

大深度掘削に伴う円形土留めの挙動とその解析

伊藤 政人 崎本 純治
平間 邦興

Behavior and Analysis of Cylindrical Earth Retaining Wall for Deep Excavation

Masato Ito Junji Sakimoto
Kunioki Hiram

Abstract

Deep excavation using cylindrical earth retaining structures was carried out for construction of a foundation of a long-span bridge. This paper describes the results of observations made during excavation and also the results of simulation of the behaviors of the cylindrical earth retaining structures and pore water of the ground using coupled stress-flow FEM analysis. The following conclusions were arrived at: ① Prediction of good accuracy can be made by using a beam-spring model considering the cylindrical effect for the retaining wall and by using a three-dimensional FEM seepage analysis for the ground water. ② The total behavior of the cylindrical earth-retaining wall is well reproduced by coupled analysis and it is clearly shown that the lowest part of the wall is subjected to lateral pressure larger than the design value.

概 要

長大橋梁基礎工事において、大規模かつ大深度にわたる円形土留めを用いた掘削工事が行われた。本報告はまず、当該工事において得られた計測データと予測解析結果を示し、大深度掘削における円形土留めと地盤・間隙水の挙動について述べる。次に、土/水連成プログラムによるFEMを用いて壁体・地盤・間隙水を一体としたシミュレーション解析を行った結果について述べる。得られた主たる成果は以下の通りである。① 土留め壁の挙動には円形効果を加味したはりバネモデルによる解析、間隙水圧の挙動には3次元FEM浸透流解析を用いることにより精度良い予測が行うことができ、それぞれの解析手法の有効性を確認した。② 土/水連成手法を用いたFEM解析により、今回の円形土留めの全体挙動をほぼ再現することができ、壁下端近傍には通常的设计で設定するよりもかなり大きな側圧が作用していたことが明らかになった。

1. はじめに

円形土留めは掘削中の外力に対し効率的に抵抗できることから、大型の掘削工事に多く用いられている。現在建設が進められている明石海峡大橋の本州側アンカレイジ(1A)の基礎築造工事においても、円形土留めを用いた大規模かつ大深度にわたる掘削工事が行われた。その規模は掘削面積・深度とも過去の実績を上回るため、施工中の計測結果を解析にフィードバックさせて安全を確認する情報化施工の手法を適用した。本報告は当掘削工事において得られたデータと予測解析結果を示し、大深度掘削における円形土留めと地盤・間隙水の挙動について述べる。また、土/水連成プログラムによるFEMを用いて、壁体・地盤・間隙水を一体とした解析を行い円形土留めの挙動を再現するとともに、壁体に作用する側圧に関する考察について述べる。

2. 1A アンカレイジ基礎掘削工事の概要

2.1 工事概要

神戸市と淡路島の間で建設が進められている明石海峡大橋(中央支間1,990m, 橋長3,910m)の4つの基礎のうち、1Aアンカレイジ基礎は直径85m, 深さ63.5mの円筒形で、世界最大級の橋梁基礎である。1A基礎(図-1)は、海岸部の埋立て地に円形に築造された地下連続壁の内部を掘削しつつRC造の側壁を打足し、底版コンクリートおよびRCC(Roller Compacted Concrete)による中詰めコンクリートを打設した後、頂版を施工することによって完成する。

図-2に土留め壁である地下連続壁と側壁の構造寸法および各掘削段階における掘削深さを示す。掘削内径は80.6m, 最終掘削深さは64mであり、過去のLNGタンクなどの掘削工事の実績に比べ、深度で40%, 直径で20%大きくなっている。また、海際の掘削工事であるた

