

円形土留めにおける偏圧の影響解析

飯谷 隆 伊藤 政人
崎本 純治 平間 邦興

概要

円形土留めは非軸対称荷重(偏圧)に対して円周方向の曲げモーメントが発生するため、過大な応力が発生することがある。そのうえ、土留め壁は、径の大型化・壁厚の薄型化の傾向にあり、建設地の地盤性状も悪くなっている。したがって、円形土留め壁の設計にはより合理的な設計手法が求められており、そのためには偏圧の評価が重要となる。本報告では、3次元FEM解析を行い、地盤条件や施工時の不確定要素等による偏圧が壁体の変形や断面力に与える影響について評価し、円形土留めの構造的安定性を明らかにした。さらに、円形土留め壁の設計に従来から用いられている手法である土留め壁をシェルに地盤を弾塑性ばねにモデル化する地盤ばねによる解析を行った。これらの解析結果に基づいて、設計で考慮すべき偏圧を静止土圧から定量的に推定する手法を提案し、より合理的な設計を可能とした。

1. はじめに

立坑やLNG地下タンク等の大深度掘削工事においては、土水圧に対して構造的に有利な円形土留め壁が数多く採用されている。この円形土留め壁は、軸対称荷重(均等圧)に対してはリングコンプレッションが有効に働くため構造的に強いが、非軸対称荷重(偏圧)に対しては円周方向の曲げモーメントが発生するため、過大な応力が発生することがある。したがって、円形土留め壁の設計には偏圧の評価が重要となる。

偏圧の発生する要因として、地盤条件(不陸、傾斜、物性の差異)や施工条件(施工精度、掘削手順、揚水)や地震力等が挙げられる。そこで、本報告では、偏圧が発生する要因として、A) 地盤の変形係数のばらつき、B) 掘削深度差、C) 揚水に着目し、3次元地盤/地下水連成FEM解析を行い、壁体の変形や断面力について検討した。ただし、地表面地盤の傾斜、土留め背面側の盛土・掘削等は、設計において別途評価・検討する要因であるため、今回の検討項目から除くものとした。さらに、土留め壁をシェルに、地盤をばねにモデル化する地盤ばねによる解析を行い、設計上考慮すべき偏圧を定量的に評価することにより、より合理的な設計が可能となることが明らかになったのでここに報告する。

2. 解析概要

2.1 解析ツール

解析には、3次元地盤/地下水連成FEM解析プログラム

「GRASP-3D」^{1), 2)}を用いた。このプログラムは地盤の応力・変形特性と地下水挙動を精度よく解析できる最先端の数値解析技術である。計算精度・計算効率についても実証済みであり、多数の実工事での適用を経て実用化されている。この「GRASP-3D」の特徴として、

- 1) 地盤の応力・変形計算と地下水の浸透流計算を同時に解析
- 2) 地盤の構成モデルには関口・太田モデル、Drucker-Prager、線形弾性モデルを選択可能
- 3) 連立方程式の解法にブロック・スカイライン法を用いることにより大規模・高速計算可能
- 4) 土要素の変位・水頭ともに1次の内挿関数を採用し離散化等が挙げられる。

2.2 解析モデル

土留め壁には地中連続壁(壁厚0.8m、長さ70m)を想定し、掘削規模は直径60m・深さ49mと仮定した。解析メッシュは解析対象の1/2とし、幅400m・奥行き200m・深度300mとした。Fig.1に解析メッシュ、地盤の透水係数等を示す。地中連続壁にはシェル要素を用い、地盤の構成モデルには線形弾性モデルを用いた。水理境界条件は、土留め壁背面側の地下水位をGL-7mに設定し、解析メッシュの右面、左面、背面を流入境界として全水頭を0mに固定し、掘削底面を流出境界として圧力水頭を0mに設定した。また、解析メッシュの前面、上面、底面を不透水境界とし、土留め壁内側にコンクリートの透水性と同程度の薄い難透水層を設けた。

