

ジオドームのスパイラル支保効果に関する 模型実験とFEM解析

The effects of spiral support on the Geo-Dome in model tests and FEM analyses

山口 健*・大川 孝**・村松 正重***・後藤 聡****

Takeshi YAMAGUCHI, Takashi OKAWA, Masashige MURAMATSU, Satoshi GOTO

Deep underground space (Geo-Dome) is under planning. Main supporting system of Geo-Dome is the use of the ring compression effect by the surrounding spiral tunnels around the Geo-Dome.

In order to validate the ring compression mechanism of the spiral tunnels, model tests were performed by changing the pitch of the spiral tunnels. Model test apparatus is the cylindrical shaped chamber (diameter:150cm, height:70cm) which is possible to apply vertical and horizontal stresses to the model ground independently. Cylindrical hole in the model ground (diameter: 20cm) was supported by the inner pressure at the beginning of the tests. By decreasing this inner pressure, soil deformation was measured at the boundary of the ground, and the tensile forces of spiral tunnels were also measured by the strain gauge on the spiral tunnels. Moreover, FEM analyses were performed to simulate model test results.

Key Words: geo-dome, excavation, arching effects, model tests, FEM analysis, 3-D analysis, spiral tunnels

1. はじめに

ジオドームは、図-1(a)に示すように、都心部の深さ50m~100mの半固結堆積岩(洪積層)から固結堆積岩(軟岩)地盤に構築される直径約50m、高さ約30m程度のドーム状の空間である。ドーム状空間への地上からのアクセスは、ドーム天端へ接続する直径約10mの立坑による。ジオドームは都心部に構築されるため、建設時の地上占有スペースを極力小さく抑えることができる。このためジオドーム工法は、地上よりの大規模掘削ではなく、アクセス用の立坑からドーム空間を構築する方法である。ジオドーム工法の主なコンセプトは以下の通りである。(1) スパイラルトンネルとロックボルトによりドーム周辺地盤の変形を抑止し、地盤を補強する。一体化されたスパイラルトンネルと周辺地盤が、ドーム掘削による掘削解放力に抵抗し、空洞の安定を保つことができる(スパイラル天盤構造効果と呼ぶ)。(2) ドームの水中掘削により周辺地盤の負担を軽減する(水中施工効果)。(3) ドームの水中掘削、水中ライニングなどにより周辺地下水位に影響を及ぼさない。ジオドームでは、3つの支保工、すなわち、スパイラルトンネル、ロックボルト、およびライニングが水中掘削と組み合わせられて施工される。

* (財) エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター
*** (財) 先端建設技術センター

**大成建設(株)
***大成建設(株) 技術研究所

これらの中で、スパイラルトンネルの役割は、ドームの円周方向の荷重に対して、スパイラルトンネルの螺旋形状がリング効果を発揮しこれに抵抗し、周辺地盤を安定させることである。ここで、スパイラルトンネルは完全な併合リングではなく螺旋形状であるので、円周方向の荷重に対してどの程度リング効果が発揮されるかを定量的に評価しなければならない。さらに、スパイラルトンネル間の地盤に発生するアーチ効果もドーム周辺地盤を安定させる要因となる。よって、スパイラルトンネル間のピッチ、地盤との付着力の影響についても明かにする必要がある。また、スパイラルトンネルのリング効果を比較検討するために、螺旋ではなく閉塞しているリングを用いた実験と、全くトンネル模型を用いていない（無補強）実験も行った。本論文では、スパイラルトンネルの天盤構造効果について、その支保効果やメカニズムを解明するために実施した実験や解析について報告する。

