

自立山留め工法「スーパー・リブ工法」の開発（その1）

—設計法と実測結果による検証—

清 広 歳 宮 崎 祐 助
秋 野 矩 之

Development of Cantilever Earth Retaining Method (Super-Rib Method) (Part 1)

—Verification of Design Method by Measurement of Actual Behavior—

Hirotooshi Sei Yusuke Miyazaki
Noriyuki Akino

Abstract

The Super-Rib Method is a cantilever earth retaining method which does not use any supports. This method uses reinforced concrete diaphragm walls having a T-shaped cross section (Super-Rib). Such a cross section is used in order to increase the rigidity of the walls. It is inappropriate to design the three-dimensional Super-Rib by the generally-used two-dimensional earth retaining wall design method. This paper describes results of design by three-dimensional FEM and the beam-spring analysis method considering the three-dimensional shape of Super-Rib. Furthermore, it is reported that the authors have verified the utility of this beam-spring analysis method by comparing the results of this analysis using measured lateral earth pressure with actual behavior of Super-Rib.

概 要

スーパー・リブ工法は、山留め壁を T 字型とし剛性を高めた連続地中壁（スーパー・リブ）により、切梁や腹起しなどの支保工なしで掘削を可能とした自立山留め工法である。このスーパー・リブは、形状が立体的であることから、その設計に通常の二次元状態を想定した山留め設計法をそのまま用いることには無理がある。本報告では、立体的な形状をモデル化できる三次元 FEM、および梁・バネモデルに立体的形状を考慮した解析法による設計を示した。そして、この設計結果と実測により得たスーパー・リブの挙動を比較した結果について述べる。さらに、汎用性のある梁・バネモデルにスーパー・リブの立体的形状を考慮した解析法に、実測の側圧を入力し、その解析結果と実測のスーパー・リブの挙動を比較し、設計法としての妥当性について検証した。

1. まえがき

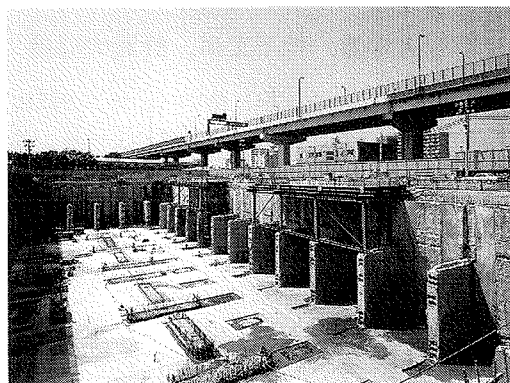
市街地での高度に複合化された再開発事業では、複数の建物群の地下部分が相互に連結、もしくは一体化された形で計画される例が多い。このような計画では、必然的に地下部分の掘削平面が大きくかつ複雑な形状になる。

掘削平面が複雑でかつ一辺が 100 m を超す大平面となると、山留め工法として、水平切梁工法はその適用限界を超える。また、地盤アンカー工法も、敷地条件に大きな制約を受け採用が難しい場合が多い。このような問題点を解決すべき工法として開発したのがスーパー・リブ工法である。

スーパー・リブ工法は、T 字型として剛性を高めた連続地中壁（スーパー・リブ）を山留め壁とし、切梁や腹起しなどの支保工なしで掘削を可能とした自立山留め工法である。このスーパー・リブは、形状が立体的であることから、その設計に通常の二次元状態を想定した山留

め設計法をそのまま用いることには無理がある。

本報告では、まず立体的形状をモデル化できる三次元 FEM (以下、A 法と呼称する)、および二次元状態を想定した梁・バネモデルにスーパー・リブの立体的形状を考慮した解析法 (以下、B 法と呼称する) を紹介し、これ



