

大深度地下空間開発技術の研究開発について (ジオドームプロジェクト)

Technology to develop a space in underground at a great depth (Geo Dome Project)

大川 孝*・梶 修**・細田 泰宏**・山口 健***

Takashi OKAWA, Osamu KAJI, Yasuhiro HOSODA, Takeshi YAMAGUCHI

This paper describes the possibility how to create the large underground space named "Geo-Dome". It is hoped that we can use deeper and larger underground space to establish several necessary and invaluable facilities in urban area. So we made up the new idea of the rational construction method for the large underground space through the research and development named "Technology to develop a space in underground at a great depth". we proved the validity of the support system, "spiral tunnel arrangement near the dome and underwater execution in it", by means of experiment in laboratory, construction of "Mini-Dome" and the numerical analysis concerning about "Geo-Dome".

1. まえがき

今日における都市域での地下空間利用は従来型の地下利用施設形態や技術的、経済的理由等から浅深度にとどまっている。今後は特に都市部における中、大深度での地下空間利用および立体的な大規模空間利用も期待される。その先駆的プロジェクトの1つとして平成元年度から平成8年度にわたり深度50m以深において直径50m、高さ30mのドーム状空間（以下ジオドームと称す）の構築技術（「大深度地下空間開発技術」）に関する研究開発を行った。本文ではジオドームの構築可能性に関する検討結果を中心に記述している。

2. ジオドーム概要¹⁾

2・1 ジオドーム

ジオドームとは主に都市部の深度50m以深に構築を予定している直径50m、高さ30m程度の無支柱ドーム状空間のことで、ドーム周辺には地上からのドームへのアクセスルートとしての直径10m程度の立坑とジオドームの空洞安定性向上のための螺旋状トンネル（以下スパイラルトンネルと称す）を配置している。ジオドームの概念図を図-1に、ジオドームと従来の構造物との比較を図-2に示した。

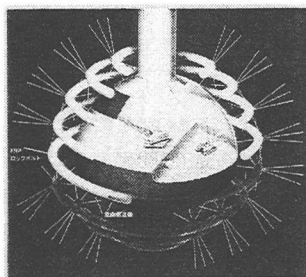


図-1 ジオドーム概念図

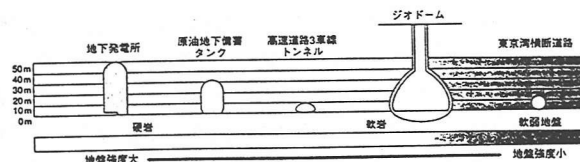


図-2 ジオドームと従来の地下構造物との比較

* 大成建設株式会社 土木プロジェクト推進部
** 正会員 大成建設株式会社 土木プロジェクト推進部
*** 財団法人エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター

2・2 ジオドーム構築方法の特色

一般的な都市部での地下構造物は土圧、水圧に抵抗するように構築されるが、ジオドームでは山岳トンネル工法のように外力による支保部材の負担を低減するために地盤自体の強度を期待する。また、大規模開削工法等を採用せず、アクセス用立坑（直径10m程度）からドームを構築するために地上の占有スペースを極力抑えることができる。さらにはジオドームでは以下の2つの新規構築原理を採用する（図-3参照）。

(a) スパイラル天盤構造効果

地盤の耐荷能力を活用するためにドーム掘削以前にスパイラルトンネル、ロックボルトを施工する。その結果、ドーム掘削時にスパイラルトンネルの螺旋形状によるリング効果によって地盤の掘削解放力の一部をスパイラルトンネルが負担し、ジオドーム周辺地盤の応力負担および地盤変形を低減することができる。

