

# 論文 地下連続壁トレミーの圧力測定

岡田武二<sup>\*1</sup>・近藤 陸<sup>\*2</sup>・永島三雄<sup>\*3</sup>・平井孝典<sup>\*4</sup>

**要旨** 深度が地表面から-120mにも達する大深度地下連続壁をトレミー工法によって施工したが、1部のエレメントのコンクリート打設でトレミー内における閉塞現象が発生した。大深度地下連続壁の施工を円滑に行うためにも、トレミー閉塞の原因を解明するためにトレミーの圧力測定を実施した。本論文では、これら現場計測で得られた実測データに基づいて、高強度高流動コンクリートのトレミー内の流動時圧力分布の算定方法と脱水ろ過現象を誘起する圧力差について考察し、トレミー閉塞の可能性を論じた。

**キーワード**：地下連続壁、トレミー、閉塞、高強度高流動コンクリート、圧力分布

## 1. はじめに

LNG地下タンクの仮設山留め壁として使用する大深度地下連続壁（深度120m）の施工をスランプフロー60~70cmの高強度高流動コンクリートを用いてトレミー工法によって施工したが、1部のエレメントのコンクリート打設でトレミー内における閉塞現象が発生した。今後の大深度地下連続壁の施工を円滑に行うためにも、トレミー閉塞の機構（以下、メカニズムと称す）を解明することが必要である。地下連続壁のコンクリート打設は、トレミーで流動性の高いコンクリートを自重により圧入し、溝壁内安定液と置換するものである。トレミー内流動時におけるコンクリートは、一般に行われているコンクリートポンプ圧送と同様な流動状況となるものと考えられる。コンクリートポンプ圧送の場合、配管内におけるコンクリートの閉塞を生ずる原因としては、材料の分離および骨材相互のアーチング現象が考えられている。本工事の施工状況から推察するとトレミー内閉塞のメカニズムは、材料分離により配合の変化した部位が移動し、さらにトレミー内の圧力分布の変化に伴う管行き方向に生ずる水の分離が生じ、脱水固化した状態となり閉塞するものと想定された。

そこで、閉塞の原因を解明するために現場におけるトレミー内の圧力測定を実施した。本論文は、この現場計測で得られた実測データに基づいて、高強度高流動コンクリートのトレミー内流動時の圧力分布の算定方法と配合変化部位の圧力差について考察し、トレミー閉塞の可能性を論じたものである。

## 2. トレミー閉塞現象

閉塞現象はコンクリートを順調に投入中に突発的に生じ、トレミー内のコンクリート高さが急激に増加する。コンクリートの投入を中断してトレミーを引き上げてもほとんどの場合コンクリートの固化部分が移動しない状態で存在した。その位置は地表面から-65~-105mの間に生じ

\*1 清水建設（株）技術研究所 部長、工博（正会員）

\*2 中部電力（株）浜岡原子力総合事務所

\*3 知多LNG地下式貯槽土木

清水・大林・鹿島・大成共同企業体 所長

\*4 清水建設（株）土木東京支店技術部 グループ長

ており、これらの中、地表面から-80m前後の深さに位置している固化部分が約半数であった。固化部分の長さは1~3mほどであり、その上部のコンクリートは正常なものと判断された。固化部分のコンクリートはスランプ0~15cm程度の硬さで様々であるが、その最下部には脱水された非常に硬いコンクリート層が生じているもののが多かった。

本工事の地下連続壁に使用した高強度高流動コンクリートの設計基準強度は370kgf/cm<sup>2</sup>、空気量は2±1%、スランプフローは65±5cmである。多量の連続打設となることから5箇所のレディーミキストコンクリート工場（以下、プラントと称する）から供給した。代表的な例として、Oプラントで使用した材料および配合を表-1および表-2に示す。

トレミーが閉塞した時に、トレミーを引き上げながら閉塞箇所の上部トレミーのジョイント位置から採取したコンクリートの洗い分析試験の結果から粗骨材体積濃度を求める約28~47Vol.%の範囲であった。平均値は38.7Vol.%（標準偏差は6.54Vol.%）であり、プラントの配合から粗骨材の比重を2.64として粗骨材体積濃度（Vol.%）を求めた36.7Vol.%とほぼ一致した。