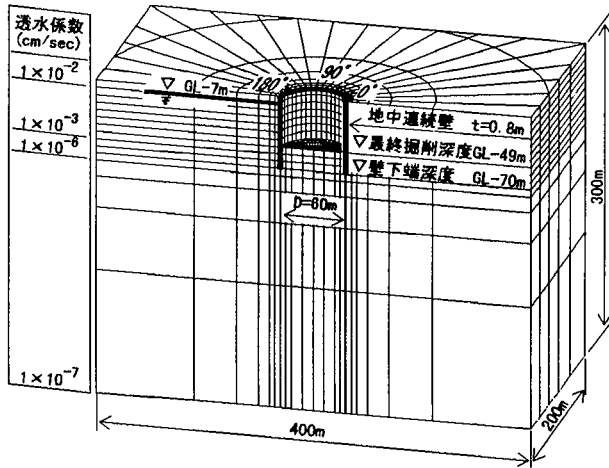


Fig. 1 解析メッシュ
Finite Element Mesh for Analysis

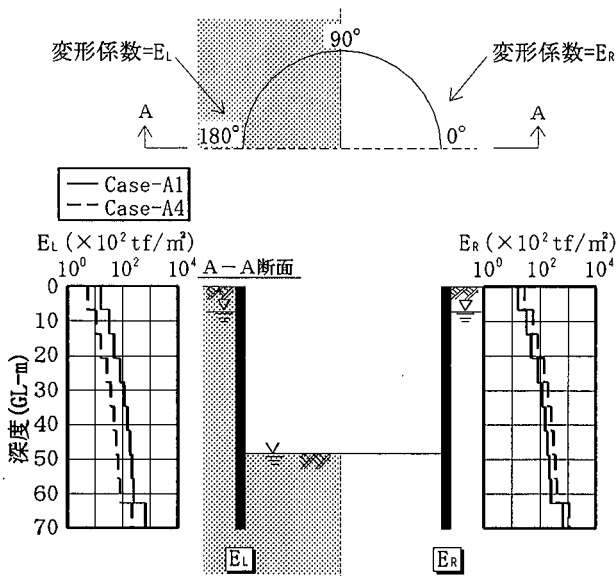


Fig. 2 解析モデル
Analysis Model and Modulus of Elasticity

Table 1 解析ケース
Details of Analysis

Case	E_L	E_R	平均値	$E_L : E_R$	変動係数
A1	E_{01}	E_{01}	E_{01}	1 : 1	0.00
A2	$(4/5)E_{01}$	$(6/5)E_{01}$	E_{01}	1 : 1.5	0.20
A3	$(2/3)E_{01}$	$(4/3)E_{01}$	E_{01}	1 : 2	0.33
A4	$(1/3)E_{01}$	$(5/3)E_{01}$	E_{01}	1 : 5	0.67

ただし、 E_{01} は Case-A1 の変形係数
変動係数 = 標準偏差 / 平均値

3. 地盤の変形係数のばらつきによる影響³⁾

3.1 解析条件

偏圧の発生する要因として地盤の変形係数のばらつきに着目し、その極端な例として、解析メッシュの左半分(90~180°)の変形係数(以下、 E_L)と右半分(0~90°)の変形係数(以下、 E_R)が異なる地盤を想定した。解析は、地盤の変形係数が左右で等しいケース(Case-A1)と、 $E_L : E_R$ を1:1.5(Case-A2)、1:2(Case-A3)、1:5(Case-A4)と地盤の左半分と右半分で変形係数のばらつきが大きくな

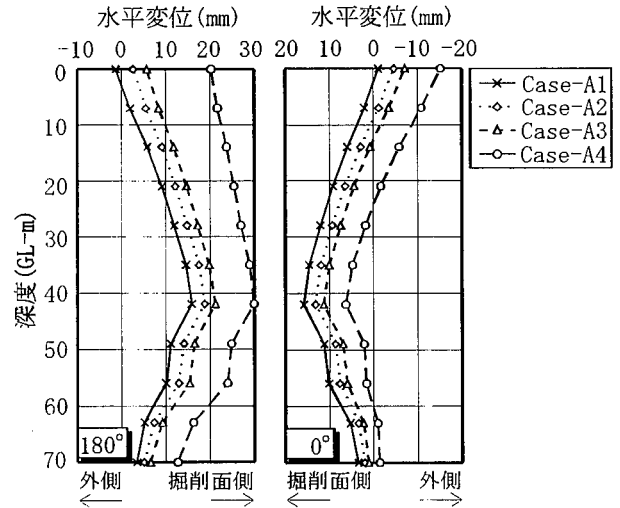


Fig. 3 水平変位
Displacement Distribution in a Vertical Direction

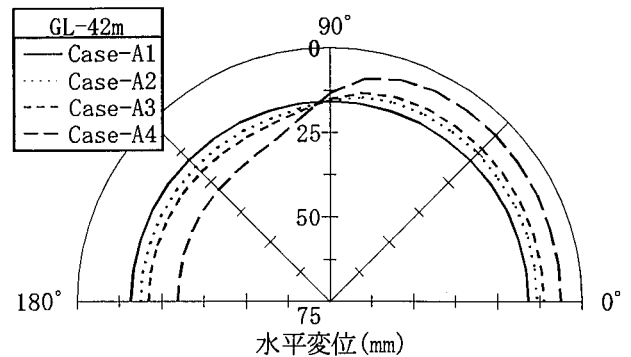


Fig. 4 水平変位 (GL-42m)
Displacement Distribution in a Circumferential Direction (GL-42m)