(b) 水中施工効果

水中下でのドーム掘削、ライニングを行うことによって地盤および各支保部材に作用する荷重を低減し、また湧水による砂層等の流出および周辺地下水低下の防止も図る。

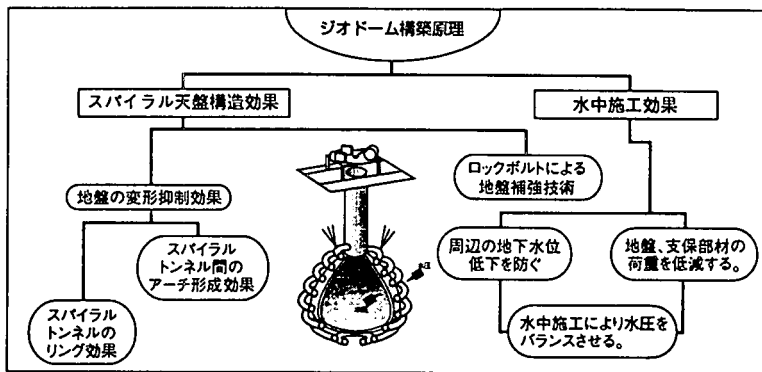


図-3 ジオドーム新規構築原理

2・3 ジオドーム構築に向けての開発課題

前述したように、ジオドームの基本条件は都市部において地上占有面積を極力抑えて地下水等の周辺環境に影響を与えずに50m以深に無支柱のドーム状空間（直径50m、高さ30m程度）を構築することであり、地質条件も半固結堆積岩から軟岩と広範囲にわたる。また、スパイラル天盤構造効果と水中施工効果という全く新しい構築原理を採用している。以上のことからジオドームの構築の可能性について以下の開発課題に関する検討を行った。

(a) ジオドームに関する設計思想の確立

(b) 地質条件、施工法、開発機械（軟岩急曲掘進機、現場成型型FRPロックボルト、水没自動掘削機、水没自動ライニング機）を総合化した施工システム、情報化施工技術の構築

2・4 ジオドームの施工法分類

ジオドームの施工対象地盤は半固結堆積岩から軟岩と広範囲であるために各々の地質条件に対応した最適なジオドームの施工法を選定する必要がある。そのため、ジオドームの施工法を図-4に示すような4ケースに分類した。この内のA、B、C工法はドーム掘削以前にスパイラルトンネル、ロックボルト施工を行ってスパイラル天盤構造効果を期待する施工法である。A工法はスパイラル天盤構造効果のみで施工中のドーム空洞の安定を保つ施工法であり、気中でのドーム掘削とする。A工法の地盤強度は3.0MPa～4.0MPa以上の軟岩が対象となる。ただし、この工法では掘削に伴う地下水低下に関する環境影響評価の検討が必要である。また、施工中のドーム空洞の安定がスパイラル天盤構造効果のみでは不足する場合には水中でドーム掘削を行う。これがB、C工法である。B工法の場合にはドーム掘削は水中で施工するが、2次ライニングは一時的に揚水し、気中で施工可能な地盤（一軸圧縮強度が2.0MPa～3.0MPa以上）が対象となる。C工法はドームの掘削、ライニング共に水中で施工し、ドーム完成後揚水

3. ミニドーム実証実験^{2) 5) 7)}

3・1 実証実験の主な実施内容

平成元年度から平成4年度まで行った数値解析結果によりジオドーム構築におけるスパイラル天盤構造効果および水中施工効果を確認し、さらにジオドームの基本構造と設計手順を策定した。平成5年度から平成8年度においては、上記の新規構築原理の1つであるスパイラル天盤構造効果に関して実証実験と実証実験により構築した数値解析モデルを用いたジオドームの構築可能性を行った。まず室内模型実験を行い、実験結果から模型レベル（理想状態）でのスパイラル天盤構造効果を確認した。さらに模型をモデル化した数値解析も併せて実施し、数値解析結果と模型実験結果とが定性的に同じ傾向になることが確認された。つまり、室内模型実験における数値解析モデル（手法）の妥当性が確認されたといえる³⁾。引き続き実地盤においてジオドームよりも小規模なミニドームを用いた実証実験（以下ミニドーム実証実験と称す）を行った。ミニドーム実証実験での主な実施内容を以下に示す。

- (a) スパイラル天盤構造効果の確認を含めたドーム掘削に伴うミニドーム周辺地盤挙動の解明
- (b) ミニドーム周辺地盤の挙動をシミュレートできるような数値解析モデルの構築

3・2 ミニドームの構造概要

ミニドームとは東急建設（株）地下実験場内（神奈川県相模原市）の既設立坑最下部地点（G.L.-50m）からG.L.-82.5mまでの範囲に位置し、主に立坑（直径4m、高さ20m）、スパイラルトンネル（高さ2.2m、延長178m）、ドーム（直径20m、高さ12.5m）から構成されている岩盤構造物のことである。ミニドームの概要図を図-6に、完成後のミニドーム内部状況を写真-1に示す。

