場合には強度低下がみられた[6)]．また，その強度低下の影響度は流動方向の側

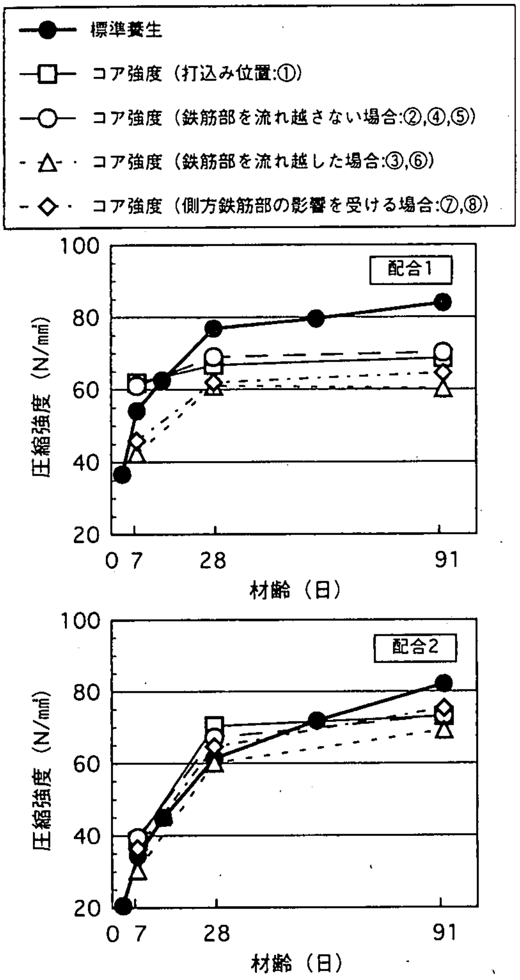


図-8　コアの圧縮強度試験結果

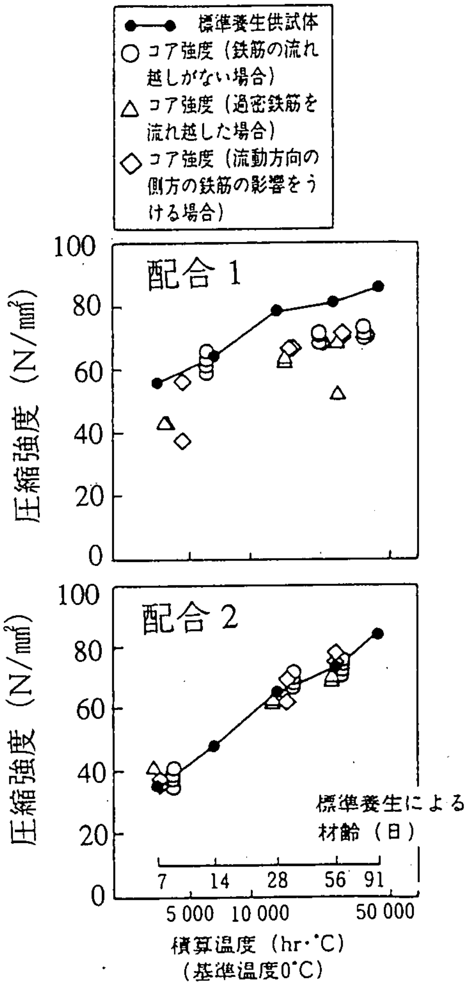


図-9　積算温度で表現したコア強度の発現状況

方に配置された格子鉄筋に比べ，2段あるいは3段過密配筋の方が大きい傾向がみられた．さらに，配合1では標準養生供試体の発現状況と異なり，材齢28日以降の強度増進が極めて小さい傾向にある．

これに対し，配合2では流動時における鉄筋部の流れ越しによる影響はほとんど認められず，また，標準養生供試体とほぼ同等の強度発現性を示した．

以上の結果から，配合2については流動時の鉄筋部障害の影響をほとんど受けず，試験体全体にわたって均等な強度が得られていることが確認された．

c)積算温度によるコア強度の評価

図-8に示すように，配合1ではコアの採取位置に関わらず，材齢28日以降の長期強度の増進が得られなかった．この原因として，コンクリートの硬化初期に高温履歴を受けたことが考えられる．そこで，温度履歴の影響を検討するために，強度の発現状況を積算温度で表現した結果を図-9に示す．

