

高流動コンクリート

— LNG 地下タンクにおける自己充てんコンクリートの適用 —

川村 佳則*

1. はじめに

自己充てん性を有する高流動コンクリート（以後、自己充てんコンクリートという）の構想が練り始められたのは、コンクリート構造物の早期劣化が社会的問題としてクローズアップされた 1980 年代初頭である。本来は耐久性に優れた材料にもかかわらず、建設後数年を待たずして補修を要する状態に至る鉄筋コンクリートが続出したが、その原因がコンクリートの充てん不良にあると認識されたからである。

1985 年から自己充てんコンクリート開発のための基礎研究が、前川、小澤により開始され、1988 年夏には市販の材料を組み合わせることによって、締固め不要コンクリートのプロトタイプの第 1 号が完成した。この第 1 号は、乾燥収縮や硬化収縮、水和熱および硬化後の緻密性などに関する性質もほぼ満足のいく性能をもっていることが確かめられた。

その後、任意の構成材料を用いて、締固め不要の自己充てん性能を満足する配合を、誰でも簡単かつ確実に算出できるための研究（配合設計法に関する研究）などが進められた。本研究の成果を基に、数多くの施工実績が積み重ねられるとともに、日本コンクリート工学協会、土木学会コンクリート委員会が研究委員会が設置され、技術的課題が検討されてきた。日本建築学会では、1997 年 1 月に「高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針（案）」が発刊され、土木学会においても、1998 年 7 月に「高流動コンクリート施工指針」²⁾が発刊された。それらの指針の発刊を契機に、土木・建築分野で自己充てんコンクリートの施工実績がますます増加している。

東京ガス(株)においても、扇島工場に建設中の TL12LNG 地下タンクの側壁に自己充てんコンクリートを適用した。適用にあたっては、技術課題の抽出、技術検討および評価を行い、その結果を実施工に反映することにより、良好なコンクリートを打設することができた。本論文で、その内

容を報告する。

2. 地下タンクの概要および技術課題

2.1 TL12LNG 地下タンクの概要

扇島工場 TL12LNG 地下タンクは、世界最大級の容量 20 万 KL（内径 70.8 m、液深 51.0 m）の鉄筋コンクリート製の円筒形構造物で、屋根、側壁および底版から構成されている。底版はコンクリートの設計基準強度 24 N/mm²、厚さ 8.0 m、側壁は設計基準強度 60 N/mm²、厚さ 2.8 m、この内、側壁第 1~3 ロットに 7 200 m³の自己充てんコンクリートを適用した。

本地下タンクは、世界で初めて底版と側壁を剛結構造とした LNG 地下タンクである。完成後には底版に作用する水圧により、底版外周部には非常に大きな曲げモーメントが発生することとなる。底版と一体構造となっていることにより、側壁剛結部である側壁第 1~3 ロットにその断面力が伝達され、大きな引張力が発生することとなる。その引張力に対抗するために、側壁第 1~3 ロットに大容量ケーブルによるプレストレスを導入している。そのため、側壁第 1~3 ロットには多量の鉄筋および PC 鋼材が設置されている。また、第 1 ロットは応力の流れをスムーズにするため、ハンチを設けている。ハンチ部は鉄筋および PC 鋼材が緻密状態で設置されており、作業員が入ることもできない。

以上のような経緯から側壁第 1~3 ロットに、自己充てんコンクリートを適用した。第 1 ロットは 2.0 m、第 2、3 ロットは、4.0 m である。図 - 1 に本タンクの概要図を示す。

2.2 技術課題

本地下タンクの側壁は、鉄筋量が多く、PC 鋼材用シース

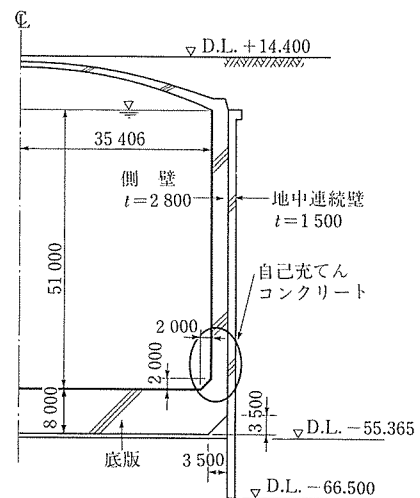
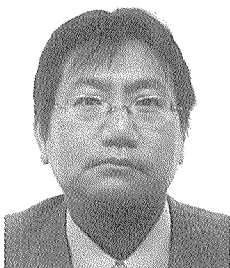