る計4ケースを行った。ただし、 E_L と E_R の平均値はCase-A1の変形係数である E_{01} とした。Fig. 2に解析モデルを、Table 1に解析ケースをそれぞれ示す。

3.2 解析結果

3.2.1 水平変位の深度方向分布 Fig. 3に180°方向および0°方向における水平変位の深度方向分布を示す。Case-A2~A4では180°方向において掘削面側へのはらみ出しがCase-A1より大きく、逆に0°方向では小さくなっており、 E_L と E_R のばらつきが大きくなるほどその量は多くなっている。これは、Case-A2~A4では90~180°で E_L が E_{01} より小さいため掘削面側の地盤抵抗がCase-A1より小さくなり、逆に0~90°で E_R が E_{01} より大きいため地盤抵抗が大きくなるためである。

3.2.2 水平変位、円周方向曲げモーメントの円周方向分布 (GL-42m地点) Fig. 4にGL-42mにおける水平変位の円周方向分布を示す。Case-A1では円周方向に一樣な変形となっているが、Case-A2~A4では変形係数の境界である90°付近を境に、0~90°で変形がCase-A1より小さく、90~180°で変形が大きくなっている。

Fig. 5にGL-42mにおける円周方向曲げモーメントを示す。Case-A2~A4では90°方向前後で大きく発生しており、90~135°方向では土留め壁の内側で引張、45~90°方向で

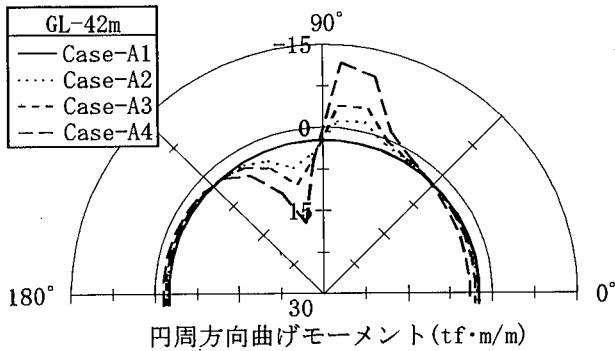


Fig. 5 円周方向曲げモーメント (GL-42m)
Circumferential Bending Moment (GL-42m)

Table 2 円周方向応力度
Maximum Circumferential Stress

Case	$E_L : E_R$	曲げ応力度 (kgf/cm ²)	軸応力度 (kgf/cm ²)	円周方向応力度 (kgf/cm ²)
A1	1 : 1	2	154	156
A4	1 : 5	16	178	194

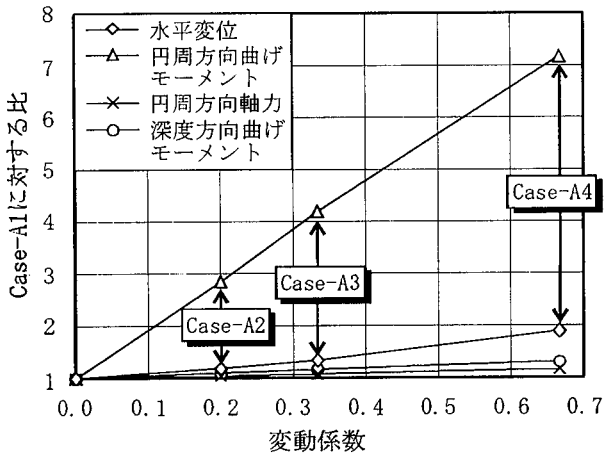


Fig. 6 水平変位, 断面力の Case-A1 に対する比
Ratio of Maximum Displacement, Sectional Force
against Case-A1