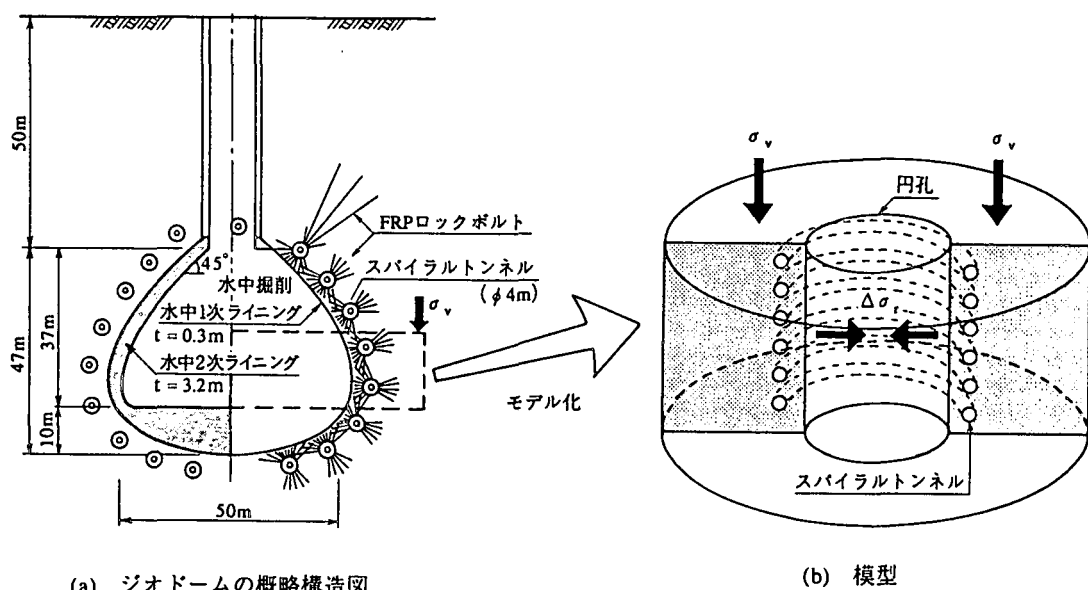


図-1 ジオドームのモデル化

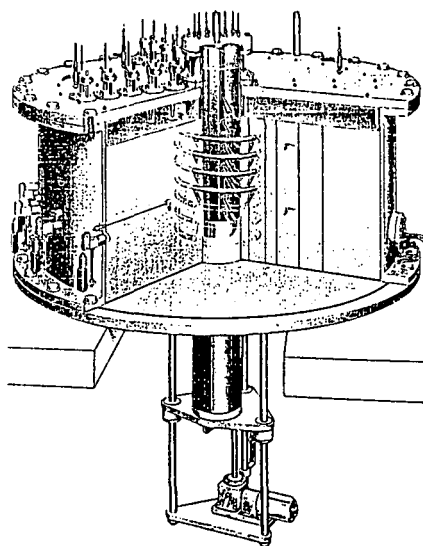


図-2 実験装置の概要

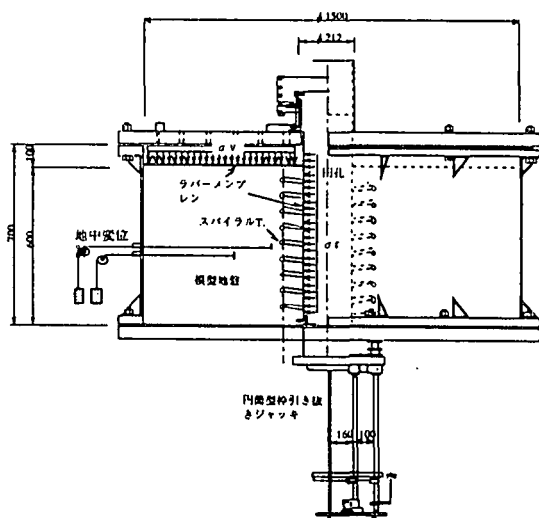


図-3 土槽の断面図

これらの目的のために、図－1(b)に示すように実物の一部を模型として取り出し、その部分に作用する応力を模型地盤に与え、掘削を模擬するために円孔の内圧を減圧（除荷）する実験を行なう。また、本実験で使用する模型は円筒状であり、ドーム状の模型を使用していない。これは、図－1に示すように、実物のジオドームの一部分を取り出しモデル化することが目的で、ジオドーム全体をモデル化することでは無いためである。また、円筒状の模型で得られた結果は比較的评价しやすいことも理由の一つである。ここで、部分模型であるから全体に関する力学的な相似則は考慮していないが、スパイラルトンネルの支保効果の検討が主な目的であるから、スパイラルトンネルと地盤との剛性比が支配的な要因であると考えられる。