配合2では，材齢28日まではコア強度の発現状況が標準養生供試体の強度発現履歴と同等以上である．これは，図-7に示すように硬化初期の温度履歴が配合1に比べて緩やかであり，その後も標準養生と同等な温度履歴を経たことが影響しているものと考えられる．

これに対して，配合1では初期材齢の段階から両者は異なった履歴を示している．この現象は，図-7に示す配合1の材齢1～2日の水和発熱による高温状態が，本来は積算温度で表現できるはずの通常のポルトランドセメントとの水和反応に影響を及ぼしたことや，材齢が経過しても硬化体中の細孔容積量がほとんど減少しなくなるなど，長期的に安定して強度が発現しない組織構造を生じさせたことが要因として考えられる[12)]．

d)コアの単位容積質量

材齢91日のコア供試体の単位容積質量の測定結果を，図-10に示す．なお，同図には先のコア強度試験結果と同様に，各コア採取位置の高さ方向の平均値を示した．最も過密配筋部の影響を受け易いと思われた③および

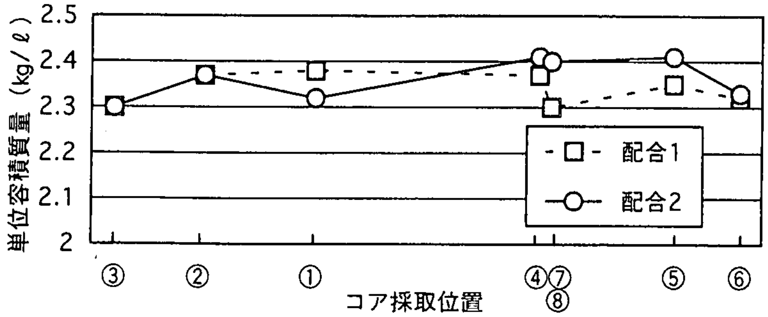


図-10　コア供試体の単位容積質量測定結果

⑥の位置において，単位容積質量はいずれの配合についてもやや低下しているが，これらの位置以外については打込み位置の単位容積質量とほぼ同等の試験結果が得られている．この結果から，本試験体の全体にわたり骨材はほぼ均等に分布していることが分かる．

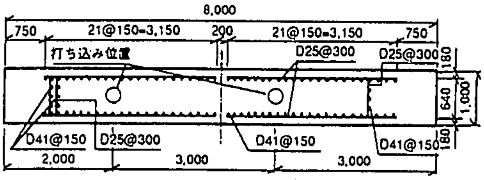
4．高強度・高流動コンクリートの実規模地下連続壁における性能実証実験

（1）実験内容

a)実験概要

第3章に示した打設実験において，低熱ポルトランドセメントを主な結合材として使用した高強度・高流動コンクリート配合は，硬化時の温度上昇が低いため，打込みコンクリートの強度発現性が良好であり，鉄筋部を流れ越した場合の強度低下がほとんど認められなかった．このような実験結果を受け，本実験では同配合を用いて実大規模の地下連続壁へ適用することにより，同配合の市中のレディミクストコンクリート工場における連続製造の可能性，コンクリート構造体の硬化後の品質等を確認することとした．

本実験で対象とした部材は，幅8 m，壁厚 1m，深度 50m の実大規模の地下連続壁である．配筋状況は図-11に示すとおりであり，鋼材量は約200 kg/m³である．



(mm)

図-11　地下連続壁の形状・寸法および配筋図

表-7　コンクリートの仕様，配合および使用材料

配合強度（材齢91日）	スランプフロー	500mmフロー到達時間	空気量	充てん高さ（R2障害）
81N/mm²	65±5cm	3〜10秒	4±1%	30cm以上

G_{max} (mm)	W/B (%)	s/a (%)	単位量（kg/m³） 水 W	結合材 B	S1	S2	G	SP	BP
20	30	52	168	560	579	248	793	13.2	0.5