は外側で引張の曲げモーメントが発生している。また、 E_L と E_R のばらつきが大きいほど円周方向曲げモーメントは大きくなっている。

3.2.3 水平変位, 断面力の最大値 Table 2 に Case-A1, A4 の円周方向応力度の最大値を示す。Fig. 6 に水平変位, 円周方向曲げモーメント, 円周方向軸力, 深度方向曲げモーメントが最大値を示す深度 GL-42m における, Case-A1 と各ケースの最大値の比を示す。Case-A1 に対する Case-A2~A4 の比は, 変動係数が大きいほど, つまり E_L と E_R のばらつきが大きいほど大きくなっている。水平変位の Case-A1 に対する Case-A2~A4 の比は 1.2~1.9 倍であり, 円周方向軸力も深度方向曲げモーメントも 1~2 割増加する。また, 円周方向曲げモーメントの Case-A1 に対する Case-A2~A4 の比は約 3~7 倍となっている。しかし, Case-A2~A4 では, 円周方向の曲げによって発生する応力度 (以下, 曲げ応力度) の円周方向応力度全体に占める割合は, 最大 1 割に留まっている。また, 変動係数のばらつきによる円周方向応力度増分は, 軸圧縮によって発生する応

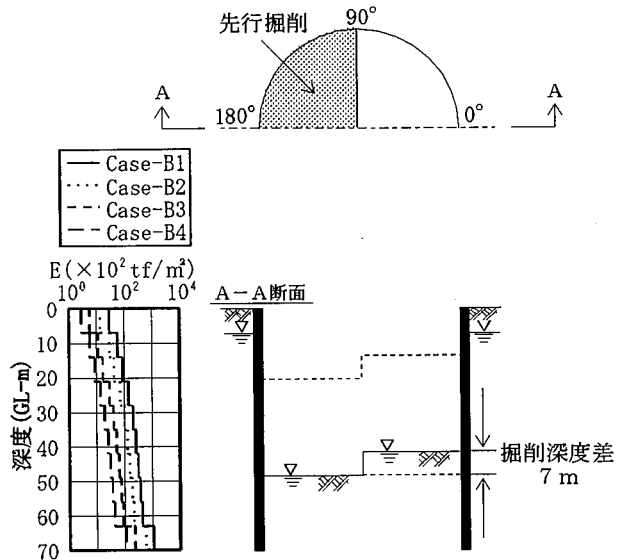


Fig. 7 解析モデル
Analysis Model and Modulus of Elasticity

Table 3 解析ケース
Details of Analysis

Case	E	変形係数低減比
B1	E_{02}	1 / 1
B2	$(1/2)E_{02}$	1 / 2
B3	$(1/5)E_{02}$	1 / 5
B4	$(1/10)E_{02}$	1 / 10

ただし, E_{02} は Case-B1 の変形係数

力度 (以下, 軸応力度) を加味しても, 1~2 割程度である。また, 実施工例の地盤の変動係数を調べてみると 0.04~0.14 程度であり, E_R を E_L の 5 割増とした Case-A2 の変動係数より小さい。Case-A2 の円周方向応力度の Case-A1 に対する増分は 7% に留まっている。

4. 掘削深度差による影響⁴⁾

4.1 解析条件

偏圧の発生する要因として掘削時の深度差に着目し, その極端な例として, 掘削面の左半分 (90~180°) を常に 7m 先行掘削する場合を想定した。解析は, 先行掘削による偏圧に地盤剛性の与える影響をみるために, 地盤の変形係数 E が基準値 E_{02} のケース (Case-B1; $E_{02}/E=1$) と, 地盤の変形係数を基準値 E_{02} より一様に低減させるケースとして E_{02}/E が 1/2 (Case-B2), 1/5 (Case-B3), 1/10 (Case-B4) の計 4 ケースを行った。Fig. 7 に解析モデルを, Table 3 に解析ケースをそれぞれ示す。

4.2 解析結果

4.2.1 水平変位の深度方向分布 Fig. 8 に Case-B1, B3 の GL-42~49m 掘削時の水平変位の深度方向分布を示す。掘削深度の差による変位の差は GL-42m 付近で最も顕著に現れており, 先行掘削している 180° 方向で大きく 0° 方向では小さい。また, 地盤の変形係数が小さい Case-B3 ほどその傾向は大きくなっている。

