

論文 比較的流動性の高いコンクリートを用いた地中連続壁の側圧に及ぼす要因の影響

戸栗 智仁^{*1}・田中 博一^{*2}・木村 克彦^{*3}・根本 浩史^{*4}

要旨：流動性の高いコンクリートを地中連続壁に打込む際、発生する側圧について精度の高い予測手法が確立できれば、施工の省力化や設計の合理化に寄与できる。本研究では、高密度に配筋された地中連続壁の側圧に及ぼす配筋の影響について、室内試験、実施工時の測定結果及び既往の施工結果を比較・検討した。その結果、地中連続壁に配置されたせん断補強筋の影響が大きいことを明らかにした。また、有孔管を用いた側圧低減対策が、高い低減効果を有していることを明らかにした。

キーワード：地中連続壁、高密度配筋、コンクリート側圧

1. はじめに

仕切り板方式で施工される地中連続壁（以下、連壁と称す）の先行エレメントは、コンクリート打込み時に発生する側圧の面から、打込み速度を制限しながら施工しているのが現状である。特に流動性の高いコンクリートを使用する場合は、側圧が大きくなることも報告¹⁾されている。

近年の構造物の大型化や耐震性の面から、大深度かつ高密度配筋された連壁を構築する事例が増えている。しかし、流動性の高いコンクリートを用いる連壁の側圧を精度の良く予測することができないため、仕切り板を過大に設計する、若しくは安全側の打込み速度で施工しているのが現状である。その結果、コンクリートの打込みが長時間に及ぶことにもなり、連壁の精度の良い側圧予測方法が確立できれば、構造の合理化、施工時間の短縮などに貢献できる。

本研究では、高密度に配筋された連壁における実施工時の側圧を測定するとともに、室内での側圧測定（以下、室内試験）を合わせて行い、これらの結果から側圧に影響を及ぼす要因について検討した。さらに、コンクリート中に設置

した有孔管を用いた側圧低減対策を実施し、その効果についても考察を加えた。

2. 試験概要

2.1 構造概要

側圧測定した連壁の寸法は、深さ 58m、壁厚 1.5m、先行エレメントの幅 3.0mである。連壁の深さ 58mのうち、GL±0～-45mの範囲は、止水機能に加え山留め機能が要求されており、本検討ではこの部分を対象にする。

連壁のせん断補強筋は、GL±0～-6mの区間では D19@600（水平、鉛直方向）、GL-6～-13mの区間では D19@400（水平、鉛直方向）、GL-13～-45mの区間では D22@400（水平方向）@200（鉛直方向）が配置されている。

また、コンクリートの打込みは、直径 8 インチのトレミー管を用いた。さらに、コンクリートの打込み速度は、側圧の測定対象としたエレメントでは 7m/hr とした。

2.2 コンクリートの配合

連壁に用いたコンクリートの配合と使用材料を表 - 1 及び表 - 2 にそれぞれ示す。呼び強度

*1 清水建設(株)土木事業本部技術第一部（正会員）

*2 清水建設(株)技術研究所土木技術開発部 工修（正会員）

*3 清水建設(株)技術研究所テクノセンター 工博（正会員）

*4 清水建設(株)東北支店土木技術部 工修（正会員）

は 40N/mm^2 (設計材齢 28 日), 粗骨材の最大寸法は 20mm である。

2.3 試験及び測定項目とその方法

(1) フレッシュコンクリート試験

フレッシュコンクリートの試験項目は, スランプ及びスランプ経時変化, スランプフロー及びスランプフロー経時変化, 空気量, コンクリート温度である。

なお, スランプ及びスランプフローの経時変化試験は, 側圧測定時のアジテータ車から採取したコンクリートを用いた。

(2) 実構造物における側圧測定方法

実構造物(以下, 実機)における側圧は, 差動トランス式土圧計を水平方向と鉛直方向に取付け, 両方向のコンクリート圧を測定した。

実機における測定深度は, 図 - 1 のように, せん断補強筋間隔が異なる 2 箇所 (GL-13m 及び GL-25m) とした。

(3) 室内試験における側圧測定方法

室内試験での側圧測定は, 既往の研究²⁾において提案されている装置を用いた。本装置は, コンクリート槽(内径 38cm, 深さ 80cm), 載荷版, ロードセル, 荷重載荷装置, 測定装置からなるもので, 図 - 2 に概要を示した。

