

— 研究展望
Review

研究展望

水没工法による深部軟岩でのドーム空間建造に関する構想研究 ——都市型 CAES の実現を目指して——

FEASIBILITY STUDY OF SUBMERGED GEO-SPACING IN DEEP SOFT ROCK ——AIMING AT URBAN CASE——

林 正夫*

By Masao HAYASHI

1. 要 旨

地球上の人口は 21 世紀に向けて、大都市に集まる傾向が強い。大都市の多くは大河川の扇状地である土丹・泥岩地帯に立地されている。ここでは未利用の大空間ではあるが、従来の土木技術の常識では困難な深部軟岩等でのドームを建造できる無人工法の発案を示し、大都市の社会資本として重要な輸送、衛生、治水、利水、エネルギー貯蔵などの公共施設を過密化する地上から深部地下に移し、地上を快適な人間空間に蘇らせ得る可能性を論じる。

例として地球環境向上と都市での大電力貯蔵になる圧縮空気貯蔵-ガスタービン発電の都市型の総合システムを提案した。その資源節約の特長と経済価値および随伴効果は、さきに報告した³⁾。

別な例として、環境・衛生対策に重要な下水場の汚泥消化槽の地中化が、効果的にここで述べた工法によって行い得ることを提案した。

(1) 無人で掘り地盤沈下のない水没工法を；人間を苛酷な地下労働から解放し、機械掘削した水没空間を水中コンクリートで無人で覆工する方法を示した。

(2) 崩れる地盤はまず崩しセメント固化してから本掘削する；汚泥中のモンモリロナイト、イライトなどは水和反応で崩れやすい。そこは水中でまず余掘りし、泥土をセメント固化後本掘削する。あるいは余掘り後、チューブコンクリートで仮巻きし固化してから、掘削を

繰り返す。チューブ型枠工法も用い得る。この工法により軟岩地帯もドームとして大規模に利用できる可能性が生じるように思われる。

(3) 深部で拡幅したドームを；立坑の下部を数倍に拡幅して掘るためにパンタグラフ溝切り機を考えた。これで放射状に半径方向の溝を多方向に掘り最後に円周方向に旋回し形状を仕上げれば、回転トルクはごく少なくて地中ドームができ水压で支えられた状態になる。パンタグラフは“く”の字形、“入”の字形等が考えられる。

(4) 水没ドームにコンクリート覆工を；内型枠は撓性らせん状チューブ型枠、二重メンブレン型枠等を考えた。連続して下部から段々この型枠とドーム壁の間に水中コンクリートを打設し固化後、型枠と水を地上に撤去すると覆工コンクリートに土圧がプレストレスとして導入され耐震的なドームができる。これは海底ドームの建造にも応用できよう。

(5) ドーム状連続地中壁は地中の曲線レールで；本体掘削の前に、卵形のコンクリート外周壁をまずつくりその完成後に本掘削すると、覆工に強いプレストレスが導入され高耐震構造になる。その外周面の溝切りとセグメントコンクリート打設のために曲線レール-スライドカッター工法を考えた。

(6) この構想は、浅い地下からしだいに深くまず汚泥消化槽、ついで深層曝気槽、燃料タンク、都市域の治水・利水・防災用水タンク、都市廃棄物の処理・処分タンク、さらには中流域での地下水用ダム、高効率の完全酸化曝気槽としても利用できるかもしれない。

タンクをより深く設ける方が効率的となる CAES 用圧気タンクは、初めは水没している軟岩地帯の石炭の廃坑を再利用しパイロットプラントとして実証テストが可

* 正会員 工博 東海大学教授 工学部土木工学科、(兼) 電力中央研究所顧問 (〒259-12 平塚市北金目 1117)

Keywords: CAES, rock mechanics, soft rock, submerged cavern, underground cavern

能なように思う。

(7) 地下水圧を利用してドームをつくる発想からすでに5年経った。この背景には堆積地質学・岩盤力学・土質力学・削井工学・水中機械工学・水中コンクリート工学・水中計測工学・耐震工学、さらにエネルギー工学・都市工学・防災工学・環境経済学等が絡まっていたり、実用化試験への壁が意外に厚いことがしだいにわかってきた。

ローマは一日にして成らずではあるがベルリンの壁が倒れ、モスクワの鉄のカーテンが急速に開かれる昨今、情報化のおかげでこの幻の壁にも意外に早く孔があき“新世紀の曙”を覗けるのもそう遠くないかもしれない。

2. 目的

大都市の人間生活は、輝やく太陽を享受できる地上で行うのが良いことは自明であるが、巨大な公共施設である高速鉄道・下水場・発電・変電・送電・衛生・燃料設備等は、積極的に地中化を図り、都市を快適な人間空間として蘇らせる努力は、21世紀の中心課題になるであろう。

しかし、大都市の多くは大河川の扇状地が多く、その地下は軟弱・軟質な地盤が多く、従来の土木技術であるシールド工法・ケーソン工法・NATM工法などでは、地下のドーム空間の建造は困難かつ危険で、コストも高く、その開発は著しく妨げられているといえよう。

著者は、地下水位を変化させないで、水没工法によって軟質岩盤にドーム空間を建造する Submerged Geo Spacing の技術構想を研究しつつあるので報告する。まだ構想段階であり、今後数多くの要素研究を積み重ねることが必要であるし、体系的なシステム解析を始めなければならないが、土木学会よりの求めに応じ未熟ではあるがその構想を披瀝し、21世紀に向けての土木技術者の開発目標となる“北極星”を探してみたい。

3. 着想

(1) 大都市の地下50m以深は未利用の大空間であるが、そこでの軟岩・土丹などの一軸圧縮強度 q_u は10~20 kgf/cm²、深さ600mでも、せいぜい30~40 kgf/cm²程度と考えておくべきである(写真-1)。たとえば東京湾の岸に沿った地域では、工業技術院地質調査所でのガス田の資源調査等のためのボーリングコア等の地質調査結果を総合して推定すると、星野・釜井らによれば¹⁾、図-1のように q_u が40~50 kgf/cm²の地層深度が描かれており、また図-2のように星野・渡辺・釜井らにより²⁾、 q_u が200 kgf/cm²の地層深度が描かれている。

このような東京湾岸で、Compressed Air Energy



写真-1 東京湾深部の泥岩 (三浦層)

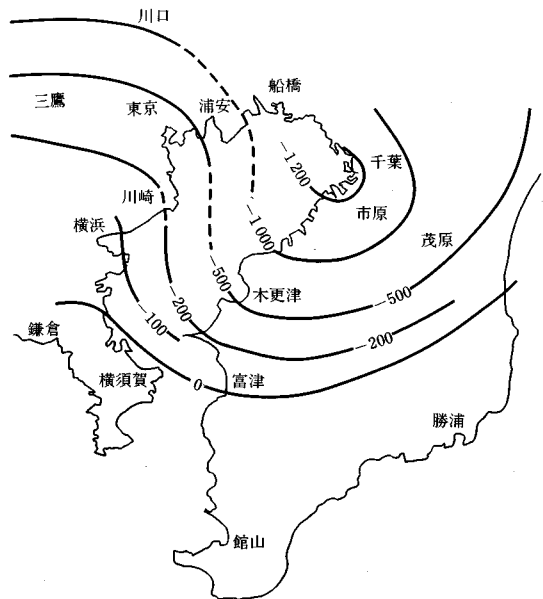


図-1 一軸圧縮強度 40~50 kgf/cm² の地層深度 (単位: m) (星野・釜井による予想図)

Storage—Gas Turbine 発電のためには熱効率がよくなる60気圧の地下圧気タンクを、水圧補償型式によることにして、600mの地下水圧下に、すなわち600mの深さのところにつくり、10万m³程度(直径50m、高さ60m相当)を建造できれば、40万kW出力のピーク発電が7時間可能になる大電力貯蔵システムが、都市型のCAES-GTとして実現できるのではないかと著者は考えた(表-2)。その発電システムの技術性と経済性、さらに資源節約の特長などは、さきに報告した³⁾。その場合の圧気タンクは水没タンクで、図-3のように深夜電力によりコンプレッサを地上で運転し、送気管を通じて圧気を地下タンクに貯蔵し、そのときは水は送水管を通じ地上に排出しておく。昼間に発電のときは、ガスタービンの燃焼用の空気として圧気をガスタービンの燃焼器に送気し、水は地上から圧気タンクに流入する。圧気が

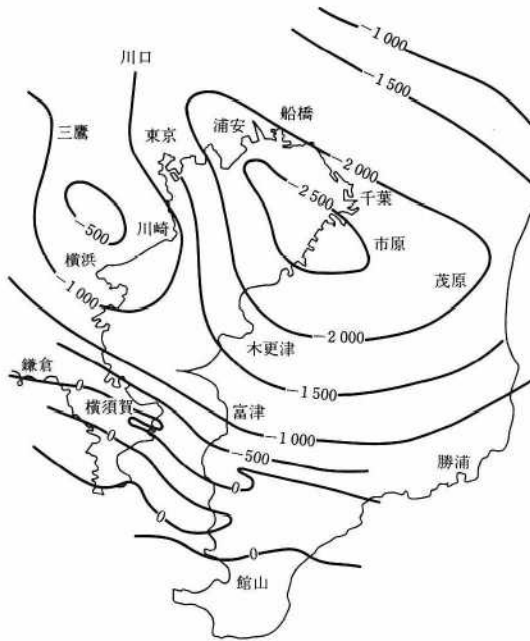


図-2 一軸圧縮強度約 200 kgf/cm² の地層深度 (単位: m) (星野・渡辺・釜井による予想図)

■ 圧縮空気貯蔵ガスタービン発電システム

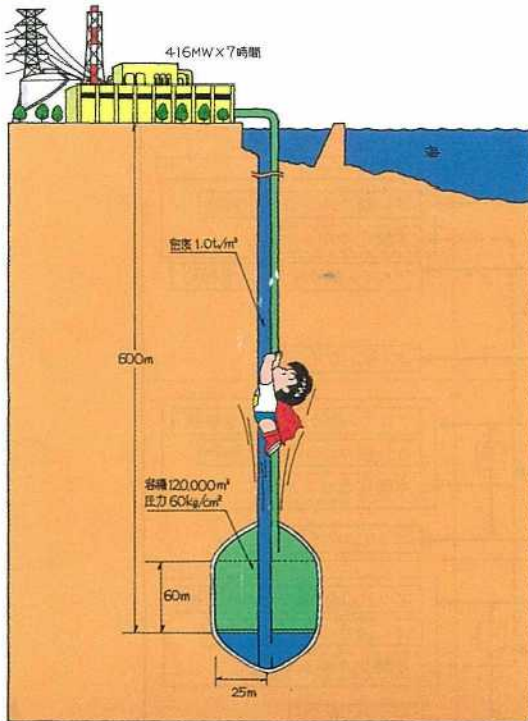


図-3 深部軟岩における圧縮空気タンク (構想)

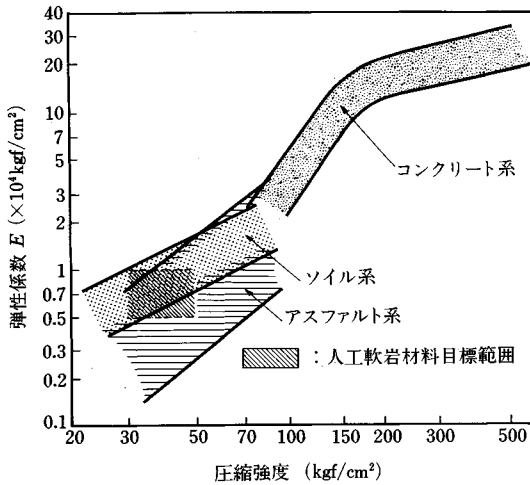
表-1 水没ドーム工法をエネルギー・環境・資源・防災等に利用する実証研究の構想案 (試案)

西暦 (年)	西暦 (年)			
	1990	1995	2000	2005
0	水没石炭廃坑で工法試験			
50	(汚泥消化槽) (地下駅のドーム) (地下変電所)			
100	(中流域での地下ダム) (大震災時消防剤備蓄タンク)			
	(深層曝気槽・治水・利水用タンク・燃料タンク)			
200	(都市廃棄物の処理・処分タンク)			
300	(5万kWクラス都市CAES)			
400				
500				
600	(40万kWクラス都市CAES)			
700				
800	(完全酸化曝気槽)			
900				
1000	(80万kWクラス都市CAES)			
1100				
1200	(完全酸化曝気槽)			

表-2 従来の山岳地帯での揚水発電用空洞と新しい深部軟岩での圧縮空気貯蔵-ガスタービン発電用空洞の工法の比較 (構想)

	揚水発電用空洞	CAES用空洞 (軟岩の場合)	
計画の概念	標高	EL500m~1000m	EL-600m
	岩質 岩級	硬岩 (花崗岩など) B~C _H クラス	軟岩 (泥岩など) Dクラス
	地下労働	有人	無人
設計	空洞	大気圧 発電プラント	水没 静水圧 圧縮空気タンク (発電プラントは地上)
	発電力と 空洞形状	100万kWクラス 横型 (トンネル) 幅 30m, 高さ50m, 長さ120m	40万kWクラス 立型 (卵形) 直径50m, 高さ60m
計画	空洞安定 の設計	緩み領域 (5~20m) はプレストレス鋼 線とアンカー鋼棒, 天井アーチ覆工	緩み領域をなくす設計 (内圧として静水圧) (か圧縮空気圧) 天然のプレストレスコン クリート覆工と膜
施工	施工方法	大気圧下で発破工 事によりベンチカッ トしながらPC・ロッ クアンカー・鉄筋 コンクリート覆工	(全断面工法の場合) 泥水圧下で拡幅掘削し 泥土をセメント固化後, 加圧泥水圧下で本掘削し, チューブ型枠をらせん 状に敷設しながら水中 コンクリートで覆工, 最後に淡水化しプレ ストレス