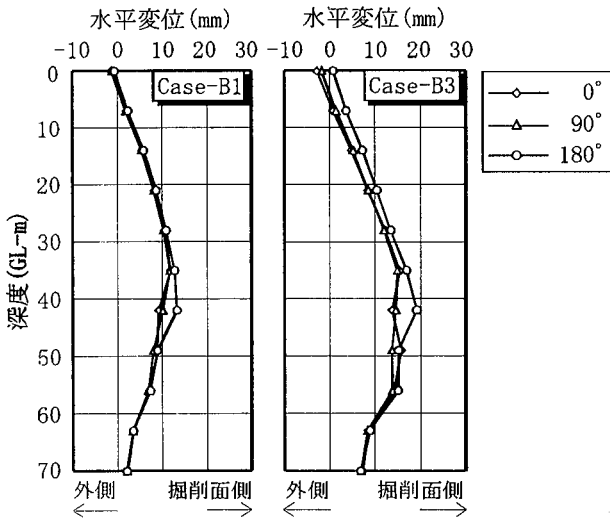


Fig. 8 水平変位
Displacement Distribution in a Vertical Direction

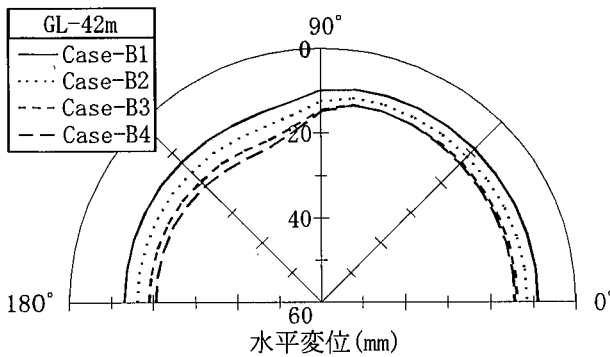


Fig. 9 水平変位 (GL-42m)
Displacement Distribution in a Circumferential Direction (GL-42m)

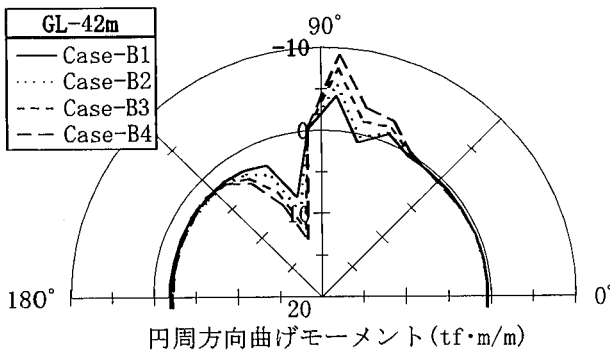


Fig. 10 円周方向曲げモーメント (GL-42m)
Circumferential Bending Moment (GL-42m)

4.2.2 水平変位, 円周方向曲げモーメントの円周方向分布 (GL-42m地点) Fig. 9にGL-42~49m掘削時のGL-42mにおける水平変位の円周方向分布を示す。掘り残している0~90°方向で変形は一様に小さく、掘削深度の境界である90°方向で変位は急激に変化し、先行掘削部である90~180°方向で変位が一様に大きくなっている。この変形モードは、先行掘削による偏圧の影響をよく表現している。

Fig. 10にGL-42~49m掘削時のGL-42mにおける円周方向曲げモーメントを示す。掘削深度の境界である90°方向前後で大きな曲げモーメントが発生しており、90~135°

Table 4 円周方向応力度
Maximum Circumferential Stress

Case	GL-42~49m掘削			GL-49m掘削(段差なし)
	曲げ応力度 (kgf/cm ²)	軸応力度 (kgf/cm ²)	円周方向応力度 (kgf/cm ²)	円周方向応力度 (kgf/cm ²)
B1	7	129	136	135
B3	11	175	186	182