脱水固化現象は粗骨材体積濃度が約41~47Vol.%程度の大きい部位で認められた。さらに、トレミー内コンクリートの落下高さが60m程度の場合に、コンクリートの投入量を約50m<sup>3</sup>/hr以下で打設する時には、粗骨材体積濃度が約41~47Vol.%程度の大きい部位が部分的に生じることが明らかとなり、この配合変化部位がトレミー内を下方へ移動する間に脱水ろ過現象が進行して閉塞に至ることが推察された。

### 3. トレミーにおける圧力分布の算定式

流動時におけるトレミー内の圧力分布は、コンクリートをポンプ圧送する場合で言えば高落差のある低い所へ圧送する特殊な条件下の場合となる。通常のポンプ圧送の圧力分布は圧送口で最大であり、先端部近傍では圧力が零となる。一方トレミーの圧力分布は投入口で圧力が零であり、先端部近傍でトレミー外の安定液圧力が保持されるものと考えられる。

図-1は地表面からの深さ119mの大深度地下連続壁の下部5mにコンクリートを打設した時の圧力状態の例を示している。トレミーの先端には、すでに圧入したコンクリートの圧力 $p_c = 1.2\text{kgf/cm}^2$ と安定液の圧力 $p_s = 12.4\text{kgf/cm}^2$ との和の13.6kgf/cm<sup>2</sup>の圧力が作用している。コンクリートの投入を中断すると、安定液の最下端からの高さ（以下、釣合い高さ $\ell_0$ と称する）約52mでコンクリートは静止するものと考えられる。さらに、コンクリートの投入を再開すると釣合い高さの上部にコンクリートが積み上がり、投入流量に見合ったコンクリート増加高さ $\ell_c$ mを保持しながら流動する。この $\ell_c$ mのコンクリートによる自重圧力が釣合い高さの位置に増加圧力として作用することになる。しかし実際には、コンクリートの流動によるすべり抵抗が作用するので圧力損失が生じ、圧力は点線のように低減するものと思われる。この低減割合は、コンクリートの使用材料、配合、トレミー径、投入量などによって変化する。

トレミー内におけるコンクリートの閉塞メカニズムを解明するためには、コンクリートのトレミー内の流動時の圧力分布を定量的に検討する必要がある。

ベルヌーイの定理のエネルギー保存則における水頭和は式(1)で表わせる。また、コンクリートの損失水頭 $h_e$ は式(2)で表わせる。式(2)を式(1)に代入して、両辺をxで積分すると式(3)が得られる。図-1に示すように、圧力状態をP<sub>1</sub>点を高さの基準点(x=0)とし、P<sub>2</sub>点を安定液高さ $\ell_s$ の位置(x=ℓ<sub>c</sub>+ℓ<sub>0</sub>)とすれば、P<sub>1</sub>=0 kgf/cm<sup>2</sup>であり、P<sub>1</sub>点よりx m 下の圧力p<sub>x</sub>は、式(4)で算定出来る。また、P<sub>2</sub>点の圧力p<sub>2</sub>は式(3)にp<sub>1</sub>=0、x=ℓ<sub>c</sub>+ℓ<sub>0</sub>を代入して、式(5)で算

定出来る。トレミー内の圧力分布は、式(4)で示されるように自重による圧力  $\rho_c \cdot x$  と圧力損失  $(AQ+B) \cdot x$  の大小によって圧力差が変化する。また、増加高さ  $\ell_c$  は式(3)に  $p_1 = 0$ 、  
 $p_2 = \rho_s \cdot \ell_s, x = \ell_c + \ell_o$  の条件を代入することにより式(6)で算定出来る。