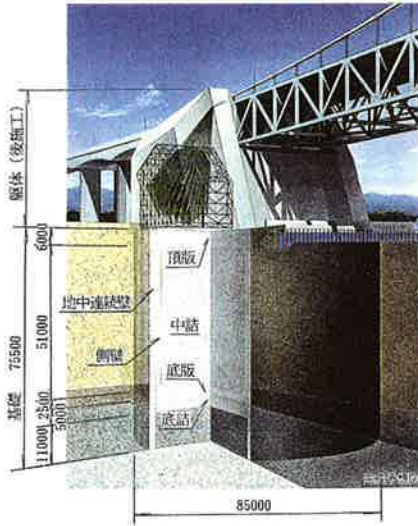


図-1 1A アンカレイジ構造図

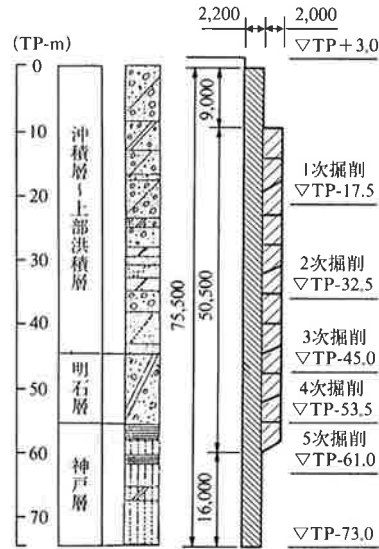


図-2 土留め壁構造寸法

表-1 計測器一覧

計測器		数量	記号
鉄筋計	円周方向	174	●
	鉛直方向	50	
コンクリート有効応力計	円周方向	28	△
	鉛直方向	8	▼
土圧計		40	□
間隙水圧計		91	■
挿入式傾斜計		4	☆
地中間隙水圧計		22	*
層別沈下計		19	○

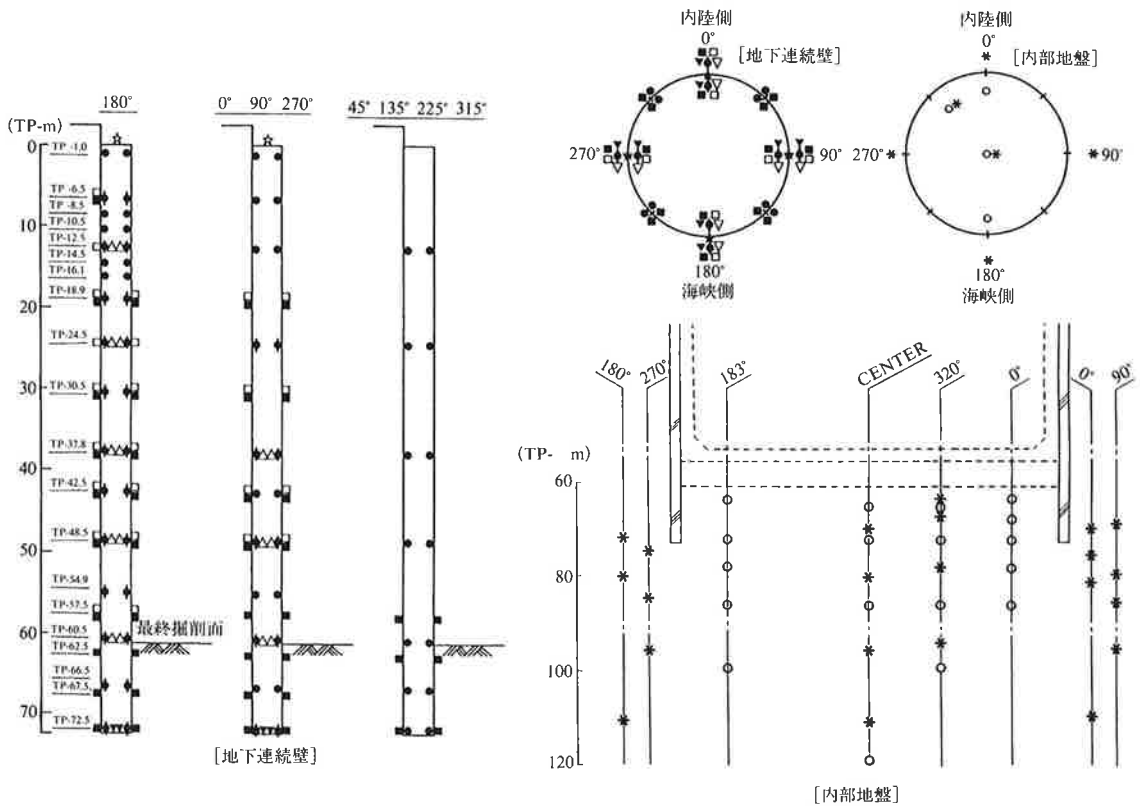


図-3 計測器位置図

め、地下水位が高く、地下水圧による盤ぶくれが懸念された。そのため、連壁内側の4本のディープウェルによって水圧を低下させながら掘削を行った。

2.2 地質概要

図-2には掘削地点の地層構成も示してある。TP-45m付近までは粒度分布のよい砂礫層の沖積～上部洪積層であり、その下部に同じく砂礫を中心とする薄層の明石層が位置している。TP-55m付近からは砂岩・泥岩を主体とする第三紀堆積軟岩である神戸層が位置し、頻繁

