

大深度・厚壁地中連続壁実験報告（その3） （地中連続壁掘削時の溝壁安定に関する実験的考察）

Field Test Report of Deep & Thick Diaphragm Wall(Part 3) (Consideration on Trench Stability for Diaphragm Wall Excavation)

細井 武*	原 伸和**
Takeshi Hosoi	Nobukazu Hara
玉越 正宏***	坂本 隆一郎***
Masahiro Tamakoshi	Ryuichiro Sakamoto

要 約

水平多軸型ドラムカッター式掘削機による地中連続壁掘削時に、周辺地盤に発生する過剰間隙水圧を計測した。計測の結果、ドラムカッターによる地盤の繰り返しせん断応力により過剰間隙水圧が発生し、その最大値は有効土被り圧の約10%となり、溝壁局部の安定に与える影響が大きいこと、発生する過剰間隙水圧は地盤を切削する時のドラムカッターの回転トルクに比例し、掘削中心から過剰間隙水圧発生位置までの距離の自乗に反比例することが判明した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 地中連続壁掘削時の溝壁安定問題
- § 3. 掘削実験
- § 4. 過剰間隙水圧発生メカニズム
- § 5. 溝壁局部崩壊例
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

地中連続壁の掘削時に溝壁全体の安定が確保されている場合であっても、溝壁が局部的に崩壊する事例が確認

されている。この溝壁の局部的な崩壊に関して、バケット式掘削機による掘削の場合は、周辺地盤に発生する過剰間隙水圧がその主原因であることを文献1),2),3)において述べている。

今回、大深度・厚壁地中連続壁実験工事（深度150m、壁厚2.1m）を水平多軸型カッタードラム式掘削機（（株）利根製EMX-240）を用いて実施した。本実験工事において、掘削時にバケット式掘削機の場合と同様な間隙水圧の変動が認められるかどうかを確認するため、掘削実験を行った。

本実験結果および地中連続壁基礎工事の施工時に実施した計測結果^{1),2)}に基づき、地中連続壁の掘削時に周辺地盤に発生する過剰間隙水圧の発生メカニズムについて考察する。

* 土木設計部長

** 東関東(支)外郭春日部(出)副所長

*** 土木設計部設計課

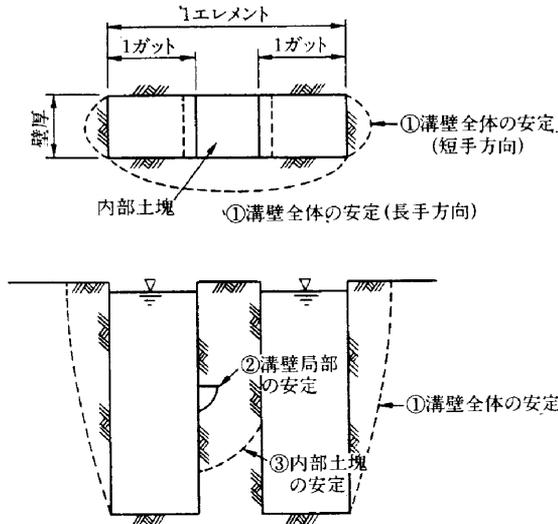


図-1 掘削時の安定問題

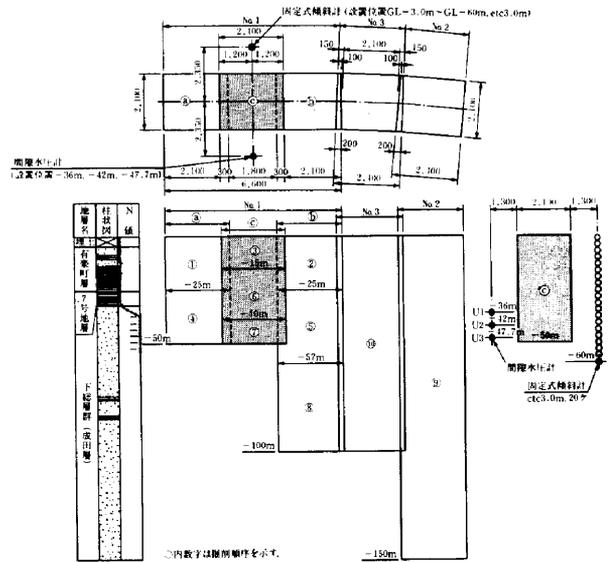


図-2 大深度・厚壁地中壁実験工事

§ 2. 地中連続壁掘削時の溝壁安定問題

地中連続壁を掘削する場合、溝壁の安定問題として次の3つを考慮する必要がある（図-1参照）。

- ①溝壁全体の安定
- ②溝壁局部の安定
- ③内部土塊の安定

溝壁全体の安定については既往の研究も多く、2次元解析に基づく研究と3次元解析に基づく研究に大別される。地中連続壁の掘削順序を考えると、2次元解析は実際の掘削状態を再現するものではなく、簡略的な解析として位置づけられる。3次元解析に基づく研究には、Schneebeli(1964), A.Piaskowski et al(1965),内田ら(1968,1969), 大塚ら(1971), 金谷ら(1984)等がある。現在我が国では、地中連続壁基礎協会において、内田ら、大塚ら、金谷らの方法が溝壁全体の安定計算法として採用されている⁴⁾。