種類	記号	品質
結合材	B	密度3.08 g/cm³，比表面積3560cm²/g 低熱ポルトランドセメント91%，フライアッシュ9%　の混合品
細骨材	S1	熊谷産陸砂，表乾比重2.62，粗粒率3.21，実積率65.9%
	S2	佐原産山砂，表乾比重2.60，粗粒率1.71，実積率62.9%
粗骨材	G	秩父産石灰砕石，表乾比重2.70，粗粒率6.59，実積率61.9%
高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体
増粘剤	BP	多糖類ポリマー

b)配合および使用材料

実験に用いたコンクリートの仕様，配合および使用材料を表-7に示す．第3章に示した実験結果から，コンクリートの配合強度を 81N/mm²，水結合材比を30%とした．本実験では第2，3章に示した実験と同様に，結合材として低熱ポルトランドセメントとフライアッシュを使用したが，レディミクストコンクリート工場における製造の容易性等を考慮して，これらの結合材を同様の比率で事前に混合したプレミックス品（フライアッシュ混入率9%）を使用した．

c)コンクリートの製造および運搬方法

コンクリートは，市中のレディミクストコンクリート工場において水平2軸式強制練りミキサ（練混ぜ容量3 m³）を使用して製造した．1バッチ当りの練混ぜ量を2.25 m³とし，練混ぜ時間は180秒（モルタル先練り80秒，粗骨材投入後100秒）とした．また，製造時には全製造バッチについてモニターカメラによる練混ぜ状態の目視確認，ならびにミキサ負荷値の確認を行った．

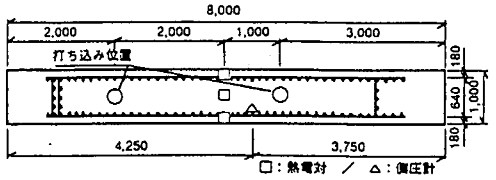


図-12　計測器配置図

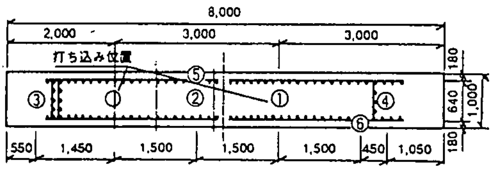


図-13　コアボーリング位置図（①～⑥）

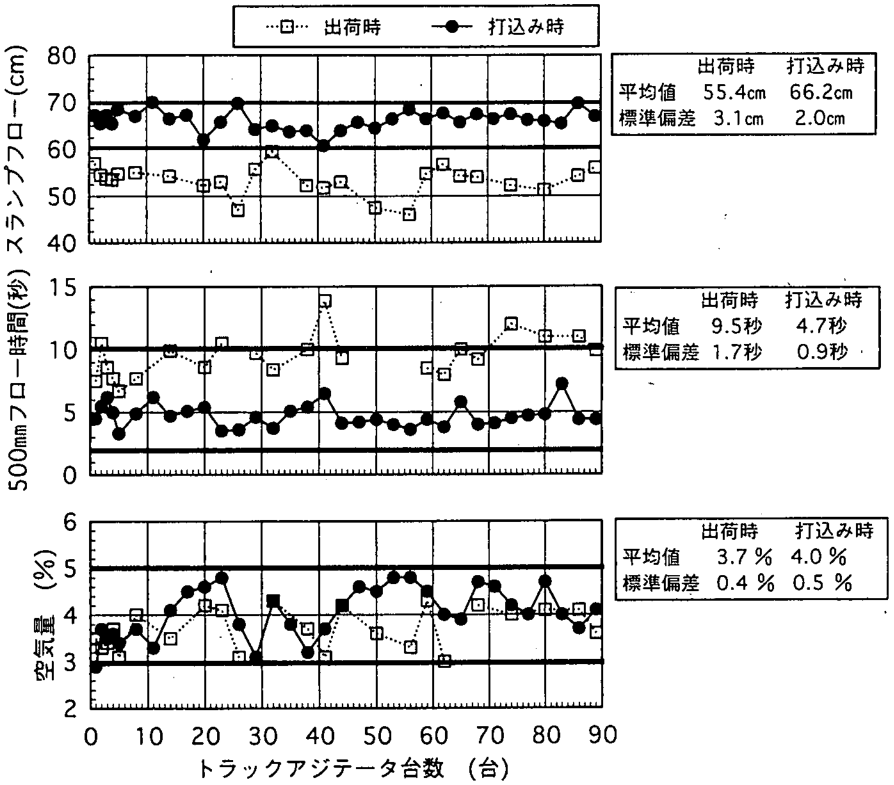


図-14　フレッシュコンクリート品質管理試験結果

トラックアジテータ車の積載量は4.5 m³/台, コンクリートの製造・出荷量は 40 m³/hr 程度とし, 総打設量は410 m³であった. また, トラックアジテータ車による打込み場所までの運搬時間は約40分であった.