試験方法は, コンクリート槽の側圧測定用の土圧計設置位置(コンクリート槽の底面から 15cm)までコンクリートを投入, 土圧計の初期値(ゼロ点)調整, コンクリート槽の天端までコンクリートを投入(打込み高さ 62cm),

荷重載荷装置を用いて実施工に対応した上載荷重を繰り返し載荷した。

ここで上載荷重の載荷は, 実機で打ち込まれたコンクリートが安定液中にあることを考慮し

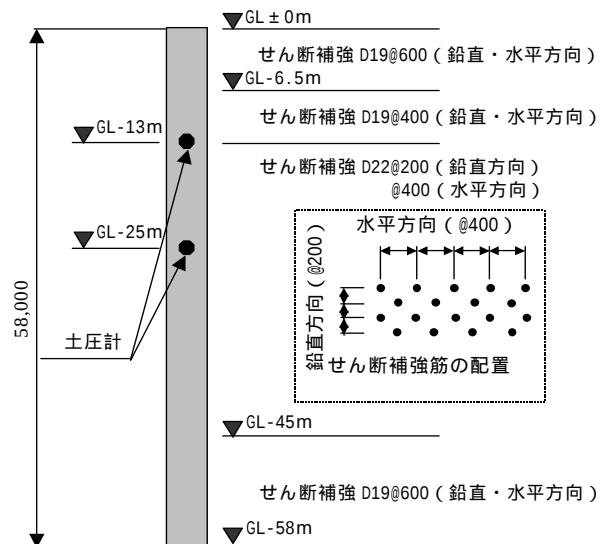


図 - 1 連壁構造及び側圧測定位置

表 - 1 使用材料

種 類	仕 様	備 考
セメント	高炉セメント B 種 密度 $3.04(\text{g/cm}^3)$	
細骨材	山砂 表乾密度 $2.60(\text{g/cm}^3)$	FM2.65
粗骨材	砕石 2005 表乾密度 $2.68(\text{g/cm}^3)$	実績率 59.5%
混和剤	高性能 A E 減水剤 (ポリカルボン酸系)	

て, コンクリート重量を安定液中の値に換算して取り扱った。また, 1 回あたりの載荷荷重は, 式(1)により $1.52(\text{kN})$ とした。

$$W = \gamma c' \times g \times \Delta h \times A \quad (1)$$

ここに,

W : 1 回あたりの載荷荷重 (kN)

$\gamma c'$: コンクリートの水中密度 ($= 1.25\text{g/cm}^3$)
($=$ コンクリートの気中密度 - 安定液密度)

g : 重力加速度 (9.8m/s^2)

Δh : 1 回あたりの打込み高さ ($= 1.10\text{m}$)

A : 装置の載荷面の面積 ($= 0.113\text{m}^2$)

表 - 2 コンクリートの示方配合

スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
23	40.5	4.5	51.5	175	433	848	834	5.200

2.4 側圧低減手段

側圧低減手段は、コンクリート中に有孔管を設置して、打込み後に発生するブリーディング水を積極的に排水する方法³⁾を適用した。有孔管には、その穴からコンクリートが流入しないように、透水マットを巻きつけたもの（写真 - 1）を用いた。