水に溶解し、いわゆるシャンペン現象^{4)~7)}を発生させないようにするため、著者はタンク内に気水分離面を形成し、浮き蓋方式をさきに提案した⁴⁾。この浮き蓋方式については、基礎実験を計画中であるので、いずれ報告したい。要するに、軟岩であっても、泥水圧で坑壁を支持して掘り、その後覆工ができていれば、静水圧あるいは圧気圧がつねに作用しておれば、圧気タンクの安定は保持できると考えた。そのためには、前提条件の整備として、部分的な深部地盤改良、泥水下での坑壁の安定、静水圧下でのコンクリート覆工等の技術開発が必要である。

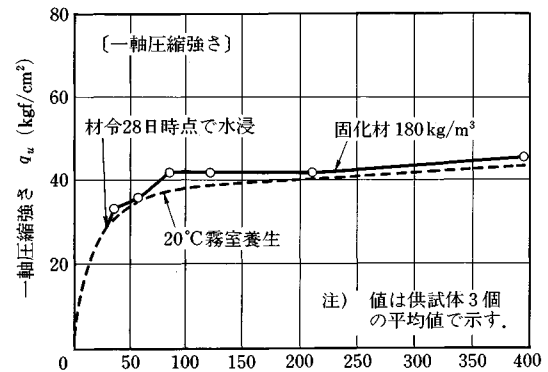


図—4 固化体の圧縮強度と弾性係数の関係図

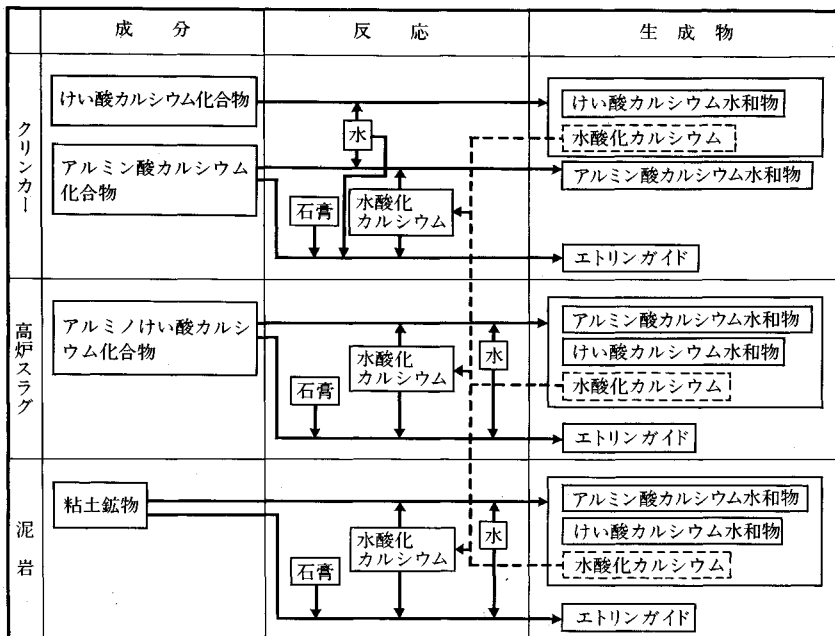
(2) 土丹・泥岩等は掘削すると緩み、大気に触れると酸化し、その後水に触れるとイオン交換によって吸水膨張し、slaking を起こすことがある。これは、泥岩中のモンモリロナイト・イライト等の水和反応および、緩みに伴う間隙水の移動に原因があるとされている^{8)~12)}。

この種の swelling と slaking の常識は、従来の土木技術の大前提である大気圧下・圧気圧下などでの掘削・覆工に伴う現象であることに着眼してみたい。

水没工法では、ごく深部での飽和間隙水圧状態での掘削・覆工であり、大前提が著しく従来の土木技術における泥岩の考え方と異なっていると思う。石油削井の技術^{8),17)}では、slaking 対策としてライム泥水、KCl 泥水が用いられており、加重泥水による安定化には重晶石が



図—5 泥岩を粉砕し高炉セメントと石膏で固化した人工軟岩 (岸・野尻)



図—6 石膏を多く入れることにより多量のエトリンガイトを生成し早期強度の強い人工軟岩になる (岸・野尻)

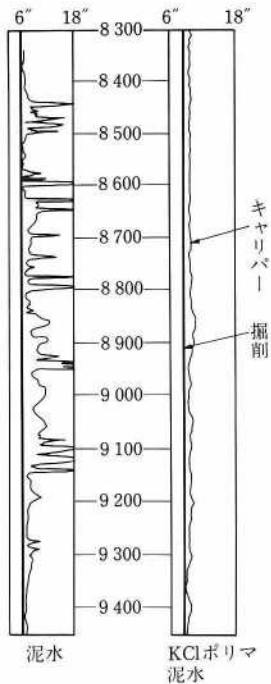


図-7 KCl ポリマー泥水の坑壁保持効果の実測 (Steiger, R.P.)

よく用いられている。場合によってはポリマー泥水も重用される。図-7にはKClポリマー泥水の効果を示す¹⁷⁾表-7は著者による泥水調査の要約である。しかし、大規模掘削中の大深度・超深度等の水没工法では、大事をとり、崩れる地盤は地中で積極的に崩すことを提案する。その掘削残土のかかなりの分量はその地中水没空間でまず攪拌し、十分に均質化してから、クリンカー、スラグ、石膏(多量)を配合して固化材として攪拌し、十分に地中で固化させる。

このためには、最近の深礎基礎工法の技術¹⁵⁾および泥岩の人工岩盤化の技術¹⁶⁾(図-4~図-6)等を積極的に活用する。要するに、深部軟岩は積極的に改良して利用する発想を、著者は最近提唱することになっている。

(3) 深部で拡幅したドームを立坑の下で掘削するには、常識的には“片持ちばり式”の拡幅ビットが考えられるが、拡大率に限界が感じられたので、著者は発想を変え“旋回はしないで掘る拡幅機”として写真-2のパンタグラフ溝切り機を考えた¹⁸⁾。それは図-8のように、Pantoであり縦に押せば横に広がるという動詞のとおりである。すなわち中心軸に沿ってヒンジ(複数)で連結されたアーム(複数)を押せば、中心軸に直角な方向にアームが広がろうとする。このようにしてアーム沿いのカッター運転時に掘削反力をとろうとするメカニズムを、アーム沿いの溝切りの機構として考えた。アーム沿

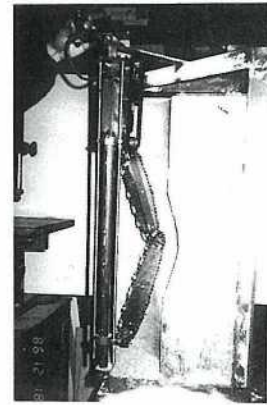


写真-2 パンタグラフ溝切り掘削機の模型 (チェーンソー) (1986)

■パンタグラフ方式の掘削機の構造

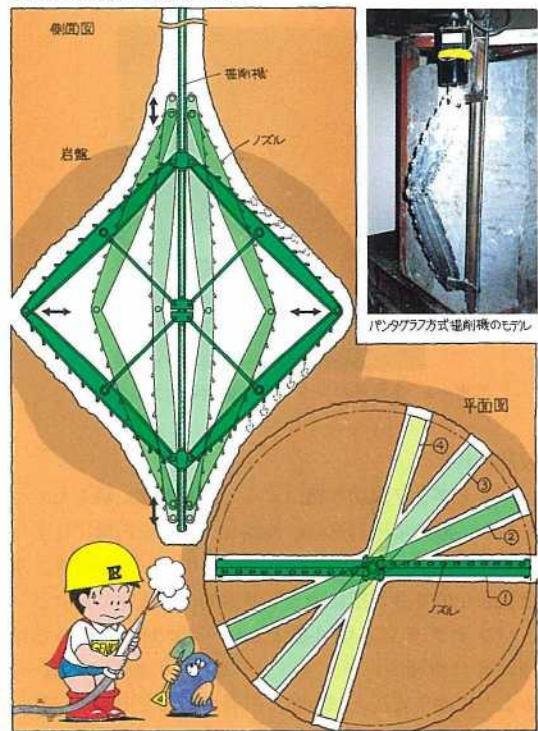


図-8 パンタグラフ溝切り機の掘削(概念) (1986)

いのカッターとしては、軟岩で q_u が 50 kgf/cm^2 程度以下ならチェーンソー、 q_u が 150 kgf/cm^2 程度以下ならドラム式のスライドカッター、 q_u が 300 kgf/cm^2 程度以下ならブーム式のロータリヘッドの付いたスライドカッターなどが高圧水噴射と併用して装備されることになろう。図-9はパンタグラフ溝切り機概念図であり¹⁹⁾、著者の発案を技術評価した結果の図である。

パンタグラフの形としては、くの字形、入の字形、多関節の弓の字形などが考えられ、掘削溝の形状に応じて

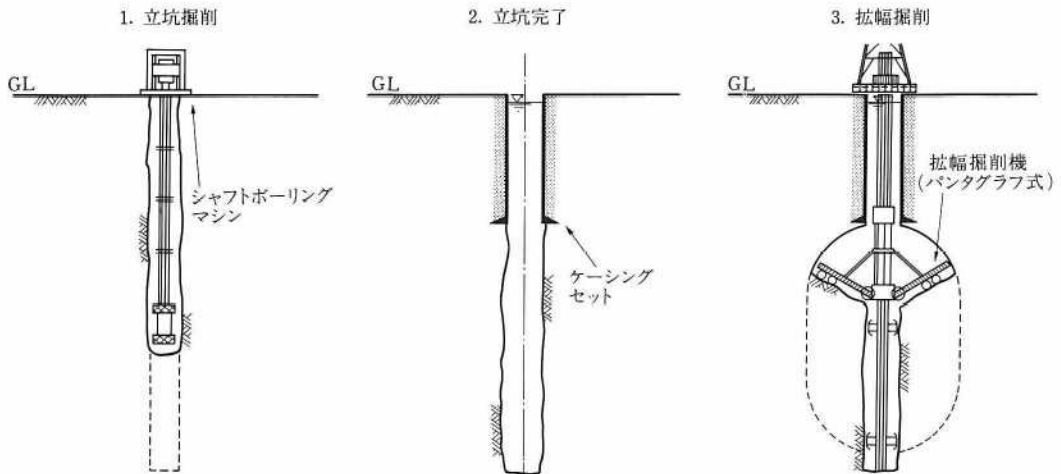


図-9 パンタグラフ方式の拡幅掘削機のモデル（電力中研における F/S）（1988）



写真-3 多関節パンタグラフ掘削機モデル（1989）

設計されよう。

パンタグラフ溝切り機によって、放射状に溝をたくさん掘り、最後に円周方向に回転し、形状を円滑に仕上げれば、回転トルクはごく少なくて地中ドームができ、水没状態なので静水圧によって基本的には支保できよう。

パンタグラフ溝切り機 Panto Trencher については 1986 年に原理的にチェーンソーを付けた模型を写真-2 のように池埜宏氏と試作し、石膏を削ってみて、妥当な方法であることを確認した。その後写真-3 のように日大の学生、久野了史君と多関節・チェーンソー付きのパンタグラフ溝切り機の模型を 1989 年に試作した。今後、現地のボーリング孔内において、拡幅水没空間を実験的に形成する小型の試験機を製作していく予定にしている。

パンタグラフを原理とする掘削機は、たとえば、立坑の下でのドーム空間、建物の基礎のフーチングコンクリートのための掘削、鉄塔基礎のフーチング、NATM の放射状のロックアンカー用のボーリング等に利用できると思われる。

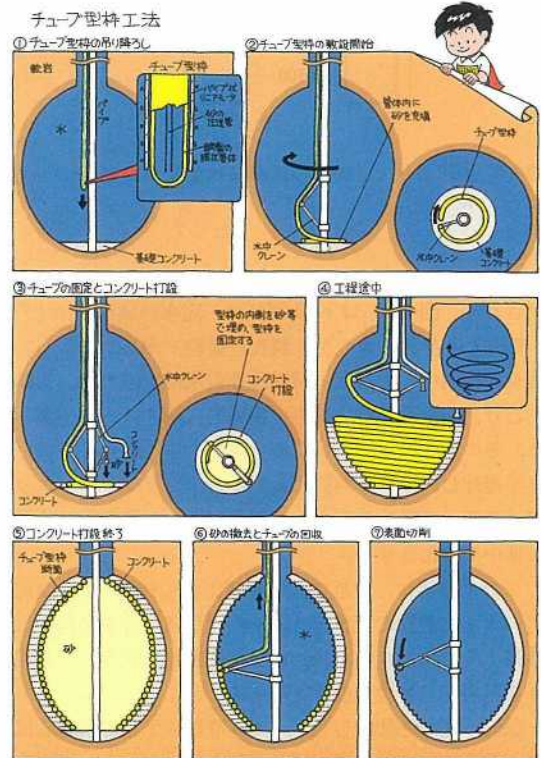
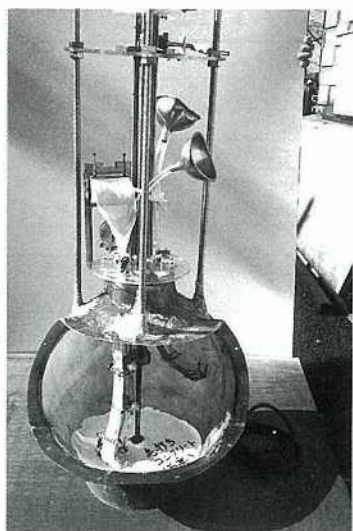