な互層を成している。

2.3 計測概要

本掘削工事においては、土留め壁の安全管理と底部地盤の盤ぶくれに対する安全管理の2つを目的に、壁体および地盤の挙動の計測を実施した。表-1に計測器の一覧を示し、図-3に計器位置図を示す。これらの計測結果をもとに逆解析を行い、その入力定数を用いた予測解析を行うことにより、最終的な壁体および地盤の安全性を確認したり。

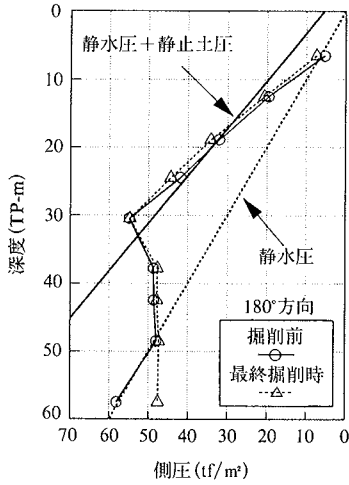


図-4 側圧分布

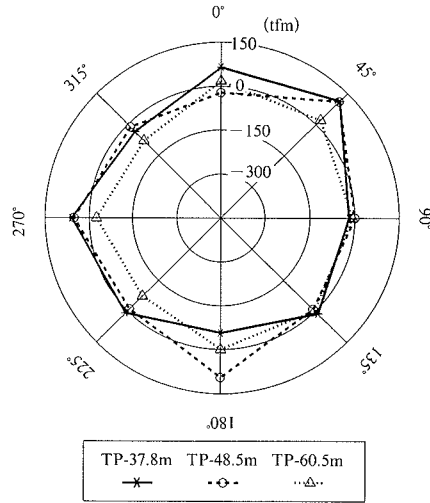


図-5 円周方向曲げモーメント

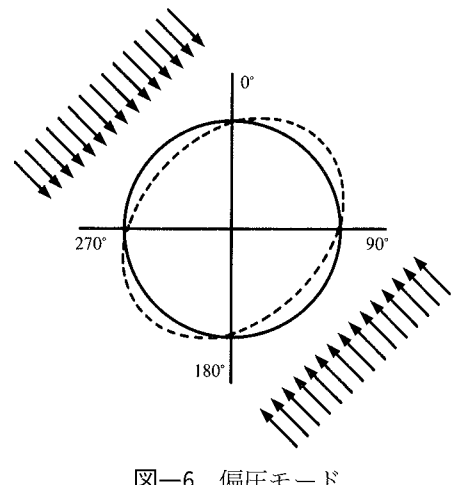


図-6 偏圧モード

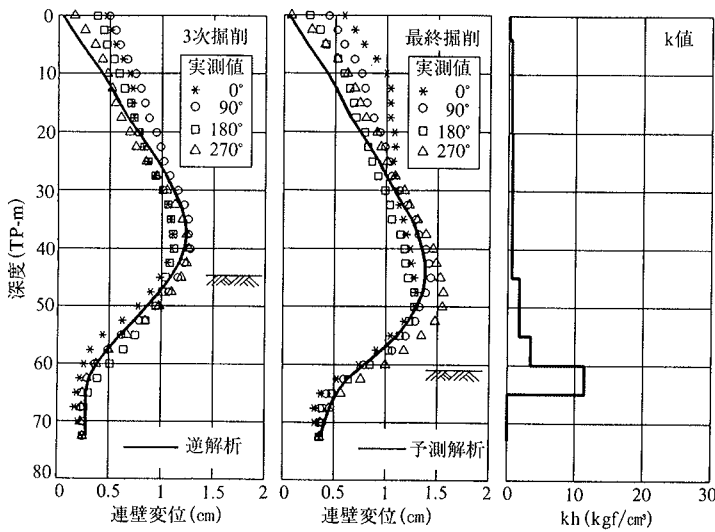


図-7 土留め壁の変形

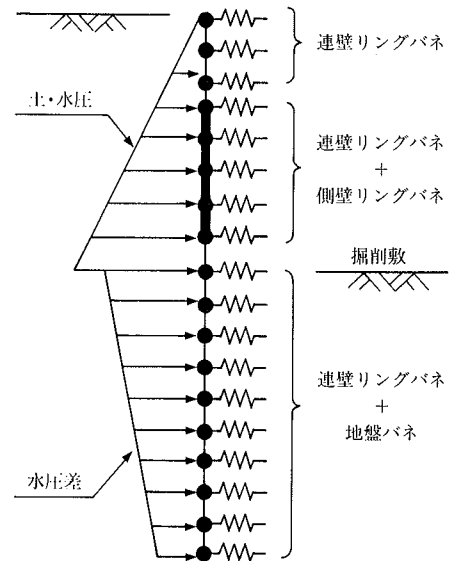


図-8 円形土留め解析モデル

3. 計測結果とその考察

3.1 側圧

図-4に、掘削開始前と最終掘削時の側圧分布を示す。図には、静水圧と静水圧+静止土圧 ($K_0=0.5$:設計値)を示してある。TP-30m付近までの側圧は、静水圧+静止土圧に等しいが、TP-30m付近から土圧は減少しはじめ、TP-50m付近で深の土圧はほぼゼロ(静水圧のみ)であった。また、掘削前と最終掘削時において変化はほとんどなく、これは壁の変形が非常に小さかったためと考えられる。