2. 実験方法

2. 1 模型および実験装置

図－2に実験装置の概要を、図－3に土槽の断面図をそれぞれ示す。土槽は内径150cmの円筒状であり、深さは70cmである。土槽は圧力容器となるため、上部および下部は十分な強度と剛性を有する圧力蓋の構造となっており、Oリングにより完全にシールされている。上蓋下面には、ラバーメンブレンで覆われた圧力室が設けられ、同室内に水を注入し空気圧により加圧することにより、模型地盤に任意の上載圧を加えられる構造となっている。模型地盤は図－3に示すように直径150cm、高さ60cm、中央部に直径20cmの円孔を有するドーナツ状の飽和砂で、円孔まわりにスパイラル型またはリング型のトンネル模型をセットしている。

模型実験に用いた材料の物性を表－1に示す。スパイラルトンネルの模型は、テフロン棒（ ϕ 20.6mm、ヤング率 $E=5000\text{kgf/cm}^2$ ）を用いてリング型およびスパイラル型に加工した。スパイラルトンネル模型の表面には模型地盤と同じ砂を張りつけ最大限の付着力が発揮できる場合と、スパイラルトンネル模型の表面にグリースを塗り付着力が最も小さい場合について比較検討した。さらに、トンネル模型の表面にはひずみゲージを貼り付け、発生する軸力を測定した。模型地盤としては、6号珪砂（平均粒径0.3mm、均等係数2.13、最大粒径0.85mm）を相対密度が約50%になるように空中落下法により作成し、炭酸ガスを通し水で飽和したものをを用いた。この時の模型地盤の乾燥密度は約 1.55t/m^3 であった。

2. 2 実験手順と計測項目

模型地盤の作成方法について以下に説明する。

①円筒型枠とラバーメンブレンを土槽内にセットする。ただし、ラバーメンブレンの初期の外径と模型地盤中心部の孔の外径がほとんど同一になるようにしているので、ラバーメンブレンの張力はその初期において地盤に対して作用しない。②スパイラル型またはリング型トンネル模型を円筒型枠の周囲にセットする。③

空中落下法（2mmふるいを使い、落下高さ60cm）で砂地盤を作成する。ただし、落下高さが60cmであるので、トンネル模型の下

方にも砂は十分に堆積

した。さらに、土槽下部より炭酸ガスおよび水を注水し飽和させる。④上蓋をセットし、上載圧および内空圧を表－2に示す所定の圧力まで加圧する。

表－1 模型実験に用いた材料

模型部材	材料	使用形状・状態	材料特性
地盤	6号珪砂	$D_r=50\%$ ($\gamma_d=1.55\text{t/m}^3$)	$E_{50}=100\text{ kgf/cm}^2$
スパイラルトンネル	テフロン棒	$\phi=20.6\text{ mm}$	$E=5000\text{ kgf/cm}^2$ $EA=16,660\text{kgf/cm}^2\cdot\text{cm}^2$

表－2 実験条件

初期載荷圧		減圧過程	
上載圧 σ_v (kgf/cm^2)	円筒孔内圧 σ_r (kgf/cm^2)	減圧増分 $\Delta\sigma_r$ (kgf/cm^2)	最終円筒孔内圧 (σ_r) (kgf/cm^2)
1.5	0.68	0.05	0.03

事前の室内K₀圧密試験結果より、K₀=0.45であったので、表-2に示すような比率で圧力を設定した。⑤円筒型枠をゆっくり下から引き抜く（約5mm/min）。下蓋下部には、円筒型枠を真直ぐに引き抜くための装置が取り付けられている。ここで、円筒型枠とラバーメンブレンの間にはグリースが塗布されており、内空変位をモニターしながら円筒型枠をゆっくりと引抜き、内空変位が変わらないように内空圧を調整する。（ほとんどの実験ケースにおいて、この時の内空圧は上載荷重圧1.5kgf/cm²に対して実測値で約0.68kgf/cm²で、垂直圧と水平圧の比K₀は約0.45に相当した。）⑥表-2に示す実験条件で内空圧を減圧し掘削を模擬し、図-4に示す各種の計測を行う。