図-10 水没空間のコンクリート覆工用のチューブ型枠（1989）

(4) 水没ドームにコンクリート覆工を施す技術は種々考えられ、たとえば水中の左官工のロボット、スライドフォームを施すロボットその他が考えられるが、著者は立坑の断面が制約されていることを十分に考慮に入れることと、コンクリート型枠の位置の精度を上げるための操作の単純化を図れるよう、中心軸を利用したらせん状チューブ型枠を考えた²⁰⁾。この Spiral Tube Form は図-10 のように水没ドーム空間の下部から連続して



写真—4 チューブ型枠のモデル (左は第1層のチューブをらせん状に敷設するところ、右は中段までコンクリート覆工を済ませたところ) (1989)

段々と可撓性の袋詰め砂の入ったチューブを水中クレーンによってらせん状に積み上げ、それを内型枠として水中コンクリートを岩盤面との間に所定の厚みに打設しようとする考えである。このチューブ型枠は中心軸パイプのまわりに動く水中クレーンによって巻き出され、一段ごとにセメントミルクで上下のチューブの間は接着されながら積み上げる。1段ごとに水中コンクリートを別のトレミー管で打設していき、チューブ型枠はこのコンクリートとも接着されるので、内型枠がオーバーハングしても形状が崩れることはない。念のため裏込めの砂を積み上げることもできる。

このらせん状チューブ型枠工法はらせん状鉄筋を各リフトごとに布設する場合にも便利であり、岩盤と打設コンクリートの間にグラウト管をらせん状に布設するのにも便利な方法と考える。

写真—4には著者の発案を池野造形研究所の協力を得て実施した。学生、恵藤俊哉君との模型実験の状況を示す。

この型枠とドームの壁の間に水中コンクリートの打設が終わったのちは、コンクリートの十分な固化を待ち、型枠を撤去し、加重泥水を淡水化すると、その工程間の水の比重差に応じた外圧が覆工コンクリートドームにプレストレスとして導入され、耐震的で気密性のよい覆工コンクリートドームができる。その岩盤力学的な解析はあとで述べる。

このチューブ型枠の考えは著者が1988年に着想し、その後、1989年に写真—4のように模型実験を開始し、その実用的見通しを得たもので、今後、水没工法により地中ドーム、地中タンクあるいは橋脚基礎などを地中、

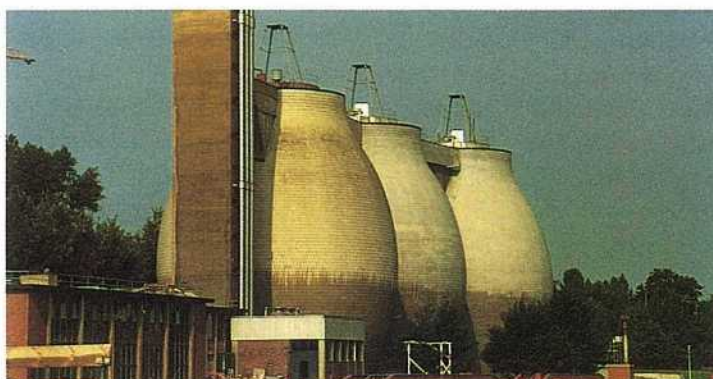
河底、湖底、海底などに建造する場合に応用できるのではないだろうかと思っている。

(5) 別な工法として、ドーム状の連続地中壁を本体掘削より先行して外周壁として建造する方法を考えた。それは曲線レール・スライドカッター工法と名付けた方法である。すなわち、岩盤力学的に理想を追求すると大断面のドーム空間の全断面掘削よりは、本体掘削の前に卵形のコンクリート外周壁を先行してつくり、その完成後に本体掘削を行うと、覆工に大きな主働土圧が本体掘削の段階で作用し、覆工コンクリートには十分なプレストレスが導入され、高耐震構造になると考えた。その手順を実現するための1つの工法として、外周壁のところの曲面の溝切りとその溝にセグメントごとに水中コンクリートを打設するための曲線レール・スライドカッター工法を考えた²¹⁾。その基本構想と、岩盤力学的な考察はあとで述べる。

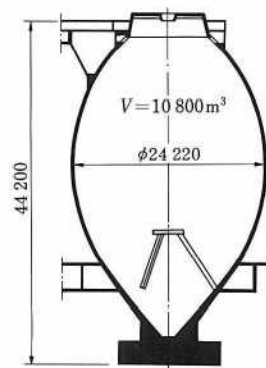
(6) この水没工法は、著者が前報²⁾でエネルギーシステムとして構想をたてた。それは地球環境のCO₂問題への対策と、エネルギー消費を減らし、資源と土地の節約をねらった、大電力を都市の地下に貯蔵するCAES-GTの新システムを考えたものである。しかし、その後その実用が図られれば、より身近な技術にも広く応用できることに気が付いた。それは表—1のように、汚泥消化槽、深層曝気槽、燃料タンク、治水・利水・防災用等の水タンク、都市廃棄物の処理・処分用の地中ドーム空間、さらに将来は工場廃液等の完全酸化曝気槽等としても利用できるかもしれない。

表—3 卵形汚泥消化槽（嫌気性）の地中化のメリット（試論）

		地上式タンク	地下式タンク
立地	周辺環境	下水場	下水場
	土地	地上を占有 地盤 ほとんどが軟弱地盤	地上を開放し有効利用 軟弱地盤はプレコンソリデーション後に掘削・覆工
構造	立坑の深さ		空洞掘削力の水平成分と地盤強度の被り分の水平抵抗力のつり合いから決めるので地盤強度に応じて選択できる
	保温	保温材（35℃）	保温性がよい
	内圧	プレストレスコンクリート構造（ガス圧 0.3 t/m ² ）	天然のプレストレスコンクリート構造（鉄筋も可能）
	容量	1 400m ³ ～12 000m ³ クラス	大型化が容易
	耐震設計	躯体下部の補強と鋼管杭基礎	地盤とともに揺れるので、補強は少なく済む。浮力は人工岩盤で対抗する。
	配管	一部は外部配管	全部内部配管
施工	躯体	プレストレス工事	水没コンクリートタンク工事
	基礎	鋼管杭工事	プレコンソリデーション工事
運転管理・補修	消化汚泥	卵の形を良くして汚泥と砂を底のため同時に取り出す	左と同じ
	消化ガス	発電に使う	左と同じ
	開放・点検・修理	人が入る	人を乗せた水中管理艇（大気圧にする別の設計なら人が入れるが覆工が厚く要る）
評価	予察	軟質地盤でもプレコンソリデーションの後、水没法によれば卵形の汚泥消化槽は可能であろう。習熟すればコストで有利になろう（土地が空く、メリットが大きい）	



写真—5 汚泥消化槽（ニュールンベルグ）[鹿島建設（株）のパンフレットによる]



4. 水没・無人工法の大略の体系

(1) 水没・無人工法の手順の例

写真—5には、下水場での汚泥消化槽の写真を示す。この種の衛生設備は現在は地上にあり²²⁾、高さ30m前後、容積5 000～10 000 m³、直径20m前後のプレストレスコンクリート容器である。

著者は、全く個人的な発案であるが、この種の設備は地中化すれば表—3のようなメリットが生まれるのではないかと考えている。

その工事の手順は表—4、図—11、および表—5のように体系化される。その主な考え方は次のようである。

① 立坑の必要な深さの決定 消化槽の機能上はドームを深くに設けて高温・高圧の方が良いとも考えら

れるが、それは今後の検討に委ねるとして、ここでは地盤とドームの安定からみた力学的な評価方法の基本を示してみる。ドームを掘削すると掘削相当外力²³⁾が地盤の方に作用するが、その水平成分の大半はドームの土被り部分において分担され、その地盤の圧縮強度で抵抗されなくてはならない。この種の力のつり合いから立坑の深さを近似的に求めることができよう。土被りを浅くしたければ、地盤改良を土被り部分について行うことになる。より詳細には、著者が1968年に喜撰山地下発電所で始め、その後各地で実用化された空洞掘削時の緩みの逐次解析の手法²³⁾を応用すれば、アーチ作用は合理的に評価できる。

② 深層地盤改良 軟質地盤の地盤改良、特に深礎セメント固化工法は、ここ10年ほど急速に普及し

表-4 軟質地盤での卵形汚泥消化槽の地中化のための水没工法の体系（試論）

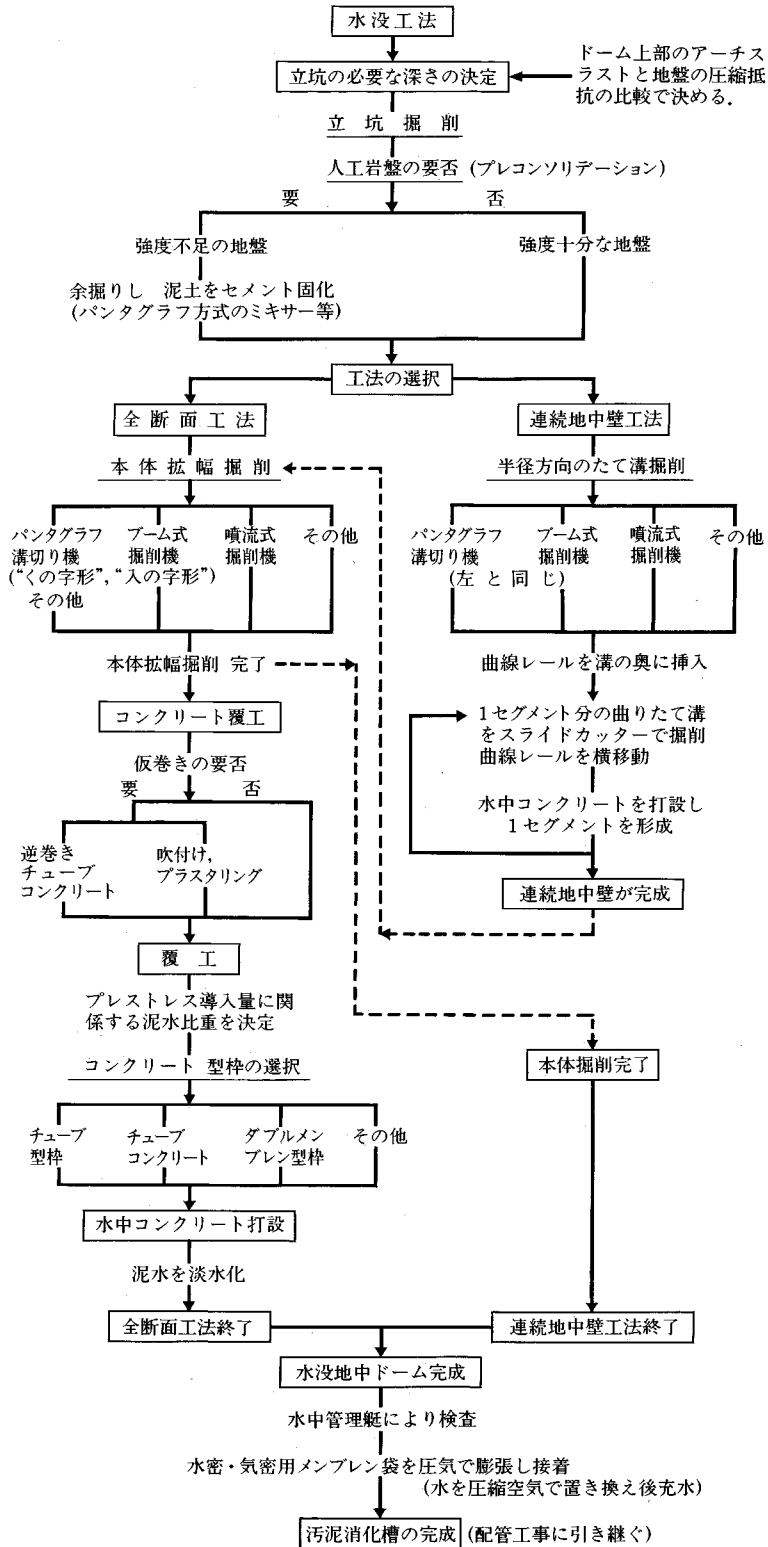
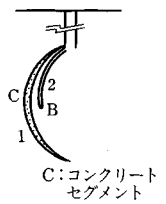
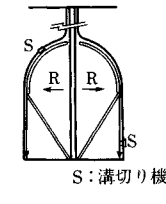
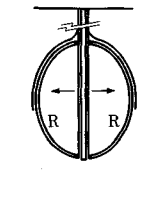
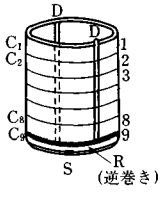
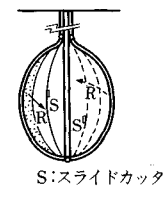

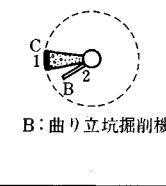
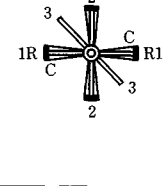

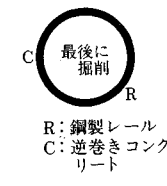
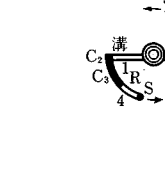