3.2 偏圧

図-5に円周方向鉄筋応力から計算された壁体の円周方向曲げモーメントを示す。円周方向曲げモーメントは等方的な側圧によっては発生しないので、そのモードを分析することで、偏圧についての考察を行うことができる。発生した曲げモーメントは45°方向で外側引張、315°

方向で内側引張の傾向にあり、図-6に示すような偏圧が作用したモードといえる。設計時において、偏圧は静止土圧の20%を見込んでおり、それによって発生する円周方向曲げモーメントの最大値は外側引張43tfm、内側引張24tfmであった。実測値と比較すると約1/2であり、設計時の偏圧の大きさを見直す必要があると考えられる。

3.3 壁体変形

図-7に3次掘削、最終掘削における壁体変形の実測値を示す。壁の最大変位は設計値が1.8cmであったのに対し、実測値は1.2~1.5cm程度であった。壁の最大変位が設計値より小さかったのは、壁に作用した側圧がTP-30m以深で設計値よりも小さかったためと考えられる。

図には3次掘削における逆解析値とその時点で得られた定数を用いて行った最終掘削の予測解析値も示してある。解析は、土留めが円形であることをリングバネとして考慮した2次元のはりバネモデル(図-8:プログラムコード:ERSA)によって行った。逆解析値は実測され