各種の計測器の配置の概要を図-4に示す。主な計測項目は、模型地盤上面の沈下を測定するための非接触型の変位計、模型地盤の内空変位を測定するためのカンチレバータイプの変位計および水圧計などである。本報告では模型地盤上面の沈下と内空変位の変化について報告する。

2. 3 実験ケース

初期載荷圧および円筒圧の減圧増分などの実験条件を表-2に、実験ケースを表-3にそれぞれ示す。検討する実験パラメータは、①スパイラルトンネル模型のタイプ（スパイラル型と閉塞リング型）、②スパイラルトンネルのピッチ③スパイラルトンネルと模型地盤との付着力の大小、などである。また、比較検討のために、スパイラルトンネル無しの模型地盤のみの実験も行った。

表-3の実験ケースに示すように、模型地盤の密度は全て同じになるように作成した。

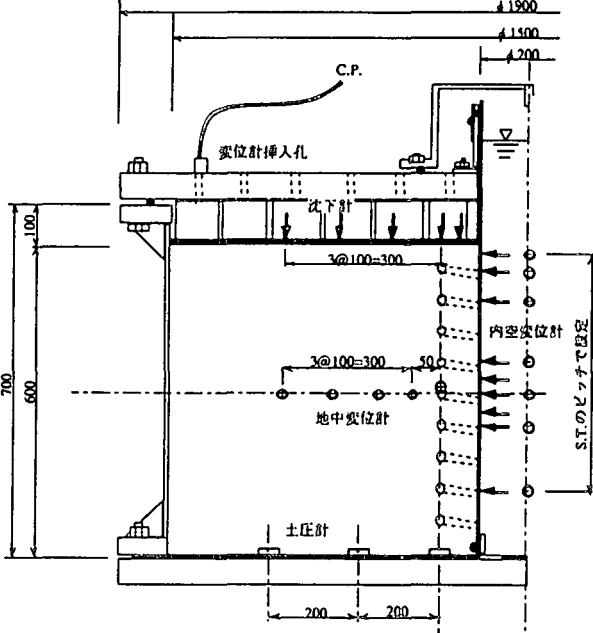


図-4 各種計測器の配置

表-3 実験ケース

実験 NO.	スパイラルT 形態	スパイラルT		備 考
		付着力	ピッチP (mm)	
1	なし	-	-	地盤のみ
2	R (リング)	大	100	閉塞リング (標準)
3	R	大	140	リングピッチ大
4	R	大	60	リングピッチ小
5	S (スパイラル)	大	100	S.T.標準ケース
6	S	大	140	S.T.ピッチ大
7	S	大	60	S.T.ピッチ小
8	S	小	100	S.T.付着小

地盤剛性E_g=100kgf/cm²
 スパイラルトンネル模型の剛性 Es=5000kgf/cm²
 スパイラルトンネルのかぶり=50mm

3. 模型実験結果

3. 1 孔内変位と地盤変形

模型地盤の円孔内には初期応力として 0.68kgf/cm^2 の水平応力が加えられているが、これを次第に減圧（掘削を模擬）することによって、地盤に変形が生じる。最終の孔内圧を 0.06kgf/cm^2 まで減圧した時点における孔内変位の深さ方向の分布を、リング型とスパイラル型について図-5(a)(b)にそれぞれ示す。リング型やスパイラル型を円孔周辺に設置することによって、応力開放による地盤変形は抑制され、孔内変位が減少することが分る。同一ピッチでリング型とスパイラル型を比較すると、ピッチ100mmのリングのケースを除いてほぼ同程度の変位量を示しており、地盤変形を抑制する効果はほぼ同じであるといえる。ただし、上部端においてスパイラルの方が孔内変位が大きくなる傾向がみられる。これは、下端は剛な底盤で固定と考えられ、上端部はラバーゴムを介して圧力が作用しているため変位の拘束程度が下端よりも小さく、しかもスパイラル型であるためだと考えらる。また、図-5(a)において、ピッチ100mmのリング型の実験結果のみが、他のケースと比較して内空変位が大きく計測されている。この理由は不明であるが、このケースのみ他と異