表-5 軟岩での深部地中水没

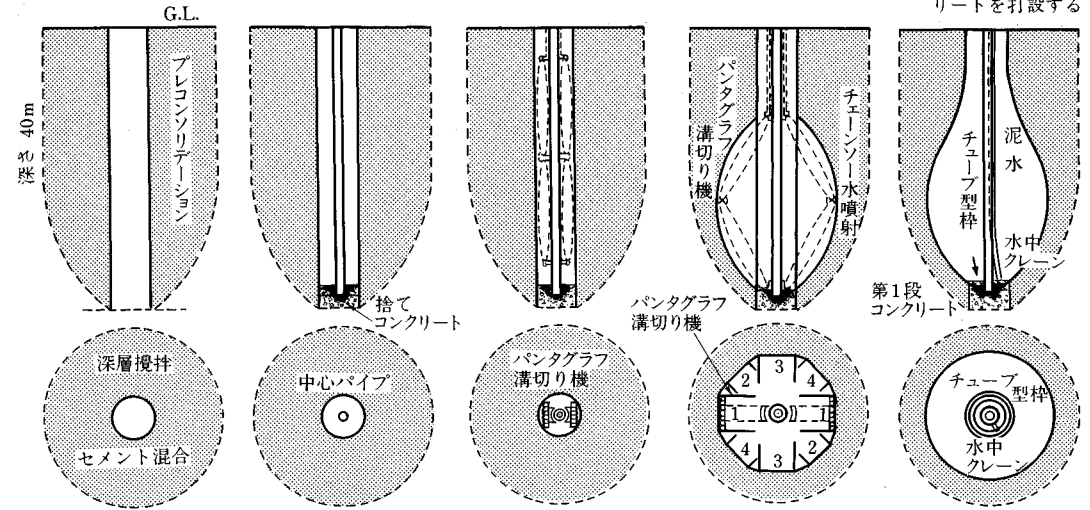
工法		全断面工法							
方式	水没掘削		水没掘削		水没掘削プレコンソリデーション	水没掘削-エアドーム			
	メンブレン型枠	チューブ型枠	ベンチカット	チューブコンクリート					
記号	A-1	A-3	A-4	A-5	A-6	A-2			
地質	強い堆積岩	強い堆積岩	ところどころ弱い堆積岩	強い堆積岩	弱い堆積岩	強い堆積岩			
略 面 図	<p>P:パンタグラフ溝切り機 S:スライドカッタ L:ロードヘッド</p>		<p>逆巻きベンチカット PETC:ホストエキスパンドチューブ コンクリート PETC PETC PETC ベンチ PETC マットコンクリート</p>		<p>順巻きチューブコンクリート PETC</p>		<p>プレコンソリデーション-チューブ型枠 PC:プレコンソリデーション PC C:コンクリート TF:チューブ型枠</p>		<p>M:浮揚メンブレン気密幕 A:エアドーム</p>
	水平断面	<p>C:コンクリート TF:管状型枠 溝</p> <p>パンタグラフ方式 管状型枠方式</p>		<p>ベンチカットチューブコンクリート方式</p>		<p>チューブコンクリート方式</p>		<p>プレコンソリデーションチューブ型枠方式</p>	
掘 削	<ol style="list-style-type: none"> 1. 東西方向のたて溝を、パンタグラフ機により水中掘削 2. 南北方向たて溝 3. 斜め方向たて溝 4. 斜め方向たて溝 		同左 (ただし、ベンチカット)		同左		同左 (ただし、余掘り後全体をプレコンソリデーション)		<ol style="list-style-type: none"> 1. 全断面掘削(A-1に準)する 2. 上半部の仕上げ(水中)
	覆 工	<p>A-1 水中にメンブレンを吊り降ろし、メンブレンの外側に水中コンクリート打設、メンブレンの内側は支えになる貧配合コンクリート(いずれ掘削する)。</p> <p>A-3 管状型枠方式(チューブ型枠)</p>		チューブコンクリート方式(逆巻き)		チューブコンクリート方式(順巻き)		チューブ型枠	
利 点		工事が早い	コンクリート覆工が確実	チューブコンクリートを覆工構造体とする。		チューブコンクリートを覆工コンクリートとみなす。		軟らかく、弱い岩盤に対応できる。	
	開 発 課 題	<p>A方式 パンタグラフ溝切り機、メンブレン型枠のスペーサー</p> <p>B方式 管状型枠の配置システム</p>		チューブ間の打ち継目強度の向上策		同左		人工岩盤(プレコンソリデーション)の造成システム	
説 明 資 料		<p>A) 土木学会 第42回年次学術講演会 1987-9 (パンタグラフ方式)</p> <p>B) 土木学会 第22回岩盤力学シンポジウム 1990-2 (管状型枠方式)</p>							

タンクの無人工法案 (構想)

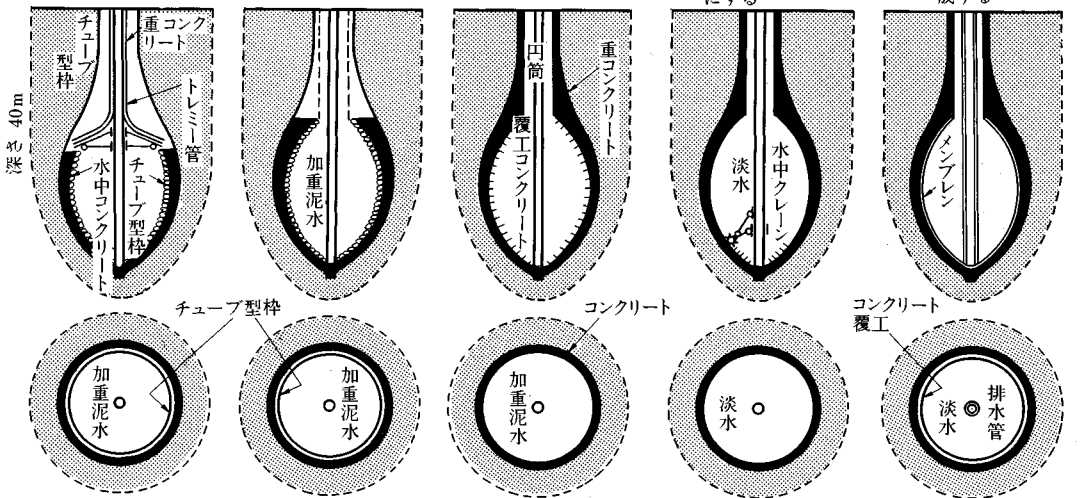
容 積 1万m³~10万m³
 想定の深さ 100m~700m

(曲 面 連 続 地 中 壁 工 法)					
					$q_u=(20\sim150) \text{ kg/cm}^2$
曲り立坑方式	曲線レールセグメント	弓型レールセグメント	水平リングレール-スライドカッタ	2ヒンジ弓型レール-スライドカッタ	多ヒンジ弓型レール-スライドカッタ
B-1	C-1	C-2	D-1	E-1	E-2
砂 層 な ど を 含 む 堆 積 岩					
 <p>C:コンクリートセグメント</p>	 <p>S:溝切り機</p>		 <p>(逆巻き)</p>	 <p>S:スライドカッタ</p>	
 <p>B:曲り立坑掘削機</p>		 <p>W:拡幅用水噴射</p>	 <p>最後に掘削</p> <p>R:鋼製レール C:逆巻きコンクリート</p>		
<p>外周壁を完成させてから内部の本体掘削を行う (B-E)</p> <p>1. 先行セグメント</p>	<p>A-1に準じ、たて溝をつくったのち、そのたて溝に曲線レールRを奥まで送り込む。(弾性曲げ)</p>	<p>A-1に準じ、たて溝をつくったのち、そのたて溝に弓状に曲げて2ヒンジレールを送り込む。</p>	<p>地上から、鋼製リングレールRの下面を切削しDから排土し、Rを切り下げる。</p>	<p>1.C-2に準じ、弓型レールをたて溝の奥まで挿入。</p>	
<p>2. 曲り立坑機によって、1つのセグメント部分の曲りスロットを掘削したのち、水中コンクリートをそのスロットに打設する。</p>	<p>レールRに沿ってスライドカッタSにより円周方向にスロット部分を拡振する。そして水中コンクリートを打ち1つのセグメントをつくる。</p>	<p>弓状レールRに沿って、スライドカッタSにより円周方向にスロット部分を拡振する。そして水中コンクリートを打つ。</p>	<p>Rが切り下った直上の水中スロットに水中コンクリート(逆巻き)の代りに粘重液(ストッパ)を入れておき流体型枠にする。(石油掘削技術)</p>	<p>2. 弓型レールRの円周方向側面でスライドカッタSを運転し、円周方向にスロットを形成し、水中コンクリートを打設。</p>	<p>弓型レールは多ヒンジにして、立坑を降下させたのち、たて溝の奥まで、1, 2, 3, 4の手順で送り込む。</p>
<p>工事が確実、崩れにくい。</p>	<p>同 左</p>	<p>同 左</p>	<p>同 左</p>	<p>同 左</p>	
<p>曲り立坑掘削機</p>	<p>スロット部分の拡振用スライドカッタ(溝切り機)</p>	<p>弓状レールを押し込む手順</p>	<p>水平リングレール、スライドカッタ、粘重液ストッパ</p>	<p>2ヒンジ弓型レール、スライドカッタ、側面コンクリートバックカ、底部のコンクリートストッパ(D-1に準ずる)</p>	
<p>岩の力学連合会、第7回連合シンポジウム、1987-12</p>	<p>土木学会、地下空間利用シンポジウム、1988-10</p>	<p>土木学会、地下空間利用シンポジウム、1988-10</p>	<p>土木学会 第21回岩盤力学シンポジウム、1989-2</p>	<p>土木学会 第20回岩盤力学シンポジウム、1988-2</p>	<p>(財)エンジニアリング振興協会 無支保空間建設システム、1989-3</p>

- 1) 深層攪拌・セメント混合方式によるプレコンソリデーション
- 2) 水中に中心パイプを建込む
- 3) 水中にパンタグラフ溝切り機を降下する
- 4) 泥水中で溝を拡幅し多くの放射方向に溝を掘った後、旋回して補強部を仕上げる
- 5) 第1段のコンクリートを打設後チューブ型枠を降下した水中クレーンによりらせん状に敷設し、第2段の水中コンクリートを打設する



- 6) 加重泥水の下で、引続きチューブ型枠をらせん状に積み上げつつ水中コンクリートを中段まで打設する(重コンクリートを打設)
- 7) 水中ドームの天井部までコンクリートを打設する(重コンクリートを打設)
- 8) チューブ型枠を水中クレーンを用い地上に撤去後、立坑に鉄管を挿入し裏込めコンクリートを打設する(逆順もあり得る)
- 9) 加重泥水を淡水化し比重差に応じた覆工コンクリートにプレストレスを導入後水中クレーンを旋回しつつ研磨機で壁面を円滑にする
- 10) 水中にメンブレンを降下し加重水を充滿することにより、メンブレンをドームの壁に圧着し、接着することにより遮水膜を形成する



図一11 卵形汚泥消化槽の地中化のための全断面工法の構想 (超深度 CAES も同様)

た^{14), 15)}.

地盤改良の範囲はタンクの周辺とし、図一11の1)のように行われる。その改良目標強度は5~100 kgf/cm²程度までは変化でき、設計と工法に応じて選択できる。

③ 全断面工法か連続地中壁ドーム工法の選択

プレストレスを覆工コンクリートに導入する量の多寡によって、理論的には工法の選択が行われよう。導入力を大きくするには連続地中壁ドーム工法が理想である。この場合は自然土圧のほとんどが導入力に変換される。その岩盤力学的説明はあとで述べる。全断面工法の場合は、



写真—6 浮揚式メンブレン

加重泥水と淡水の比重差（水没の場合），あるいは加重泥水に相当する水圧（気乾タンクにする場合）が覆工へのプレストレス導入力に変換される。著者の現在の見通しでは，全断面工法なら，すぐにでもパイロットプラントは建造できると考えている。

その場合の期待できる技術はパンタグラフ溝切り機とチューブ型枠工法である。

④ 全断面工法 図—11のように本体掘削を主としてパンタグラフ溝切り機，ブーム式掘削機，その他で行ったのち，コンクリート覆工をチューブ型枠その他の工法で行う。ライムか KCl の加重泥水をその後，淡水化し，水没地中ドームは完成する。この水没地中ドームの検査・管理・維持補修などは，水中管理艇で行うことができる。気密・液密のためには写真—6のようなメンブレン袋を水中で圧気によって膨張し覆工コンクリート面に圧着する方法がとれるであろう。その際，水は逆に送水管を通じ地上に押し上げられる。

⑤ 連続地中壁工法 あとで述べるように，図—14の手順により立坑の下で，1つのたて溝を半径方向にパンタグラフ溝切り機等によって掘り，その中に曲線レールを挿入し，所定のドーム曲面の経線はこの曲線レールによって構成したのち，この曲線レールに沿って1セグメント分の曲線状たて溝を掘る。この水没たて溝空間の奥まで曲線レールを緯線方向に移動したのち，後方にできた水没たて溝空間に1セグメント分の水中コンクリートを打設し硬化させる。再び第2セグメント分の曲線状たて溝を掘ることになり以下同順である。このようにして，外周壁のコンクリートを卵形にまずつくり，その完成後に本体の地盤部分をえぐり取る。その掘削は全断面工法の場合の方法と同じで，パンタグラフ溝切り機を活用することになる。詳細は8.で述べてある。

⑥ 水没タンク空間の計測と監視，補修等 水没状態で計測・監視・補修等を行うには，基本的には水中ロボットによることとし，中心軸を利用した水中クレーンシステムによってロボットを運転するとその位置決めが

