

報告

[1207] 高性能地下連続壁のコンクリートの実大規模実証実験

大友忠典*¹・田沢雄二郎*²・村田俊彦*³・馬場英二郎*⁴

1. まえがき

近年、地下連続壁の用途の多様化、高度化が進んでおり、LNG地下タンクの建設の分野では軸圧縮力が卓越する円筒形構造物を地下連続壁で構築し、これに高強度コンクリートを使用することによるコスト低減が検討されている。また、高強度鉄筋の活用により曲げ部材となる地下連続壁でも高強度コンクリートの有利性が顕在化してくることも予想される。

このような地下連続壁では、コンクリートは安定液のなかに打ち込まれるのであり、品質の安定に懸念が持たれることが多い。さらに高強度コンクリートは単位水量を少なくするため骨材の表面水率のわずかな変動の影響を受け易く、レディーミクストコンクリート工場（以下生コン工場）における安定製造が難しいとされており、この点でも従来とは異なる品質の安定したコンクリートが求められる。このような求めに応じて高強度で品質の安定したコンクリートを開発し、これを用いた高性能（高強度と安定品質）地下連続壁の可能性の実証を目的とした開発実験のうちから、つぎの二点を報告する。

- ①開発したコンクリートにより、高性能地下連続壁が可能であることを実証したこと。
- ②地下連続壁のコンクリートでは、水中打込みにおける強度低減率（以下水中低減率）という概念で水中に打込まれたコンクリートの強度を2割程度割引いて考えることが一般に行われているが、これについて見直したこと。

2. 開発の方針と対応した対策

高性能地下連続壁に使用するコンクリートとしてつぎのような性能を設定した。

- ①設計基準強度 600～800 kgf/cm² の高強度を、市中の生コン工場製造、安定液中への打込みという条件下で実現すること。
- ②流動性に優れていること。
- ③製造・施工の過程でバッチ間でも、また、時間経過しても流動性が安定していること。
- ④高強度を目指すことにより単位セメント量が多くなるが、従来の普通セメントを使った通常の地下連続壁に比べて温度ひび割れの問題で不利にならないこと。

このような目標性能を達成するコンクリートを開発するために、それぞれに対応して以下のような対策を採用した。

- ①高強度を達成するために、多量のセメントを使用しても厳しい高温養生履歴（以下マス養生条件）とならず、長期材齢で高強度を得易い高ビーライト系ポルトランドセメントを使用する。この場合、施工と供用の都合を配慮した上で設計基準材齢は91日とする。
- ②優れた流動性を確保するために、高性能AE減水剤を多量に使用し、そのことによる材料分離

*1：鹿島(株)・鹿島技術研究所・第二研究部・主管研究員、(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)・土木技術本部・工務部・技術課長

*4：鹿島(株)・土木設計本部・LNGグループ・設計長

- に抵抗するために増粘剤を使用する。
- ③流動性の安定のために増粘剤を使用する。
- ②の増粘剤はこの効果も合わせ持つ。
- ④発熱を少なくするため、低発熱型セメントを使用する。①で述べたセメントはこの点からも有効である。
- このような性能の設定とそれに対応した対

表-1 使用材料

材料	銘柄なしは産地
セメント	T社製 高ビークライト系ポルトランドセメント 比重:3.22 C ₂ S:58%
細骨材	神奈川県・海老名市産・陸砂 比重:2.58
粗骨材	東京都・八王子市産・砕石・硬質砂岩 比重:2.65
高性能AE減水剤	K社製 ポリカルボン酸塩系
増粘剤	Y社製 水性 ポリサッカライド (ウエランガム)

表-2 配合

設計基準強度 (材齢91日)	最大寸法 (mm)	S F (cm)	空気量 (%)	水セメン ト比(%)	細骨材率 (%)	増粘剤率 (W×%)	減水剤率 (C×%)	単位量 (kg/m ³)					
								水 W	セ M	細骨材 S	粗骨材 G	増粘剤	減水剤
600	20	60±5	2±1	34.6	47	0.1	2.0	165	477	806	939	0.165	9.5
800	20	65±5	2±1	27.8	44	0.1	2.0	165	594	713	939	0.165	11.9

注) S Fはスランプフロー

策により、文献 1) で報告したような検討を経て配合を決め、実規模実証実験に使用するコンクリートとした。

3. 使用材料と配合

使用材料を表-1に示す。細骨材は陸砂で形状は粗粒のものは丸みを帯びており、起源としては河川砂と考えられるものである。粗骨材は、硬質砂岩の砕石である。配合を表-2に示す。試験練りを行い、材齢28日時点で得たデータをもとに材齢91日時点でのセメント・水比と強度の関係性を推定して決定したものである。流動性はスランプフロー65±5cmを基本に考えたが、設計基準強度600 kgf/cm²のものについては分離傾向がみられたので多少小さく設定した。