この方法は、軟弱の地盤改良工法として行われているパイブドレン工法やサンドドレン工法と原理的に同じものである。有孔管の仕様は表 - 3 のようになる。

2.5 データ整理の方法

側圧は土圧計により測定された測定値とした。

また、側圧測定位置での鉛直圧から求められる式（2）で与えられるものとした。

$$P_h = K_0 \times P_v \quad (2)$$

ここに、

K_0 ：側圧係数

P_h ：測定された側圧（kPa）

P_v ：側圧測定位置における鉛直圧（kPa）

P_t ：側圧測定位置における上載圧（kPa）

$$(\quad) = (\gamma c' \times g) \times H$$

H ：着目点より上方のコンクリート相当高さ（m）

$\gamma c'$ ：コンクリートの水中密度（g/cm³）

$$(\quad) = \text{コンクリートの気中密度} - \text{安定液密度}$$

g ：重力加速度（9.8m/s²）

3. 試験・測定結果および考察

3.1 試験及び測定結果

(1) フレッシュコンクリートの試験結果

スランプフローの経時変化を図 - 3 に示す。同図にはスランプの経時変化も併記した。なお、試料採取時刻を試験開始時刻とした。図中の数字は、それぞれ設置した土圧計の深度に対応す

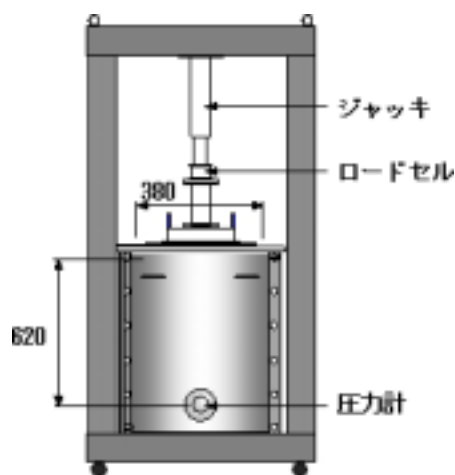


図 - 2 試験装置概要



写真 - 1 排水管設置状況（室内試験）

表 - 3 有孔管の仕様

区別	R (m)	排水管外径 D (m)	L (m/m ²)
室内試験	0.19	0.032	0.89
実機測定	0.28	0.060	0.77

R：有効排水距離

室内：測定装置のコンクリート層内径

実機： $r / \pi^{0.5}$ r ：排水管設置間隔

L：単位排水面積あたりの排水長さ(=D/R²)

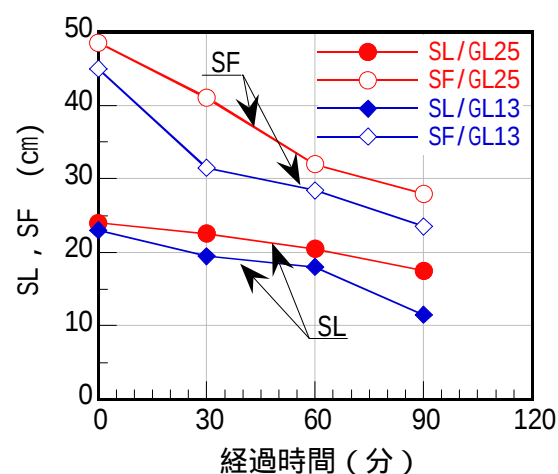


図 - 3 スランプ及びスランプフローの経時変化

るものである。時間の経過とともにスランプフローは低下しており、コンクリートの流動性が失われていることがわかる。なお、コンクリート温度は 27℃であった。

表 - 4 計測結果まとめ

側圧低減対策	計測位置 (鉄筋間隔)	区別	t_{max}	$P_{t,max}$	$P_{v,max}$	$P_{h,max}$
なし	GL-25.0 (水平@400,鉛直@200)	室内	130	205.6	121.5	80.9
		実機	59	85.8	40.5	38.3
	GL-13.0 (水平・鉛直@400)	室内	140	247.8	123.1	80.3
		実機	81	114.0	82.6	64.7
あり	GL-13.0 (水平・鉛直@400)	室内	57	111.2	-	40.8
		実機	81	114.0	30.4	53.0

t_{max} : 最大側圧を示した時間、 $P_{t,max}$: 最大側圧時の上載圧 (kPa)

$P_{v,max}$: 最大側圧時の鉛直圧 (kPa) $P_{h,max}$: 最大側圧 (kPa)