表—6 球形の深部地中タンク周辺の応力成分

$$\begin{aligned} \sigma_{zo} &= \rho_r H \\ \sigma_{zo} = \sigma_{yo} &= K \sigma_{zo} \\ \sigma_z = \sigma_{oz} &= \left\{ 1 + \frac{1}{14-10\nu} \frac{\rho^2}{R^3} \left(4-5\nu + 9\frac{\rho^2}{R^2} \right) \right\} \\ & \quad (z=0) \\ \sigma_{\theta} = \sigma_{\theta z} &= \frac{3}{14-10\nu} \frac{\rho^2}{R^3} \left(-2+5\nu + \frac{\rho^2}{R^2} \right) \\ & \quad (z=0) \\ \sigma_r = \sigma_{oz} &= \frac{12}{14-10\nu} \frac{\rho^2}{R^3} \left(1 - \frac{\rho^2}{R^2} \right) \\ & \quad (z=0) \\ \sigma_{\theta} = \sigma_{zo} &= \frac{3}{14-10\nu} \left(-(1+5\nu) + 10\nu \cos^2 \varphi \right) \\ & \quad (R=\rho) \\ \sigma_{\theta} = \sigma_{zo} &= \frac{3}{14-10\nu} \left\{ -(1+5\nu) + 10\nu \cos^2 \varphi \right\} \\ & \quad (R=\rho) \\ \sigma_{\theta c} &= \frac{15\nu-3}{14-10\nu} \sigma_{zo} \\ & \quad (\varphi=0, z=0, \rho=R) \\ \sigma_{zc} &= \frac{27-15\nu}{14-10\nu} \sigma_{zo} \\ & \quad (\varphi=0, z=0, \rho=R) \\ \sigma_{\theta A} = \sigma_{\theta A} &= -\frac{15\nu+3}{14-10\nu} \sigma_{zo} \\ & \quad \left(\varphi = \frac{\pi}{2}, \rho=R \right) \\ \alpha_z &= \frac{\sigma_{zc}}{\sigma_{zo}} \\ \alpha_{\theta c} &= \frac{\sigma_{\theta c}}{\sigma_{zo}} \\ \alpha_{\theta A} &= \frac{\sigma_{\theta A}}{\sigma_{zo}} \\ \alpha_{\varphi} &= \frac{\sigma_{\theta A}}{\sigma_{zo}} \end{aligned}$$

行いやすくなることに着目する。

⑦ 断熱・気密・液密膜 基本的には気密・液密は，前述のように，天然のプレストレス効果により拘束応力が効いたコンクリート覆工構造物をつくることにより達成する。しかし，水中工事なので，その習熟には時間がかかるので，補助手段として断熱・気密・液密を目的としたメンブレンを内装する。水中タンクにそれを内装するには，写真—6のように送気管によりメンブレン袋を水中で膨らまし，同時に送水管により余分になった水を地上に排出することにより，メンブレン袋をコンクリート覆工面に圧着・接着する方法が考えられる。

5. 水没・無人工法のための種々の方法（試論）

まだ実証されていないので，きわめて未熟であるが，21世紀の土木技術者への夢をプレゼントする気持ちで，著者が気の付いてきた水没工法の諸例を一覧すると表—5のようである。要約すると次のようになる。

A) 全断面工法：水中で本体掘削をしてから，水中

で覆工する工法（著者の発想の順序による）

- A—1 メンブレン型枠工法（1986）
- A—2 エアドーム工法（1987）
- A—3 チューブ型枠工法（1990）
- A—4 ベンチカット工法（1990）
- A—5 チューブコンクリート工法（1990）
- A—6 プレコンソリデーション工法（1990）

これらの詳細は、表—5の下欄の資料に述べてある。

A—4のベンチカット工法は、A—3のチューブ型枠工法の応用であり、岩盤が悪い場合の逆さきの概念である。A—5のチューブコンクリート工法はA—3のチューブ型枠工法からの連想であり、チューブそのものを覆工としての構造強度を予備的にもたせる考えである。したがって二次覆工が要ることが多いであろう。A—6はこの論文の重点であるプレコンソリデーション・チューブ型枠工法である。弱い地盤は地中で崩れるだけ崩し、泥土化する。そしてよく攪拌し、余掘り状態で人工岩盤になるようセメント固化する。そこを本掘削し、チューブ型枠で本覆工コンクリートを打設する構想である。

この考えは、なかなか気が付かなかつたし一見大胆であるが、よく考えてみるときわめて合理的と思っている。地盤の弱さや不均質さを、積極的に無理なく克服できる立地自由度の高い優れた深部無人工法になると期待している。

下町の地価の高い地盤は、軟弱なところが多いが、このプレコンソリデーションによる人工岩盤化のコストは、地中化による地表の解放の経済効果によって、十分償えることになろう。

B) 連続地中曲面壁工法：外周壁コンクリートを地中の曲面として建造したのち、そのあとで本体部分の掘削を行う工法（著者の発想の順序による）

- B—1 曲がり立坑方式（ロボット掘削）
- C—1 曲線レール・セグメント方式（スライドカッター）
- C—2 弓形レール・セグメント方式（スライドカッター）
- D—1 水平リングレール・スライドカッター方式
- E—1 2ヒンジ弓形レール・スライドカッター方式
- E—2 多ヒンジ弓形レール・スライドカッター方式（(財)エンジニアリング振興協会ENAA）

このほかにも、今後いろいろなレール方式とスライドカッター方式、固定のカッター方式などが考えられるであろう。

この工法は、岩盤力学的には、緩み領域がなくなり、天然の力で強くプレストレスされた覆工コンクリートが形成できる可能性を含んでいる。しかし、あとで述べる

ように、今後、未経験な種々の技術について、要素ごとに実験を行い、成立性を評価していかなければならない。

なお、通産省プロジェクトの急曲シールド機によるドーム空間の形成の大型プロジェクトは、有人であることと、団子状断面の壁を予備的につくる工法なので、先行連続地中壁のプレストレス効果は期待していないようなので、こことは別のカテゴリーと考えられる。

6. 水没工法による深部地中空間の建造のメリットと主な技術課題

(1) 無人工法 地下での労働をなくし、地上から計測・監視したデータに基づき、一貫したシステムによって掘削と覆工を操作する。しかし、その計測と制御の対象は暗黒の水中あるいは、圧気エアドームの地中空間であるので、計測・制御システムの新しい研究に着手しなければならない。メリットとしては、自由度がかなり減らされた遠隔計測・制御のシステムをねらったことであり、すなわち立坑内の中心軸管が“背骨”の役割を果たすことを強調しておきたい。この“バックボーン”が軸対称条件を保証しやすくしている。またこの中心軸管からの水中クレーンの先端から岩盤までの至近距離について、主として計測・制御の精度を上げればよい方式なので、計測・制御の自由度はかなり束縛されている優れた特長である。

(2) 深部軟岩でのドーム空間 従来は円筒状の連続地中壁に限られていた開削空間の概念を、2重曲率のドーム空間に拡大した点に特長があり、地表の工事占有面積が著しく節減できる。そのためには、パンタグラフ拡幅掘削機などの新しい建設機械システムを開発する必要がある。その実現性はすでにF/Sによって確認してある。

(3) 弱い地盤の場合は、深部地中を地盤改良し、立地を拡大 地山強度比の低い地盤は、水没拡幅掘削し、掘削土の攪拌後、防水性セメントで固化、すなわちプレコンソリデーションを行ってから本工事を始める。深部地中でこの準備工事はコスト増であるが、立地拡大・地盤の信頼性向上等に益するところはかなり大きく、弱い地盤では地中ドーム不可能との先入観念は、水没工法の場合にはそれほど基本的問題ではなくなると思う。

(4) 地盤の緩みが少ない工法 理想的には、外周壁が完成してから、内部の本体掘削をするので、覆工の裏込め部での緩みはごく少ない。著者は、あとでFEMによりこのことを説明してみているが、これには技術上の1つの仮定がある。それは、加重泥水でたて溝を支承できることである。この仮定を満たすには2つの方法があり、その1つは抗壁保持能力の高いライム泥水・KCl泥水・ポリマー泥水等を用いること、その2は前述のプ

レコンソリデーションを行うことである。

(5) 地盤沈下が無視できる工法 加重泥水(比重1.05~1.15)で掘り、覆工を済ませてから淡水化する。あるいは外周壁を先行して完成させてから内部をえぐり取る手順なので、もし、地下水の汲出しがなければ、地盤沈下の素因となる剛性低下は掘削土相当分の保有していた地盤の初期剛性と、覆工コンクリートの構造物の剛性の差だけである。このことは、従来の石油備蓄タンクとか地下発電所等の工法の場合の緩みとは全く異なることは表一2で述べた。この剛性の減分がドームの上部に存在する“被り深さ”の地盤剛性によってアーチ作用として十分に負担できれば、地表面の地盤沈下は無視できる。

地盤沈下を来さないためには、要約すると次の条件があればよい。

- ① 地下水を汲み出さない水没工法であること。
- ② 地盤が弱く被り部分の地盤が弱いときは、プレコンソリデーションを行うこと。

(6) 覆工の裏込め部の止水工事、気密工事等の容易さ これら液密・気密の工事は、リグラウト管と内装メンブレンによって主として行うことになる。リグラウト管は、全断面工法と連続地中曲率壁工法の場合において、それぞれ、らせん状リグラウトパイプをコンクリート打ちの前にチューブ型枠と同時に配置する方法、および曲線レール沿いの弓形のリグラウトパイプをセグメントコンクリート打設前に配置する方法等により基本的に可能である。

内装メンブレンを覆工に圧着・接着する方法は浮揚メンブレンとしてさきに述べた。

(7) 深部水中コンクリート打設におけるコンクリート強度の発揮 最近、水中コンクリートに関しては、シリカセメント、澆水性ポリマーコンクリート、防水性コンクリート等の新素材の研究開発が進んでいる。その品質の向上は著しく、北海油田の海洋工事を契機として、水中深くに打設したコンクリートは1000 kgf/cm²の高圧縮強度が期待できる時代に近づいている²⁵⁾。

したがって、地球の重力を最大限に利用することができる深部水中の工事環境は、澆水性の高強度コンクリートの好個の舞台となろう。

その前提条件としては、泥水中に流し込んだコンクリートの品質が低下する概念を除かなければならない。澆水性のポリマーコンクリートは、打設後、水中で餅状となり、良い解答を与えてくれるとしても、打継目のグリーンカット、泥土の沈積部のフラッシュ、半透膜のチューブコンクリート等の補助工法の開発が必要である。

(8) 可視空間の形成 工事中および使用中には、

ときどき、ドームの内壁の状況を目視できることが望ましい。そのためには、一時的に水没空間を圧気空間に換え、カメラによりステレオ撮影を行えると、その撮影情報をグラスファイバー・レーザ通信により、地上で映像化できることになる。要するに、エアドーム化(正確にはガスドーム化)は、工事管理のための重要な補助工法になる。

そのために著者は「浮揚式メンブレン」を考えた²⁴⁾。それは写真一6のように模型実験を試みたものであらかじめ、必要に応じメンブレンの外側、すなわち圧着面にグラウトパイプをこもり傘の骨のように配置しておく、メンブレンは行儀良く水中で開いていくので都合がよいし、圧着後にグラウトをするのにも都合がよく、また、立坑とドーム空間の接合部分でのドームの補強にも役立つことを、模型実験の体験で気が付いた。

7. 水没工法における泥岩の状態の予察

一般に地質学・応用地質学・岩盤力学・土質力学、広く土木技術での常識として、土木工事であるトンネル・斜面・構造物基礎において、「泥岩は土木工事において、含有水分が蒸散したり、掘削によって応力が解放され、緩み、ひびが入ったり、凍結融解作用を受けて崩壊したりする。特に乾燥・収縮の繰返しによりスレーキングを起こしたり、吸水による体積膨張により崩壊が促進され、細粒化する」ので、泥岩は重要な関心が従来から払われ、数多くの実験研究と試験法が開発されてきた^{9)~13), 26)}。

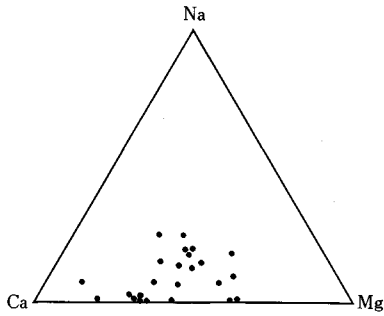
著者も、ダム、地下発電所、斜面、原子力発電所の基礎地盤その他の研究・開発に長年携わってきて、泥岩の乾燥収縮性、吸水率、膨潤性は軟質岩盤の工学的分類の背景としてかなり重要である旨を述べてきた²⁸⁾。

以下の“水没工法”における泥岩の予察は著者の予備的な調査の結果、発想した泥岩の見方であって、いまだ実験的な現象把握にまで至っていないが、今後の実験のテーマの論点を明確にするために、一問一答式に課題を設定し、その予察を述べてみたい。

[設問1] 泥岩の吸水膨張とslakingは、深部軟岩での水没掘削でも発生するかどうか？

[予察1] 第三紀の泥岩を考えると、それは数千年前の堆積時には細粒の風化生成物である粘土鉱物から成っており、その主体はモンモリロナイトであり、これは吸水によって結晶格子を押し広げ、水分子が格子間に侵入し、体積を膨張させる、いわゆるswellingの性質をもっている。

また、大気中で切り取り等によって空気にさらされると軟岩は乾湿の繰返しによって急激に固結力を失い細粒化し、いわゆるslaking現象を呈する。



図—12 膨潤・スレーキングを起こす泥岩中の粘土の交換性陽イオンの成分比の三角図（吉川・桜井・立松ら）

トンネル掘削では地山が緩むと地下水のポテンシャルの変化が生じ、移動してきた地下水が岩石中に浸透し、水の吸着によって、膨潤や組織の結合力の低下を引き起こし、破壊領域の拡大と膨張を生じる。これがトンネルの盤膨れとされている。

粘土化学として、ミクロ的に電子レベルで考えると、交換されやすい陽イオン（Cation）の容量が大きいと崩壊しやすいことがわかっており、塩基で置換される陽イオンの容量 Cation Exchange-Capacity (CEC : me/100 g) が1つの指標になる⁹⁾。その交換性陽イオン EC は Na, Ca, K, Mg があり、それらの定量は原子吸光分析法によっており、セミマイクロアンモニア蒸留法によって CEC は測定される。トンネル工事で膨潤性の著しかったサイトから採った試料の EC の組成は図—12 に示されている。この三角座標からわかることは、わが国での膨潤性の軟岩では交換されやすい陽イオン EC はカルシウム分とマグネシウム分の混ざった粘土がほとんどであることである。