写真一 スーパー・リブ

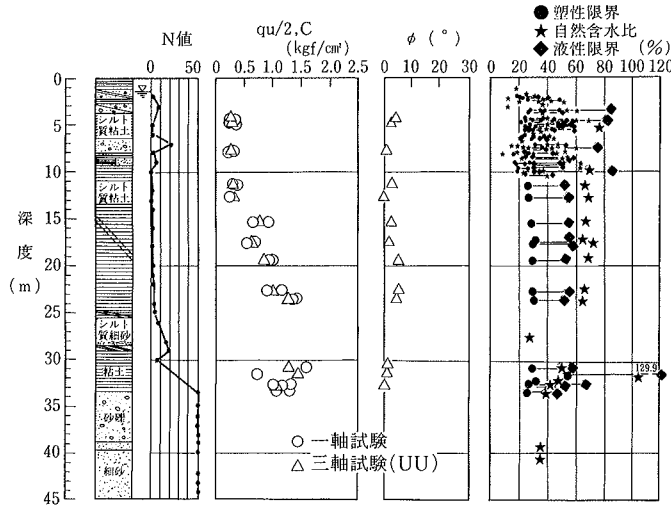


図-1 地盤概要

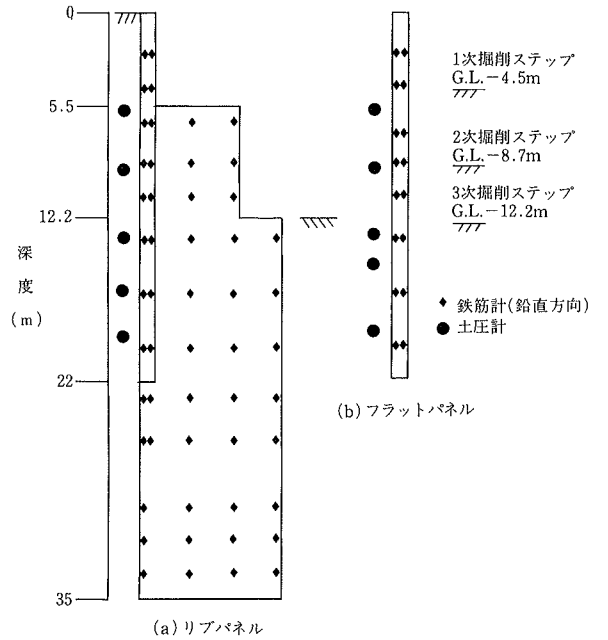


図-3 山留め断面, 測点 A の断面計器配置

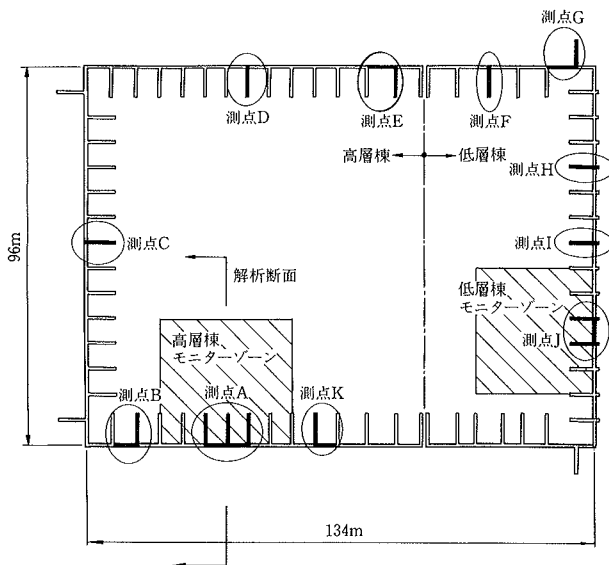


図-2 山留め平面, 計測位置

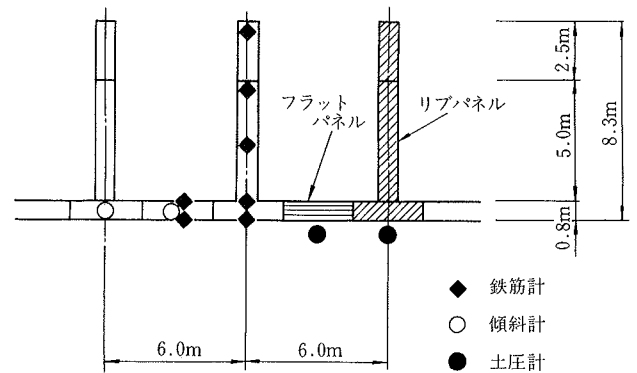


図-4 測点 A の平面, 計器配置

らの解析法によるスーパー・リブの設計について記した。次に、この設計値と、実測で得たスーパー・リブの挙動を比較検討した結果を述べ、さらに汎用性の高いB法について、実測側圧を用いた解析を行い、その解析結果と実測挙動を比較し、設計法としての妥当性を検証した。