(2) 側圧・鉛直圧・上載圧の経時変化

側圧測定の結果を表 - 4 に示す。また、側圧、上載圧及び鉛直圧の経時変化の一例を図 - 4 及び図 - 5 に示す。

側圧低減対策を行わない場合、最大側圧及び最大側圧時の鉛直圧及び上載圧は、室内試験に比べ実機の方が小さくなっている。また、最大側圧を示した時間は短くなっている。このような結果は、既往の測定事例^{2),4)}と同様な傾向である。

(3) 側圧係数

側圧係数 K_0 について、式 (2) から誘導した式 (3) を用いて求めた。

$$K_0 = P_h / P_t \quad (3)$$

室内試験及び実機における測定結果から求めた側圧係数の経時変化を図 - 6 に示す。側圧係数は、いずれの測定結果とも同様に減少する傾向を示している。

スランプフローの経時変化が少ない配合を用いた既往の実績⁵⁾では、側圧係数が 1.0 で一定であったと報告されている。しかし、今回用いたコンクリートは、図 - 2 に示すようにスランプフローが経時変化し、流動性が経時的に低下するため、側圧係数も減少しているものと考えられる。

3.2 側圧に影響を及ぼすせん断補強筋の影響

側圧測定の結果、最大側圧は、室内に比べ実機の方が小さくなっていた。また、上載圧が時間経過とともに一次関数的に増加していたの

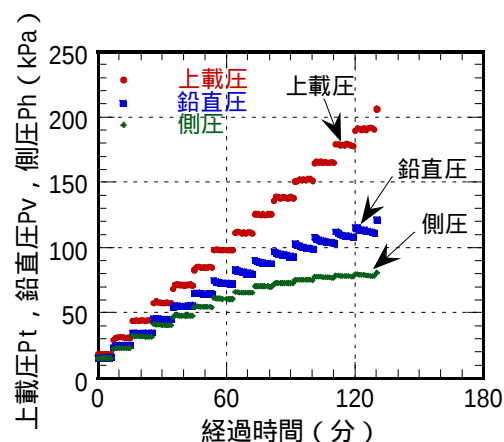


図 - 4 圧力の経時変化 (室内: GL-25m)

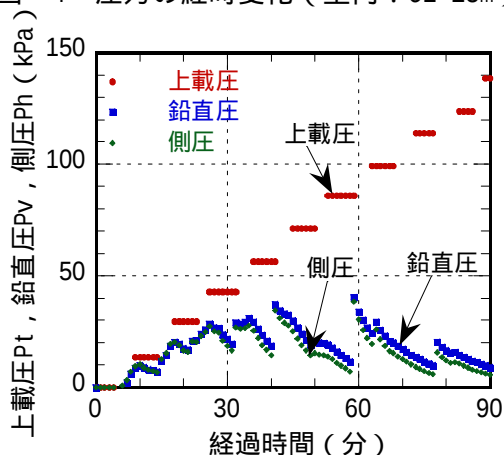


図 - 5 圧力の経時変化 (実機: GL-25m)

に対し、鉛直圧の増加率は時間の経過とともに減少する傾向を示した。この理由として、コンクリートの流動性低下などの性状変化に伴い、室内試験ではコンクリートとコンクリート槽の側枠の間に摩擦力 (以下、周辺摩擦力) が発生し、上載圧の一部が移行したと考えられる。また、実機では、地山との周辺摩擦力の発生や鉄