3・3 ミニドームの構築順序

ミニドームは平成7年1月より立坑の構築を開始し、平成8年3月にドームの構築を完了した。

(a) 立坑構築

最初にドラムカット式切削機により立坑を掘削した。支保部材は吹付けモルタル（厚さ $t=10\text{cm}$ ）とロックボルト（直径 $D25\text{mm}$ 、長さ $l=3.0\text{m}$ ）とした。なお、立坑構築完了後にドーム構築に先立って立坑底部から地盤歪計およびH鋼応力計を設置した。

(b) スパイラルトンネル掘削

立坑構築完了後にスパイラルトンネル発進用の横坑を構築し、その後スパイラルトンネルを掘削した。掘削機械としてはドラムカット式切削機とツインヘッダーを使用した。支保部材はH鋼支保工を使用しており、弱面部には吹付けモルタルを行った。

(c) スパイラルトンネル内での計測器設置

スパイラルトンネル掘削完了後に計測器（地中変位計、スパイラルトンネル軸力計、ロックボルト軸力計）を設置した。

(d) スパイラルトンネル内コンクリート充填

スパイラルトンネル構築後に高流動コンクリートでスパイラルトンネル内部を充填した。

(e) ドーム構築

スパイラルトンネル内部のコンクリートが所定強度に達した後にドームを掘削した。掘削機械としては主にツインヘッダーとブレーカーを併用した。支保部材は吹付けモルタル（厚さ $t=15\text{cm}$ ）とロックボルト（直径 $D25\text{mm}$ 、長さ $l=1.5\text{m}$ ）とした。また構築途中で計測器（ロックボルト軸力計、地盤歪計）を設置した。

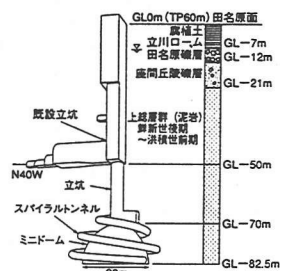


図-6 ミニドーム概要図

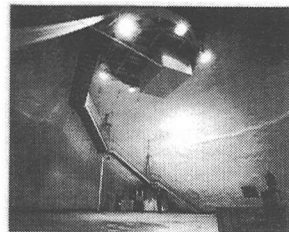


写真-1 ミニドーム内部

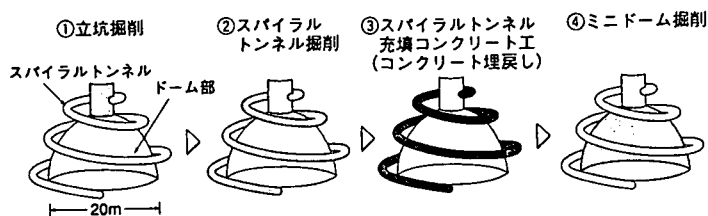


図-6 ミニドーム構築順序図

3・4 ミニドームにおける計測概要

ミニドームでは主にドーム掘削中、掘削完了後のスパイラルトンネルおよびミニドーム周辺地盤挙動を中心に計測を行った。

(a) スパイラルトンネルの挙動計測

- ・スパイラルトンネル内発生軸力（計測器：スパイラルトンネル軸力計）
- ・スパイラルトンネル変位（計測器：地中変位計）

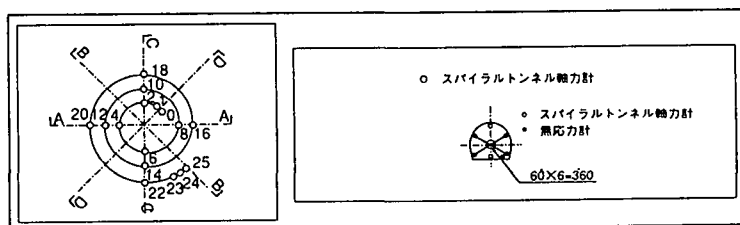
(b) ミニドーム周辺地盤の挙動計測

- ・地盤変位（計測器：地中変位計）
- ・地盤歪（計測器：地盤歪計）
- ・ロックボルト軸力（計測器：ロックボルト軸力計）

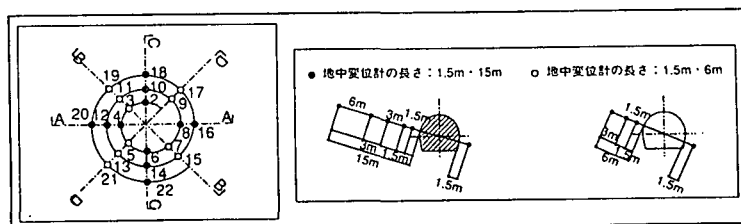
(c) その他

- ・立坑端部H鋼応力（計測器：H鋼応力計）
- ・吹付けモルタル内鉄筋計歪（計測器：鉄筋計）

スパイラルトンネルに設置した各計測器の平面配置図を図-7に示す。なお、図-7中の番号は計測断面番号を示しており、また地中変位計とロックボルト軸力計の両方が設置されている計測断面については、相互の計測器配置距離を1m以上離れた。