4. 実証実験の規模と実験方法

実証実験は、市中の一般の生コン工場で作成し、実工事規模の大きさで掘削して安定液を張ったトレンチ内に、トレミー1本でコンクリートを打ち込んだものである。

生コン工場でのコンクリート製造では、増粘剤を1バッチ分ずつ小分け計量して小袋にいれたものをミキサに手作業で投入したこと以外は特別な設備は使用していない。生コン工場から打込み地点までのコンクリートの運搬時間は約40分である。

地下連続壁の大きさは図-1に示すように、深さ30m、長さ3m、厚さ1.5mで、一つのエレメントのコンクリート量は135m³である。地表から深さ15mまでは鉄筋が配置してあり、その鉄筋量は190 kg/m³である。Aエレメントに設計基準強度600kgf/cm²のコンクリートを、Bエレメントに

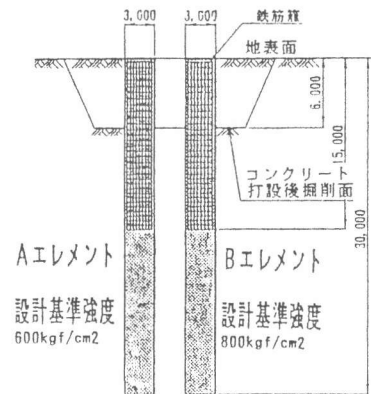


図-1 実証実験のエレメントの寸法

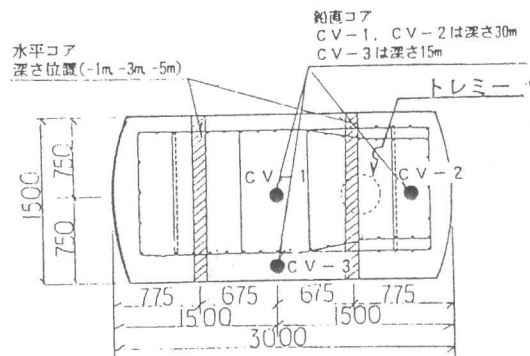


図-2 コア採取位置

同 800kgf/cm² の
コンクリートを打
ち込み、2週間以
上経過して、図-
2に示すCV-1、
CV-2、CV-
3 k位置からコア
を採取した。

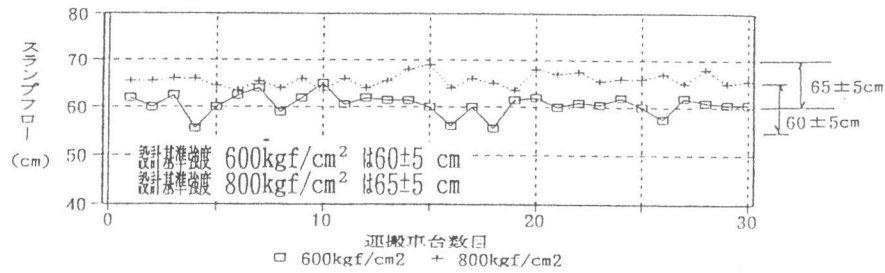


図-3 スランプフロー測定結果

表-3 フレッシュコンクリートの試験結果

試験項目	ケース 測定場所	設計基準強度 600kgf/cm ²		設計基準強度 800kgf/cm ²	
		生コン工場	打設現場	生コン工場	打設現場
スランプフロー (cm)		59.3±1.2	60.6±0.8	63.9±1.3	65.7±0.5
フロー時間 (秒)		11.3±2.3	10.4±1.4	10.9±0.7	9.7±0.8
空気量 (%)		1.1±0.2	1.1±0.03	1.1±0.2	1.2±0.1
コンクリート温度 (°C)		27.2±0.5	28.7±0.2	26.1±0.8	26.0±0.3

注) ±で示す範囲は平均値の信頼限界

5. 実験結果及び考察

5.1 フレッシュコンクリートの性質

打込み現場で測定した
スランプフローの測定結

果を図-3に示す。30台の運搬車のコンクリート全てが設定した計画範囲の流動性であり、流動性の安定が難しいとされる高強度コンクリートにおいても、安定した流動性が得られている。