以上のような予備的な知識から次のように予察しておく。従来の土木技術は“大気中”の工事であったが、この論文の場合は、第三紀に堆積して以来、間隙水が充満したまま、飽和状態で保持された深部泥岩を地下水位を変化させないで水中掘削するし、岩盤の緩みもあとで述べるように少なく、吸水、大気、地下水のポテンシャルの変化、地下水の移動は、ごく少ない地中水没環境での事象であり、膨潤、スレーキングは泥水中ではごく少ないであろう。

しかし砂層での地下水のポテンシャルの変化は長時間を考えればあり得るので、坑壁をベントナイト泥水でケーキをつくることにより、遮水しつつ水中掘削することは必要であろうし、交換性の陽イオンの反応を抑えるために Ca 系の泥水、KCl ポリマー泥水等を用いればよいと予察される。今後、基礎実験によって現象を解明する予定である。

[設問 2] 軟岩トンネルでは地山強度比 β が 2 以下であ

ると、トンネル周辺に塑性域が発生するとされている。この β は岩盤の見掛けの圧縮強度を、土被り土圧で除した比率とされている。また、著者らが提唱し実用化されてきた大空洞の逐次的な緩み解析では、局所安全係数が 1.5 以下の領域は補強工事の対象とし、緩み領域と称してきた。水没工法においては、緩み領域は発生しないのか、そのための設計・施工上の対策は万全なのか。

[予察 2] あとで述べる覆工の裏込め部分の緩み領域には、水没工法特有の有利な点、すなわち覆工の剛性が主動土圧を高い三次元的な拘束圧力として保持する効果が働き、すなわち天然のプレストレスがこの領域に作用するので、局所安全係数は 1.5 よりはかなり大きな 4~10 の値に保持できる見通しが得られている。

この解析の前提としては、掘削中のライム泥水、KCl 泥水等にさらに重晶石の粉で加重された泥水を用いること、場合によっては前述の浮揚メンブレン等で工事中に遮水し、間隙水圧の変化がないように設計・施工において配慮することにする。さらに大前提として、プレコンソリデーションを余堀り領域に対して実施することも重視する。

[設問 3] 軟岩はクリープしやすい。タンクの変動内圧によってクリープ破壊³⁰⁾の心配はないか。

[予察 3] 最も注意しなくてはならないのは、裏込め部の局所安全係数の低下である。基本的には[予察 2]で述べたように、天然のプレストレス効果により、局所安全係数は 4~10 に保持され、変動応力によるクリープ破壊の心配は避けられる。

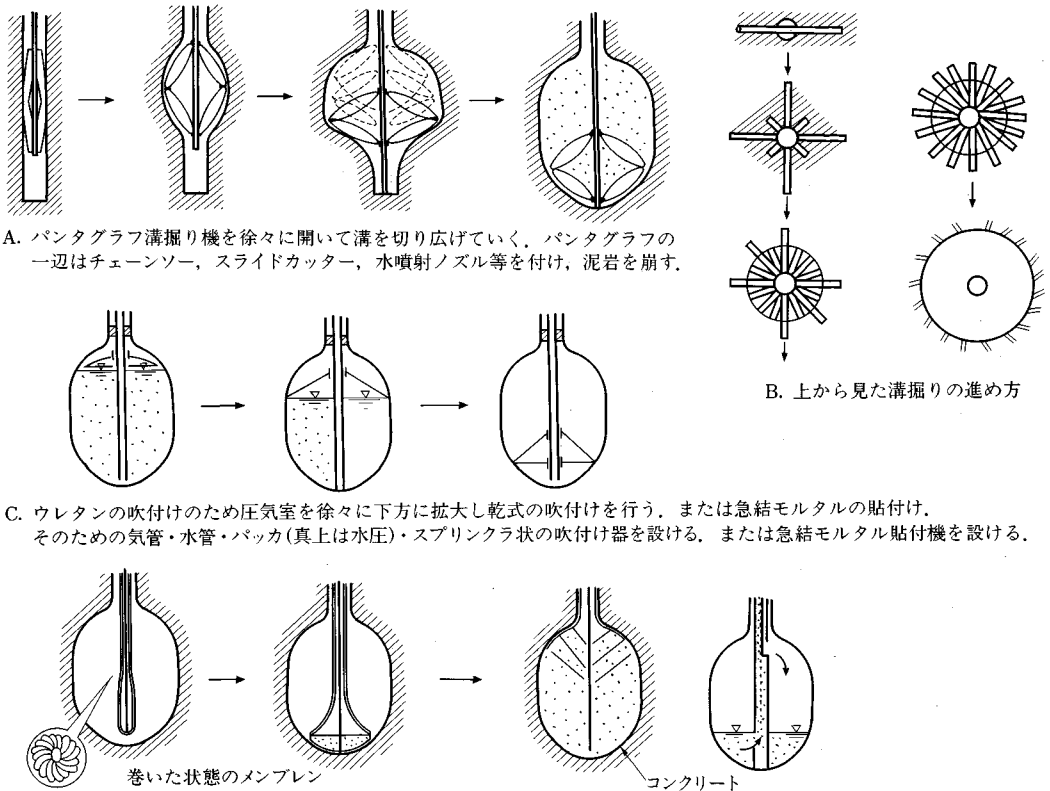
ただし、物性のばらつきを考えると、場合によっては余掘りしてプレコンソリデーションを行う慎重な対策も、あらかじめ考慮に入れておくことと、覆工コンクリートは遮水性の高いポリマーコンクリートを用いることがよいと思われる。この設問に対しても、今後、試験工事における計測と解析が必要である。

また、安定性は全応力解析以外に、浸透水流を仮定した有効応力解析も、今後、研究していくことにしたい。

[設問 4] 耐震工学的には、表層近くの地盤に傾斜面が内在する場合には、大きな地震によって地盤が“側方流動”を発生する懸念がある³¹⁾。このような地盤ではどのように対処できるのか。

[予察 4] 大地震においては、地盤内のすべりやすい傾斜した粘性土層は、地盤の側方流動の素因になりがちなことは、いくつかの注意深い震害調査によって判明している。対策としては、その流動の深さはほぼ 20~30 m 以浅に限られることが多いが、この深さまでは、周辺地盤も含め、地盤改良を図ることと、念のため二重管の立坑とすること等が考えられる。

[設問 5] 初期地圧の異方性に対し、どのように対処す



A. パンタグラフ溝掘り機を徐々に開いて溝を切り広げていく。パンタグラフの
一辺はチェーンソー、スライドカッター、水噴射ノズル等を付け、泥岩を崩す。

B. 上から見た溝掘りの進め方

C. ウレタンの吹付けのため圧気室を徐々に下方に拡大し乾式の吹付けを行う。または急結モルタルの貼付け。
そのための気管・水管・パッカ(真上は水圧)・スプリンクラ状の吹付け器を設ける。または急結モルタル貼付機を設ける。

D. メンブレン型枠(2重袋, タイプレート付) 巻いた状態のメンブレンを水中に降ろし、水中コンクリートを2重袋の中
に流し込む。やや重い液を中心部に流し、メンブレンを岩壁に押し付ける。2重袋の内のコンクリートの厚みはタイプレ
ートの幅で管理できる。重い液の揺動を抑えるため石灰灰、砂等で軽く固めておく。天井部のメンブレンのタイプレ
ートは傘型の骨組と一体化しておく。最後に、内部をA, Bの工程で掘削する。

図-13 メンブレン工法(仮称)の手順

るか。

[予察5] 土丹・軟岩での初期地圧については、まだ十分な知識は得られていないが、東京湾のベイブリッジの建造にあたり、首都高速道路公団³¹⁾によって試験されたところによると、土丹において深さ120mまでの孔内載荷テストでは、その静止土圧は図-15のように深さ方向に変化している。いまごく単純な予備的な推算として静止側圧係数 K を求めてみると、浅いところの2.7から深いところでは1.0に近づいている。この値が現存する土圧の異方性を示すとはただちにはいいがたく、むしろ浅い地層での剛性が先行圧密応力によって高くなっていることを示していると理解しておいた方がよい。現存している側方土圧は、今後、水圧破砕法その他の方法によって計測していく必要がある。

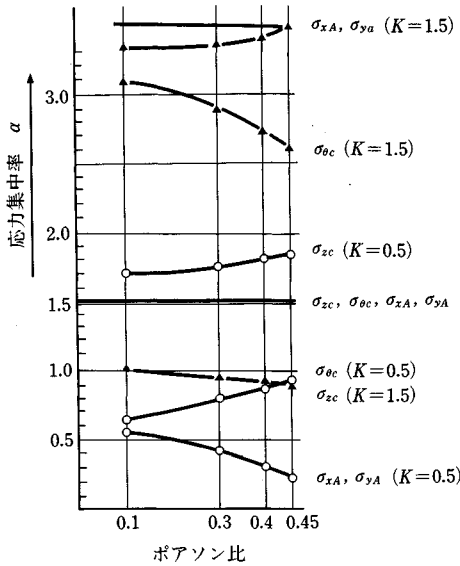
地下ドームの形状設計のための予備的考察として、球状の深部地下タンクの周辺応力に与える地盤の側方土圧の影響を検討しておく。

ごく近似的ではあるが、弾性理論^{32), 33)}を応用して、表-6のように、側圧係数 K とポアソン比 ν の値の変

化によって、図-16の球形タンクの周りの主要点である赤道面上の点Cと、北極・南極の極点A等の応力 σ_{xA} , σ_{yA} , σ_{yC} , σ_{zC} 等がどのように影響されるかを検討した。基準的な応力は、遠方での鉛直応力 σ_{z0} とする。この σ_{z0} は $\rho_r H$ とする。ここで、 ρ_r は岩盤の湿潤単位体積重量、 H は深さとする。側圧係数 K は σ_{x0}/σ_{z0} と σ_{y0}/σ_{z0} であり、これらは相等しいとしておく。

球形タンクは地表面からかなり深く、地表の半無限面の境界条件の影響は無視できるものとする。図-17に描いた応力状態の特長は、次のように要約できる。

- a) 理想的な応力状態は側圧係数 K が1.0の場合であり、応力集中度 α は、全点、全方向で、常に1.5である(ちなみに二次元円筒の場合は2.0である)。
- b) 側圧係数 K が0.5の場合には、ポアソン比は0.3近辺と想定すると、赤道面上C点での鉛直応力成分は $\alpha=1.78$ である。
- c) 側圧係数 K が1.5の場合には、ポアソン比 ν は0.3と想定すると、赤道面上のC点での水平円周方向応力成分は $\alpha=2.88$ 、極点Aでの応力は $\alpha=3.70$ に達する。



図—17 側圧係数による応力集中率の違い

有効なようである。水没工法では坑壁は適切な泥水によってほぼ遮水性のケーキができていて、以下の論を進める。その成否は別途、実験的な要素研究を進めることにしたい。

表—6の式を援用して、球面沿いの最大圧縮応力 σ_1 は

$$\sigma_1 = \alpha \rho_r H - \gamma_m H$$

ここに、 ρ_r と γ_m はそれぞれ岩盤湿潤単位体積重量および泥水比重とする。球面への直応力 σ_3 は、

$$\sigma_3 = \gamma_m H$$

したがって、最大せん断応力 τ_{max} は次式となる。

$$\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$$

いま、軟岩のせん断抵抗 τ_R は、内部摩擦項 $\sigma_n \tan \varphi_r$ を省略し、一軸強度 q_u の1/2が粘着抵抗項とすると

$$\tau_R = q_u / 2 + \sigma_n \tan \varphi_r > q_u / 2$$

となり、局所安全係数 S は、

$$S = \tau_R / \tau_{max} = q_u / \{ (\alpha \rho_r - 2 \gamma_m) H \}$$

もし S を与件とし、泥水比重 γ_m を求めるとすれば、

$$\gamma_m = (\alpha \rho_r H S - q_u) / 2 H S$$

この式に、 $S=1.5$ 、 $q_u=300 \text{ t/m}^2$ 、 $\alpha=1.5$ 、 $\rho_r=1.9 \text{ t/m}^3$ 、 $H=650 \text{ m}$ を代入してみると、 γ_m は 1.27 t/m^3 を必要とし、 $q_u=400 \text{ t/m}^2$ で $S=1.2$ なら γ_m は 1.17 t/m^3 を必要とする。この γ_m の値の評価に関しては、専門家によれば、ライム泥水に若干の重晶石粉を加え、粘度を低下させる配剤をすれば、実用上可能な加重泥水の γ_m であるといわれているが、十分な試験施工の経験によって、はじめて自信が得られることになろう。

q_u 値が不足する場合には、プレコンソリデーション

表—7 泥水の種類とそれらの特性 (予備調査段階)

	粘土の水和を抑制	比重の安定性	ソリッドコントロール	耐セメント性	逸泥耐性	低粘性	泥水処理	公害・環境対策
ベントナイト泥水	×	×	○	×	○	×	○	○
ベントナイト一分散系 (リグニン)	△	◎	◎	○	○	◎	◎	○
ライム泥水	○	○		◎	○	○		○
PC-120 泥水	◎	○		×	○	○	○	○
KCl 泥水	◎	○	△	○	○	○	○	○
ブライン泥水	◎	◎		◎	×	△	△	×
オイル泥水	◎	○	○	○	×	×	×	×

の手法を用いれば、 γ_m を 1.10 t/m^3 程度に低下させるシナリオが別途、存在する。

初期地圧が異方的な場合には、扁平な楕円体とする形状設計のシナリオも存在する。

いずれにしても、サイトに見合った実証研究を要する。

8. 連続地中曲面工法の可能性 (曲線レール・スライドカッター工法の場合)