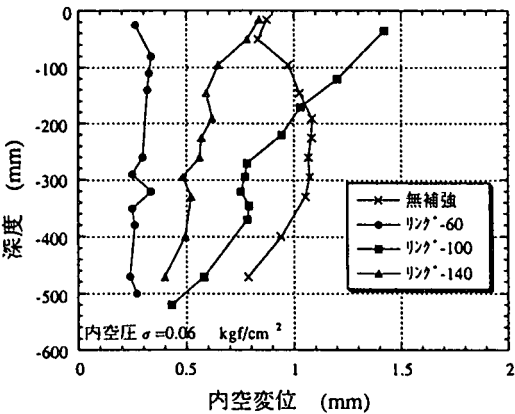


図-5(a) 深度と内空変位の関係 (リング型)

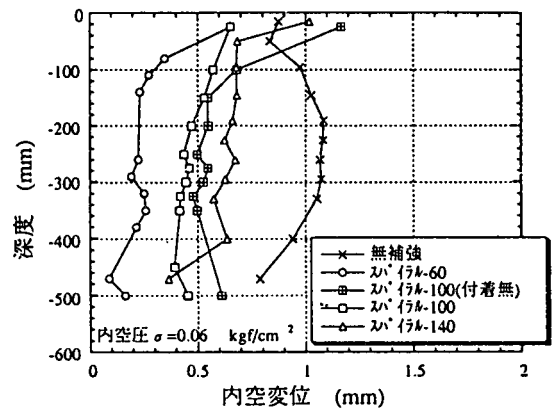


図-5(b) 深度と内空変位の関係 (スパイラル型)

なる傾向を示すことから以下の考察では、このピッチ100mmのリング型のケースを除いて行う。また、図-4に示す計測断面は、変形の真円性を確認するために、90度回転した2断面において計測されている。計測結果については示さないが、これらの2断面における模型地盤上面の沈下と孔内変位の計測結果はほとんど同じであり、変形がほとんど真円状態であることが確認されている。

次に、スパイラル型やリング型においてもピッチが小さいほど、変形の抑制効果が大きいことがわかる。これは、スパイラルトンネル間の地盤に発生するアーチ効果によって説明することができる。また図-4に示すように、中程の深度においては、地中変位計をスパイラル間に設置しているが、スパイラル間の地盤の変形はほとんど計測されなかったため、どのケースにおいてもリング間

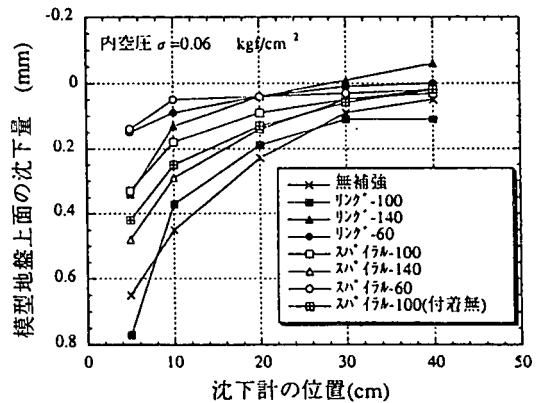


図-6 模型地盤上面の沈下量と位置の関係

の砂が円孔方向に移動するような中抜けの現象は生じていない。

次に、スパイラルと地盤の付着を低減した場合を図-5(b)に重ねて示しているが、付着のあるものと比較して大きな変位差は生じていない。ただし、上下端でやや変形が大きくなっている。

孔内圧を 0.06kgf/cm^2 まで低減した時点における模型地盤上面の沈下を図-6に示した。横軸は円孔からの距離を示している。地盤中にスパイラル又はリングを設置することによって模型地盤上面の沈下が大きく低減されていることが分る。リングやスパイラルを設置した地盤では、ともにピッチが小さいほど沈下量も小さく、地盤とスパイラルの付着を低減したケースにおいては、模型地盤上面の沈下の増加がみられる。