表-1 使用材料一覧

使用材料	種類	物性および化学成分	
セメント	フライアッシュ混入 低燃高炉セメント	比重 = 2.80, 比表面積 = 4710 cm <sup>2</sup> /g 骨セ = 32 %, 高炉スラグ = 48 %, フライアッシュ = 20 %	
細骨材	御衣野産山砂	表乾比重 = 2.59, 吸水率 = 1.99 %, (F.M. = 3.07)	山砂: 川砂 = 4 : 6 F.M. = 2.96
	播磨川産川砂	表乾比重 = 2.60, 吸水率 = 1.88 %, (F.M. = 2.88)	
粗骨材	播磨川流域砂利	表乾比重 = 2.64, 吸水率 = 1.28 %, 寸法 25 ~ 15mm	砂利: 山砂利 = 4 : 6 F.M. = 6.57
	瀬戸産山砂利	表乾比重 = 2.60, 吸水率 = 1.45 %, 寸法 15 ~ 5mm	
混和剤	高性能AE減水剤	ポルカルボン酸塩 比重 = 1.06, 固形分濃度 = 20 wt%	

表-2 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	25	25±5	2±1	35.0	45.0	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤添加率 C × wt (%)
						W	C	S	G	
						155	443	775	962	ベース: 1.0 流動化: 0.7

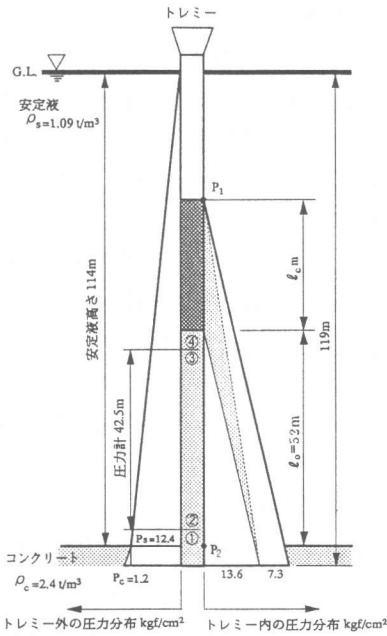


図-1 大深度地下連続壁の圧力状態の例

表-3 算定式

$\frac{d}{dx} \left[ \frac{v^2}{2g} + Z + \frac{p}{\rho_c} \right] = - \frac{dh_e}{dx} \quad \dots (1)$	$\frac{v^2}{2g}$ : 速度水頭 $\frac{p}{\rho_c}$ : 圧力水頭 $Z$ : 位置水頭 $h_e$ : コンクリートの損失水頭 $\frac{\Delta p}{\ell}$ : トレミー単位長さ当りの 圧力損失 (kgf/cm <sup>2</sup> /m) $Q$ : 吐出量 (m <sup>3</sup> /hr) $A, B$ : コンクリートのスランプ、 トレミー径によって決まる定数 $Z_1 - Z_2$ : 基準面からの高さ $Z_1 = \ell, Z_2 = \ell - x$ $x$ : P1点とP2点の距離 $\ell_c$ : コンクリートの増加高さ (m) $\ell_s$ : 安定液高さ (m) $\rho_s$ : 安定液の単位体積重量 1.09 (tf/m <sup>3</sup> ) $\rho_c$ : コンクリートの単位体積重量 2.40 (tf/m <sup>3</sup> )
$\frac{p_2 - p_1}{\rho_c} = - \frac{1}{\rho_c} \int_{x_1}^{x_2} (A \cdot Q + B) dx + (Z_1 - Z_2) \quad \dots (3)$	
$p_2 = p_1 + \rho_c x - (A \cdot Q + B) x \quad \dots (4)$	
$p_2 = (\rho_c - (A \cdot Q + B)) \cdot (x + (A \cdot Q + B)) \quad \dots (5)$	
$\ell_c = \rho_s \cdot \ell_s \left( \frac{1}{\rho_c - (A \cdot Q + B)} - \frac{1}{\rho_c} \right) \quad \dots (6)$	
$\ell_o = \ell_s \cdot \rho_s / \rho_c \quad \dots (7)$	
$\frac{\Delta P}{\ell} = AQ + B = 0.00145 Q - 0.065 \quad \dots (8)$	

#### 4. トレミーにおける圧力測定

これまでにトレミー内に生ずる圧力分布を測定した報告はなく、特に $\phi 25\text{cm}$ の大口径のトレミーの実測例は見当たらない。そこで、本地下連続壁の1エレメントのコンクリート打設時にトレミー内に生ずる圧力分布を測定した。