生コン工場と打込み現場の測定結果を対比して表-3に示す。表-3のフロー時間は、スランプフロー試験において拡がりの直径が50cmに達する時間で、分離傾向がありモルタルが先行するようなコンクリートでは短い。筆者らは分離しないコンクリートの目安としてはフロー時間5秒以上と考えている項目である。結果はつぎのように整理できる。

①生コン工場と打込み現場のスランプフローを比較して、ほぼ同等ないしは打込み現場で若干スランプフローが大きい傾向がある。今回使用したポリカルボン酸塩系の高性能減水剤は時間をかけて分散効果を発揮し、その効果が時間を経た後に向上する傾向があるとされており、この影響が現れているものと理解できる。フロー時間はスランプフローと対応して若干短くなっているが分離しない限界と考えている5秒より長い。

②空気量は変化していない。

③コンクリート温度は、Aエレメントの場合に若干上昇しているが、Bエレメントでは変化していない。Bエレメントのコンクリートを打ち込んだ日は寒い日(気温15~20°C)であり、これとの関連でコンクリート温度が上昇しなかったと理解している。このことが後に述べる標準供試体強度に微妙に影響している。

以上のような状況で、いずれにしても、コンクリートの流動性は安定し、運搬中(40分程度)に流動性が低下するなどの施工上の問題は生じなかった。

5.2 各種供試体の強度とコア強度のエレメント単位でのばらつき

A、Bエレメントともに、コア(鉛直、水平)、標準供試体(生コン工場採取、打込み現場採取)の材齢91日の強度試験値があり、これらの統計値を表-4に示す。これらの結果から各エレメント毎に有意差検定を行った。その結果をもとにつぎのようにまとめられる。

①A、Bエレメントともに、鉛直コアと水平コアの強度に差はない。

②Aエレメントでは標準供試体の強度で生コン工場採取のものと打込み現場採取のものとで差はない。

③Bエレメントでは標準供試体の強度は、打込み現場採取のものが生コン工場採取のものより大きくその差は有意である。これは、先に述べたようにBエレメントのコンクリートを打ち込んだ日

は寒く、現場存置の現場採取標準供試体は初期養生が低温になり、これが91日の長期強度を大きくする効果をもったためと考えられる。参考までにBエレメントの標準供試体強度の材齢に応じた発現状況を

表-4 全強度データの統計値

種別と単位 統計値項目	設計基準強度 600kgf/cm ²				設計基準強度 800kgf/cm ²			
	コア強度		標準供試体強度		コア強度		標準供試体強度	
	鉛直コア	水平コア	生コン工場採取	現場採取	鉛直コア	水平コア	生コン工場採取	現場採取
	平均、最大、最小、標準偏差の単位は、kgf/cm ² 、変動係数の単位は %							
データ個数	141	26	18	42	146	29	17	42
平均値	793	785	904	882	1017	1013	1108	1134
最大値	973	913	950	958	1226	1167	1174	1213
最小値	635	656	834	755	865	902	1029	1057
分散	3826	4703	937	2091	4960	3107	1192	1326
標準偏差	62	69	31	46	71	56	35	36
変動係数	7.83	8.90	3.49	5.17	6.95	5.60	3.23	3.25

整理すると表-5のようになり、材齢 7日、28日では打込み現場採取のものと生コン工場採取のものと有意差はないが、傾向としては先に述べたことを裏付けている。

表-5 設計基準強度800kgf/cm²の標準供試体の強度発現

材齢	7日	28日	91日
生コン工場採取	443±7	841±12	1108±22
打設現場採取	435±8	857±12	1134±11
u0	1.42	1.64	2.15
有意差の有無	×	×	○

④A、Bエレメントともに、コア強度と標準供試体はそれぞれに有意な差がある。

表-6 全コアと全標準供試体の比較

設計基準強度 600kgf/cm ²		設計基準強度 800kgf/cm ²	
コア強度の平均	標準供試体の平均	コア強度の平均	標準供試体の平均
792±10	900±11	1016±10	1125±10

あらためて、全コアと全標準供試体を集計し比較すると表-6のようになり、双方ともに

標準供試体の方が約110 kgf/cm² だけ高い強度を示している。この強度差はコアのコンクリートは、水中に打ち込んだものであること、硬化過程から初期養生期間がマス養生条件下にあったことなどの影響やコア採取作業の影響を受けたためと考えられる。コアのエレメント単位でのばらつきは、表-4の標準偏差ないしは変動係数として示している。既往の代表的な調査例²⁾(データ個数244、平均値 522kgf/cm²、標準偏差62.1、変動係数11.9%)と比較すると、標準偏差で同程度、変動係数で3~6%小さくなっている。このように、実強度で800~1000kgf/cm² のような高強度でばらつきの小さいコンクリートが得られている。