次に、図-7に孔内圧と孔内変位の関係を示した。ここに、孔内変位の値は深度中央部の4点を平均して求めた。孔内圧を減少することにより孔内変位が非線形的に増加するが、スパイラル型及びリング型を設置したケースでは、地盤のみのケース（無補強）と比較して変位の増加が抑制されていることが分る。この傾向はピッチが小さくなるとさらに顕著になる。ところで、図-7の曲線は模型地盤の応力～ひずみ曲線とみることもでき、地盤のみの場合は、孔内圧がゼロに近づくにつれ孔内変位の増加は顕著になり、剛性低下も著しく破壊に近いことが分る。スパイラルの効果は、孔内圧がゼロに近づくにしたがって顕著であり、変形を抑制するとともに、剛性低下及び破壊も抑制していることが分る。

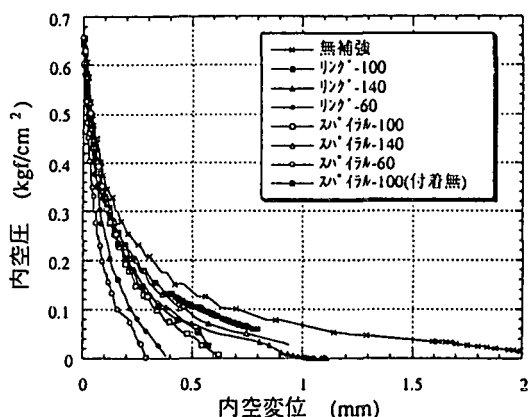


図-7 内空圧と内空変位の関係

3. 2トンネル模型に発生する軸力

リング型およびスパイラル型のトンネル模型に作用した軸力（孔内圧 $\sigma=0.06\text{kgf/cm}^2$ 時）とその測定点の深さの関係を図-8(a)(b)にそれぞれ示す。スパイラル型のトンネル模型に発生した軸力は、自由端部では極端に小さく $2\sim5\text{kgf}$ 程度であるが、自由端より深度方向に1リング分程度離れるとほぼ一定の値を示し、平均してピッチ60mmで 15kgf 、ピッチ100mmで 20kgf 、ピッチ140mmで 27kgf 程度の値を示す。ピッチが大きくなるとスパイラルに発生する軸力が大きくなる傾向を示す。ジオドームの掘削による解放力は、その1部がスパイラルトンネルの軸力となり、スパイラルトンネルにより負担される。よって解放力が同じであればスパイラ