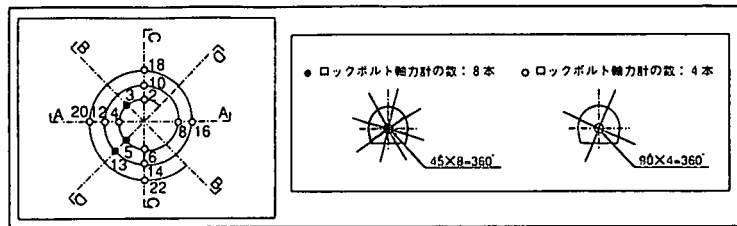


スパイラルトンネル軸力計



地中変位計

図-7 計測器配置図（その1）



ロックボルト軸力計

図-7 計測器配置図 (その2)

3・5 ミニドームに関する計測結果

ミニドームに関する計測結果としてスパイラルトンネル軸力と地盤変位について記述する。

(a) スパイラルトンネル軸力

ドーム掘削に伴う深度別スパイラルトンネル軸力を図-8に示した。この結果よりドーム掘削に伴ってスパイラルトンネルにトンネル軸方向の軸力が発生し、ドーム掘削完了時には最大で約11.8MN発生することを確認した。なお、計測断面14（深度：-74.9m）付近での軸力が周辺領域に比べて低い、これは今回のスパイラルトンネルの打設を2日に分けて行い、計測断面14付近に打継部が存在しているためであると思われる。そこで数値解析と比較検討する際に用いる設計検討データでは計測断面14付近の軸力を特異値として取り扱うこととした。

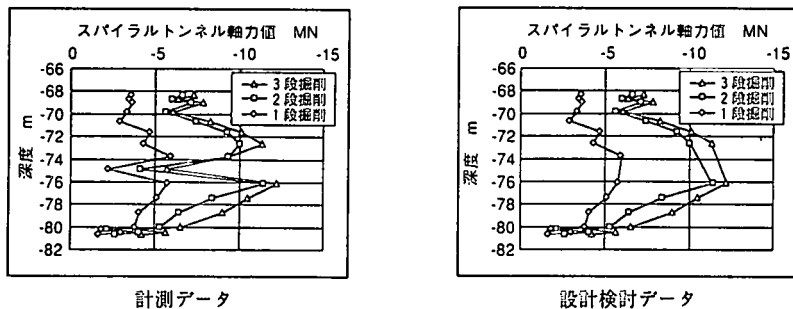


図-8 スパイラルトンネル軸力

(b) 地盤変位

ドーム掘削に伴う各計測断面に関する半径方向地盤変位を図-9に示した。図-9よりドーム掘削に伴ってドーム壁面変位およびスパイラルトンネル変位は増大し、ドーム掘削完了時にはドーム壁面変位が最大4.5mmになることを確認した。また、ドーム掘削完了後の長期計測結果から当該地盤では堆積軟岩の特徴であるクリープ挙動をほとんど確認できなかった。

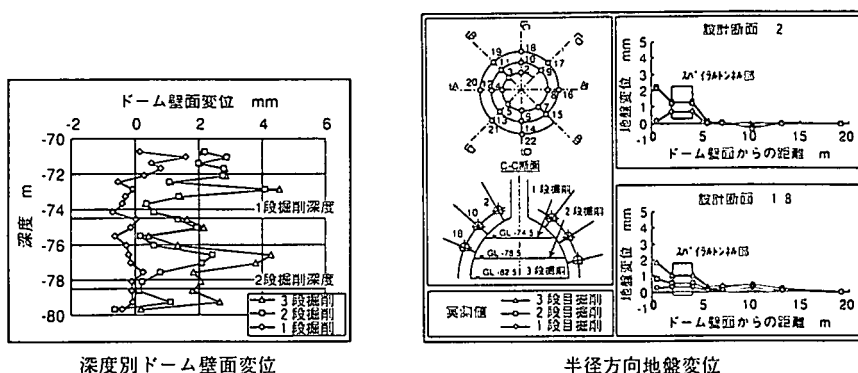


図-9 地盤変位

3・6 ミニドームに関する数値解析検討結果

ミニドームの設計手法の確立を行うために各種パラメータに対して3次元弾性FEM順解析を行い、計測結果との比較検討を行った。なお、数値解析に関するパラメータはミニドームを含めたジオドームの設計手法の確立に関して必要条件である以下の5項目とした。