2. 工事場の地盤, 地下工事, 計測の概要

スーパー・リブ工法を採用したリバーサイド隅田は、東京都墨田区堤通の隅田川沿いに位置している。工事場の地盤は、図-1に示すように、自然含水比が液性限界を超える軟弱なシルト質粘土が地表面からGL-26m付近まで堆積しており、工学的に安定した地層は、GL-30m以深から見られるといった、東京の典型的な下町低地の地層構成となっている。

掘削工事は、図-2および図-3に示したように、134×96mと非常に大きい平面を、GL-12.2mまで、山留め壁にスーパー・リブを用いて自立掘削した。掘削に

当たっては、スーパー・リブ工法が新しい工法であることから、安全性を確認するため、高層棟および低層棟の各ゾーンごとに計器を集中させたモニターゾーンを設け、その部分を先行して掘削した。また、掘削は、設計法の検証をより多く行うために、三段階の掘削ステップに分けて行った。

スーパー・リブは、図-3および図-4に示した形状で、リブパネルとフラットパネルにより構成されており、パネル間は構造的に一体化させるためエレメント間構造継手方式により接続されている。根入れ深さは、フラットパネルではGL-22mであり、リブパネルではGL-35mで、N値50以上の砂礫層まで施工している。

計測は、図-2に示した測点A~Kの11箇所で行った。本報告で実測結果を紹介する測点Aの計器配置を、図-3, 4に示した。計器は、図-4に示すようにリブパネルとフラットパネルのそれぞれの挙動を把握するため、両パネルに配置している。

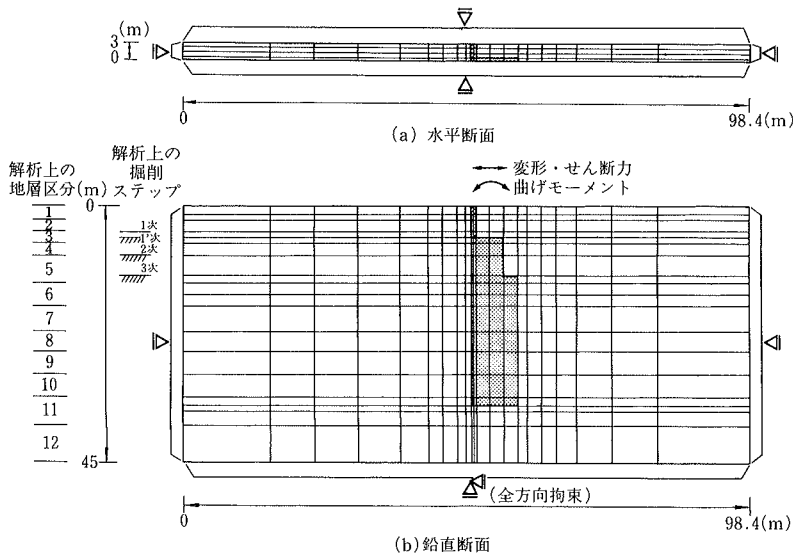


図-5 FEM 解析モデル

表-1 FEM 解析に用いた地盤定数

解析上の地層区分	応力～歪関係	E (tf/m ²)	ν	γ (tf/m ²)	K	n	Rf	C (tf/m ²)	φ (°)
1	弾性	280	0.4	1.6					
2	弾性	560	0.38	1.78					
3	Duncan-Chang		0.45	1.75	114	0.67	0.89	2.6	4.8
4	弾性	1,960	0.35	1.73					
5	Duncan-Chang		0.45	1.6	34	0.41	0.73	3.5	5
6	Duncan-Chang		0.45	1.6	112	0.58	0.61	7.6	3.1
7	Duncan-Chang		0.45	1.6	492	0.38	0.58	8.7	5.7
8	Duncan-Chang		0.45	1.6	830	0.31	0.49	12.9	4.9
9	Duncan-Chang		0.3	1.8	1,125	0.5	0.9	0	32
10	Duncan-Chang		0.4	1.8	659	0.5	0.9	12.4	0
11	Duncan-Chang		0.3	1.9	4,907	0.5	0.9	0	55
12	Duncan-Chang		0.3	1.8	1,869	0.5	0.9	0	46