溝壁局部の安定は、掘削中に周辺地盤に発生する間隙水圧や振動による局部的な崩壊、応力解放による粘土層の部分的な崩壊等が対象になる。すなわち、前述の溝壁全体の安定が確保されているにもかかわらず、溝壁の局部的な崩壊が発生する可能性があり、溝壁局部の崩壊が誘因となって全体崩壊にまで進行することも考えられる。したがって、溝壁の安定問題を論ずるにあたり、溝壁局部の安定は溝全体の安定と同様重要な問題であるが、現段階では理論的な究明がなされていないのが現状である。

内部土塊の安定とは、閉合型地中連続壁の内側に残置した島状の土塊あるいは、ラップ掘削時に残置する中間ガット部等の安定を意味する。地中連続壁の掘削が進行

表-1 各計器の仕様

計測機器名	製品番号	制作会社	容量	精度	寸法
差動トランス式 間隙水圧計	P-7	(株)自動制御 技術研究所	7kgf/cm ²	8gf/cm ²	50φ× 235mm
差動トランス式 固定型傾斜計	INA-150	〃	±2.5度	1/12000	50×50× 190mm

するに従って、内部土塊が周辺地盤から縁を切られ、次第に不安定な状態に推移していくため各掘削段階における内部土塊全体の安定を、別途検討する必要がある。しかしながら、内部土塊全体の安定についても解析法が確立されていないのが現状である。

本報では、溝壁局部の安定問題について焦点を絞り論じる。

§ 3. 掘削実験

3-1 実験概要

図-2に示す最大掘削深度150m、壁厚2.1mの大深度・厚壁地中連続壁実験工事において、No.1エレメントの◎ガット中央部の周辺地盤内に固定式傾斜計および間隙水圧計を設置し、掘削中の周辺地盤の挙動を計測した。設置した計測機器の仕様を表-1に示す。掘削は図-2に示すとおり、①→②→③→④→⑤→⑥→⑦の順で行った。掘削実験に使用した掘削機は水平多軸型ドラムカッター式掘削機（(株)利根製EMX-240）である（図-3参照）。

掘削実験を行った地点の地層は、図-2に示すように

上総層群を基盤として地表面から埋立層、沖積層の有楽町層・洪積層の7号地層および下総層群より成っている。埋立層（GL±0.0m～GL-3.0m）は人口的に埋立てられた砂層でN値は7程度である。GL-3m～GL-26mは一万年前に堆積したと伝わる有楽町層であり、上部はゆるい砂を、下部は軟弱な粘土を主体としている。GL-26m～GL-32mは7号地層と呼ばれる $q_u=20\sim30\text{tf/m}^2$ （ $196\sim294\text{kN/m}^2$ ）の粘土層である。つぎにGL-32m～GL-450mまでは下総層群（成田層群）と呼ばれる更新世の洪積層で、砂を主体としており、 $c'=5\text{tf/m}^2$ （ 49kN/m^2 ）、 $\phi'=35\sim40^\circ$ 程度の締まった砂層である。

間隙水圧計は図-2に示すように下総層群の砂層内のGL-36m、GL-42mおよびGL-47.7mの3点に設置した。

また固定式傾斜計はGL-3.0mから3mピッチでGL-60mまで20個を設置した。

計測データは図-4に示す計測システムにより記録した。No.1エレメントのAガット掘削時（図-2における④の掘削時）の間隙水圧の計測は5分毎のインターバル計測を行い、間隙水圧の変動状況を概略的に把握した。つぎにNo.1エレメントのBガットおよびCガット掘削（図-2における⑤、⑥、⑦の掘削時）の間隙水圧の計測は、2秒間隔の連続計測に切替え、間隙水圧の経時変化を詳細に記録した。

3-2 実験結果および考察

(1) 掘削深度と過剰間隙水圧

No.1エレメントAガット掘削時（図-2における掘削④、GL-25m～GL-50m）の過剰間隙水圧の計測（インターバル計測）結果を図-5に示す。またNo.1エレメントBガット掘削時（掘削⑤、GL-25m～GL-50m）およびCガット掘削時（掘削⑥、⑦、GL-25m～GL-50m）