図 - 1 TL12LNG 地下タンク概要図



* Yoshinori KAWAMURA

東京ガス(株) 生産部生産エンジニアリンググループ 課長

などの埋設物も多いことから、内部空間が非常に狭く、コンクリートの充てん性を確保することが課題であった。それとともに、自己充てんコンクリートは、コンクリート打設時に締固めを行わないため、全量検査装置を用いて要求性能を満たさない低品質のコンクリートを打設する前に除外することとしたが、自己充てん性の判定に加えて、従来抜取試験により判定していた流動性と粘性を全量検査装置で判定できるかが課題であった。

最初の課題に対しては、所要の品質を満たすコンクリートの配合計画を行い、その配合での実物大モデルを用いた打設実験により、自己充てん性の確認することで対応した。2番目の課題に対しては、流動性と粘性を判定できる改良型の装置を開発した。この装置を用いることにより、良好なコンクリートを打設することができたとともに、品質管理における省力化を図ることができた。

3. コンクリートの充てん性確保

3.1 コンクリートの配合計画

(1) 要求品質

側壁第1～3ロット内部は、図-2に示すようにD51の鉄筋が内外側とも2段に配筋され、継手には重ね継手を使用している。また、PCシースおよび定着金物などが配置されることとなり、パイプレタによる締固め作業が非常に困難である。そこで、「高流動コンクリート施工指針」に準拠し、締固めを必要としない自己充てんコンクリートを適用することとした。自己充てん性のランクは、最小鋼材のあき(78 mm) および鋼材量(400 kg/m³) から自己充てん性のランクを1とした。側壁の壁厚は2.8 mで、流動性を確保する必要があったため、スランプフローを60～70 cmとした。

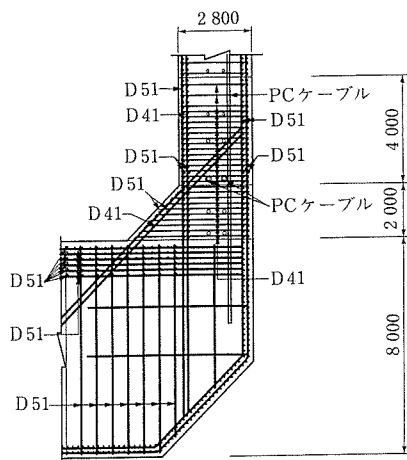


図-2 側壁下端部配筋図

側壁第1～3ロットの自己充てんコンクリートの1回あたりの打設量は1,900～2,700 m³と多いため、ある程度打設速度を高めるとともに、粘性が大きくなり過ぎないようにする必要があった。そこで、コンクリートの粘性を評価するO漏斗流下時間の目標値は、9～15秒とした。コンクリートの要求品質を表-1に示す。

表-1 コンクリートの要求品質

項目	内容	
設計基準強度(N/mm ²)	60	強度保証材齢91日
スランプフロー(cm)	65 ± 5	自己充てんランク1
空気量(%)	4 ± 1	自己充てんランク1
O漏斗流下時間(sec)	(9～15)	自己充てんランク1
U型充てん高さ(cm)	≥ 30	障害R1

(2) コンクリートの配合

「高流動コンクリート施工指針」においては、材料分離抑制の観点から使用する材料の種類により、「粉体系」、「増粘剤系」および「併用系」に区分される。ここで、「粉体系」はセメントなどの粉体を多くしたもの、「増粘剤系」は粘性を高める混和剤を添加したもの、「併用系」は粉体と増粘剤を併用したものである。今回、側壁第1～3ロットに使用する自己充てんコンクリートは、以下の理由により「粉体系」を選定した。

- 1) 側壁コンクリートの設計基準強度が60 N/mm²の高強度コンクリートであり、一般に高強度の自己充てんコンクリートには「粉体系」が適している。
- 2) 増粘剤を混入したコンクリートは、低温時にコンクリートの粘性が増大する場合がある。
- 3) 増粘剤を混入したコンクリートは、一般に凝結時間が延びる傾向にあり、低温時には初期材齢での発現強度が遅れる場合がある。本タンクでは初期材齢でプレストレスト力を導入するため、初期発現強度を確保する必要がある。

セメントは、粒子が効率的に分散され、高流動性、良好な充てん性能を得やすく、硬化時の発熱量が低い低発熱型ポルトランドセメントとした。そのセメントに、あらかじめ石灰石微粉末(以下石粉という)を混合して、粉体量を確保した。