##### 4.1 測定方法

図-1に安定液高さ $\ell_s$ 、トレミー内のコンクリート釣合い高さ $\ell_0$ 、トレミー内コンクリート增加高さ $\ell_c$ および圧力計位置などの関係を示す。圧力計は、2mおよび3mのトレミー2本にそれぞれ1.5m離して2個を取り付けた。圧力計の位置は、トレミー先端から、 $7 \pm 0.75\text{ m}$ （①、②）および $49.5 \pm 0.75\text{ m}$ （③、④）とした。トレミー内の圧力は、図-2に示す圧力計、動ひずみ測定器およびペンレコーダを用いて連続的に測定した。測定は、トレミーの立て込み直前の零点を記録し、コンクリート打設開始時からトレミー引き上げの時点まで連続的に行った。また、圧力測定時には、時刻と安定液高さ、トレミー先端深さ、コンクリート釣合い高さ、クレーン吊り荷重、投入量を記録した。 $5\text{m}^3$ アジテータ車の1台毎の投入量を約 $70\sim 140\text{m}^3/\text{hr}$ の範囲で数段階に変化させた。トレミーを常にクレーンで吊り、同時に吊り荷重をペン型レコーダで自動記録した。 $5\text{m}^3$ アジテータ車1台の投入開始から投入終了までの時間をストップウォッチで測定し、平均投入量 $Q_0$  ( $\text{m}^3/\text{hr}$ ) を求めた。

##### 4.2 測定結果

クレーン吊り荷重および圧力計のペンレコーダ測定例を図-3に示す。

###### (1) コンクリートの釣合い高さ $\ell_0$

トレミー内のコンクリートの釣合い高さ $\ell_0$ は、コンクリート投入終了後にクレーン吊り荷重が安定した後に「さげふり」により測定した。この測定値と式(7)による算定値とは良い相関関係（相関係数1.00）にあることが明らかとなった。これは、安定液先端位置における安定液圧力とトレミー内のコンクリートの流体圧力が釣合う状態でコンクリートが静止することを示唆している。すなわち、今回のような高強度高流動コンクリートはトレミー内において単位体積重量が $2.40$  ( $\text{tf}/\text{m}^3$ ) の流体として作用するとして良い。

###### (2) コンクリート投入量と吐出量

図-3に示したように、クレーン吊り荷重は、投入開始時点までは一定値（以下、平時と称す）を示しており、投入開始と同時に急激に増加し、その後最大値を保持して定常な流動状態に達する。投入を終了すると吊り荷重は急激に減少する。「終了時から平時」にもどる間はトレミー内の増加高さ分のコンクリートが釣合い点まで下がる時間と考えられる。この吊り荷重の減少量は、コンクリートを投入開始直後にトレミー内に積み上がったコンクリートの吊り荷重増加量と同等と考えられる。したがって、吐出量 $Q$ は、投入終了直後から下がるコンクリート量をクレーン吊り荷重の減少量から換算して求めて、アジテータ車1台の投入量 $5\text{m}^3$ から差し引いて、投入時間で除して求めた。

###### (3) コンクリート投入量とトレミー内圧力損失

図-4は、投入量と最大圧力との関係を示したものである。コンクリートの流動時の最大圧力は、上部では約 $2\sim 5.4\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、下部では約 $10\sim 12\text{kgf}/\text{cm}^2$ であった。下部が大きな値となったのは、トレミー外の安定液高さによる安定液圧と釣合うためのコンクリート自重による圧力（ $50\text{m} \times 0.24 = 12\text{kgf}/\text{cm}^2$ ）が作用しているためである。図-5は投入量と流動による増加圧力との関係を示したものである。増加圧力は、最大圧力から平時圧力を減じて求めた。上部では、投入

量を $70\sim130\text{m}^3/\text{hr}$ の範囲で大きくすると、トレミー内コンクリート増加高さが増大する影響をうけて最大圧力は $1.5\sim3.5\text{kgf/cm}^2$ の範囲で増大する。しかし、コンクリート増加高さによる下部の流動による増加圧力は $0\sim0.5\text{kgf/cm}^2$ と小さな値であった。これは、安定液下端位置における増加圧力は零と見なしても良く、流動時のトレミー先端からコンクリートへの圧入抵抗がないことを示唆している。