d)コンクリートの打込み方法

ベントナイト系の安定液（ベントナイト 2％, CMC0.4%）が満たされた連壁溝に2本のトレミー管（φ250 mm×3m）を図-11 に示す位置に設置し, トラックアジテータ車のシュートから両方のトレミー管へコンクリートを直接流し込んで打込んだ. なお, トレミー管のコンクリートへの根入れ深さは2～6m とし, 管の切り継ぎ時以外は連続的にコンクリートを打設した. 平均の打上がり高さは5m/hr であった.

e)打込みコンクリートの品質試験方法

コンクリート出荷時, および現場打込み時にはスランプフロー試験, 空気量試験等を表-3 に示す方法に準じて行った.

f)打込み時の計測項目・方法

構造体には, 図-12 に示す位置に計測器を埋設した. 深度-44m から-14m まで 5m 間隔で側圧計を設置し, コンクリートの側圧を測定した. また, 深度-25m の位置に熱電対を設置し, 構造体の温度を測定した.

g)構造体コンクリートの品質確認方法

構造体コンクリートの品質は, 構造体からコアボーリングして採取されたコア供試体により確認した. コアボーリングを行った位置を図-13 に示す. なお, ①, ②の位置については深度-50m 程度までコアを採取できたが,

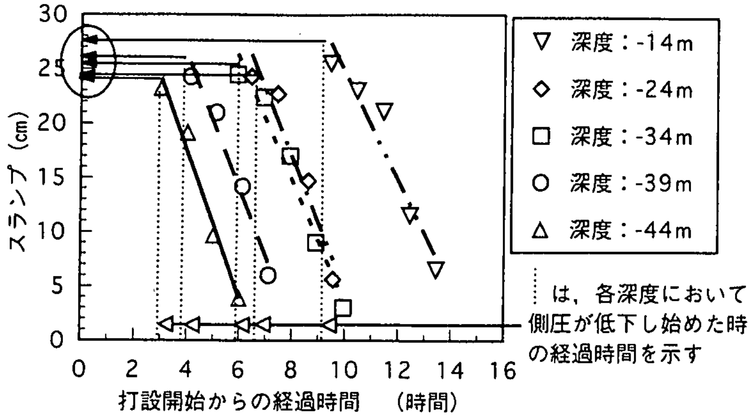


図-15 スランプ経時変化測定結果

他の位置についてはボーリング時の曲がりのため，深度-10m～-45m 程度までの採取となった．

コアの採取は材齢58日から91日において実施し，材齢91日において圧縮強度，単位容積質量を測定した．

（2）打込みコンクリートに関する実験結果

a)フレッシュコンクリートの品質

工場出荷時および打込み時における，コンクリートの品質管理試験結果を図-14に示す．出荷時のスランプフロー平均値 55.4 cmに対し，打込み時のスランプフロー平均値は66.2 cmであり，10 cm程度の差がみられるが，これは架橋ポリマーが配合された高性能AE減水剤を使用したためである．また，U形充てん装置による間げき通過性試験を打込み時に行ったが，充てん高さはどの場合においても 36cm 程度であった．

打込み時のスランプフローや 500 mmフロー到達時間の標準偏差は小さいことから，品質の安定したコンクリートが製造・施工されたものと考えられる．

b)スランプフローの保持時間と側圧

打込み時においては，図-15 に示す深度別に試料を採取し，スランプ（フロー）の経時変化を調べ，打込みコンクリートの流動性の損失と連壁内に設置した側圧計による側圧の低下との関係を調べた．

平均の打上がり速度は5m/hr であったが，側圧は発生からおよそ2時間程度でピークとなり，その値は 10～12t/m²であった．図-15 は，側圧低下時の経時変化測定用試料のスランプ（静置状態で練置き）を示したものであるが，いずれの深度においてもスランプが 25 cm程度になると，側圧は低下する傾向がみられる[7]．したがって，打込みコンクリートのスランプ（フロー）経時変化を調べることは，有効な側圧管理手法になるものと考えられ，スランプ 25 cm程度が側圧低下の目安になるものと考えられる．