さきに表—5に例示したように、いろいろな工法があり、このほかにも今後、斯界において発案されるであろう。ここでは以下に一例を示す。無人で掘り、しかも連続的な曲面形成の可能性として、著者は曲線レールをたて溝の奥に送り込むことを1987年に考えつき、1988年にその構想を示唆した³⁵⁾。それは2ヒンジ弓形レールの考えであった。その後、この構想は建機メーカーとゼネコンによってさらに具体化され、(財)エンジニアリング振興協会においてごく予備的な段階であるが概念設計が行われた³⁶⁾(ENAA-1988-プロ3)。しかし、まだ机上検討だけであるので、著者は発案者としてさらに基本的な機能を小型模型をつくり、研究すべく目下準備中である。

① 立坑掘削 所定の深度まで鋼管を建て込む。その中には泥水が充満している。これは在来技術で可能である (図—18)。

② たて溝工事 (図—19) 水没している立坑の下部において、パンタグラフ掘削機あるいはブーム掘削機を運転して、たて溝を泥水下で掘削する。そのたて溝の形状は、空洞の鉛直断面内の形状にする。この水没たて溝の保持時間は、約2~3週間と考えられる。空洞の直径は50m程度と想定する。

③ 曲線レールの建込み (図—20) 水没たて溝の

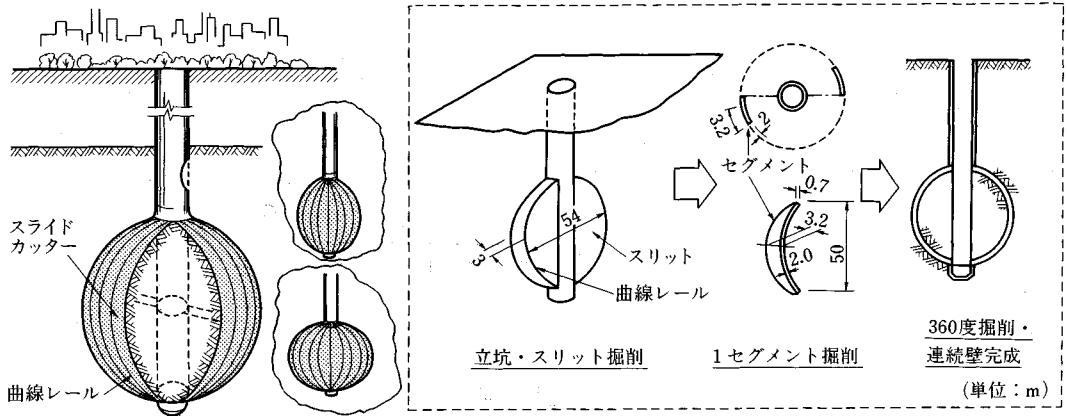


図-18 曲線レールスライドカッター工法 (ENAA-1988-プロ3)

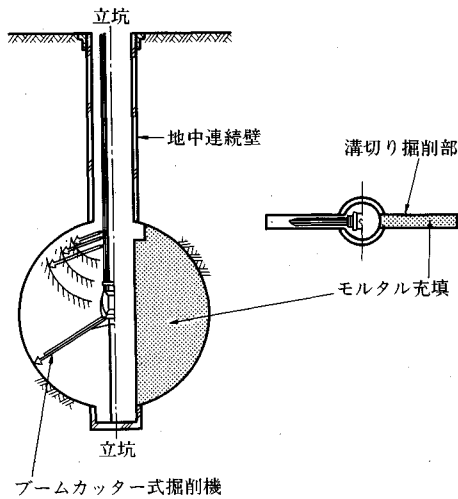


図-19 溝切り工事

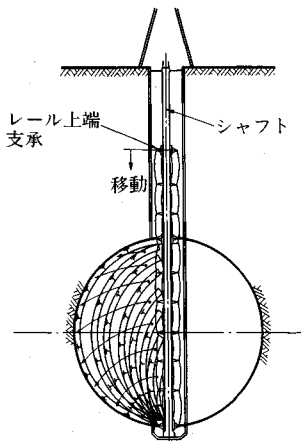


図-20 曲線レール建込み (ENAA-1988-プロ3)

奥まで曲線レールを吊り降ろす。この曲線レールは多数の要素からなり、各要素間はヒンジおよび油圧ジャッキで連結されており、たて溝の奥まで重力および連結用油

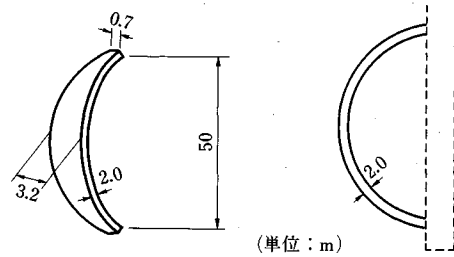


図-21 セグメントの形状・寸法

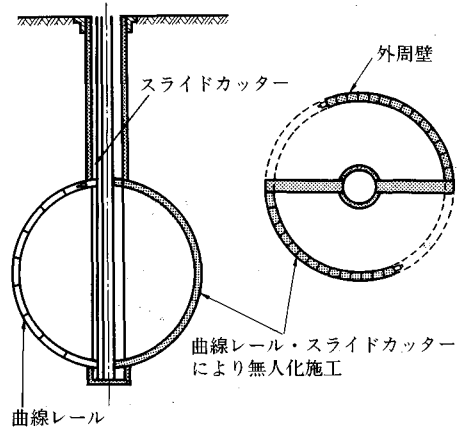


図-22 外周壁工事

圧ジャッキによって所定の曲線形状になるまで寄り付かせる。

④ 曲線溝の形成 (図-21, 図-22) 曲線レールの側面においてスライドカッターを運転し、いずれはセグメントコンクリートを水中でこの中に注入打設することになる曲線溝 (図-22) を形成する。この場合の掘削土砂は、曲線レールの上下から泥水ポンプかエアリフトによって地上に排出し、処理される。曲面溝の形状は、赤道部分で広く、両極部分では狭い (図-21)。曲面溝

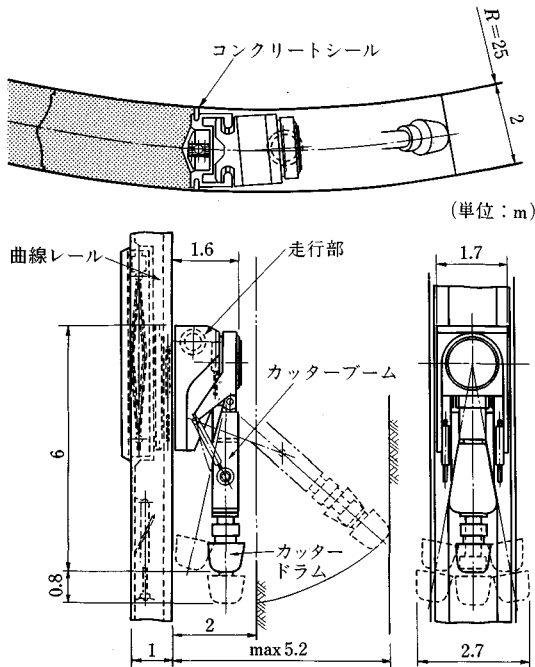


図-23 スライドカッター機構 (ENAA-1988-プロ3)

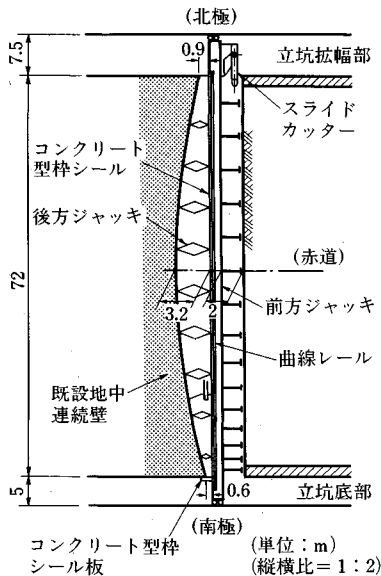


図-24 レール支保要領図 (ENAA-1988-プロ3)

の形状を管理するには、スライドカッターの張出しブームの運転を制御するプログラム掘削機能を開発する必要がある (図-23)。

曲面溝の水中の保持期間は約2~3週間と想定され、必要に応じ余掘りし、セメント固化してから曲面溝を整形する。

⑤ 曲線レールの移動 (図-24) 曲面溝の中にお

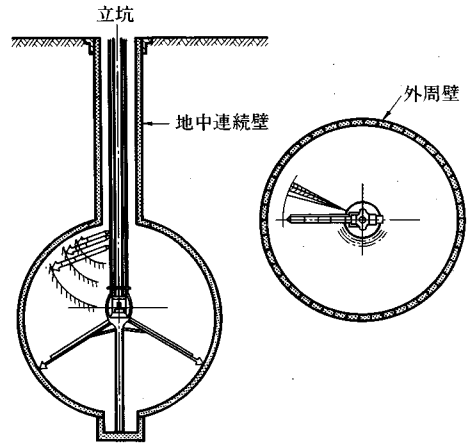


図-25 空洞内掘削 (ENAA-1988-プロ3)

いて、反力装置を使って、曲線レールを溝の奥まで移動させる。反力装置のストロークは赤道部分で長く、両極部分で短い。

⑥ セグメントコンクリートの打設 水没している曲面溝に、外周壁の一部となるセグメントコンクリートを打設する。水中の生コンクリートは高分子混和剤の入った餅状のコンクリートとする。この生コンクリートが曲線レールの側に洩れてゆき、固まるのを避けるため、曲線レールにはコンクリートシールを装備しておく (図-24)。あるいはチューブ型枠を用いる。

⑦ 第2回の曲線溝の形成

⑧ 曲線レールの移動 ⑤と同じ。

⑨ 第2回のセグメントコンクリートの打設 ⑥と同じ。図-18のように全セグメントを逐次打設する。曲線レールは、最終段階では、保守・計測のための計器とともに、コンクリート中に埋め殺す。

⑩ 外周壁のセグメントコンクリートが完成する。

⑪ 空洞内の本格掘削 (図-25)

すでに外周壁が完成している状態で、立坑内の中心鋼管を基準にして、ブーム方式あるいはバンタグラフ方式の拡幅掘削機を用い、空洞内の本格掘削を水中で行う。

⑫ 外周壁コンクリートには、空洞内の本格掘削につれて外から土圧が主動土圧として作用し、いわば天然のプレストレスが導入された状態になる。

このプレストレスを大きくすると、将来のSMES用の地下タンクにも応用できるかもしれない。

掘削の前に外周壁を完成し、あとから内部を掘ると、覆工コンクリートの背面の緩み領域の部分には主動土圧、場所によっては覆工コンクリートの変形による受働土圧として自緊作用が働き、高い拘束圧力の領域になるので、水漏れも少なく、地盤沈下は避けられる可能性が高い。

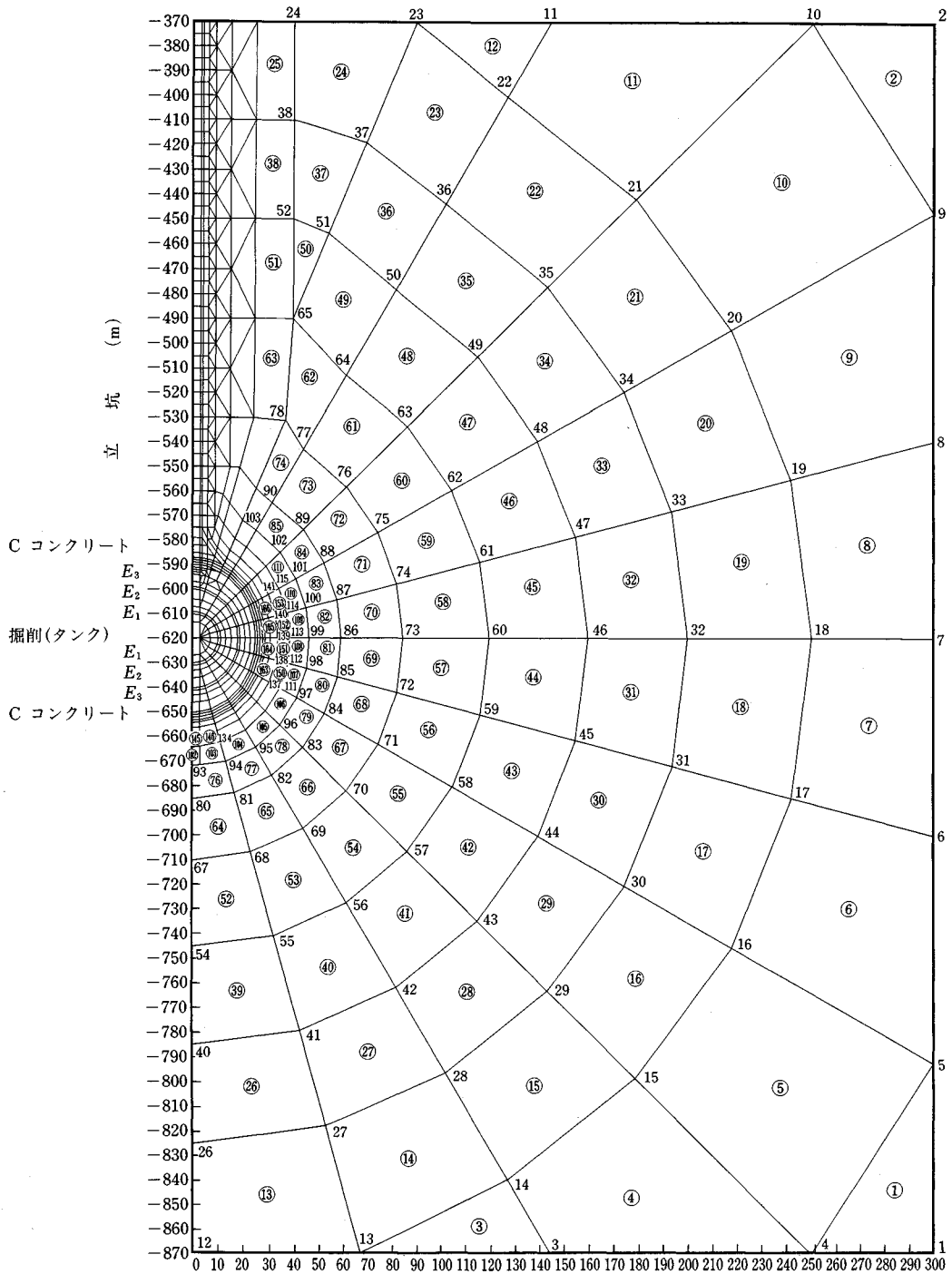


図-27 軸対称 FEM による非線形変形の掘削解析モデル

隙水圧の分布の非定常現象の解析，すなわち，有効応力解析を行うのがよいが，それは長期課題に委ねる．ここでは単純に全応力解析を行った．それが成立する前提条件は，主として遮水であり施工技術の高度化に期待する