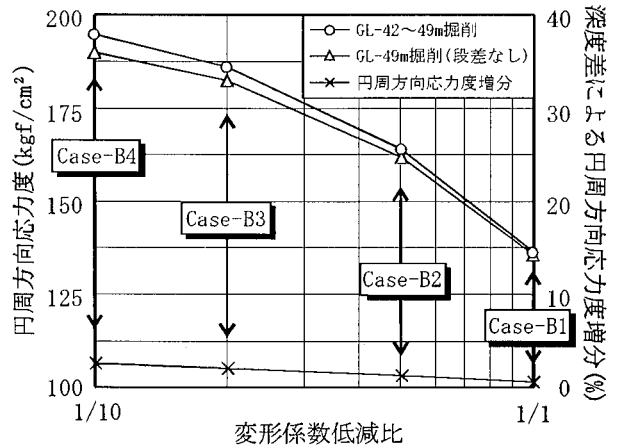


Fig. 11 円周方向応力度とその増分
Maximum Circumferential Stress and the Rate of Increase

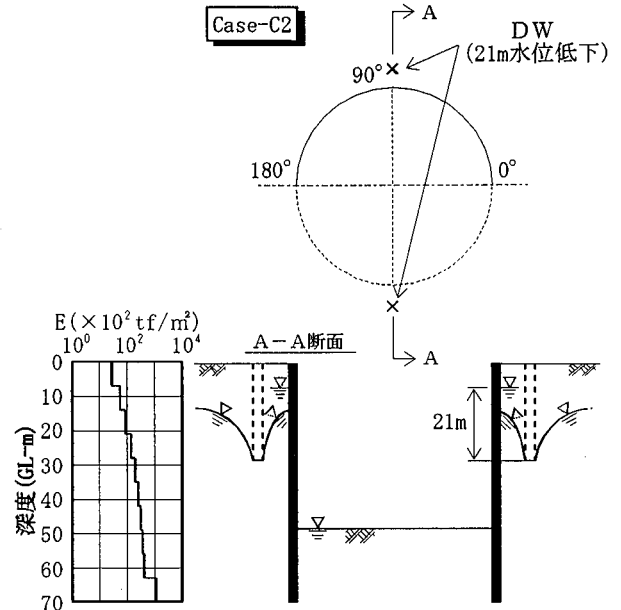


Fig. 12 解析モデル
Analysis Model and Modulus of Elasticity

方向では土留め壁の内側で引張、45~90°方向では外側で引張の曲げモーメントが発生している。また、地盤の変形係数が小さいケースほど発生する円周方向曲げモーメントは大きくなっている。

4.2.3 円周方向応力度の最大値 Table 4にCase-B1, B3のGL-42~49m掘削時と段差なしによるGL-49m掘削時の円周方向応力度の最大値を、Fig. 10にCase-B1~B4の円周方向応力度の最大値とその増分をそれぞれ示す。地盤の変形係数が小さくなるほど壁体が発生する円周方向の曲げモーメントや軸力は大きくなるため、円周方向応力度も大きくなっており、その値はGL-42~49m掘削時のほうが大

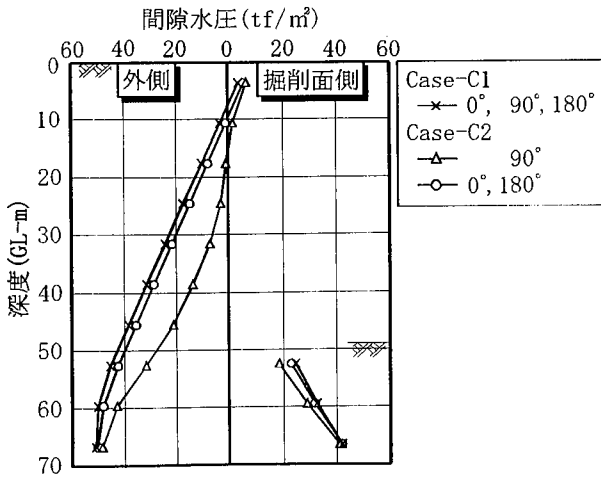


Fig. 13 間隙水圧
Distribution of Pore Water Pressure

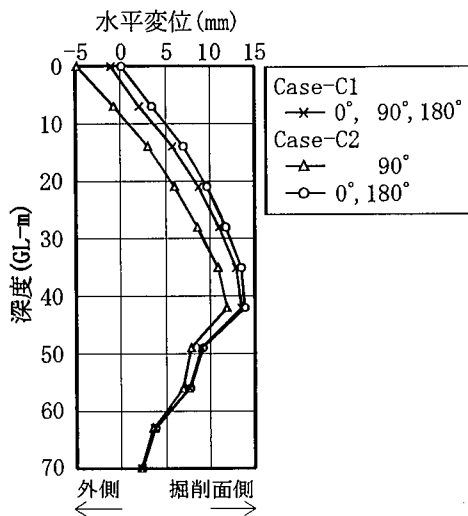


Fig. 14 水平変位
Displacement Distribution in a Vertical Direction

きい。しかし、掘削深度差のあるGL-42~49m掘削時と一様に掘削するGL-49m掘削時とを比較すると、深度差をつけて掘削することによる円周方向応力度増分は1~3%に過ぎず、7mの掘削深度差を想定した場合でも偏圧の影響は少ないと考えられる。

5. 揚水による影響

5.1 解析条件

偏圧の発生する要因として揚水に着目し、壁外側に2本(90°)のディープウェル(以下、DW)を想定した。地下水位をGL-7mから21m低下させるケース(Case-C2)を表現するために、DWの該当位置の節点に水頭境界条件を与えた。地盤の変形係数EはE₀₂(4.1節)とした。なお、DWを設置しないで一様に49m掘削するケースをCase-C1とした。Fig. 12に解析モデルを示す。