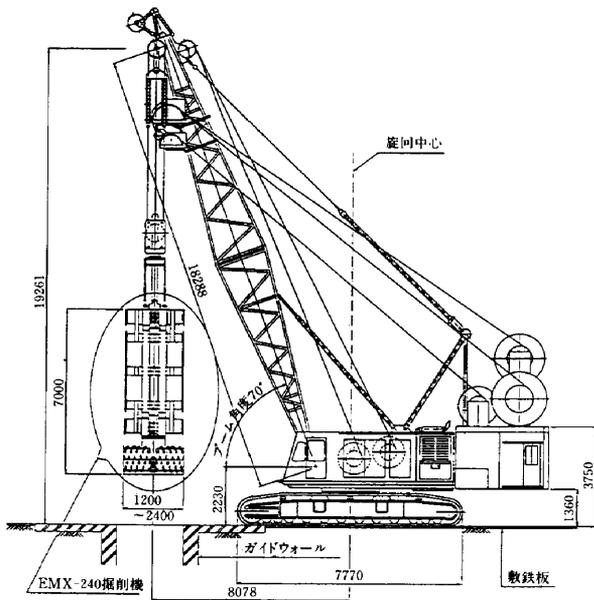


図-3 EMX-240 掘削機

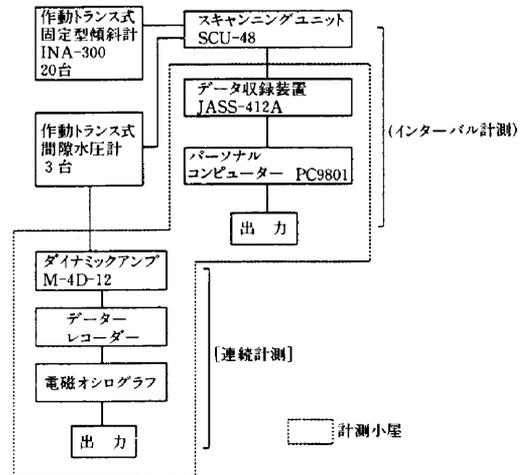


図-4 計測システム

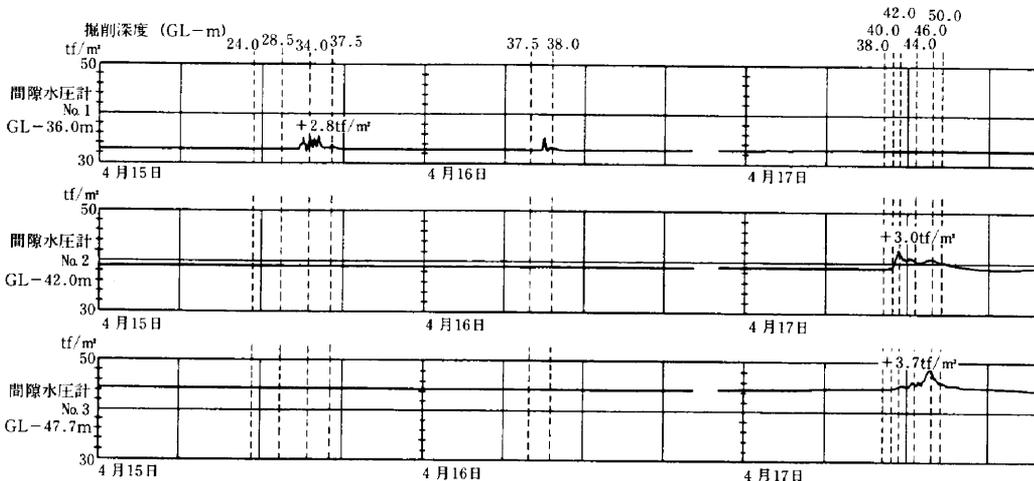


図-5 No.1エレメントaガットGL-25～-50m掘削時の過剰間隙水圧の計測結果（インターバル計測）

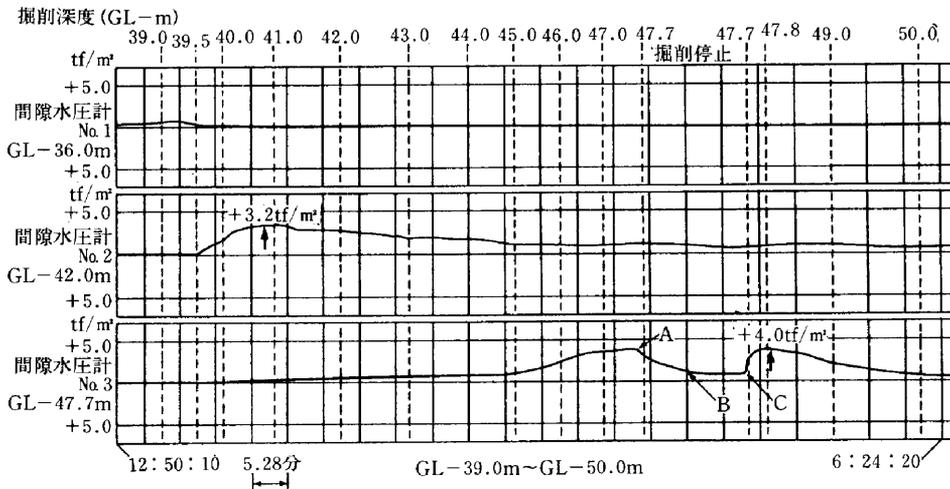


図-6 No.1エレメントbガット掘削時の過剰間隙水圧の計測結果（連続計測，確認試験1）

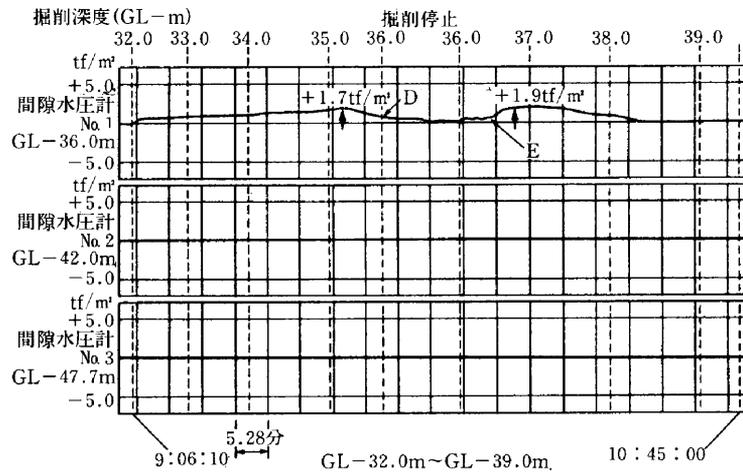


図-7 No.1エレメントcガット掘削時の過剰間隙水圧の計測結果（連続計測確認試験2）

の過剰間隙水圧の計測（連続計測）結果を図-6および図-7に示す。

図-5～図-7から掘削位置が間隙水圧計に近づくとしたがつて過剰間隙水圧が大きくなり、掘削位置が間隙水圧計に最も接近した地点あるいはその付近で最大の過剰間隙水圧が発生している。また、過剰間隙水圧の最大値は、その発生深度が大きくなるに従って大きくなっていることがわかる。