混和剤は、流動性を確保し、かつ、単位水量、単位セメント量を低減させるために、ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤とした。

単位水量、水粉体容積比および単位粉体量は、「高流動コンクリート施工指針」の規定に実績を考慮し設定した。

細骨材は、千葉県君津産の山砂(密度2.6 kg/cm³、給水率

表-2 自己充てんコンクリートの配合

項目	値	
水セメント比(%)	38	
水粉体容積比(%)	94.1	
単位粗骨材容積(%)	0.3	
	単位量	
	(kg/m ³)	(m ³ /m ³)
水	160	0.16
セメント	421	0.13
石粉	108	0.04
粉体(セメント+石粉)	529	0.17
細骨材	858	0.33
粗骨材	810	0.3
高性能AE減水剤	粉体×1.3～1.7%	

1.3%，粗粒率 2.66），粗骨材は最大寸法 20 mm の石灰岩碎石（密度 2.7 kg/cm³，給水率 0.6%，粗粒率 6.7）を使用した。配合を表 - 2 に示す。

3.2 充てん性確認—実大モデル打設実験

(1) 実験概要

選定した配合でのコンクリートの自己充てん性を確認するため、配筋がもっとも過密状態である側壁第 1 ロットの実物大モデルの供試体を製作し、これにコンクリートを打設して、自己充てん性を確認した。透明型枠を用いて、充てん状況を目視観察するとともに、数箇所から試料を採取して、粗骨材の洗い分析により充てん性を確認した。打設は、実物大モデル型枠に生コン車のシュートを直接のせ、打設した。図 - 3 に実物大モデル形状を示す。

(2) 実験結果

(a) 打設状況結果

打設したコンクリートは、スランプフロー：63～68 cm，○漏斗流下時間：12～14 秒であった。コンクリートの廻り込み状況は良好で、過密配筋部の鉄筋交差部や PC シース管等を乗り越えて、型枠のすみずみまで充てんされていた。

流動勾配は、1/10～1/20 程度であった。6 層目の打設は、コールドジョイントの影響を見るために、打重ね間隔を 2 時間あけた後、打設した。

(b) 粗骨材洗い分析結果

打設中のコンクリートから試料を採取し、水洗いを行って粗骨材の含有量を測定した。試料を採取したかぶり部分については、設計粗骨材含有率 34.5 % に対して、28.0～33.5 % であり若干ばらつきが認められたが、設計値と比較して、80 % 以上は残る結果となった。表 - 3 に粗骨材分析

表 - 3 粗骨材分析結果

試料採取位置	粗骨材重量含有率 (%)
① 生コン落し口 (5 層目)	34
② ハンチ際・生コン落し口側下部 (1 層目)	28.5
③ ハンチ際・生コン落し口側中段部 (3 層目)	28
④ ハンチ際・生コン落し口最遠側下部 (1 層目)	33.5
⑤ ハンチ際・生コン落し口最遠側中段部 (3 層目)	30
⑥ 連壁際・生コン落し口側下部 (1 層目)	30
⑦ 連壁際・生コン落し口最遠側・下部 (1 層目)	29.5
設計値	34.5