図-6は、吐出量とトレミー単位長さ当たりの圧力損失との関係を示したものである。コンクリート吐出量を大きくすると、単位長さ当たりの圧力損失 $\Delta P/l$ は大きくなる。今回の測定結果では吐出量約 $50\sim110\text{m}^3/\text{hr}$ の範囲で $\Delta P/l$ は $0.02\sim0.08\text{kgf/cm}^2/\text{m}$ の範囲であった。一次回帰式を求める式(8)が得られる。

従来のコンクリートポンプ圧送では、単位長さ当たりの圧力損失は圧送量 $30\sim50\text{m}^3/\text{hr}$ で約 $0.1\sim0.2\text{kgf/cm}^2/\text{m}$ 程度である。今回の単位長さ当たりの圧力損失が小さいことは、一般のコンクリートポンプの配管径が $12.5\text{cm}$ 程度であるのに比べて、トレミーの直徑が $25\text{cm}$ と大きいことおよびコンクリートをスランプフローの大きい配合としたことが影響しているためである。

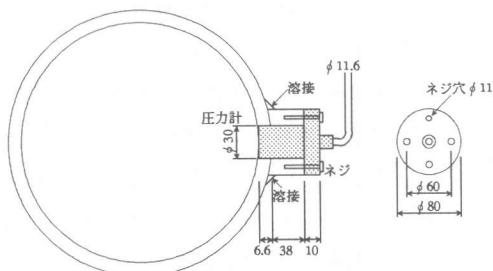
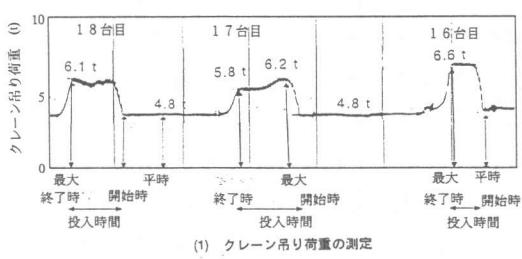
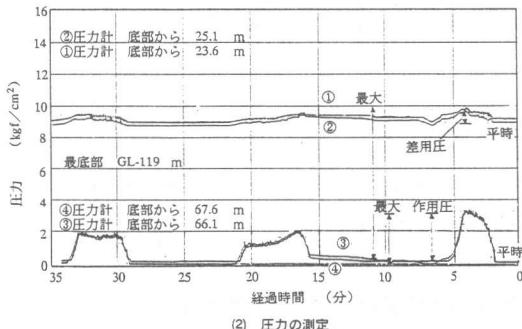