表-8 標準養生供試体の圧縮強度試験結果

材齢	サンプル数	平均値 (N/mm²)	標準偏差 (N/mm²)	変動係数 (%)
3日	5	21.3	2.9	13.9
7日	10	35.5	3.5	9.9
14日	5	48.2	4.9	10.2
28日	10	61.3	5.8	9.4
56日	5	68.3	4.7	6.8
91日	10	81.7	3.5	4.3

c)圧縮強度

打込み時に採取した，標準養生供試体の圧縮強度試験結果を表-8 に示す．初期材齢において変動係数は比較的大きいが，材齢を経るに従い小さくなる傾向がみられる．材齢91日の圧縮強度は82N/mm²程度であり，目標の配合強度を満足している．

（3）構造体コンクリートに関する実験結果

a)構造体の温度履歴

埋設した熱電対により連壁内の温度を測定した結果，連壁中央部はコンクリート打込み後，およそ2日で最大温度を示しており，最大温度は48.2℃，温度上昇量はおよそ30℃であった．

b)構造体のコア強度

構造体から採取されたコアの強度については，各採取位置における高さ方向のばらつきはほとんどみられず，材齢91日における構造体全体の平均強度は82.0 N/mm²，標準偏差5.7 N/mm²，変動係数7.0％であった[8]．打込み時に採取した標準養生供試体の同材齢における圧縮強度平均値は，表-8 に示すようにこれと同等であったことから，構造体における平均強度としては標準養生供試体と同等の品質が確保されたが，構造体強度の変動係数はやや増加する傾向がみられた．

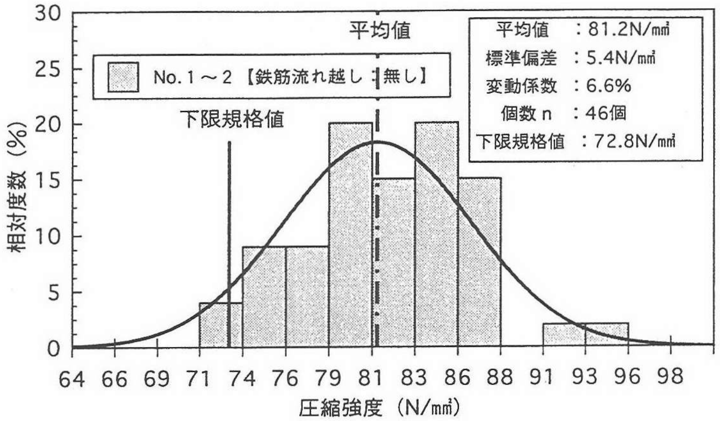


図-16　コア供試体の圧縮強度分布（鉄筋部の流れ越しが無い場合）

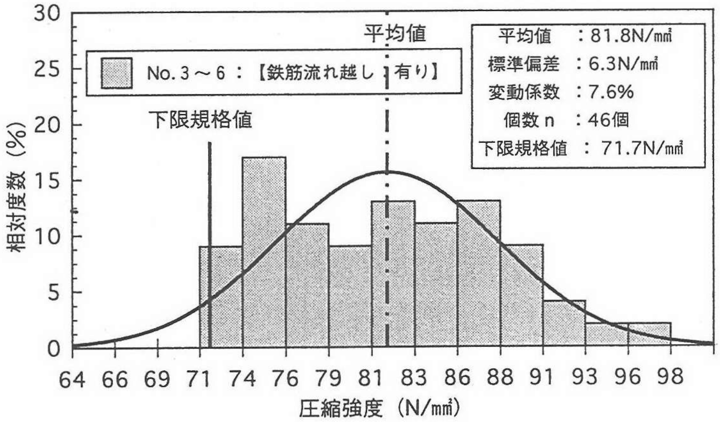


図-17　コア供試体の圧縮強度分布（鉄筋部の流れ越しが有る場合）

次に，構造体から採取したコア供試体を鉄筋部の流れ越しの影響が無い部分（①，②），および鉄筋部の流れ越しの影響が有る部分（③～⑥）とに区別し，各々の圧縮強度分布を図-16，17に示す．なお，両図には強度の測定値が正規分布に従うと仮定した場合の，正規分布における5%不良確率を下限規格値として示した．

鉄筋部の流れ越しの影響の無い部分の平均強度は81.2N/mm²，標準偏差5.4N/mm²，変動係数6.6%であり，標準養生供試体に対して平均強度に差はみられないが，変動係数はやや増加している．養生条件の相違や，供試体の作製方法（コアおよび標準供試体）がこれらの結果に影響したことも考えられるが，安定液中への打設に伴う品質の低下はわずかにあったものと考えられる．