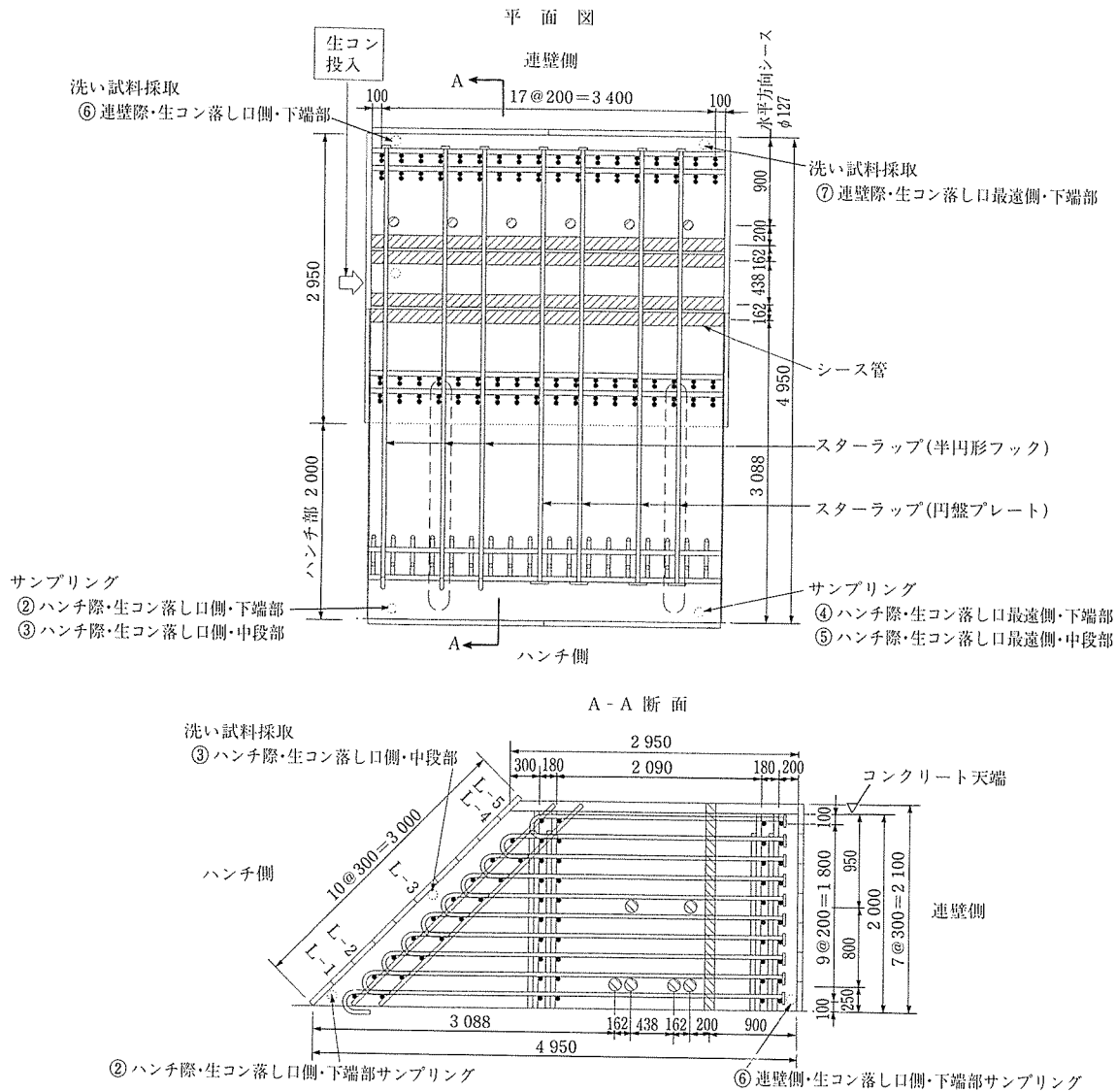


図 - 3 実物大モデル形状図

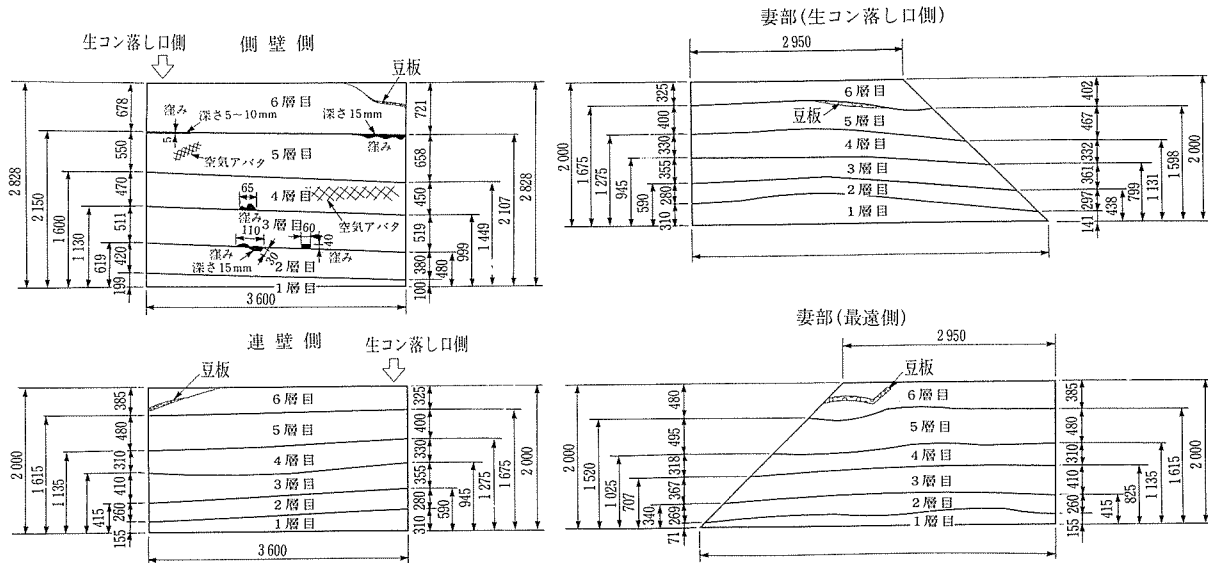


図 - 4 型枠脱型後表面状況図

結果を示す。

(c) 脱型状況

打設した後、およそ1ヶ月後に型枠を撤去した。コンクリートの充てん状況は、ハンチ面には、4、5層目に空気あばたが見られたほか、空気が抜けきらなかったと思われる窪みが層境に見られた。窪みは、5箇所あったが、深さ方向にこの窪みをはつた結果、深さは最大でも15mmであり、その奥には層の境目は見られなかった。その結果から、ハンチ面については、実施工では型枠バイブレータなどにより型枠面をたたくなどして充てん性を向上できると判断した。

脱型後、コンクリートをはつり、解体しながら、内部の充てん状況を確認した。内部コンクリートでは、鉄筋交差部やPCシース管部、定着金物部付近について、空洞や巣などは見られなかった。また、各層の打重ね部について、層境が見られず、コールドジョイントは認められなかった。5層目と6層目の打重ね時間間隔は2時間以上であり、6層目打設時には5層目の天端は若干硬化が進んでいたが、コールドジョイントは認められなかった。脱型時の各側面の状況図を図-4に示す。

(3) 実験結果の評価

実物大モデル打設実験の結果の評価を以下に示す。

- ・コンクリートのフレッシュ性状は良好であり、すみずみまで廻り込んでいた。
- ・粗骨材洗い分析の結果、設計値に対して80%程度の粗骨材含有率であった。実際のコンクリート打設は層状に行うことから、上層から下層への粗骨材の沈降もあるため、全体的には粗骨材もバランスよく充てんされると考えられる。