図-2 トレミーへの圧力計の取り付け



(1) クレーン吊り荷重の測定



(2) 圧力の測定

図-3 経過時間とクレーン吊り荷重および圧力の測定例

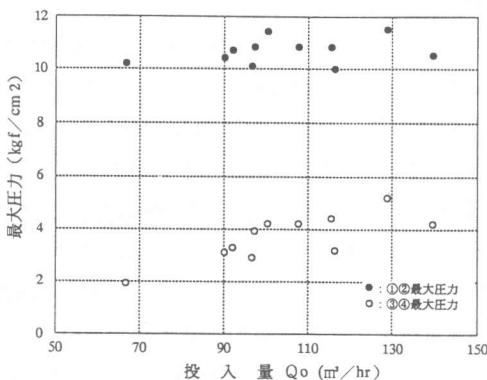


図-4 投入量と最大圧力との関係

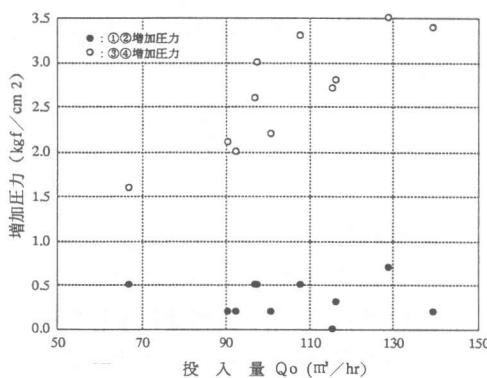


図-5 投入量と増加圧力との関係

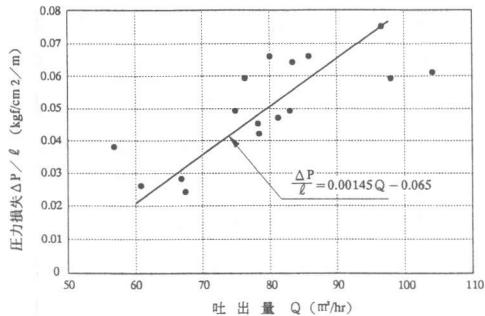


図-6 吐出量と圧力損失との関係

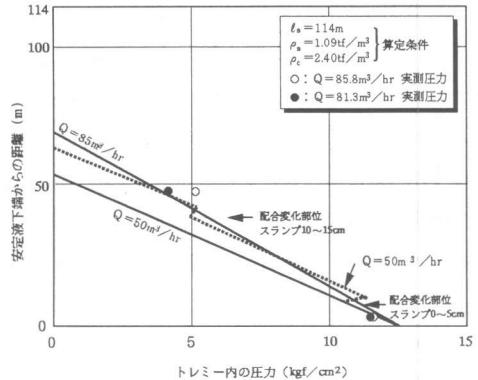


図-7 トレミー内の圧力分布

##### 5. 配合変化部位が偏在する場合の圧力分布の算定

トレミー内の圧力分布は、図-1の破線のように直線分布となる。これは、コンクリートによる圧力損失をトレミー全長にわたって一定と仮定しているからである。しかし、粗骨材体積濃度の大きい配合変化部位が何処かに1～3mにわたり偏在する場合には、その部位でのすべり抵抗の増加によって単位長さ当たりの圧力損失が増大する。圧力損失が自重による圧力増加よりも大きくなる場合には、配合変化部位でトレミー先端方向へ減圧となる場合が考えられる。図-7は、トレミー内落下高さが45～60m部分で配合変化部位が生じ、粗骨材体積濃度が示方配合の37Vol%から50Vol%へと増大した場合を想定してトレミー内の圧力分布を式(3)、式(6)、式(8)を用いて算定したものである。算定条件としては  $\ell_s = 114\text{ m}$ ,  $\rho_s = 1.09\text{ tf/m}^3$ ,  $\rho_c = 2.40\text{ tf/m}^3$ とした。高強度高流動コンクリートの既往のポンプ圧送実測値から外挿して推定すると単位長さ当たりの圧力損失は、 $\phi 25\text{ cm}$ 管、スランプ0～15cm、吐出量50m³/hrの場合で  $\Delta P / \ell = 0.3 \sim 0.5$  ( $\text{kgf/cm}^2/\text{m}$ ) 程度と大きな値となるものと予測される。図-1のP<sub>2</sub>点から10mおよび40mの位置にそれぞれスランプが0～5cmおよび10～15cmの配合変化部位が1～3mにわたり偏在する場合の圧力分布は点線のように算定できる。配合変化部位では0.2～0.8kgf/cm<sup>2</sup>の減圧が生ずる。この減圧により過脱水現象が引き起こされ、残りの約10～30mをそれぞれ6～18分間で下方へ移動する過程でさらに圧力差を増大しながら流動するものと考えられる。したがって、大深度地下連続壁においてトレミー内における閉塞を防止する方法は、トレミー内の圧力分布が部分的に減少することを極力少なくすることである。このためには、配合変化部位の発生を防止する目的でトレミー内のコンクリートの増加高さ  $\ell_c$  をある値以上となるようにコンクリートの吐出量Qを管理することが重要である。これら  $\ell_c$  およびQは本論文で示した式(6)、式(8)で算定出来る。

##### 6. おわりに

トレミー内の圧力分布について以下のことが明らかになった。

- 1) 本地下連続壁に用いた高強度流動化コンクリートのトレミー単位長さ当たりの圧力損失およびトレミー内の増加高さは、式(8)および式(6)で算定出来る。
- 2) 圧力  $p_1$  の位置より  $x\text{m}$  離れた位置の圧力  $p_2$  は、式(3)で算定出来る。

[謝辞] 現場計測の実施に当たり、終始暖かい御指導、御支援をいただいた知多エル・エヌ・ジー(株)の方々をはじめ清水・大林・鹿島・大成共同企業体のご協力を得ましたことを、ここに記して感謝の意を表します。