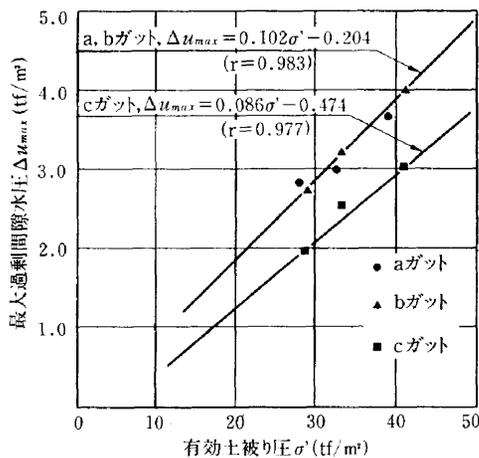
図-8は過剰間隙水圧の最大値 Δu_{max} が発生する深度における有効土被り圧 σ' と Δu_{max} の関係を整理したものである。同図から、 σ' と Δu_{max} は非常に良い相関関係を有していることがわかる（a） \textcircled{b} ガット掘削時、相関係数 $r=0.983$ 、 \textcircled{c} ガット掘削時、 $r=0.977$ ）。また掘削中心位置から間隙水圧計までの距離 L と過剰水圧 Δu の関係を図-9に示す。同図から Δu は $1/L^2$ と非常に良い相関関係があることを示している（ \textcircled{b} ガット掘削時の相関係数 $r=0.930$ 、 \textcircled{c} ガット掘削時 $r=0.894$ ）。

(2) 過剰間隙水圧の発生原因の確認試験

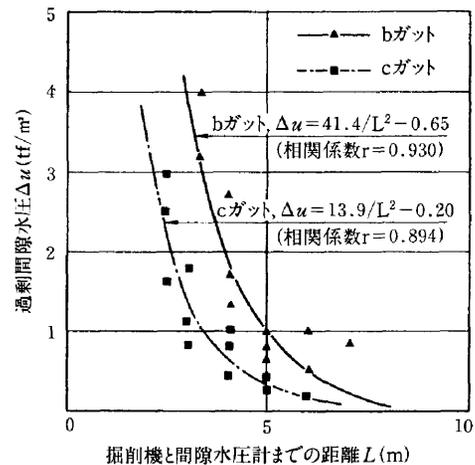
過剰間隙水圧の発生原因を確認するため、 \textcircled{b} 、 \textcircled{c} ガット掘削時に確認試験を行った。