初期側圧係数 $K_0 = 0.6$

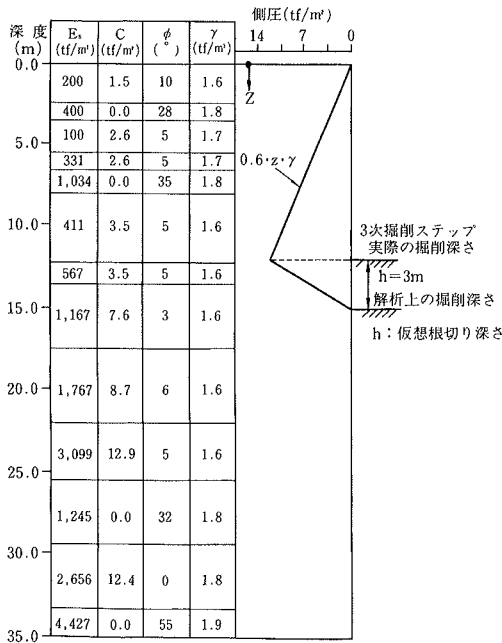


図-6 梁・バネモデルに用いた地盤定数・側圧

3. スーパー・リブの設計

ここでは、スーパー・リブの設計に用いた A 法（三次元 FEM）および B 法（立体的形状を考慮した梁・バネモデル解析法）の二つの解析法について、解析モデル、解析方法を説明するとともに、解析結果を示した。

3.1 解析モデル・解析方法

A 法で用いた解析モデルは、図-5 に示したように、スーパー・リブの平面形状の対称性を考慮して、T 字型の 1/2 モデルとした。この解析では、土の応力～ひずみ関係に弾性もしくは Duncan-Chang モデルを用いた。地盤定数には、地盤調査結果から決定した表-1 の値を用いた。スーパー・リブ本体は、弾性体として取り扱った。

解析は、非線形弾性解析で、解析方法としては、掘削開始前における地盤の応力状態を求めた後、解析上の掘削ステップごとに掘削部分の要素を消去し、これと同時に掘削部分の応力を開放する方法をとった。なお、掘削開始前の地盤応力状態を求める際の初期側圧係数は、 $K_0 = 0.6$ とした。

B 法で用いた地盤定数、側圧を図-6 に示した。このうち、地盤の変形係数に関しては、スーパー・リブのリブ部分の摩擦抵抗を次の方法で評価した。まず、リブ部が無いものとして地盤の変形係数を求め、この地盤の変形係数に、リブ部の面内方向の摩擦抵抗を、壁杭について提案されている方法¹⁾を参考に地盤の変形係数に換算し、評価した。スーパー・リブ本体は弾性体とし、断面性能はスーパー・リブの一つの T 字部分について求め、これを単位幅当たりで換算して入力した。スーパー・リブの先端条件は固定とした。解析では、掘削深さを図-6 に示した通り、実際の掘削深さよりも、さらに 3 m (仮想根切り深さ) 深いものとし、この仮想根切りの部分に図に示した逆三角形の側圧が作用するものとした。各ステップでの掘削深さ位置までの側圧係数は、 $K_0 = 0.6$ とした (図-6 参照)。

3.2 解析結果による設計

A 法および B 法によるスーパー・リブの最終掘削段階での変形、曲げモーメント、せん断力を、それぞれ図-7～9 に示した。これらの図の変形、曲げモーメント、せん断力は図-5 (b) に示した方向のものである。

変形に関しては、A 法のリブパネルとフラットパネルの解析結果がほぼ等しいことから、図-7 にはリブパネルの変形のみを示した。変形量は A 法が B 法よりも大きく、最大値は地表面付近で約 40 mm となっている。

図-8, 9 に、曲げモーメント、せん断力について示した。まず、A 法の解析結果について説明する。図には、A 法の解析結果からスーパー・リブ各部の曲げモーメント、せん断力をどのように換算したかについても合わせ示した。すなわち、リブ部分のない GL-5.5 m 以浅

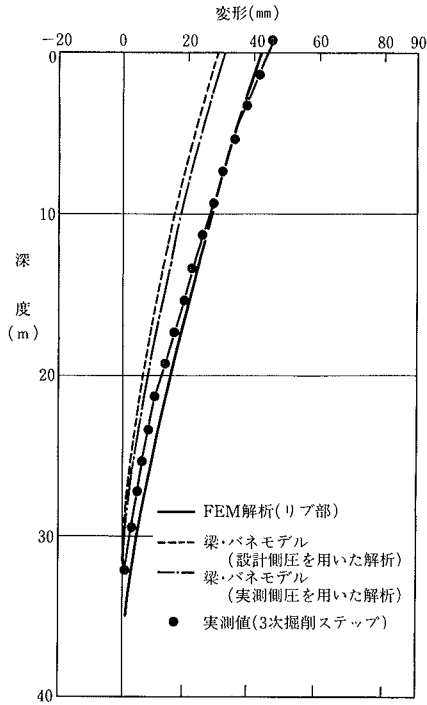


図-7 スーパーリブの変形 (3次掘削ステップ)