筋拘束の影響により，上載圧の一部が移行し鉛直圧の増加が小さくなったことが考えられる。以下にその影響を考察する。

(1) 摩擦力

室内試験における周辺摩擦力を式（４）により求め，その結果を図 - 7 に示す。既往の実績^{3), 4)}と同様に，時間の経過とともに増加する傾向を示していた。

$$P_f = (P_t - P_v) / (4h / D) \quad (4)$$

ここに，

P_f ：周辺摩擦力（kPa）

P_v ：鉛直応力（kPa）

P_t ：載荷による上載圧（kPa）

D ：装置の直径（= 38cm）

h ：装置へのコンクリート充てん高さ
（= 62cm）

一方，実機測定における周辺摩擦力は，実機の周辺摩擦力を式（５）で与えられる単位底面積あたりの平均摩擦力として求めることとする。求めた結果を図 - 8 に示す。

$$P_f' = \sum P_f / A = (P_t - P_v) \quad (5)$$

ここに，

A ：対象エレメントの底面積

実機における周辺摩擦力は，測定位置の打込み後，約 15～20 分経過した時点から増加が始まっている。また，トレミー管の先端が測定深度を超える前から周辺摩擦力の増加が始まっていた。同様な性状を有するコンクリートを用いた既往の実績³⁾では，周辺摩擦力の増加はトレミー管の先端が測定深度を超えた後から始まっており，異なる傾向を示している。この理由として，本構造物では，せん断補強筋が高密度に配置されているため，コンクリート打込み時の流動が抑止されるためであると考えられる。このことは，コンクリート打込み時に発生する動的圧が既往の施工⁵⁾では 20kPa 程度発生していたものに比べ，今回は 10kPa 程度と小さいことから推定できる。

(2) 側圧及び鉛直圧

計測位置 GL-13m と GL-25m は，同じ性能を

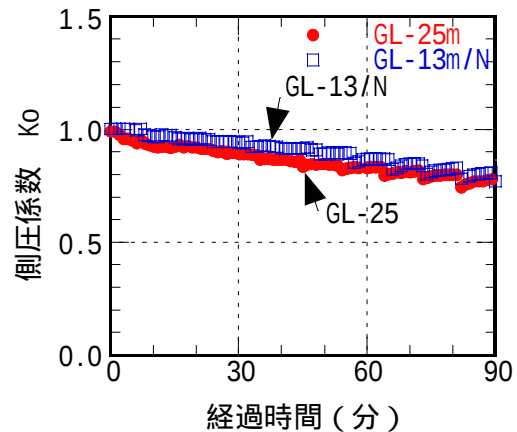


図 - 6 側圧係数経時変化（室内）

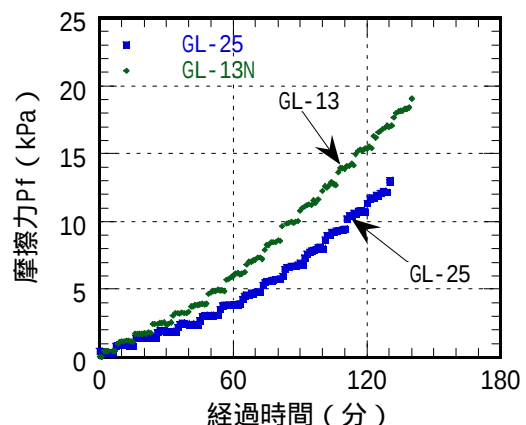


図 - 7 摩擦力の経時変化（室内）

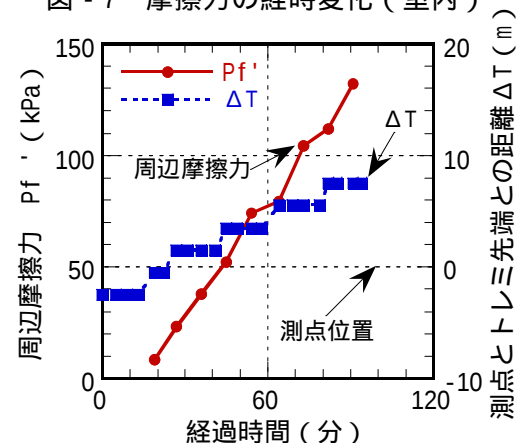


図 - 8 摩擦力の経時変化（実機：GL-25m）

有するコンクリートを用いて打込みを行っている。従って，室内試験における各測定位置の側圧や鉛直圧などの測定結果は一致している。

しかし，実機では，GL-25mの方が GL-13m に比べ最大側圧が約 60%（= 38.3/64.7）となり，約 40% 小さくなった。この理由として，せん断補強筋が GL-25m で @400（水平方向）@200（鉛直方向），GL-13m @400（水平・鉛直方向）と GL-25m の方が多く，これが影響してい