①確認試験 1

\textcircled{b} ガット掘削時において、掘削深度がNo.3間隙水圧計の設置深度47.7mの時点で、一時カッタートルクの回転を止めて過剰間隙水圧の変化を確認した。図-6において、No.3間隙水圧計の読みが $+4.0\text{tf/m}^2$ (39.2kN/m^2) 付近まで上昇したA点でカッタードラムの回転を止めると、過剰間隙水圧は急激に減少し始めた。また、B点で掘削機を掘削位置から約50mほど吊り上げカッタードラムを安定液中で無負荷で回転させたが、間隙水圧の変動は確認されなかった。さらに、カッタードラムは回転せずに掘削機をもとの位置に着底させビット荷重を 20tf (196kN) まで増加させたが、過剰間隙水圧の変動は確認されなかった（通常の掘削時のビット荷重は $1\sim 2\text{tf}$ ($9.8\sim 19.6\text{kN}$) 程度である）。その後、C点でカッタードラムを回転させ掘削を再開したところ、間隙水圧が急激に上昇し始めた。



図一八 最大過剰間隙水圧 Δu_{max} とその発生深度における有効土被り圧 σ' との関係



図一九 掘削機と間隙水圧計までの距離と過剰間隙水圧の関係

①確認試験 2

◎ガット掘削時に掘削深度がNo.1間隙水圧計の設置深度36.0mの時点で、確認試験1と同様の試験を行った。
 ◎ガット掘削時は間隙水圧の変化量は少なかったが、図一七に示すD点で掘削を休止し掘削機を50cm程上方に吊り上げ、カッタードラムを安定液中で無負荷状態で左転させたが間隙水圧の変動は確認されなかった。E点で掘削を再開したところ間隙水圧の上昇が認められた。

以上の確認試験から次のことが判明した。

- ①過剰間隙水圧はカッタードラムによる掘削時に発生している。
- ②ビット荷重の増加による過剰間隙水圧の上昇は確認試験1では確認できなかった。

すなわち、過剰間隙水圧はカッタードラムによる地盤の掘削時に発生していることから、掘削時に地盤に生じる繰り返せん断応力の変化が間隙水圧上昇の主な原因と推察できる。掘削中のせん断応力の変化はカッタードラムのモーター負荷電圧に応答すると仮定すると、モーター特性曲線より、掘削時の回転トルクに換算できる。

(3) 回転トルク (T) と過剰間隙水圧 (Δu) の関係

発生する過剰間隙水圧 Δu は、図一八から有効土被り圧 σ' とは比例的な関係にあり、かつ回転トルク T は均一な砂地盤であれば、地盤のせん断強度と比例的な関係があるものと推定できる。すなわち、 $\Delta u \propto \sigma' \propto T$ なる関係があるとも考えられる。また、図一十は $T/L^2 \sim \Delta u$ の関係をプロットしたものであるが、図一十から Δu は $1/L^2$ に比例的な関係があることがわかる。以上の考察より、 Δu が $1/L^2$ と直線的な関係があるものと推定し、実験結果を整理した。

全データを直線回帰すると次式のとおりとなる。

$$\Delta u = 5.4 (T/L^2) + 1.2, \text{ 試料数 } n = 433,$$

$$\text{相関係数 } r = 0.2 \quad \dots \quad (1)$$

ここに

Δu : 過剰間隙水圧 (tf/m²)

T : 掘削機の回転トルク (tf・m), 1ドラム当りの回転トルク T₁ × ドラム数4個

L : 過剰間隙水圧の発生位置を掘削機中心までの距離 (m)

図一十を見るとバラツキは大きいですが、全体的には右上がりの傾向が見られ、 Δu は T/L^2 と関係があることを示唆する。

§ 4. 過剰間隙水圧発生メカニズム

4-1 過剰間隙水圧の発生状況のまとめ

水平多軸型カッタードラム式掘削機による掘削実験および油圧パケット式掘削機による掘削時の計測^{2), 3)}を通して得られた過剰間隙水圧の発生状況を表一2に示す。これらの地中連続壁の掘削時発生する過剰間隙水圧について次のことが判明した。

- ①カッタードラム式（ビット回転式）掘削機による掘削（ビット回転式掘削と称する）の場合は、主としてカッタードラムによる地盤の切削により過剰間隙水圧が発生した。
- ②ビット回転式掘削の場合、過剰間隙水圧の大きさは掘削深度とともに大きくなっている。
- ③ビット回転式掘削の場合、過剰間隙水圧の大きさは掘削時の回転トルクに比例し、かつ掘削地点から過剰間隙水圧の発生地点までの距離の自乗に反比例する傾向がある。
- ④パケット式掘削機による掘削（パケット式掘削と称する）の場合、パケットの落下およびパケットによるチ