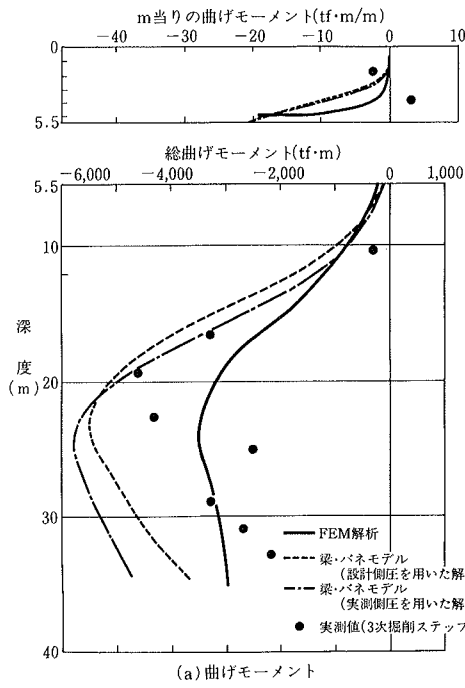
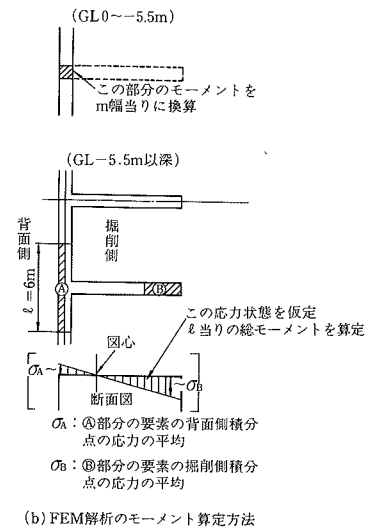


図-8 スーパー・リブの曲げモーメント (3次掘削ステップ)



に関しては、B法での解析結果が単位幅当りのものであることから、A法もこれに合わせ、応力が集中すると考えられる図中斜線部の要素から単位幅当りの曲げモーメント、せん断力を算定した。また、GL-5.5m以深では、曲げモーメントに関しては、図-8(b)に示した応力状態を仮定し、 σ_A 、 σ_B からスーパー・リブの1つのT字当りの曲げモーメントを求め、またせん断力に関しては、設計上総せん断力を受け持つとされる図-9(b)に示した斜線部分のせん断力を求め、それぞれ総モーメント、総せん断力として示した。一方、B法では、単位幅当りの解析結果をスーパー・リブの1つのT字当り(幅=6m)に換算し図に示した。

図-8、9をみると、曲げモーメント、せん断力のいずれもGL-5m付近で、A法の解析結果が急激に大きくなっていることがわかる。これは、A法では、応力が集中する部分の解析結果をとり出しているためである。総曲げモーメントに関してみると、B法の解析結果は、A法を上回っており、その値は最大値で約5,500 tf·mであることがわかる。また、総せん断力に関しては、GL-15m以浅でB法の解析結果がA法を上回り最大値で550 tf程度となっている。しかしながら、GL-15m以深ではA法の解析結果は、B法に比べ総せん断力の深さに対する減少が小さいことがわかる。