5.2 解析結果

5.2.1 間隙水圧分布 Fig. 13にCase-C1, C2の壁内外の間隙水圧深度方向分布を示す。間隙水圧は、要素中心で

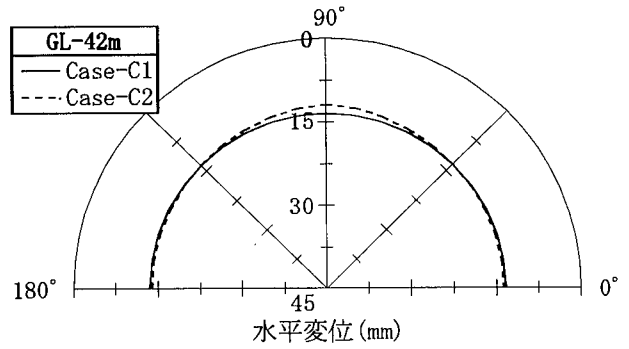


Fig. 15 水平変位 (GL-42m)
Displacement Distribution in a Circumferential Direction (GL-42m)

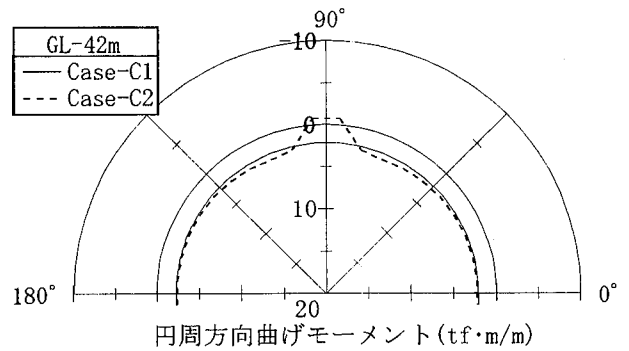


Fig. 16 円周方向曲げモーメント (GL-42m)
Circumferential Bending Moment (GL-42m)

Table 5 円周方向応力度
Maximum Circumferential Stress

Case	DW	曲げ応力度 (kgf/cm ²)	軸応力度 (kgf/cm ²)	円周方向応力度 (kgf/cm ²)
C1	無	2	134	136
C2	有	3	134	137

評価した値を用いている。DWにより壁外側の水位を低下させることによって、壁外側の間隙水圧は90°方向で15 tf/m²小さくなっている。

5.2.2 水平変位の深度方向分布 Fig. 14に水平変位の深度方向分布を示す。揚水による変形の差は地下水位を低下させている部分で最も顕著に現れており、Case-C2では90°方向において壁外側水位が低下するため、土留め壁に作用する外力が減少しCase-C1に比べて掘削面側への変形が小さくなっている。この変形モードは、揚水による偏圧の影響をよく表現している。

5.2.3 水平変位、円周方向曲げモーメントの円周方向分布 (GL-42m地点) Fig. 15にGL-42mにおける水平変位の円周方向分布を示す。Case-C1では変形は一様であるが、DWによる揚水を行っているCase-C2では90°方向付近で変形は小さくなっている。

Fig. 16にGL-42mにおける円周方向曲げモーメントを示す。Case-C2では揚水により90°方向付近で外側引張の曲げモーメントが発生している。

5.2.4 円周方向応力度の最大値 Table 5に円周方向応力度の最大値を示す。Case-C2での曲げ応力度3kgf/cm²は

Case-C1に対して5割増加しているが、円周方向応力度の増加は1%に留まっている。このことは、0°、180°方向より90°方向にかけて壁外側水位がなめらかに低下しているため、土留め壁に作用する外力の円周方向の変化が小さいことに起因する。

6. 地盤ばねによる解析

6.1 解析概要

3, 4, 5章で3次元FEM解析を行い偏圧が発生する要因を多方面から検討した結果、地盤の変形係数のばらつきによる要因(3章)が壁体の変形や断面力に与える影響が大きいことがわかった。

この解析結果と設計とを比較するために、従来から用いられている円形土留め壁の設計手法⁹⁾である地盤ばねによる解析を行った。Fig. 17に解析モデルを示す。円形土留め壁を3次元シェルに地盤を弾塑性ばねにモデル化し、地盤条件や架構条件は3章のCase-A1と同じとした。従来の設計手法では偏圧として考慮する値は静止土圧の20%が一般的に採用されているが、今回の解析では、荷重を静止土圧の5, 10, 15, 20%とする4ケースを行った。