- (a) ミニドーム対象地盤の弾性係数
- (b) ミニドーム対象地盤の側圧係数
- (c) スパイラルトンネルと地盤との境界条件
- (d) スパイラルトンネル周辺地盤の緩み領域の有無
- (e) ドーム周辺（底盤）地盤の緩み領域の有無

ミニドームのシミュレーション結果から、今後のジオドームの設計検討を行う際の留意点について述べる。

(a) 弾性係数

ミニドームでは各種力学試験から当初の弾性係数を 1.2GN/m^2 と設定したが、数値解析と計測結果との比較および計測結果から得られたミニドーム周辺地盤の歪レベルから掘削段階での弾性係数を 2.4GN/m^2 と修正した。なお、軟岩には変形係数の歪依存性が多いケースで確認されているためにジオドームの初期検討段階における弾性係数の設定は様々な力学試験結果による歪あるいは通常の岩盤構造物の設計で用いられる限界歪等を基準に行う必要がある。また、その後の掘削段階においてもジオドーム周辺地盤の歪を計測することによって弾性係数を再度検討する必要がある。掘削完了時における計測結果を含めた各弾性係数によるスパイラルトンネル軸力と地盤変位との比較を図-10、図-11に示す。

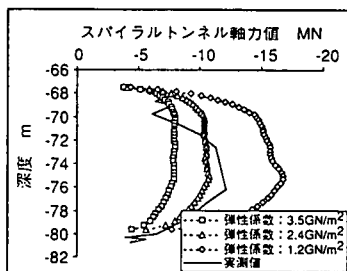


図-10 スパイラルトンネル軸力

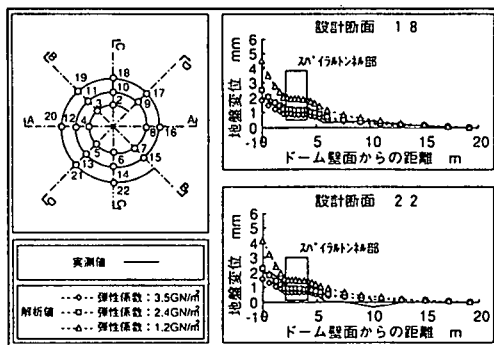


図-11 地盤変位

(b) 初期地圧

ミニドームでは初期地圧測定結果から地盤の異方性が確認されたが、数値解析と計測結果との比較から掘削段階においては等方的な挙動を示すことが確認された。この原因として原位置における測定結果が地盤の極めて局所的な応力（歪）状態を表していること等が挙げられる。そのために、構築対象地盤周辺ではできるだけ多くのボーリングを行い、また地質状況についても十分に把握することにより、広範囲にわたるマクロ的な地盤応力（歪）分布を設定する必要がある。

(c) スパイラルトンネルと地盤との境界条件

ミニドームではスパイラルトンネルの施工として従来工法（山岳工法）を採用しているために、掘削面がかなり粗い状態になっている。またスパイラルトンネル内部を高流動コンクリートで充填している。以上の施工条件および数値解析と計測結果とを比較検討した。この結果からスパイラルトンネルと地盤との境界条件に関しては滑り条件はないと判定した。なお、ジオドームの安定性を確保するためには引張強度を考慮しない、つまり剥離条件があるように設定するのが望ましく、また滑り条件に関しては滑りを極力起こさないようにする必要がある。そのため、スパイラルトンネルの施工時にはスパイラルトンネルと地盤との間には十分な付着力を有する構造にする必要がある。