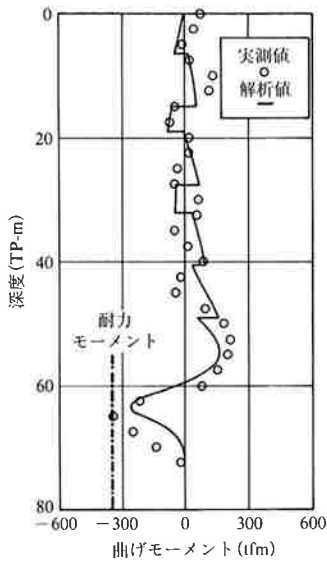


図-9 鉛直方向曲げモーメント

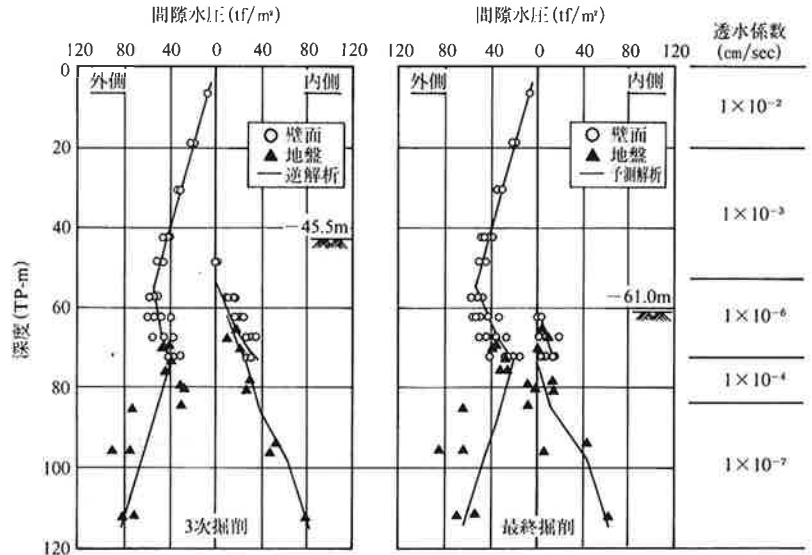


図-10 間隙水圧分布

た土水圧を既知として壁体の変形が最も合うように地盤反力係数 k 値を逆算したものである。この時点で得られた k 値の分布を図-7に同時に示す。この k 値を用いた予測解析値は実測値とよく一致しており、円形効果を加味した2次元のはりバネモデルによって円形土留めの挙動予測が十分可能であることを確認した。

しかし、逆算された k 値の分布は壁下端近傍の神戸層でゼロとなり、地盤条件に矛盾した分布になっている。壁下端近傍が内側へ変形しているのは、地盤反力がゼロであったためではなく、壁下端近傍に何らかの側圧が作用したためと考える方が自然である。壁下端近傍の地盤は軟岩層であるため、直接側圧を測定することは困難であり、今回も計測対象とされていなかった。そこでこれに関し、FEM解析を用いた検証を試みたので4.2.2項において述べる。

3.4 鉛直方向曲げモーメント

図-9に最終掘削時の鉛直方向曲げモーメントの実測値と予測解析値を示す。壁体の変形同様、両者は良い一致を示している。実測値はTP-65m付近で外側引張の曲げモーメントが断面の耐力モーメントである350 tfmを上回った。これは壁下端近傍が内側へ変形することにより、外側引張の曲率が大きくなったためである。発生曲げモーメントは耐力モーメントを上回ったが、実際のコンクリート強度が設計値より大きく発現し、断面が全断面有効の領域で終始したため、鉄筋応力度は管理値以内で推移した。

3.5 間隙水圧

図-10に3次、最終掘削時の壁面および地盤中の間隙水圧の分布を示す。ディープウェルの内部排水により連壁内側の水圧は低下しており、外側の水圧も連壁下端からTP-55m付近まで低下している。TP-55m以浅の外側の水圧には排水の影響が及んでいないのは、神戸層上

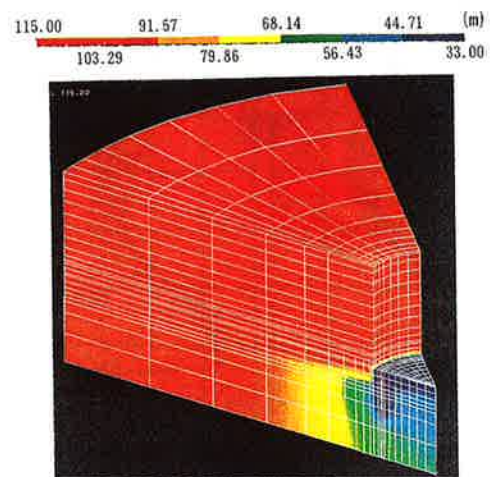


図-11 全水頭コンター図

部に透水性の低い泥岩層が位置していたためと考えられる。

図には3次掘削における逆解析値とその時点で得られた定数を用いて行った最終掘削の予測解析値も示してある。解析は3次元FEM浸透流解析(プログラムコード: SIGNAS)によって行った。逆解析値はディープウェル水位を既知として間隙水圧が最も合うように地盤の透水係数を逆算したものである。この透水係数の値を用いて行った予測解析値は実測値とよく一致している。図-11に予測解析による全水頭コンターを示す。ディープウェルを中心に水頭が低下している様子がわかり、間隙水圧が盤ぶくれに対して安全な値まで低下することを確認できた。このようにディープウェルの効果を加味した3次元の浸透流解析によって地盤中の間隙水圧の挙動を精度良く予測することができ、盤ぶくれに対する安全性の評価にも有効な手段であることを確認した。