6.2 解析結果

この解析モデルでは、従来の設計手法のように偏圧を静止土圧の20%とした場合、偏圧により発生する円周方向応力度の最大値は24.5kgf/cm²となった。

この地盤ばねによる解析と3次元FEM解析(3章)の結果より、Fig. 18に示す地盤の変形係数のばらつきを表す変動係数と偏圧を静止土圧の何%とするかについての関係を得た。実施工例の地盤の変動係数は0.04~0.14程度であることから、考慮すべき偏圧は静止土圧の約2~6%でよいことがわかる。このように、原地盤のばらつきが把握できると設計上考慮すべき偏圧を定量的に評価できるため、偏圧を慣例的に定めている現行の設計手法より合理的な設計が可能となる。

7. おわりに

3次元地盤/地下水連成FEM解析プログラム「GRASP-3D」を用いて、A) 地盤の変形係数のばらつき、B) 掘削深度差、C) 揚水によって発生する偏圧が壁体へ及ぼす影響を評価することができ、以下のことが明らかになった。

- 1) 地盤の右半分の変形係数を他方の5割増とした場合の変動係数は、ほぼ実施工例の地盤に相当し、変形係数の差異による円周方向応力度増分は7%程度である。
- 2) 7mの深度差をつけても、先行掘削部の円周方向軸力が一様に掘削した場合にほぼ等しいため、偏圧の影響は小さい。
- 3) 壁外側の水位を21m低下させる場合、土留め壁に作用する外力が円周方向になめらかに変化するため、偏圧の影響は小さい。

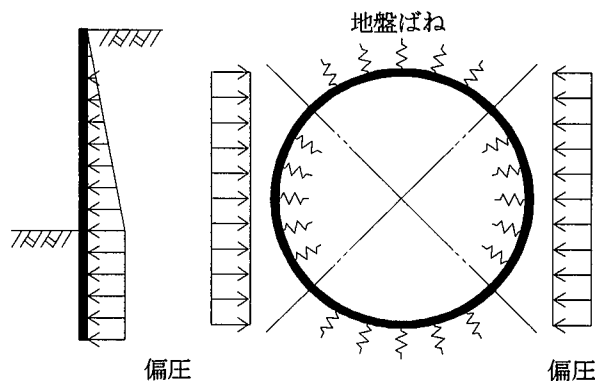


Fig. 17 解析モデル
Shell-Spring Frame Model for Design

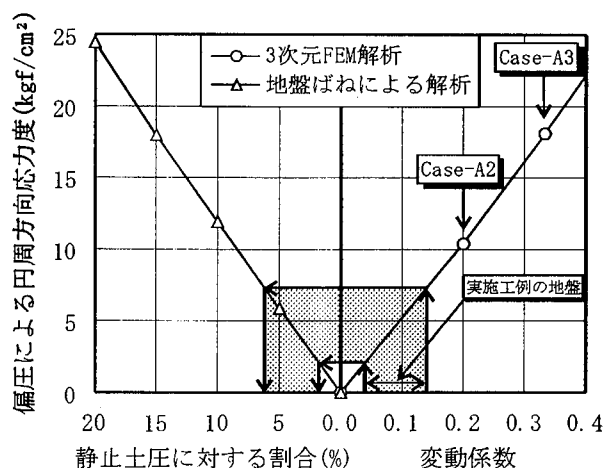


Fig. 18 偏圧の定量的評価
Quantity Estimation of Unsymmetrical Pressure

4) 偏圧が発生する要因を多方面から検討した結果、地盤の変形係数のばらつきによる要因が壁体の変形や断面力に与える影響が大きい。

5) 地盤ばねによる解析を行い3次元FEM解析と関係付け、地盤の変形係数のばらつきを表す変動係数と偏圧を静止土圧の何%とするかについての関係を明確にすることにより、原地盤のばらつきを把握できれば設計上考慮すべき偏圧を定量的に評価することができる。

参考文献

- 1) 杉江：弾・粘塑性構成則を用いた3次元土/水連成FEMの定式化と自然堆積粘土の力学挙動解析への応用，金沢大学博士論文，p.5~66，(1993)
- 2) 杉江，他：3次元土/地下水連成解析プログラム「GRASP-3D」の解析理論と粘土の力学挙動解析への応用，大林組技術研究所報，No.51，p.15~22，(1995)
- 3) 飯谷，他：偏圧が作用する円筒形土留め壁の一挙動解析，土木学会第51回年次学術講演概要集，(1996)
- 4) 飯谷，他：円筒形土留め壁における偏圧に関する挙動解析，第31回地盤工学研究発表概要集，(1996)
- 5) 小島，他：地中連続壁を使用した円筒土留工，土木技術，43巻9号，p.65~74，(1988)