(d) スパイラルトンネル周辺地盤の緩み領域

前述したようにミニドームではスパイラルトンネルの施工に従来工法（山岳工法）を採用しているために、掘削に伴い周辺地盤が緩んでいる可能性がある。そこで緩み領域の有無に関して、数値解析結果と計測結果とを比較検討した。その結果、スパイラルトンネル周辺地盤の緩みはないと判定した。なお、ジオドームにおけるスパイラルトンネルの施工は軟岩急曲掘進機により行うため、掘削に伴うスパイラルトンネル周辺地盤の緩み領域は従来工法に比べて小さいと思われるが、ジオドームの安定性を確保するためにはスパイラルトンネル周辺地盤の緩みを極力抑えるように施工する必要がある。

(e) ドーム周辺地盤（底盤）の緩み領域

ミニドーム内部の施工に関してもスパイラルトンネル施工と同様に従来工法（山岳工法）を採用しており、掘削に伴いドーム周辺地盤が緩んでいる可能性がある。そこで周辺地盤の緩み領域の有無について数値解析結果と計測結果とを比較検討した。その結果、ミニドーム周辺地盤の緩みはないと判定した。なお、ジオドーム掘削時においてもジオドームの安定性を確保するためには極力ジオドーム周辺の緩みを極力抑えるように施工する必要がある。

4. ジオドームの構築可能性検討⁶⁾

4・1 ジオドームに関する解析条件

室内模型実験結果、ミニドーム実証実験結果により妥当性が確認された数値解析手法を用いて、ジオドームに関する力学的挙動に関する検討を行った。なお、対象地盤は完全飽和状態と設定し、またジオドーム構造を完全止水体と取り扱った。なお、この場合のジオドームモデルは標準工法である図-4でのC工法を採用した。

4・2 標準モデルでのジオドームの力学的安定性に関する検討

標準モデルにおけるドーム掘削完了後、水抜き後の深度別ドーム壁面変位およびスパイラルトンネル軸力を図-12、図-13に示した。この結果よりドーム内部の水抜き後におけるドーム最大壁面変位は45mm、スパイラルトンネル軸力は88.3MN（軸応力：9.3MPa）となる。また、水抜き後における立坑およびドームのコンクリート応力を図-14、図-15に示したが、これらの結果からドーム内部水抜き後においても適切な鉄筋配置によりジオドームは力学的に安定するといえる。

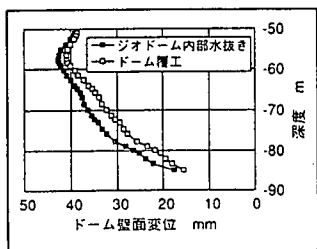


図-12 ドーム壁面変位

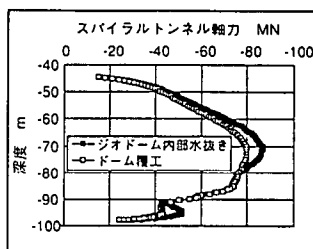


図-13 スパイラルトンネル軸力

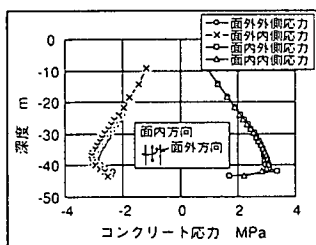


図-14 立坑コンクリート応力

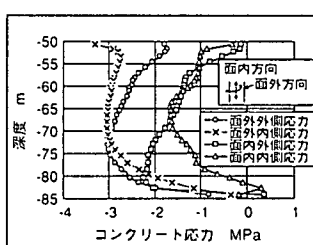


図-15 ドームコンクリート応力

4・3 ジオドームにおけるスパイラル天盤構造効果について

ドーム掘削完了後におけるドーム壁面変位を図-16に示す。この結果から水中施工時、気中施工時共にスパイラルトンネルを施工する場合にはドーム壁面変位が最大約25%低減することが確認された。これはジオドームにおいても水中施工時、気中施工時共にドーム掘削に伴い発生する掘削解放力の一部をスパイラルトンネルが負担するためである。以上のことからジオドームにおけるスパイラル天盤構造効果が確認されたといえる。

4・4 ジオドームにおける水中施工効果について

図-16よりスパイラルトンネルの施工の有無によらずドーム壁面変位が水中施工時の方が気中施工時に比べて最大約40%低減することが確認された。またドーム掘削完了後におけるスパイラルトンネル軸力を図-17に示す。図-17よりスパイラルトンネル軸力は水中施工時の方が気中施工時に比べて最大約40%低減することが確認された。これはドーム掘削に伴い発生する掘削解放力に関して水中施工時の方が気中施工時に比べて小さいためである。以上のことからジオドームでの水中施工効果が確認されたといえる。