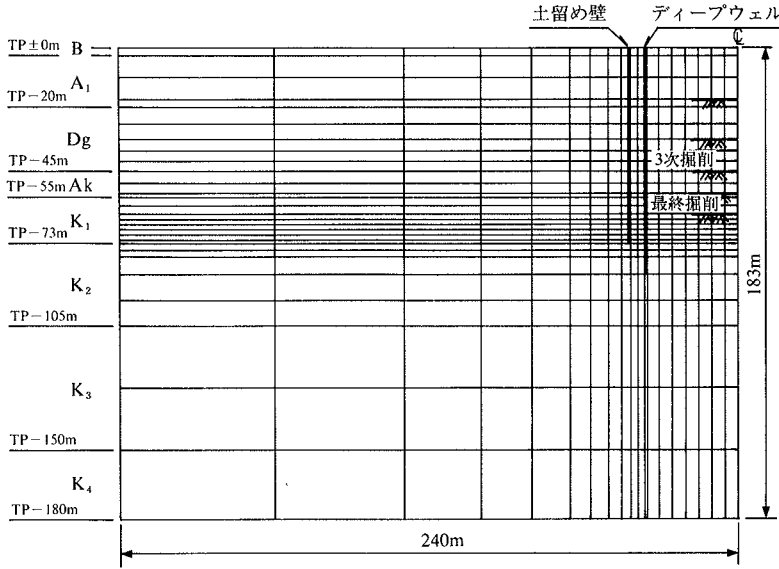


図-12 FEM 解析メッシュ図

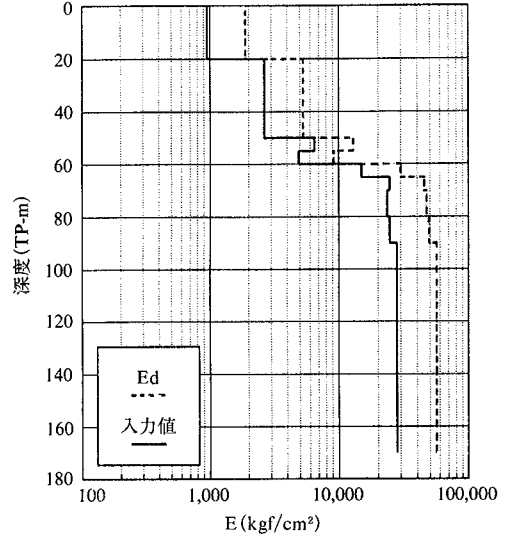


図-13 弾性係数分布

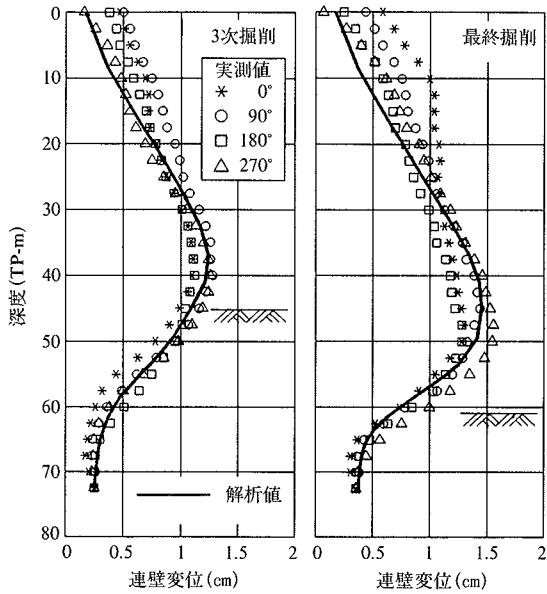


図-14 土留め壁の変形

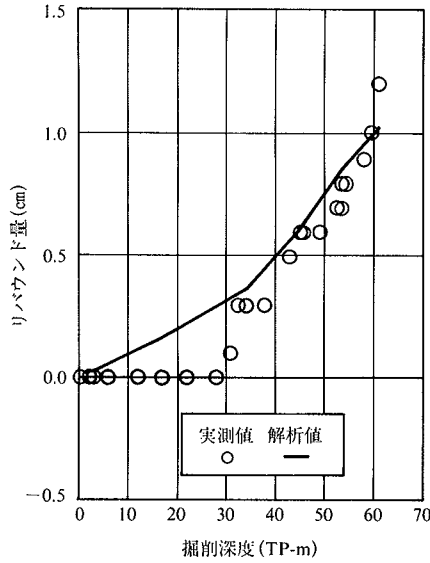


図-15 掘削深度～リバウンド量

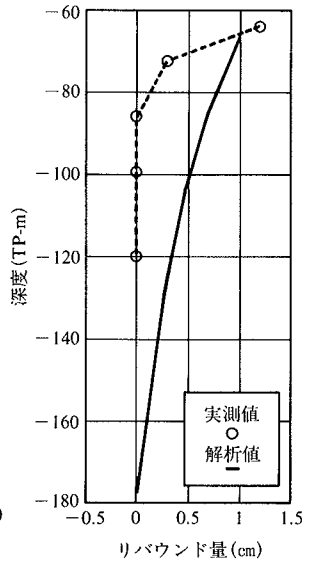


図-16 リバウンド量の深度分布

4. 土/水連成プログラムによる FEM 解析

4.1 解析条件

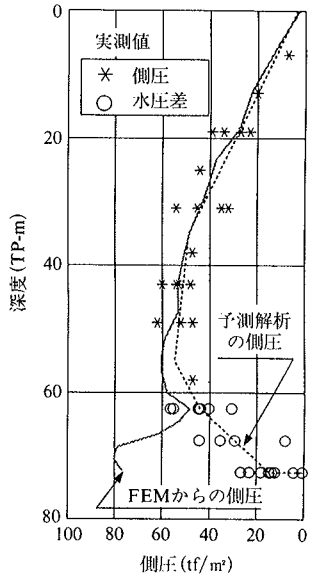
本掘削工事における円形土留め全体の挙動について、地盤の応力変形と間隙水の浸透を連成させた解析プログラム (プログラムコード: DACSAR) を用いたシミュレーション解析を行った。地盤の構成モデルはすべて線形弾性体とし、その弾性係数は PS 険層による動的弾性係数 E_d の $1/2$ とした。