表-2 掘削時に発生した過剰間隙水圧

計測名(場所)	掘削方法	計測地盤	計測深度	有効土被り圧 σ'	最大過剰間隙水圧 Δu_{max}	$\frac{\Delta u_{max}}{\sigma'_{max}}$	間隙水圧の発生原因
大深度厚壁地中連続壁実験工事	水平多軸型カッター ドラム方式	砂質土	GL-36.0m ~ GL-47.7m	28~41tf/m ²	4.0tf/m ²	0.10	ドラムカッターによる掘削
大阪湾岸線魚崎浜	油圧バケット方式	砂質土	GL-36.0m	12tf/m ²	1.0tf/m ²	0.08	バケットの落下 バケットによる チョッピング
大阪神崎川社宅	油圧バケット方式	砂質土	GL-29.0m ~ GL-38.0m	25~32tf/m ²	3.0tf/m ²	0.09	バケットの落下 バケットによる チョッピング

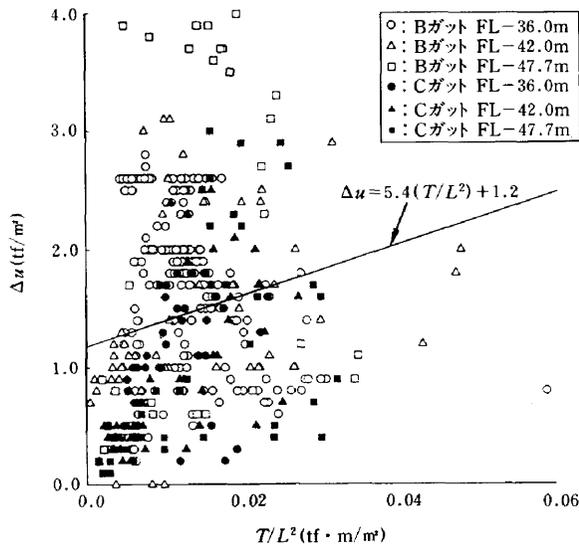


図-10 $\Delta u \sim T/L^2$ 関係 (全データ)

ョッピング（地盤にくい込んだバケットを小刻みに開閉を繰り返し、バケット内に掘削土砂を取り込む動作）により間隙水圧は上昇している。

⑤バケット掘削の場合、周辺地盤に発生する加速度と過剰間隙水圧は良い相関関係にある。

⑥砂質土においては、ビット回転式掘削およびバケット式掘削共に通常の掘削状態では有効土被り圧の10%程度の過剰間隙水圧が発生する傾向がある。

4-2 過剰間隙水圧発生メカニズム

地中連続壁の掘削中に過剰間隙水圧が発生する直接の原因は次の2点と考えられる。

- ①垂直応力すなわち平均垂直応力の変化 $\Delta \sigma_v$
- ②せん断応力の変化 $\Delta \tau$

ビット回転式掘削時とバケット式掘削時では、過剰間隙水圧の発生メカニズムが異なる。過剰間隙水圧の発生プロセスを図示したものが図-11である。

ビット回転式掘削の場合は、ビット回転（カッタードラムの回転による地盤の切削）→せん断応力の変化（繰り返しせん断応力の発生）→間隙水圧の変化が、過剰間隙

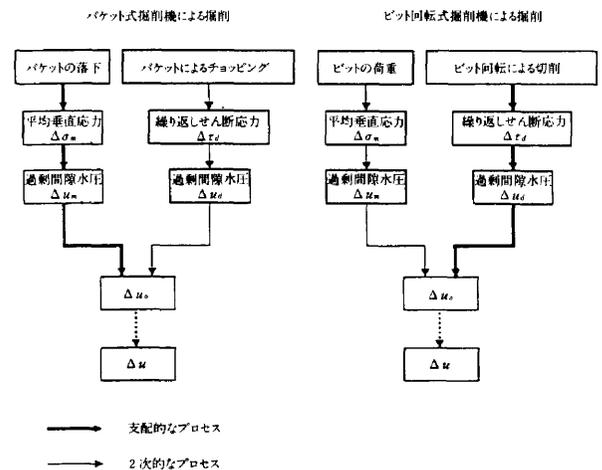


図-11 過剰間隙水圧の発生メカニズム

水圧の発生の支配的なプロセスであり、ビット荷重増加→垂直応力の変化→間隙水圧の変化というプロセスは、ビット荷重が小さく発生する過剰間隙水圧は微小であるとする。

一方、バケット式掘削の場合は、バケット落下→垂直応力の変化→間隙水圧の変化が過剰間隙水圧が発生する支配的なプロセスであり、バケットによるチョッピング→せん断応力の変化（繰り返しせん断応力の発生）→間隙水圧の変化というプロセスは2次的なものになっている。

4-3 有効応力と過剰間隙水圧の関係

図-13は本掘削実験および大阪湾岸線魚崎浜工区、大阪神崎川社宅連壁工事^{1), 3)} における現地砂質土採取し、振動三軸試験を行った結果である。試験結果から次の関係が得られた。

$$\frac{\Delta u}{\sigma'} = 5.16 \frac{\tau_d}{\sigma'} - 0.368 \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、