さらに，鉄筋部の流れ越しの影響の有る部分の平均強度は81.8N/mm²，標準偏差6.3N/mm²，変動係数7.6%であり，流れ越しの影響の無い場合に対して平均強度に差はみられないが，変動係数はやや増している．このことから，鉄筋部をコンクリートが流れ越すことによっても品質の変動はやや増加する傾向がみられた．

以上の結果を基に，本実験で用いた高強度・高流動コンクリートを地下連続壁へ適用する場合の，配合強度の算定方法を以下に提案する．

すなわち，一般にコンクリートの配合強度において考慮されるコンクリート製造時の変動に伴う割増し係数（α）の他に，安定液中への打設に伴う品質変動，および鉄筋部の流れ越しに伴う品質変動を考慮した割増し係数（β，およびγ）を考慮した配合強度算定式を以下に示す．

$$f'cr = f'ck \times \alpha \times \beta \times \gamma \qquad (2)$$

$f'cr$：配合強度

f'ck：設計基準強度
α：製造時の変動に関わる割増し係数
β：安定液中に打込むことによる品質変動を考慮した割増し係数
γ：鉄筋部の流れ越しに伴う品質変動を考慮した割増し係数

本実験結果から，各割増し係数を試算すると，打込み時に採取した標準養生供試体の変動係数が4.3％であったことから，参考文献[13]に示される割増し係数算定式（割増し係数=1/（1-1.64/100*変動係数））よりαは1.08となる．さらに，標準養生供試体の変動係数に対する鉄筋部の流れ越しの影響の無い場合（安定液中への打設の影響）の変動係数増分2.3％からβは1.04，流れ越しの影響の無い場合に対する流れ越しの影響の有る場合の変動係数増分1.0％からγは1.02となる．これより，コンクリート製造時の変動に伴う割増し係数に比べ，安定液中への打設や鉄筋部の流れ越しに伴う品質変動を考慮した割増し係数は小さいことが分かる．

なお，地下連続壁に用いられる一般のコンクリートにおける安定液中での強度低減比（=1/(β×γ)）は，通常0.8～0.9程度を見込んでいる[14]．これに対して本実験で用いた高強度・高流動コンクリートの場合には，0.94（=1/(1.04×1.02)）程度の強度低減比を見込めば良いと言える．

c)構造体の単位容積質量

構造体から採取されたコアの単位容積質量は2.42 t/m³程度であり，各採取位置における高さ方向のばらつきや，各採取位置における変動はほとんど認められなかったことから，鉄筋部の流れ越しによる粗骨材の分離はほとんどなかったものと考えられる[8]．

5．まとめ

本研究では，地下連続壁を対象とした配合強度80 N/mm²以上の高強度・高流動コンクリートの配合を検討し，地下連続壁を模擬した試験体，および実大規模の地下連続壁への打設実験を行った．得られた知見を以下にまとめる．

（1）高強度・高流動コンクリートの配合設計においては，流動性，分離抵抗性等のフレッシュ時の性能，および強度特性や硬化時の発熱特性等，これら所要の性能に応じて，使用する結合材や高性能(AE)減水剤の種類および組合せを適切に選定することが必要であり，本研究の範囲では低熱ポルトランドセメントを主体とした結合材とポリカルボン酸系高性能AE減水剤を使用した配合は所要のフレッシュ時の性能を満足し，硬化時の温度上昇量が小さく，長期の強度発現性が良好であった．

（2）本研究で選定した高強度・高流動コンクリートは，一般のレディミクストコンクリート工場においても連続的に安定した品質のものが製造可能であり，通常の連壁コンクリートと同様にトレミー工法による打込みが可能であった．

（3）側圧低下時の打込みコンクリートのスランプは，打設深度に関わらずほぼ25 cm程度であったことから，打込みコンクリートのスランプ（フロー）経時変化を調べることは，有効な側圧管理手法になるものと考えられ，側圧発生から低下し始めるまでの時間の制御は，スランプフロー経時変化特性の制御により行えるものと考えられる．