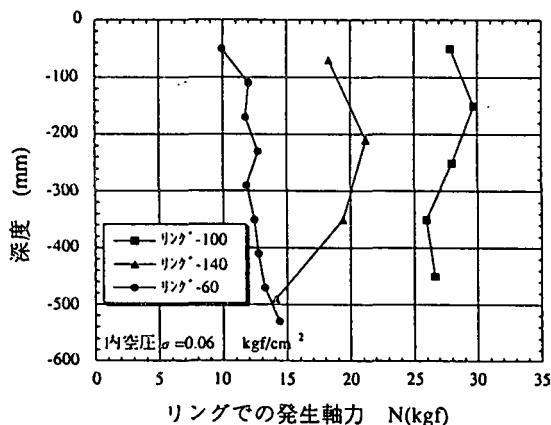


図-8(a) トンネル模型の軸力（リング型）

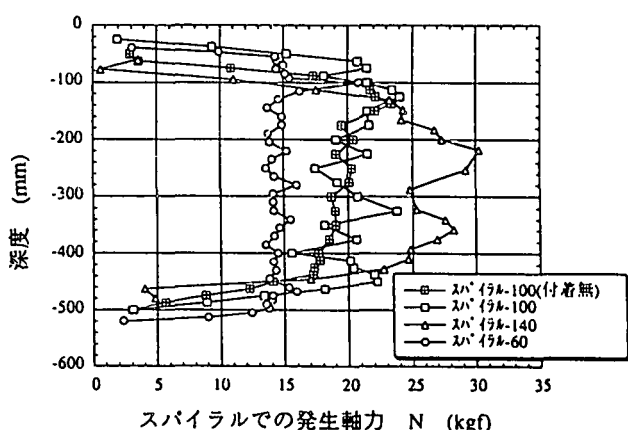


図-8(b) トンネル模型の軸力（スパイラル型）

ルトンネルのピッチが大きくなるほど、負担する軸力は大きくなる。

一方、リング型に発生する軸力分布はスパイラル型の軸力分布とは違い、深度に関わらずほぼ一定の軸力が発生する傾向を示す。リング型に関してはピッチ100mmにおける軸力が28kgfと一番大きく、ピッチ140mm(18kgf)、60mm(12kgf)の順となった。ピッチ100mmのケースに関しては、孔内変位が予想以上に大きくでたため、その結果軸力も大きく発生したものと考えられる。したがって、深度中央部と比較すると、ややスパイラル型が大きいものの、スパイラル型及びリング型ではほぼ同程度の軸力が発生していることが分る。スパイラルの表面に砂をまぶし地盤との摩擦を考慮したケースと表面にグリスを塗り摩擦を低減したケースと比較すると、摩擦を低減したケースは、上下端部における軸力の低下が僅かに見受けられるものの、両者には大きな差はみられない。

4. FEM解析

4. 1 FEM解析方法

地盤模型を線形弾性体として全応力のFEM解析を行った。ここで、無補強地盤およびリング型トンネルに対しては軸対称モデルを、スパイラル型のトンネルに対しては3次元モデルを用いた。また、スパイラルトンネル模型の表面の摩擦を軽減した解析ケースでは、ジョイント要素を地盤とトンネル模型の間に用いた。FEM解析はまず、スパイラルまたはリングを設置した地盤に対して、実験条件と同様に上載荷重1.5gf/cm²、孔内圧0.68kgf/cm²を作用させた状態で自重を考慮した初期応力解析を行う。さらに、変位をゼロクリアーして、孔内圧をゼロにし、内空変位、地表面変位などを計算する。表-4に解析に用いた定数を、図-9にスパイラルトンネルの場合

の3次元解析メッシュをそれぞれ示す。ただし、表-4に示す変形係数は、K₀圧密三軸伸張試験結果から求めた値を用いた。FEM解析を行ったケースを表-5に示すが、表-3に示す実験ケースの1,2,5,8の4ケースを行った。

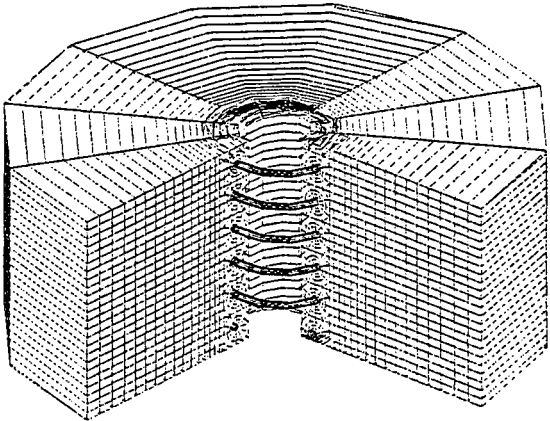


図-9 FEMメッシュ図(3次元解析用)

表-4 解析に用いた定数

	変形係数 E(kgf/cm ²)	ポアソン比 ν	単位体積重量 ρ d(g/cm ³)	鉛直バネ定数* kv(kgf/cm ³)	水平バネ定数* kh(kgf/cm ³)
地盤	100	0.2	1.55	1.0×10 ⁵	1.0
補強材	5000	0.35	2.17		

*はジョイント要素を用いた解析のみで使用

表-5 解析ケース

解析ケース	実験ケース	解析モデル	内 容
No.1	No.1	軸対称 FEM	支保なし(地盤のみ)
No.2	No.2	軸対称 FEM	リング, 10cm ピッチ
No.3	No.5	三次元 FEM	スパイラルトンネル, 10cm ピッチ
No.4	No.8	三次元 FEM	スパイラルトンネル, 付着小, 10cm ピッチ