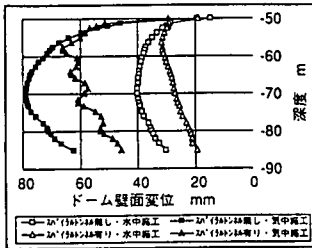


図-16 ドーム壁面変位

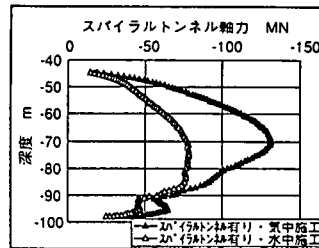


図-17 スパイラルトンネル軸力

4・5 各施工法におけるジオドーム施工可能領域の分類

次に、各施工法におけるジオドームの施工可能領域を検討した。なお、ここでの施工可能領域とは任意地点の地盤応力をDrucker-Pragerの破壊基準式を用いて安全率表示し、このジオドームの周辺地盤の安全率がほぼ1.0以上になる地盤条件の領域のことである。図-18、図-19に対象地盤の弾性係数の違いによる各施工法の施工可能領域を示した。この結果からスパイラルトンネルを施工したドーム水中施工時には地盤の弾性係数が大きくなるに従って施工可能領域が増大することが確認された。

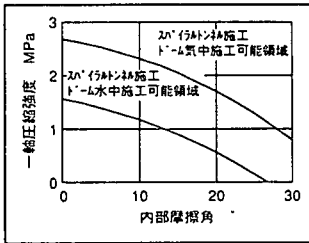


図-18 施工可能領域（弾性係数：100MN/m²）

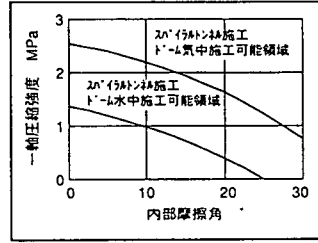


図-19 施工可能領域（弾性係数：300MN/m²）

4・6 ジオドームの構築可能性に関する考察

前述したように標準モデルでの力学的安定性は確認されたが、この場合の地盤は均質な軟岩と仮定している。しかし、実際のジオドームの対象地盤である軟岩～半固結堆積岩（洪積層）にはジオドーム構築に影響を及ぼす様々な力学特性および物理特性が存在する。そのため、これらの特性に対する影響要因としての対象地盤の含水状態、クリープ特性、歪状態等、さらには掘削に伴って地盤を急速に劣化させる膨潤現象（吸水により地盤の体積が増加する現象）やスレーキングについての検討が必要である。また、場合によっては亀裂等の不連続面や被圧水の噴出に伴う土砂流出や地下水位の低下についても検討する必要がある。以上のことから、本研究開発により標準モデルでのジオドームに関する設計技術は確立したと

いえるが、実際にジオドームを構築する場合には構築対象地盤の力学特性、物理特性を含めた力学的安定性の検討を行う必要がある。

5. おわりに

このジオドーム（「大深度地下空間開発技術」）に関する研究開発は通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度の一環として行われ、平成元年度から平成8年度にわたり新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から財団法人エンジニアリング振興協会・地下開発利用研究センターが委託を受けさらに民間各社が再委託を受けて当研究開発を行った。

6. 参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：大深度地下空間開発技術（パンフレット）
- 2) 財団法人エンジニアリング振興協会・地下開発利用研究センター：ミッドーム（パンフレット）
- 3) 山口 健・大川 孝・村松正重・後藤 聡：ミッ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、第2回地下空間シボシウム論文・報告集, pp.25-32, 1997.1
- 4) 近藤 紘一：ミッドームについて, 第2回地下空間シボシウム論文・報告集, pp.161-166, 1997.1
- 5) 猪熊 明・大川 孝：ミッドーム建設に向けてのミッドーム実証実験, 土木学会誌, pp.25-32, 1997.2
- 6) 大川 孝・梶 修・細田 泰宏：ミッドーム設計技術の開発, 第52回土木学会年次学術講演会報告集 共通セッション, pp.72-73, 1997.9
- 7) 大川 孝・梶 修・細田 泰宏：ミッドーム実証実験について, 第52回土木学会年次学術講演会報告集 共通セッション, pp.74-75, 1997.9