今回の掘削にともなって発生した地盤のひずみは $0.02 \sim 0.1\%$ であり、このひずみレベルにおける地盤の弾性係数は $E_d/2$ に近いことが文献²⁾ に示されている。図-12 に解析メッシュ図を示し、 E_d と解析に用いた弾性係数の分布を図-13 に示す。

4.2 解析結果

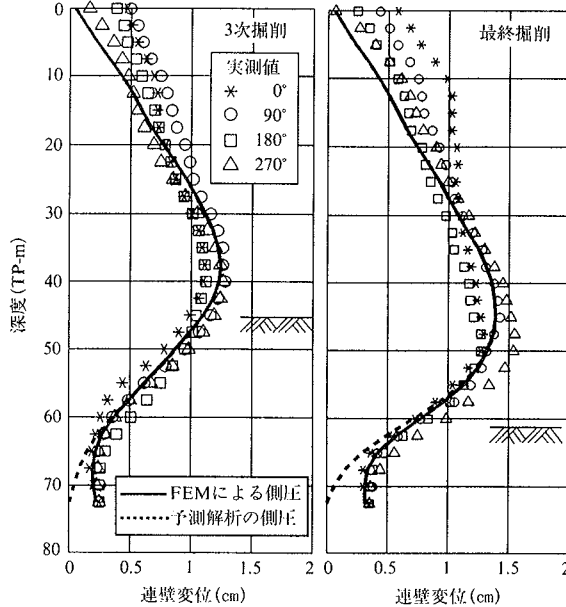
4.2.1 壁体・地盤変形 図-14 に 3 次、最終掘削の壁

体変形の実測値と FEM 解析値を示す。解析結果は壁体変形を非常に良くシミュレートしている。図-15 に底面地盤の掘削中央におけるリバウンド量と掘削深度の関係を示し、図-16 に最終掘削時におけるリバウンド量の鉛直分布を示す。リバウンド量の変化に関して、解析値は実測値と比較的良好な対応を示している。しかしリバウンド量の分布において、実測値は TP-85 m 以深はゼロであるのに対し、解析値は深部までリバウンドが発生している。この理由として、層別沈下計の出力は地盤の初期の微小ひずみに対して反応が悪い場合があること、また解析には線形弾性モデルを用いているため、地盤が引張に対する抵抗力が弱いことを表現できていないことが挙げられる。