4. 2 FEM解析結果

内空圧が 0.06kgf/cm^2 の時の内空変位と深度の関係を図-10に示す。付着の有無の影響は、円孔の上端を除いて、リング型とスパイラル型で内空変位はほとんど一致していることから、全く無いことが分る。また、無補強の場合はリング型やスパイラル型よりも内空変位が大きくなっていることが分る。これらの解析結果は、図-5に示した実験結果と定性的には同じ傾向であることが分る。

次に、解析により、スパイラル型およびリング型のスパイラルトンネル模型に発生した軸力の分布を図-11に示す。スパイラル型の場合は、付着無しの場合も示している。スパイラル型に発生した軸力は、上下端で小さく中程の深度ではほぼ一定の値を示している。また、地盤との付着の影響は上下端でやや差がみられるものの、ほぼ同程度と考えられる。一方、リング型に発生する軸力は、深度に関係なくほぼ一定の値を示している。これらの傾向は、実験結果も定性的に対応している。

5. 結論

ジオドーム構築技術におけるスパイラルトンネルの支保効果の確認を行う為に、室内模型実験を実施し、以下のことが明らかとなった。

- リング型やスパイラル型のトンネル模型を円孔周辺に設置することによって、応力解放による地盤変形は抑制され、孔内変位が減少する。
- リング型やスパイラル型のトンネル模型において発生する軸力は、上下端を除くとほぼ同程度発生しており、スパイラル型においても十分なリング効果が期待できる。さらに、ピッチを密にすることによって、その効果も向上する。
- 地盤とスパイラルの摩擦を低減した場合においても、摩擦を低減しない場合とほぼ同様な結果が得られた。
- スパイラルトンネルは、スパイラルの半径方向に直交する変位（沈下）も抑制する効果があることが分かった。

2次元および3次元による弾性FEM解析からも、実験結果とほぼ定性的に同じ様な結果が得られた。

6. 参考文献

- 1) 「ジオスペースの開発と建設機械」、社団法人日本建設機械化協会、pp.30-31

なお、本件は、通商産業省工業技術院産業科学技術研究開発プロジェクト「大深度地下空間開発技術の研究開発」の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構より委託を受け、実施したものである。

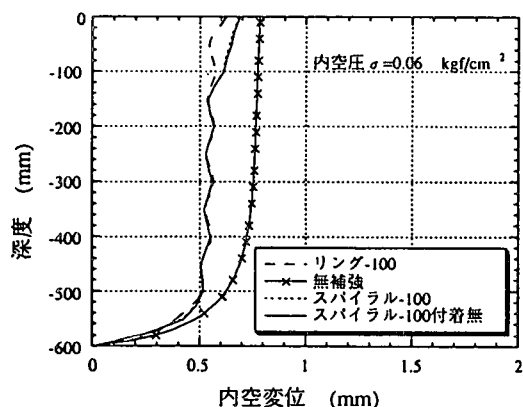


図-10 深度と内空変位の関係 (FEM解析)

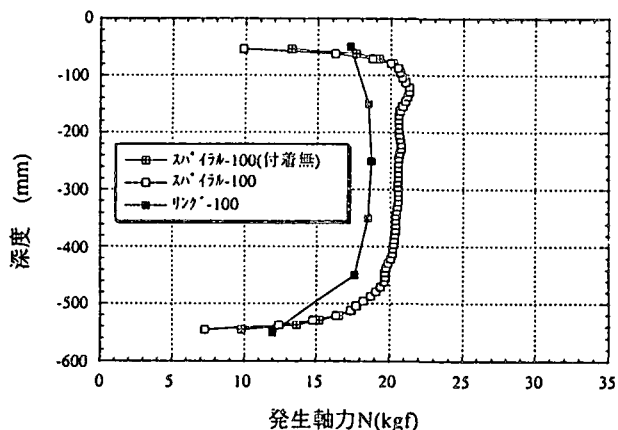


図-11 トンネル模型の軸力 (FEM解析)