- ・硬化後の調査では、大きく充てんされていない箇所はなく、充てん状況は良いと判断できる。一部、ハンチ面に空気が抜けきれなかった窪みがあったが、型枠バイブレータ等により空気を抜くことは可能であり、実際のコンクリート打設では問題ないと考えられる。

3.3 コンクリートの自己充てん性評価

コンクリートの要求品質を「高流動コンクリート施工指針」に準拠し設定し、それに基づきコンクリートの配合計画を行った。その配合での実物大モデルを用いた自己充てん性確認実験の結果、側壁第1～3ロットに適用できると考えられる。

4. 全量検査装置の検討

4.1 全量検査装置を用いた打設実験

(1) 実験概要

既存のプロトタイプ³⁾の全量検査装置は箱型の装置に鉄筋の障害をつけたものであり、コンクリートが自重のみで鉄筋の障害を通過する性状によって、充てん性の良否を評価するものである。本来、全量検査装置は間隙を通過する性状から自己充てん性を判定するものであり、流動性や粘性についての判定は抜取検査により行われていた。しかし、打設量が多くなると、抜取検査回数も多くなり、品質管理が煩雑となる。そこで、プロトタイプ全量検査装置またはこれの改良型を用いて、充てん性の良否、流動性および粘性を判定できるか否かを確認するため、試験を実施した。

生コン車から投入された時の動的な勢いによって、コンクリート自身のもつ性能が判定できないと予想されたので、投入時の勢いを止めるようにするため、プロトタイプの全量検査装置をベースとして、装置の改良を試みた。改良の目的は以下のとおりとした。

- 1) 間隙通過性に加えて、流動性と粘性の良否を判定し、従来の抜取検査頻度を低減する。
- 2) 計画打設量を確保する。

第1回目の試験装置は、プロトタイプを含めて、以下の4種類である。

- No.1：プロトタイプ (図-5)
- No.2：装置内水平距離延長タイプ (図-5)
- No.3：障壁設置タイプ (図-6)
- No.4：障壁設置改良タイプ (図-7)