5.3 エレメント単位での強度の評価

(1) コア強度の深さ方向の変化

A、Bエレメントそれぞれで、CV-1, CV-2, CV-3の各コアの強度試験値を深さ方向に配列し、また、各深さレベル毎に平均を求めたものも深さ方向に配列して、相関分析を行った結果を表-7に示す。AエレメントではCV-1, CV-2、BエレメントではCV-1, CV-3は深さ方向と相関性はなくその方向で変化はないといえる。

表-7 鉛直コア強度データの深度との相関分析

種別と単位 相関分析の項目	設計基準強度 600kgf/cm ²				設計基準強度 800kgf/cm ²			
	CV-1	CV-2	CV-3	平均	CV-1	CV-2	CV-3	平均
	Y切片の単位はkgf/cm ²							
データ個数	55	60	26	60	59	58	29	60
Y切片	789	800	827	798	1054	1051	972	1025
X係数	1.02	-1.81	-6.02	-0.89	0.037	-3.43	0.384	-0.58
r ²	0.013	0.019	0.169	0.015	0.000	0.183	0.001	0.014
t0	0.657	1.060	2.216	0.919	0.037	3.546	0.187	0.903
t	2.0	2.0	2.1	2.0	2.0	2.0	2.1	2.0
有意性	×	×	○	×	×	○	×	×

平均は各深度レベル毎の強度を平均し、深度方向に相関分析したもの
 $t_0 = r\sqrt{n-2}/\sqrt{1-r^2}$ 、 $t = t(n-2, 0.05)$
 $t_0 > t$ のときに○
 ×：深さと強度に相関がみられない。
 ○：深さと強度に相関がみられる。

残りのAエレメント・CV-3、Bエレメント・CV-2については、相関分析上は有意となったが、有意あり・なしの境界に近いものであり、相関係数も小さ

い。また、表-8の各深さレベルで平均をとって相関分析したもので深さ方向と相関がないことも加味して、この二つのコアの強度が深さ方向に相関があるとなった相関分析の結果は重要視する必要はないと考えられる。

以上のような分析と考察により、A、Bの双方のエレメントともに深さ方向に強度の変化がないコンクリートが

できていると評価でき、このことから深さ方向のデータは一まとめにしてエレメント単位の強度を評価してよいと考えられる。

(2) コア強度の平面的な変化

CV-1, CV-2, CV-3の各コア毎にデータを配列して求めた統計値を表-8に示す。表-8のデータでのコア別の有意差検定を行った結果、Aエレメントでは、コア別の強度に有意差はなく平面的に強度に変化のないコンクリートができているといえた。Bエレメントでは、コア別の強度に有意差があるという結果になった。CV-1の強度が高く、CV-2、CV-3の順で強度が下がっている。このような強度の違いが生じる理由については、トレミーからの流動距離の影響、自己発熱と放熱の関係により内部のコアは初期養生温度が高いことの影響などで考えるのい一般であるが、ここでは、これらの理由でコア強度の大小関係を説明することは難しい。材齢が短期であれば自己発熱の影響で説明し易いが、ここでは材齢91日であり、この材齢では初期温度の高い方が長期では強度が小さくなるのが確かめられており¹⁾、これで説明することは困難である。また、Aエレメントの場合との違いを説明することも難しい。

ここでは、Bエレメントの場合に、コア別の強度に違いがあるという結果を踏まえて、すなわち、CV-3の位置での強度が低いことも配慮に入れて一つのエレメントとしてのコンクリートの強度を評価する必要があることが確認された。

(3) エレメント単位での強度の評価

前項、前前項で検討した結果をもとにエレメント単位での強度を評価した結果を表-9に示す。

表-9は横に長いもので、紙面の都合で2段に分割して示している。『計画段階での設定』の欄に示すように水中低減係数は0.9に設定して配合強度はAエレメントで846kgf/cm²、Bエレメントで1007kgf/cm²に設定した(F項)。

『試験結果』の欄に示すように、コア強度Aエレメントで793kgf/cm²、Bエレメントで1017kgf/cm²が得られた(H項)。また、標準供試体強度はAエレメントで898kgf/cm²、Bエレメントで1134kgf/cm²が得られ(J項)、目標とした配合強度を50~120 kgf/cm²上回った。