以上、A法、B法の解析結果を示したが、リバーサイド隅田での実設計は、いずれの解析結果に対しても、スーパー・リブが十分耐力を有するようにしている。

4. 実測結果による設計の確認

リバーサイド隅田におけるスーパー・リブの側圧、変形、応力の実測結果を図-10~13に示した。これらの図

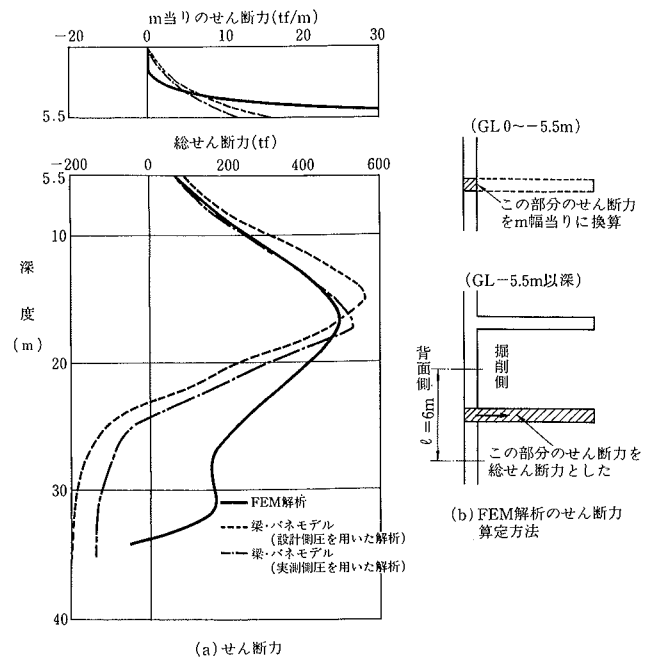
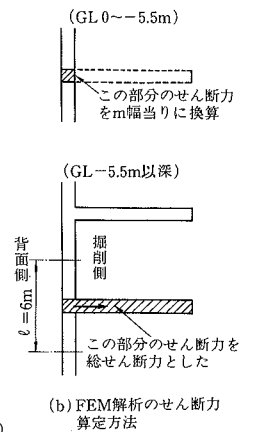


図-9 スーパー・リブのせん断力 (3次掘削ステップ)



においては、図-2に示した高層棟モニターゾーンを各次掘削ステップの深さまでおおむね掘削完了した時点の実測結果を、各次掘削ステップ完了時の値として示している。

実測側圧は、図-10に示したように、リブパネル、フラットパネルとも、3次掘削ステップの深さ付近までほぼ同じ値で、3次掘削ステップの深さに対し求めた側圧係数0.6~0.4の間にあり、設計で用いた側圧係数の設定が妥当なものであったことがわかる。

図-11によると変形量は、掘削回数が進むにつれて大

きくなっている。リブパネルの変形についてみるとGL-5.5, -22 mとスーパー・リブの平面形状が変わる深さで、変形の傾斜角度が大きくなっていることがわかる。また、変形形状は、GL-35 mの先端部分からGL-22 m付近まではほぼ直線であり、スーパー・リブが先端から回転変形していることがわかる。一方、フラットパネルの根入れはGL-22 mまでで、それ以深は地中部となるが、地中部のGL-30 m以深ではほとんど変形がなく、このことから、リブパネル間の中央の地盤は、GL-30 m以深では、スーパー・リブの変形による影響を受けていないことがわかる。

3次掘削ステップにおける実測変形を、図-7に示した。この図によると、A法の解析結果は、実測変形とかなり良い対応を示していることがわかる。一方、B法の解析結果は、スーパー・リブの先端GL-35 mからすでに実測変形を下回っており、地表面の最大変形量で実測変形量の2/3程度である。これは、解析上スーパー・リブの先端条件を固定としたことが主な原因と考えられる。