（4）本研究で選定した高強度・高流動コンクリートを打込んだ構造体の強度は，打込み時に採取した標準養生供試体とほぼ同等の強度を有したが，その変動係数はやや増加する傾向がみられた．したがって，本コンクリートの配合強度の算定においては，コンクリート製造時の変動に伴う割増し係数の他に，安定液中への打設に伴う品質変動，および鉄筋部の流れ越しに伴う品質変動を考慮した割増し係数も考慮する必要があるものと考えられる．本実験の結果からこれらを算定すると，製造時の変動に伴う割増し係数は1.08，安定液中への打設に伴う品質変動を考慮した割増し係数は1.04，および鉄筋部の流れ越しに伴う品質変動を考慮した割増し係数は1.02となる．

謝辞：本研究を遂行するにあたり，コンクリートの製造にはアサノコンクリート株式会社横浜工場，ならびに旧秩父生コン株式会社浦和工場の皆様，また，コンクリートの品質管理にあたっては旧秩父セメント株式会社，ポゾリス物産株式会社の皆様に多大な御協力を頂きました．関係者各位に厚くお礼申し上げます．

参考文献

1）三浦律彦，峯岸孝二，関晃一，岩井稔：高ビーライトセメントの高強度地下連続壁コンクリートへの適用性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.271-276，1994.
2）大友忠典，田沢雄二郎，村田俊彦，馬場英二郎：高性能地下連続壁のコンクリートの実大規模実証実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.1239-1244，1994.
3）今井実，田中秀輝：地下連続壁用高強度コンクリートに関する基礎的研究，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集，Vol.49，pp.1040-1041，1994.
4）高木貞人：特集　大深度掘削-最近の動向と事例集　事例集（2）LNG，LPG地下タンクの例，基礎工，Vol.18，No.7，pp.33-40，1990.

5）新藤竹文，大友健，横田和直，坂本淳：高強度性を有する超流動コンクリートの配合選定実験，土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集Ⅴ，Vol.48，pp.150-151，1993.
6）大友健，横田和直，坂本淳，松岡康訓：高強度・超流動性連続地中壁コンクリートの充填性実験，土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集Ⅴ，Vol.48，pp.72-73，1993.
7）松岡康訓，大友健，横田和直，坂本淳：高強度・超流動性連続地中壁コンクリートの実用性実証実験，土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集Ⅴ，Vol.48，pp.152-153，1993.
8）横井謙二，松岡康訓，横田和直，坂本淳：高強度・高流動地下連続壁コンクリートの構造体強度，土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集Ⅴ，Vol.49，pp.376-377，1994.
9）新藤竹文，大友健，横田和直，坂本淳：高強度・高流動地下連続壁コンクリートの硬化物性，土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集Ⅴ，Vol.49，pp.228-229，1994.
10）土木学会　コンクリート委員会　高流動コンクリート指針作成小委員会編：高流動コンクリート施工指針，コンクリートライブラリー93，pp.157-176，1998.
11）青木茂，十河茂幸，芳賀孝成：各種スランプロス低減型流動化剤を用いた高強度コンクリート，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.1，pp.229-234，1987.
12）地濃茂雄，仕入豊和，依田彰彦，横室隆，飛内圭之，永野徹：高強度マスコンクリートの強度発現性状に及ぼす初期温度履歴条件の影響　その２　水和進行性からの検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 A（九州），pp.523-524，1989.
13）土木学会　コンクリート委員会　コンクリート標準示方書改訂小委員会編：コンクリート標準示方書施工編，pp.56-57，1996.
14）青木茂，芳賀孝成：連壁基礎における高強度コンクリート，基礎工，Vol.19，No.8，pp.86-92，1991.

（1999.6.7 受付）

STUDY ON APPLICATION OF HIGH STRENGTH AND SELF-COMPACTING CONCRETE FOR THE UNDERGROUND DIAPHRAGM WALL

Jun SAKAMOTO, Takeshi OHTOMO, Takefumi SHINDOH and Yasunori MATSUOKA

This study was performed to investigate the mix proportion of high strength and self-compacting concrete, which mixproportion strength was more than 80 N/mm^2, and application of the concrete for the underground diaphragm wall. It was confirmed that the concrete, which was consisted of low-heat portland cement, air entraining high-range water reducing agent, would be expected to have long-term development of strength because of very low rise of temperature and could be easily filled into the structure by tremie method. And it was also confirmed that the strength of the concrete after filling into the diaphragm wall was the same as the strength of the specimens, which were sampled before filling and cured by standard curing condition.