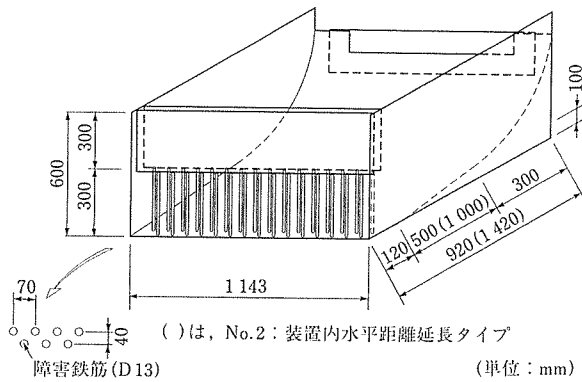


図-5 No.1/No.2 全量検査装置

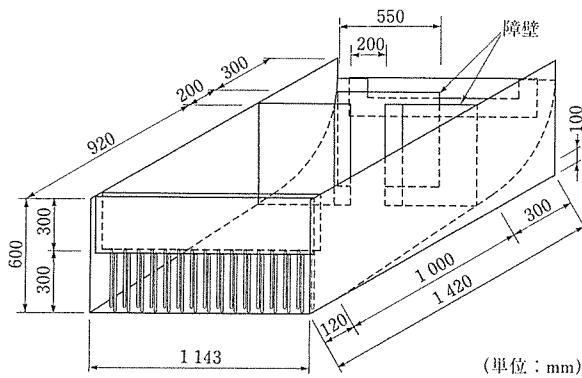


図-6 全量検査装置 No.3

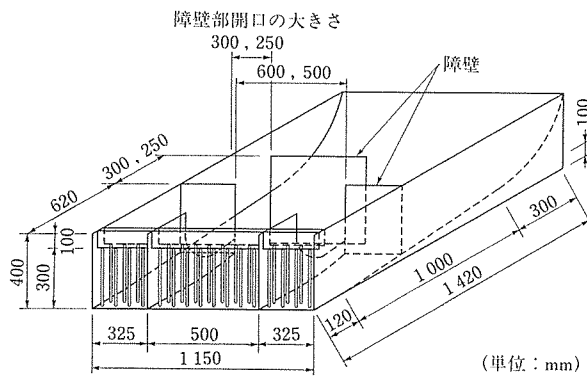


図-7 全量検査装置 No.4

No.2の装置内水平距離延長タイプは、装置の水平距離を長くして、受け入れられたコンクリートの速度を緩め、通過性状をより顕著化しようとしたものである。

No.3 全量検査装置（障壁設置タイプ）は、No.2の装置内に障壁を設置して、受け入れられたコンクリートが、この障壁に当たることによって、コンクリートの動的な勢いを緩めようとしたものである。

No.4 全量検査装置（障壁設置改良タイプ）は、コンクリートの受取りを効率よく行うために、障壁の位置を変更して、障壁通過後の流路幅を広げて、流量を確保した。また、装置の全高を下げて、生コン車の2台付けを可能にしたものである。

これらの検査装置に、コンクリートを投入して、コンクリートの通過性状を観察し、通過時間を計測し、下記の式

によりコンクリートの通過速度を算出した。

$$v = (L/t) \times (1/V) \quad (1)$$

v : 全量検査装置内通過速度 (cm/sec)

L : 全量検査装置の延長長さ (cm)

t : コンクリート 1 m³ の全量検査装置内通過時間 (sec)

V : 全量検査装置容積 (m³)

流動性の指標であるスランプフローをパラメータとして考え、3水準（45 cm, 55 cm, 60 cm）での実験を行った。

(2) 実験結果

全量検査装置 No.1 および No.2 のスランプフローと装置内通過時間の関係を図-8に示す。スランプフローと装置内通過時間とは無関係であり、すべてのコンクリートが全量検査装置を通過した。これは、生コン車からコンクリートを全量検査装置に投入した際にコンクリートに動的な勢いが与えられるからである。この動的な勢いによって、コンクリートの流動性および粘性の影響が打ち消され、全量検査装置 No.1 および No.2 を用いて流動性および粘性の良否を判定することはできないと判断できる。

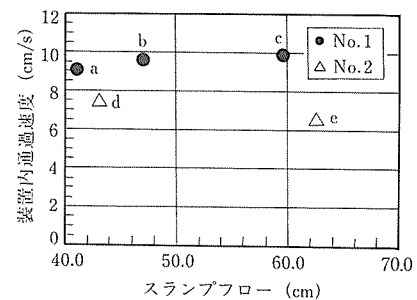


図-8 装置内通過速度とスランプフローの関係 (No.1/No.2)