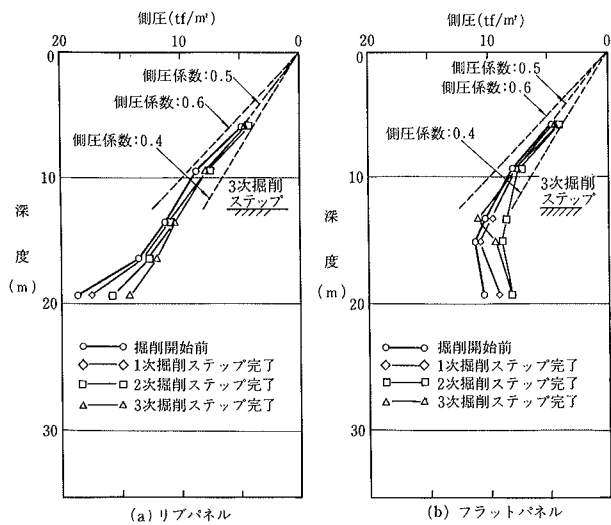


図-10 実測側圧

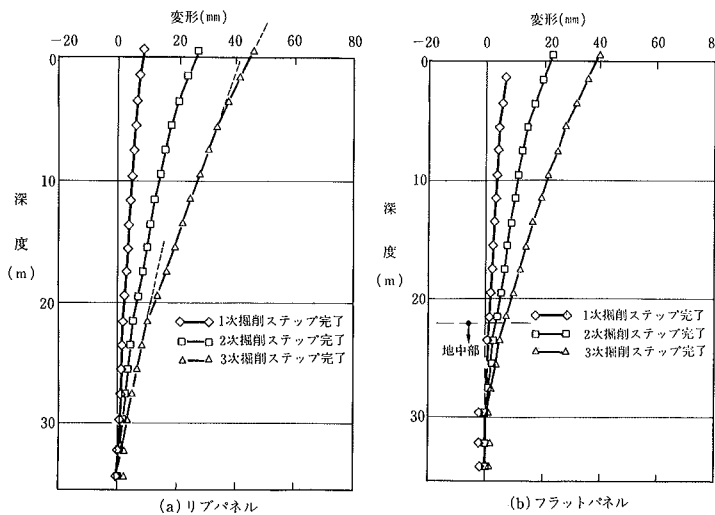


図-11 実測変形

鉄筋応力(鉛直方向)の実測値を、図-12, 13に示した。図-12に示すように、フラットパネルの鉄筋応力はいずれも引張側にあり、その大きさは最大でも200 kgf/cm²程度である。リブパネルの鉄筋応力を、図-13に示したが、この図から主に背面側に引張応力が発生し、特に、スーパー・リブの平面形状が変わるGL-5.5, -22 m付近で大きい値を示していることがわかる。鉄筋応力の最大値は、GL-25 m付近の引張応力で1,000 kgf/cm²程度である。また、リブパネルの水平方向の応力分布については、GL-15 m以浅では、複雑な挙動を示しているが、それ以深については、背面側から掘削側へ向うにつれ、引張応力が徐々に圧縮応力になる分布を示している。この応力分布は、スーパー・リブの先端に近いGL-33 m付近でもみられ、曲げモーメントが先端まで到達していることがわかる。

スーパー・リブの曲げモーメントの3次掘削ステップにおける実測結果を、図-8に示した。この曲げモーメントに関しては、リブパネルの実測鉄筋応力から算定したが、GL-5.5 m以深での曲げモーメントについては、風間²⁾らが、T字型断面の曲げ剛性および抵抗モーメントを求めた方法により、スーパー・リブの背面側および掘削側外端の鉄筋応力と曲げモーメントの関係を求め、この関係と実測結果の鉄筋応力から値を定めている。

図-8によると、A法による解析結果は、GL-30 m以浅で、実測曲げモーメントに比べ小さい値を示し、最大値で比較すると実測曲げモーメントに対し約25%の過小評価となっていることがわかる。B法の解析結果は、GL-20 mより浅い所で、実測曲げモーメントと良い対応を示しているが、それ以深では解析結果が実測曲げモーメントより大きな値を示し、スーパー・リブ先端で2倍程度となっている。これは、変形の場合と同様、解析上スーパー・リブの先端条件を固定としたためと考えられる。