- Δu : 発生する最大間隙水圧
- σ' : 拘束圧 (土被り圧)
- τ_d : 繰り返しせん断応力

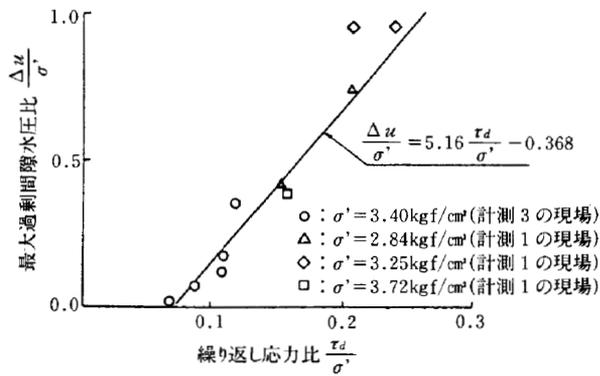


図-12 $\frac{\tau_d}{\sigma'}$ - $\frac{\Delta u}{\sigma'}$ の関係

回転するドラムカッターによる地盤の切削が、振動三軸試験の繰り返しせん断応力 τ_d といかなる関係があるかは現段階では把握できないが、掘削中に地盤内に繰り返しせん断応力が発生しているものと推測される。

いま、深さにかかわらず掘削によって地盤に同じ変形量を与えるとすれば、 τ_d は σ' にほぼ比例するものと考えられる。ここで有効応力が σ_a' および σ_b' の場合、掘削時の繰り返しせん断応力をそれぞれ τ_{da} 、 τ_{db} とすると、 τ_d は σ' に比例するという条件から次式が成立する。

$$\frac{\tau_{da}}{\sigma_a'} = \frac{\tau_{db}}{\sigma_b'} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式 (2) から次式が得られる

$$\frac{\Delta u_a}{\sigma_a'} = \frac{\Delta u_b}{\sigma_b'} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 Δu_a および Δu_b は σ_a' および σ_b' に対応する過剰間隙水圧である。

したがって、有効応力が大きい場合、発生する過剰間隙水圧も大きくなる事が導かれる。

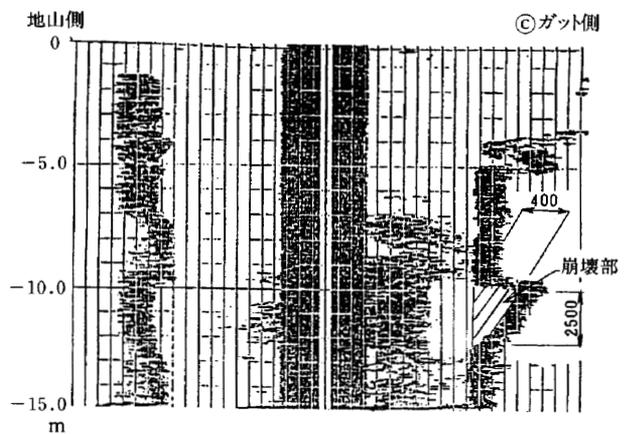
§ 5. 溝壁の局部崩壊例

5-1 溝壁の局部崩壊状況

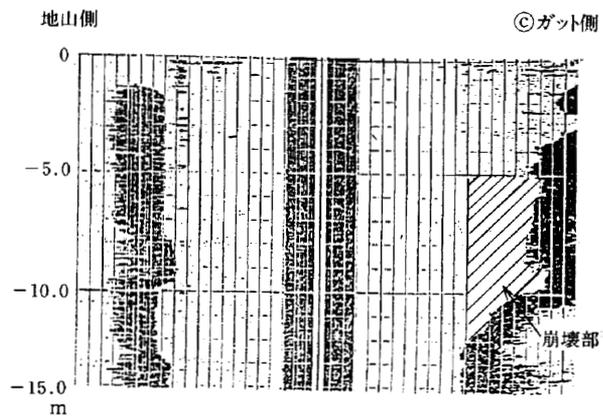
本掘削実験において、No.1エレメントの②ガット①スラップ掘削時に、まず③ガット（中間ガット）部に図-13(a)に示すように溝壁の局部崩壊（40cm×250mの三角形部の崩壊）が生じ、次第にそれが進行し、図-13(b)に示す崩壊まで至った。なお、周辺地山についてはGL-20mまで地盤改良をしていたため、溝壁崩壊はなかった。

5-2 溝壁の局部崩壊の原因

中間ガット（③ガット）部は、掘削に先だち行った安定解析結果から、十分安定するという結論が得られてい



(a) 掘削深度 15m(H.5.4.9)



(b) 掘削深度 18m(H.5.4.12)