『壁体コンクリートの強度評価』の不良率5%位置強度を示した。この強度は設計基準強度相当のものと理解してよいものである。Aエレメントで690kgf/cm²、Bエレメントで900kgf/cm²となっており(M項)、当初設定した設計基準強度を満足するものと評価できる。Bエレメントでコアの強度が低くそれが有意であったCV-3コアに注目して分析しても同様の評価となる。

また、今般計画した配合強度と比べて標準供試体の強度が大きかったので、これが予定どうりであったとした場合に修正して設計基準強度相当値を求めたのが同じ欄の「修正した不良率5%位置強度」(O)である。このようにみても当初計画の設計基準強度を満足している。

表-8 鉛直コア強度データの統計値

種別と 統計 値の項目	設計基準強度 600kgf/cm ²			設計基準強度 800kgf/cm ²		
	CV-1	CV-2	CV-3	CV-1	CV-2	CV-3
データ個数	55	60	26	59	58	29
平均値	804	786	786	1054	1000	974
最大値	973	887	864	1226	1137	1074
最小値	657	668	635	898	865	870
分散	5056	2803	3184	4140	4653	2051
標準偏差	71	53	56	64	68	45
変動係数	8.93	6.80	7.32	6.16	6.88	4.73

5.4 低減係数の確認

表-9 計画段階での設定、試験結果、壁体コンクリートの強度評価、低減係数の確認 (強度関連の単位は kgf/cm²)

表-9の『水中低減係数の確認』の欄の「修正低減係数」(P項)は、(得られた設計基準強度相当値/設計基準強度)の比を、当初設定の低減係数に乗じてその値を修正したものである。

エレメント名	計画段階での設定						試験結果				
	設計基準強度 (材齢91日) A	水中低減係数 B	水中低減係数による割増 C	変動係数 D (%)	変動係数による割増 E	配合強度 F	水セメント比 (%)	コア供試体 平均強度 H	変動係数 (%)I	標準供試体 平均強度 J	変動係数 (%)K
	計算式→→→		1÷B			A×C×E					
A	600	0.9	1.11	13	1.27	846	34.6	793	7.8	898	5.2
B	800	0.9	1.11	7	1.13	1007	27.8	1017	7.0	1134	3.3
	800×CV-3	0.9	1.11	7	1.13	1007	27.8	974	4.7	1134	3.3

壁体コンクリートの強度評価				水中低減係数の確認						
不良率5%位置算出係数 L	不良率5%位置強度 M	配合設計上の誤差 N	修正した不良率5%位置強度 O	修正低減係数 ^{(注)1} P	修正変動係数 ^{(注)2} Q	修正割増係数 R	修正配合強度 S	修正平均コア強度 T	不良率5%位置強度 U	修正低減係数 ^{(注)3} V
	H÷L	J÷F	M÷N	(O÷A)×B			A×C×R	(S÷F)×H	T÷R	(U÷A)×B
1.15	690	1.06	651	(0.98)	8	1.15	766	718	624	0.94
1.13	900	1.125	800	0.90	^{(注)1}					
1.08	902	1.125	802	0.90	^{(注)2}					

^{(注)1} 算出方法：O/Aの比だけ低減係数を引き上げるとして計算した。
^{(注)2} この「修正」は計画時の変動係数の設定が過大であったことに対する修正。
^{(注)3} 算出方法：U/Aの比だけ低減係数を引き上げるとして計算した。

この低減の内容は、水中打込み、マスコン養生、コア採取作業などの影響の結果のものであり、各影響度合いを仕分けすることは困難である。

従来は低減係数として0.8が採用されることが多かったが、ここに報告したコンクリートでは低減係数を大きく取る(低減を少なくする)ことが可能であることが確認された。

6. まとめ

実験の結果はつぎのようにまとめられる。

- ①使用したコンクリートはフレッシュコンクリートの品質が安定している。
- ②市中の生コン工場でコンクリートを製造し、安定液中に打込むという条件で、設計基準強度800kgf/cm²、コアの平均強度1000kgf/cm²以上級の地下連続壁を施工することは可能である。
- ③水中低減係数として、0.90~0.94のような値をとることが可能である。

流動勾配、充填状況、コンクリート側圧、温度履歴なども測定しており、温度ひび割れ検討でその可能性が少ないことも確認しているのでこれらについて別の機会に報告したい。

参考文献

- 1) 坂田昇・田沢雄二郎・大友忠典・瀬戸謙一郎：超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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16、1994.6
- 2) 藤田信一、儀賀俊成、万木正弘、坂田昇：大規模地下連続壁のコンクリートに関する実験的研究、土木学会論文集 No. 435/VI-15. 1991.9