全量検査装置 No.3 スランプフローと装置内通過時間の関係を図-9、装置内通過時間とO漏斗流下時間の関係を図-10に示す。スランプフロー45 cmのものは、障壁によってコンクリートが閉塞した。しかし、スランプフロー55 cmのものは、通過速度に差がなく、全量が装置を通過した。また、スランプフロー60 cmのものでは、粘性が高いほど通過速度が遅くなっており、全量検査装置を通過する速度とO漏斗流下時間との間に相関関係があると考えられる。

全量検査装置 No.4 のスランプフローと装置内通過時間の関係を表-4および図-11、装置内通過時間とO漏斗流下時間の関係を図-12に示す。表-4に示すように、実験では障壁の開口の大きさを2種類（30 cmと25 cm）とした。全量検査装置 No.4 では、コンクリートの装置通過速度は、スランプフローが大きいほど速く、漏斗流下時間が大きいほど遅くなる傾向がみられた。全量検査装置 No.3 と同様に、流動性が極端に低いスランプフロー45 cmのものは障壁によってコンクリートが閉塞した。しかし、スランプフロー55 cmのものは通過速度が遅くなるが、全量が装置を通過した。また、開口の大きさの影響については、開口の大き

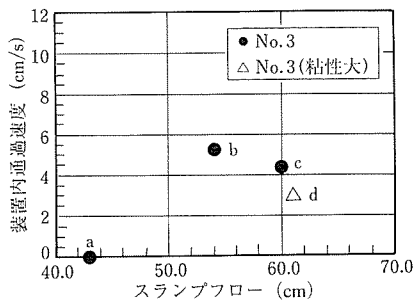


図 - 9 装置内通過速度とスランプフローの関係 (No.3)

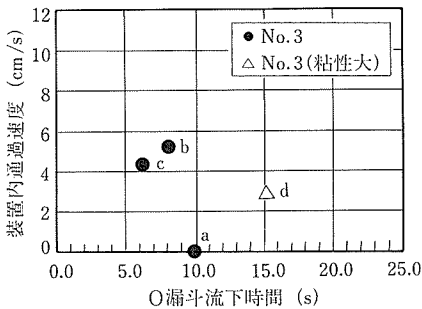


図 - 10 装置内通過速度とO漏斗流下時間の関係 (No.3)

さが 30 cm の方が装置内を通過しやすいものの、スランプフロー 55 cm のものは通過速度が開口の大きさにはあまり影響されない傾向であった。

4.2 全量検査装置の評価

全量検査装置を用いた打設実験の結果の評価を以下に示す。

- ・既存のプロトタイプ (No.1) および装置内水平距離延長タイプ (No.2) では、流動性および粘性を判定することは困難である。
- ・障壁を設けることにより、流動性の低いコンクリートを排除することは可能である。また、粘性を判定することもできると考えられる。したがって、障壁設置改良タイプの全量検査装置を用いることにより、コンクリートの自己充てん性、流動性および粘性を判定できると考えられる。

表 - 4 全量検査装置打設実験結果 (No.4)

障壁開口部の大きさ	各スランプフローにおける全量検査装置内通過速度 (cm/sec)		
	45 cm 程度	55 cm 程度	60 cm 程度
30 cm	閉塞 (44.0 cm) [15.9 sec]	3.3 (54.0 cm) [14.1 sec]	6.0 (65.0 cm) [9.9 sec]
25 cm	—	2.4 (54.0 cm) [14.2 sec]	3.4 (65.0 cm) [12.4 sec]

注) () 内：スランプフロー
[] 内：O漏斗流下時間

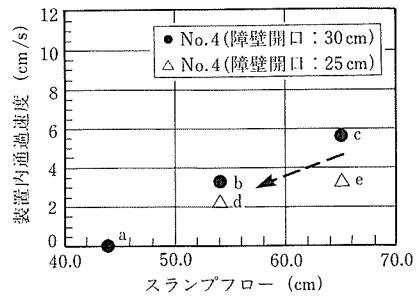


図 - 11 装置内通過速度とスランプフローの関係 (No.4)

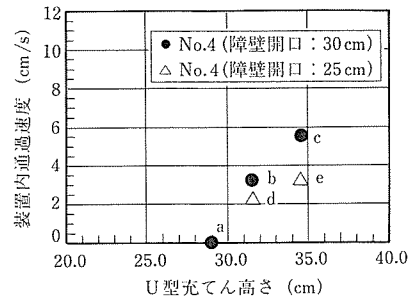


図 - 12 装置内通過速度とO漏斗流下時間の関係 (No.4)