図-13 aガット掘削時の中間ガット(Cガット)崩壊状況

た。しかしながら、実掘削時に図-13に示すような溝壁局部の崩壊が生じた原因として、中間ガット部の過剰間隙水圧の上昇が考えられる。

いま、局部崩壊の形状に基づき、図-14に示す解析モデルを設定し局部崩壊に対する安定率を試算した。

局部崩壊に対する安定率は次式で表示することができる。

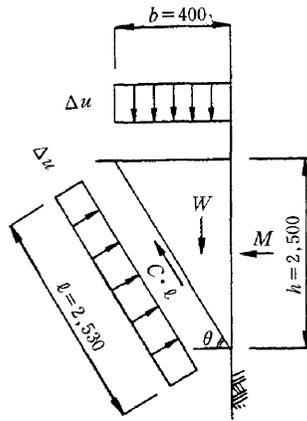
$$F_s = \frac{|(W + \Delta u \cdot b) \cos \theta + M \cdot \sin \theta - \Delta u \cdot l| \tan \phi + c \cdot l}{(W + \Delta u \cdot b) \sin \theta + M \cos \theta} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに

- W : 崩壊土塊重量, Δu : 過剰間隙水圧の上昇量
- ϕ : 地盤の内部摩擦角, c : 地盤の粘着力
- γ : 土の単位体積重量, b, h : 崩壊土塊の幅, 厚み
- l, θ : 滑り面表面の長さ, 滑り角度
- M : 泥水圧と地下水圧との差,

式 (5) に次の値を代入し、図-15に示す安全率を得る。

$$W : 2.5 \times 0.4 \times 1.0 = 1.0 \text{tf/m}^2 \text{ (9.8kN/m}^2\text{)}$$



図一14 局部安定に関する解析モデル

$$M : (1.06 \times 10 - 1.0 \times 8.5) \times 2.5 = 5.25 \text{tf/m}^2 \quad (51.45 \text{kN/m}^2)$$

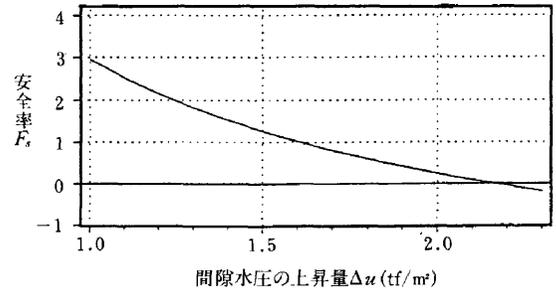
$$\phi = 30^\circ, \quad c = 0, \quad \theta = 81^\circ, \quad b = 0.4 \text{m}, \quad h = 2.53 \text{m}$$

図一15から、間隙水圧の上昇量が約1.5tf/m² (14.7kN/m²)より大きくなると安全率が1より小さくなり、溝壁崩壊を生ずる可能性があることを示している。局部崩壊が発生した深度は12m～13mであり、1.5tf/m² (14.7kN/m²)の間隙水圧の上昇量は計測結果から推定して十分可能のある値であることがわかる。

§ 6. まとめ

本文により得られた知見は次のとおりである。

- ①地中連続壁の溝壁安定問題には、溝壁全体の安定、溝壁局部の安定、および内部土塊の安定が存在する。
- ②掘削時に周辺地盤に発生する過剰間隙水圧 Δu は、有効土被り圧 σ' と非常に良い相関関係があり、 Δu の最大値 Δu_{max} は σ' の約10%程度である。
- ③水平多軸型カッタードラム式掘削の場合、過剰間隙水圧の発生原因として、地盤切削時の地盤の繰り返しせん断応力が支配的な原因と考えられる。過剰間隙水圧 Δu (tf/m²)、掘削時の回転トルク T (tf・m) および掘削中心から過剰間隙水圧発生位置までの距離 L (m) の



図一15 過剰間隙水圧と局部崩壊に対する安全率の関係

間には多少のバラツキはあるが、次式に関係があることがわかった。

$$\Delta u = 5.4 (T/L^2) + 1.2 \quad (\text{tf/m}^2)$$

- ④油圧バケット式掘削の場合、過剰間隙水圧の発生原因として、バケットの落下による平均垂直応力の増加が支配的な原因と考えられる。

本文の終わりにあたり、中央復建コンサルタントの福田氏、八谷両氏に対し、計測、計測データ整理・解析に全面的な協力を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 細井武, 長野敏郎, 福田勇治; 地中連続壁基盤の掘削時の安定に関する考察, 土木学会論文集, No.462, VI-18, pp.151～160, 1993.
- 2) 長野敏郎, 西田隆治, 鈴木陸, 細井武, 岩永克也, 平野孝行; 小断面連壁基礎の安定解析と施工 (阪神高速湾岸線魚崎浜高架橋基礎の施工), 西松建設技報, Vol.12, pp.72～90, 1989.
- 3) 細井武, 小堀田勉, 土井幸夫, 長野敏郎, 笠松照親, 石田忠; DIA-WIN工法による地下連続壁施工時の計測と解析, 西松建設技報, Vol.15, pp.48～54, 1992.
- 4) 地下連続壁基礎協会; 地中連続壁基礎工法, 技術資料集, pp.3-4～3-11, 1987.