るものと考えられる。すなわち、せん断補強筋が非常に多い GL-25m付近では、コンクリートが自重圧密により脱水・沈下するとき、その変形の一部が鉄筋に拘束され、上載圧の一部を鉄筋が負担し、その結果、鉛直圧及び側圧が小さくなったと考えられる。

以上のように、側圧に影響を及ぼす要因として、地山との周辺摩擦力に加え、本研究の範囲からは、せん断補強筋量が多い場合、上載圧の鉄筋分担に伴い鉛直圧が減少し、これが側圧に対して大きな影響を及ぼす可能性が指摘される。

3.3 側圧低減対策の効果

有孔管を用いた側圧低減対策の効果について考察する。表 - 4 から最大側圧は、有孔管の有無により室内試験で約 50% ($= 40.8/80.3$)、実機で約 80% ($= 53.0/64.7$) となり側圧が減少している。さらに、単位排水面積あたりの有孔管長と側圧低減対策の有無による側圧比との関係でまとめたものを図 - 9 に示す。同図には、既往の施工において本方法を実施した場合の結果³⁾も併記した。

これらの関係から、有孔管の設置は側圧低減に効果があり、その関係は、軟弱地盤改良工として実績の多いサンドドレーン工法等における仕様（ドレーン設置間隔や径）とその効果（圧密度）との関係⁶⁾に類似していると考えられる。すなわち、コンクリート中に設置された有孔管からコンクリートのブリーディング水が排水され、それによりコンクリートの圧密が進み、その結果、側圧が減少しているものと推察される。なお、直径 60mm（外径）の有孔管を 50cm 程度の間隔（単位排水面積あたりの排水長さ $0.77\text{m}/\text{m}^2$ ）に配置すれば、側圧を約 20% 低減する効果を有することが分かる。

4. まとめ

連壁の側圧について室内および実機で測定し、これらの関係について検討した。その結果得られた主な知見を以下に列挙する。

1) 側圧及び鉛直圧は、せん断補強筋量の影響

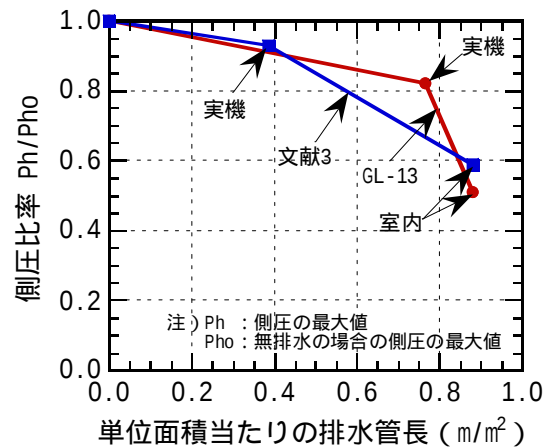


図 - 9 側圧低減効果

を大きく受けている

- 2) せん断補強筋が@400（水平・鉛直）に比較して、@400（水平）@200（鉛直）となれば、側圧は約 40% 小さくなる。
- 3) 有孔管を用いた側圧低減方法は、側圧低減に高い効果が認められ、有孔管の間隔が 50cm 程度で低減率が約 20% である。

参考文献

- 1) 戸栗智仁ほか：高強度地中連続壁コンクリートの側圧特性について，平成 5 年度土木学会中部支部研究発表会，pp.601-602，1993.1
- 2) 木村克彦ほか：高流動コンクリートを用いた地中連続壁の側圧に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，pp.1231-1236，2001
- 3) 緒方健太郎ほか：鋼製地中連続壁の有孔管による側圧低減効果，第 55 回土木学会年次学術講演会概要集 V -195，2000.9
- 4) 佐藤充史ほか：高密度配筋の地中連続壁における地山とコンクリートの摩擦力，第 56 回土木学会年次学術講演会概要集 V -516，2001.9
- 5) 古川治ほか：地中連続壁の側圧係数 K_0 に関する一考察，第 55 回土木学会年次学術講演会概要集 V -194，2000.9
- 6) 例えば，（社）日本道路協会：軟弱地盤対策工指針 pp.148，1988 年 7 月