5. 品質管理システム

5.1 監視システム

地下タンクのような大規模構造物におけるコンクリート打設では、1回のコンクリート打設量が大量であるため、数班に分割し、コンクリート打設を実施する。TL12LNG地下タンクの側壁コンクリート打設においても8班打設を行った。全量検査装置を使用した場合、コンクリートの通過状況 (写真 - 1) を常時監視する必要があり、監視員を全班に配置する必要があった。そこで、監視員削減と集中管理のため、各全量検査装置 (8班による打設のため、8台) にビデオカメラを設置し、集中モニタリングできるようにし、品質管理責任者が常時監視した (写真 - 2)。また、集中管理によりコンクリートの性状を製造工場へ即座に連絡し、コンクリート製造にすぐフィードバックできるようにした。

5.2 抜取検査の合理化

全量検査装置でコンクリートの自己充てん性、流動性および粘性を判定することができるため、主検査として全量検査装置、補助的な検査として抜取検査を実施した。

抜取検査の検査項目は、スランプフロー・O漏斗流下時間検査とした。また、側壁第2, 3ロットでは、第1ロッ

トの品質管理実績を踏まえて、検査頻度を JIS に定められた最低限（1 回/150 m³）にすることができた。

6. ま と め

今回、自己充てんコンクリートの品質管理では、全量検査装置を用いることにより要求品質を満足しないコンクリートを除外することができた。さらに、全量検査装置内を通過する状況をビデオカメラで撮影することによりコンクリート品質管理者が常時観察し、コンクリートの性状の変化を容易に把握することができた。これにより、高品質な自己充てんコンクリートによる側壁構築ができた。

このように、LNG 地下タンクのような 1 回に大量の自己充てんコンクリートを打設する場合においても、全量検査装置およびビデオカメラによる監視システムを用いた合理的で高品質な管理を実施できるシステムを確立することができた。今後、ますます鉄筋コンクリート構造物に対して、このようなシステムを用いた自己充てんコンクリートの適用実績が増大することが期待される。ただし、その適用にあたっては、施工実験などによる確認、生コンクリートの厳しい製造管理の実施など、慎重な取り扱いを行っているのが現状である。これらの手間を省略し、簡単に自己充てんコンクリートを購入することができ、信頼性および耐久性の優れた構造物が確実に実現できるシステムの構築が必要であろう。

参 考 文 献

- 1) 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンス コンクリート, 技報堂出版, 1993
- 2) 土木学会コンクリート委員会: 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, 土木学会, 1998
- 3) 大内雅博, 小澤一雅, 岡村甫: 打設現場における自己充填コンクリートの受入検査用全量検査試験の開発, コンクリート技術シリーズ 19, 自己充填コンクリートセミナー論文報告集, pp.89-94, 土木学会, 1997

【2002 年 12 月 10 日受付】

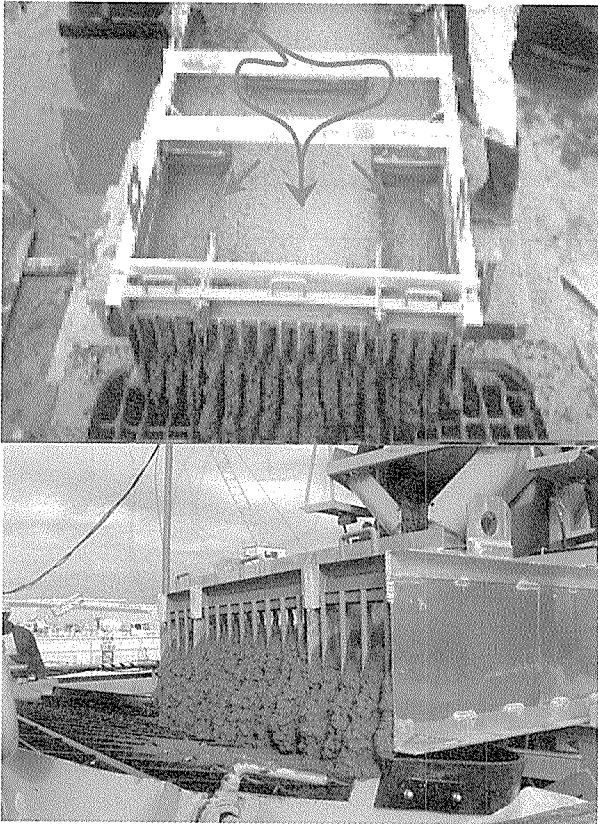


写真 - 1 No.4 全量検査装置による品質管理状況



写真 - 2 集中管理モニタリング