以上、変形に関しては、A法の解析結果が、実測変形

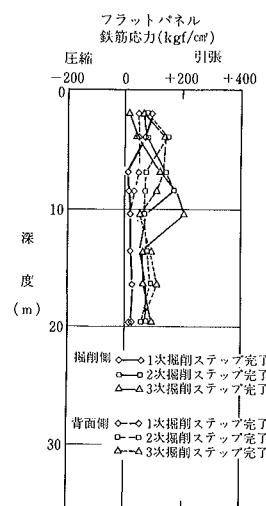


図-12 実測フラットパネル鉄筋応力

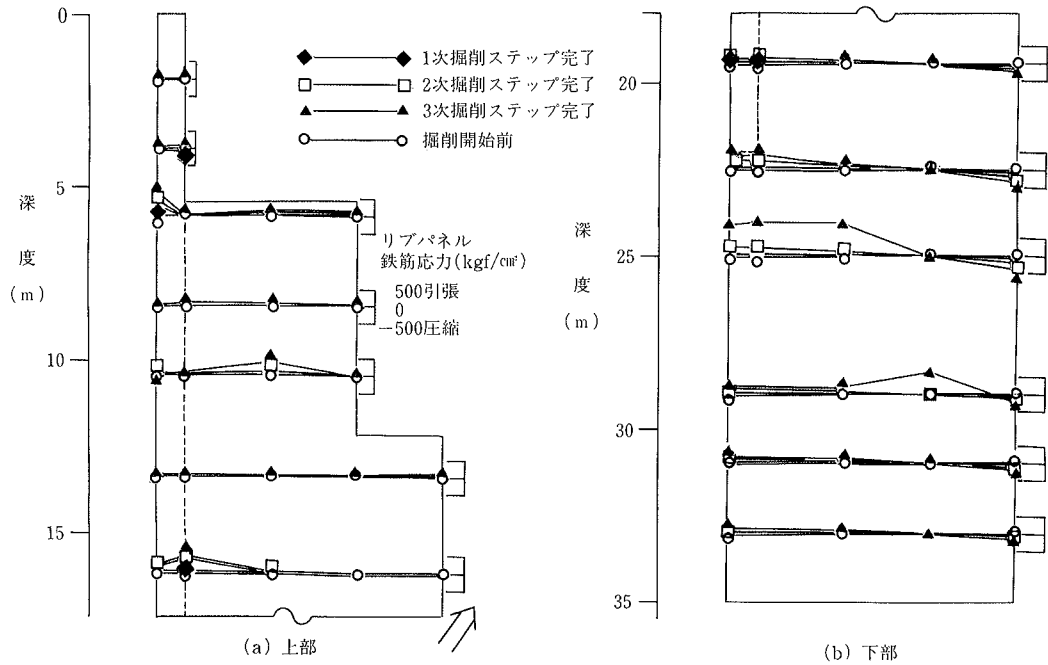


図-13 実測リブパネル鉄筋応力

とかなり良い対応を示したこと、曲げモーメントに関しては、鉄筋応力の最大値が引張応力で1,000 kgf/cm²程度であったこと、実測曲げモーメントに対しB法の解析結果が、安全側の値であったこと、などがわかった。

5. 設計法の検証

スーパー・リブの設計に用いたA法、B法の解析のうち、汎用性の高いB法について、各次掘削ステップごとに実測側圧を入力し、図-6に示した仮想根切り深さを変化させた解析を行い、実測結果と比較してみた。このうち、解析結果と実測結果の対応が比較的良かった仮想根切り深さを6mとした3次掘削ステップでの解析結果を、図-7~9に示した。

図-7によれば、解析結果の変形は、4章で示した設計に用いたB法による解析結果と同様に、実測変形に比べ小さい値を示している。このことはスーパー・リブの先端GL-35mからすでに見られる。これは、4章でも述べたように、解析上のスーパー・リブの先端条件を固定としたことによるものと考えられる。

曲げモーメントに関しては、図-8からわかるように、解析結果はGL-20mより浅い所で、実測曲げモーメントとかなり良い対応を示しているが、それ以深では、解析結果が実測曲げモーメントを上回る値を示している。これも、変形と同様、解析上スーパー・リブの先端条件を固定としたためと考えられる。

せん断力に関しては、実測結果は無いが、図-9の設計に用いた解析結果と比べると、GL-15m以浅は、A法にほとんど一致していることがわかる。

以上より、B法については、スーパー・リブ先端部分の支持条件を固定とせず、バネ支承とし、これを適切に評価すれば、スーパー・リブの挙動をより正確に予測でき、

設計法としても用いることができるものと考えられる。

6. まとめ

スーパー・リブは、切梁、腹起しなどの支保工なしで掘削を可能とするため、連続地中壁をT字型とし剛性を高めた自立山留め壁であり、その形状は立体的である。

本報告では、このように立体的な形状を持つスーパー・リブの三次元FEM、および梁・バネモデルにスーパー・リブの立体的形状を考慮した解析法による設計を示し、この設計とスーパー・リブの実測挙動とを比較した。さらに、梁・バネモデルにスーパー・リブの立体的形状を考慮した解析法により実測側圧を用いた解析を行い、実測挙動と比較した。

その結果、本報告で示したスーパー・リブの設計は、妥当なものであること、および今後十分な検討は必要なものの、梁・バネモデルにスーパー・リブの立体的形状を考慮し、先端部の支持条件を固定とせずバネ支承とした解析法により、スーパー・リブは設計できることがわかった。

謝辞

スーパー・リブの開発に当たり、温かいご助言とご指導を頂きました早稲田大学 風間 了教授に深謝致します。

参考文献

- 1) 茶谷文雄：水平力を受ける壁杭の挙動について、壁杭の水平抵抗に関する研究(その2)、日本建築学会構造系論文集, No. 411, p. 131~142, (1990. 5)
- 2) 風間 了, 宮崎祐助：自立山留め壁の挙動(その1. 設計に関する一考察)、第26回土質工学研究発表会発表講演集, p. 1511~1512, (1991. 7)