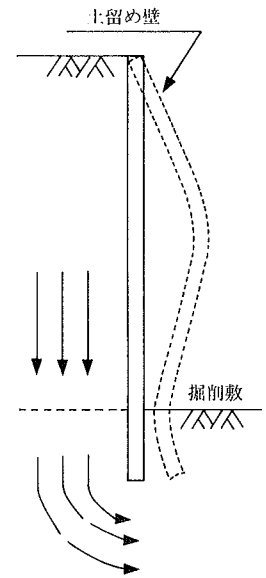
4.2.2 壁下端近傍に作用する側圧 FEM 解析結果から側圧を抽出し、3.3 項において述べた壁下端近傍に作



図一17 壁体に作用する側圧分布



図一18 土留め壁の変形



図一19 土留め壁の変形模式図

用したと考えられる側圧についての検討を行った。

壁体に変形を生じさせる側圧（はりバネモデルによる解析に外力として入力する側圧）は、背面側から壁体に作用している全側圧から、背面側と掘削側でバランスする側圧（変形に寄与しない側圧）を差し引いたものとなる。変形に寄与しない側圧は側方変位ゼロ状態における除荷時の側圧と定義されており³⁾、他条件を同一として壁体の変形を拘束した解析により求めることができる。図一17にこのようにしてFEMより求めた壁体に変形を生じさせる側圧を示す。図には3.3項で示したはりバネモデルによる解析に用いた側圧も示してある（実測された土水圧に基づいて設定されている）。TP-60m付近までは両者は良く一致しているが、壁下端近傍においてFEMより求めた側圧の方がかなり大きい。

FEMより求めた側圧を用いて、はりバネモデルによる解析を行った。逆解析においてゼロとされていた神戸層のk値はFEM解析同様 $E_d/2$ から算出した。図一18に3次および最終掘削時における壁体変形の解析結果を示す。図には実測された土水圧に基づいて設定した側圧を用いた結果も示してある。FEMより求めた側圧を用いたケースは壁下端近傍の内側への変形が実測値とよく対応しており、この側圧の大きさは妥当なものであると考えられる。

風間⁴⁾は軟弱地盤での1次根切り時における山留め壁の変形性状は、一般の設計で採用されている側圧分布では説明できないため、地盤全体の安定性が崩れることにより地盤が移動しようとして発生する側圧が壁に作用するのではないかと報告している。今回の場合も図一19に示すように地盤の状態がアンバランスになったことにより側圧が壁下端近傍に作用したものと考えられ、大深度掘削における比較的堅固な地盤においても、このような側圧を考慮すべき場合があると考えられる。

5. まとめ

明石海峡大橋1Aアンカレイジ基礎掘削工事における大深度円形土留めの計測結果とFEMによる解析結果について述べた。それらの結果についてまとめると以下のようなになる。

- ① 掘削工事で採用した情報化施工において、円形土留めの挙動には円形効果を加味したはりバネモデルによる解析、間隙水圧の挙動には3次元FEM浸透流解析を用いることにより精度良い予測が行うことができ、それぞれの解析手法の有効性を確認した。
- ② 土/水連成プログラムを用いて壁体・地盤・間隙水を一体としたFEM解析を行ったところ、地盤の弾性係数にPS陰層による動的弾性係数 E_d の1/2を用いることによりその全体挙動をほぼ再現することができた。
- ③ FEM解析結果より壁体に作用した側圧を抽出したところ、通常的设计で設定するよりもかなり大きな側圧が壁下端近傍に作用していることが明らかになり、その大きさをはりバネモデルを用いた解析により検証した。

参考文献

- 1) 古屋信明・辰巳正明・斉藤哲男・山岡禮三・崎本純治・伊藤政人：明石海峡大橋1Aアンカレイジ基礎における大深度掘削の計測結果とその評価，土木学会論文集 No. 474/VI-20, p. 47~56, (1993)
- 2) 龍岡文夫・越智健三・金有性・木幡行宏：堆積軟岩の非線形変形特性の調査・試験法，土と基礎，p. 7~12, (1992)
- 3) 坂本佳一・深田和志：土止め壁の変形に寄与しない土中土圧の測定(その1)，第22回土質工学研究発表会，p. 1383~1386, (1986)
- 4) 風間 了：1次根切り時の山留めの変形からみた側圧評価，山留めとシールド工事における土圧・水圧と地盤挙動に関するシンポジウム発表論文集，p.157~164, (1992)