面が大きいことは，さきに述べた．

このケーススタディーの対象は，圧縮空気貯蔵-ガスタービン発電の場合であり，圧縮空気圧は，ガスタービンシステムの高効率化の場合のムーンライト計画で実証

		局所安全係数		空洞中高部の水平変位 (cm)	
		岩盤	コンクリート	岩盤	コンクリート
掘削	Step 4	106.7		0.1cm	
掘削	Step 2	53.0		0.4cm	
掘削	Step 3	8.0		2.3cm	
掘削後覆土	Step 4	5.1		8.7cm	
泥水比重を低下	Step 5	4.5	3.3	9.0cm	1.7cm

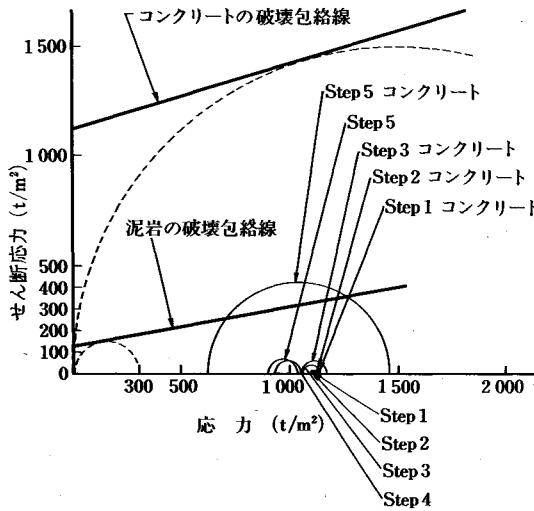


図-28 (a) 全断面工法の場合の応力の履歴

		局所安全係数		変位 (cm)	
		岩盤	コンクリート	岩盤	コンクリート
外周連壁完成後掘削開始	Step 1	56.25		0.4cm	
掘削	Step 2	20.95		1.3cm	
掘削	Step 3	20.47		1.4cm	
掘削終了	Step 4	10.25	4.3	5.0cm	5.7cm

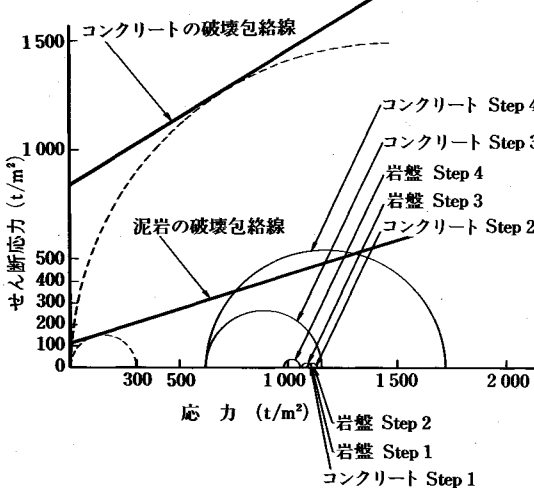


図-28 (b) 連続地中壁工法の場合の応力の履歴

全断面工法の場合 (コンクリート厚 3m)

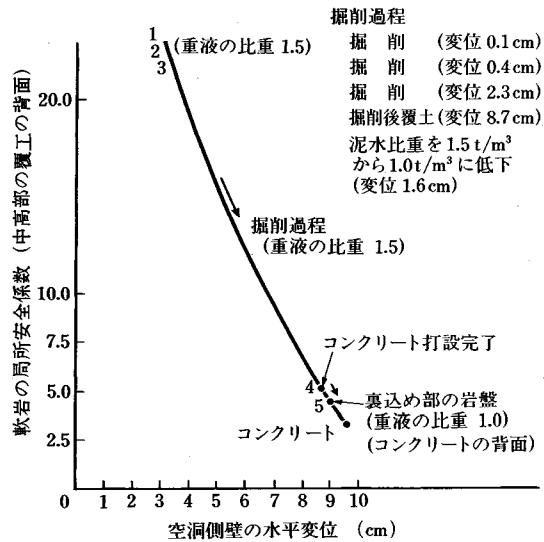


図-29 (a) 全断面工法における変位の変化 (空洞の側壁)

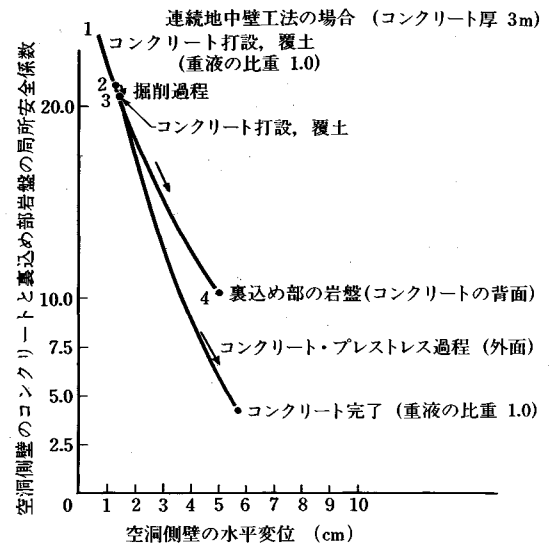


図-29 (b) 掘削に先行する連続地中壁の建造の場合の変位の変化

研究が行われた最適気圧に近い 60 気圧とした。地下タンクは図-27 のように 7 万 m^3 級とし、覆土厚さは 3 m としてモデル化した。タンクの深さは 620 m 深度とした。

軟岩の一軸強度は 30 kgf/cm^2 と想定し、初期変形係数 5000 kgf/cm^2 として、従来、著者らが用いてきた Mohr-Coulomb の破壊の包絡線と応力円との距離 d_{min} を非線形変形パラメータとし掘削は E_1, E_2, E_3 、コンクリート打設は C として、非線形変形逐次掘削解

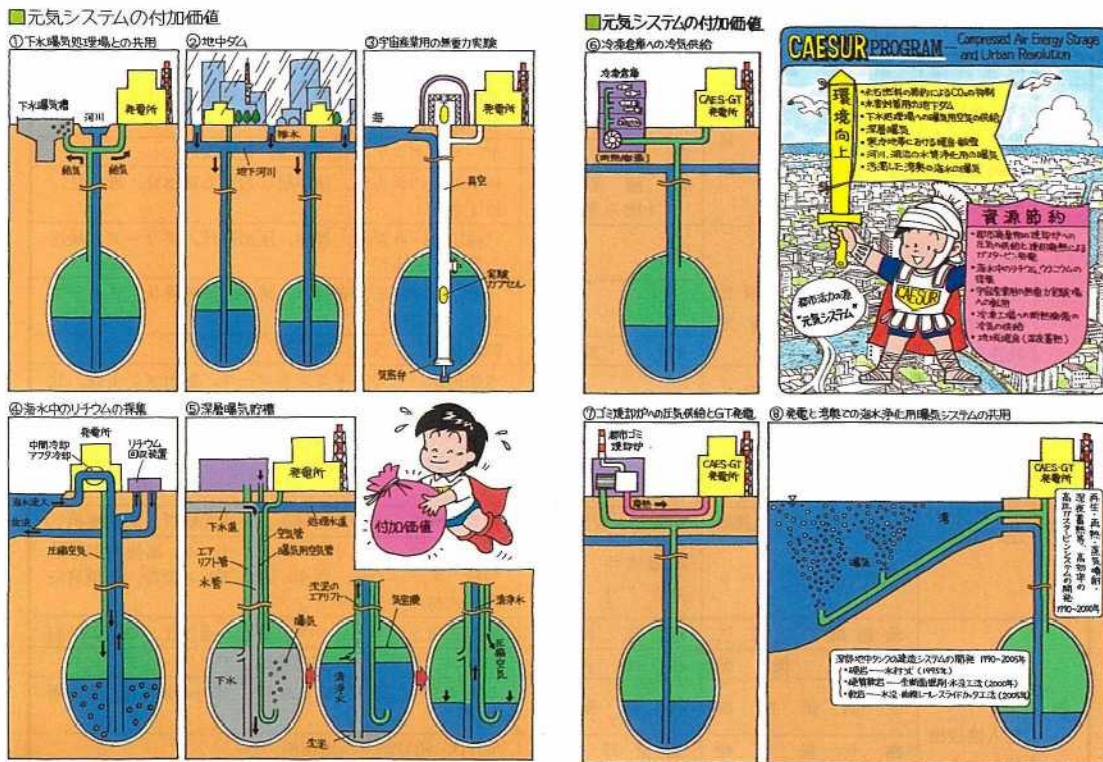


図-30 都市型の圧縮空気貯蔵-ガスタービン発電により随伴される共用的付加価値

析を行った。

この予備計算では、泥水比重は④、⑤では1.0、⑥では1.5を仮定した。

解析結果として、裏込め部分の局所安全係数 S_f は、図-28の(b)では④の場合10.3、⑤の場合4.5(図-28(a))、コンクリート応力の算定に基づく覆工コンクリートの局所安全係数はそれぞれ4.3と3.3が得られた。また、タンクの中腹部の変位は図-29の(b)と(a)で5.7cmと1.7cmであった。

泥岩は一般には透水係数が $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-8}$ cm/s のオーダーであることが多く、その泥岩の S_f が前述のように10.3~4.5に保持できれば基本的には透気性も心配がなく、クリープ変形に対しても安定に対応できる可能性が高い。しかし、応力集中、継目からの透水その他の不利な失敗に対する対策が先行していることが必要と思われるので、強靱なメンブレンとともに、全断面掘削では余掘りをしてセメント固化し、人工岩盤を周辺に形成する積極策も検討されなければならない。その計算はこの構想の段階では行っていない。今後、設計と施工の面で小型・中型の実験的な研究を展開していく。特に、全断面工法はプレコンソリデーションを行えば、泥水比重をかなり低下してもよいと思われるので、今後、さらに、数値解析面での予測研究も展開していきたい。

10. 深部軟岩での圧縮空気貯蔵が可能になった場合の都市の公共事業に伴伴される共用的な付加価値(構想)

Compressed Air Energy Storage が、もし東京・大阪などの大都市の地下で出現したら、そのエネルギーシステムに伴伴してどのような付加価値が生まれるかは、興味のあるところであろう^{(45)~(47)}。著者の夢は図-30に要約されている³⁾。すなわち、次の事業にコストダウンが波及するであろう。すなわち Compressed Air Energy Storage and Urban Revolution (CAESUR:シーザープログラム)となる。

- ① 下水曝気事業との共用
- ② 集中豪雨時の地下河川への転用
- ③ 無重力カプセル落下実験事業との共用
- ④ 海中のウラン・リチウム等の資源の採集
- ⑤ 下水処理用 Deep Shaft の機能との共用
- ⑥ 冷凍事業との共用
- ⑦ ゴミ焼却事業との共用(高圧・高燃焼度)
- ⑧ 海水・湖水・河川水のクリーン化のための曝気事業との共用

表—8 軟岩における深部地中空間建設の研究・開発課題案

	開発目標	研究課題	項目	内容と方法	
事前調査	深部堆積軟岩の遠隔地質調査法の開発	地層・地質構造の把握	地層構造の検層	堆積構造の走向・傾斜、規模、分布、弾性波、浅層反射、電磁性	
			岩質	ボーリングコア、孔内観察、孔内変形	
			堆積特性(挟み層)	初期地圧の異方性、挟み層における透水性、透気性、被圧水圧	
設計	ボーリング孔内での軟岩の力学的物性調査法の開発	泥岩、砂岩、頁岩の変形と強度	変形	三軸圧密、非排水、排水、圧密降伏、クリープ、繰返し変形、異方性	
			強度	一軸、三軸圧密、非排水、排水、圧密降伏、クリープ、疲労、異方性	
			初期地圧	側圧係数、三次元、異方性	
計	設計法と工法の開発	重泥水		水和抑制、ソリッドコントロール、耐セメント性、比重安定性、逸泥防止、低粘性	
			軟岩の安定性評価	非線形変形粘性変形	クリープ、繰返し応力、水和反応、局所安全係数の所要値、透水性、透気性
			空洞覆工の安定性評価	粘弾塑性変形解析	軸対称解析、非軸対称解析、三次元解析、動的解析
施工	無人建設機械システムの開発	泥水中コンクリート	高強度ポリマーコンクリート	耐泥水性能、ファイバーコンクリート、高強度用骨材、型枠、ストッパー、泥水、メンブレン型枠、打継目処理、骨材冷却、クーリング	
			最適構造と工法	最適設計	掘削と覆工のタイミング、形状の適正化、地圧の抑制
			立坑機械	水没立坑	鉄筋コンクリート、鋼製立坑、アクアヘッド
			空洞掘削機	拡幅掘削	パンタグラフ機(溝切りが主)、ブーム掘削機(旋回掘削)
			曲り掘り機	連壁部掘削	MHD、曲りレール用掘削
			小型水中掘削機	仕上げ用	ベンチカット、スライドカッタ、水中吹付け
			連続地中壁	曲面コンクリート壁	曲りレール、スライドカッタ、圧気用バック、エアリフト
			排土システム	高効率化	エアリフト、バケット
形状管理	泥水中計測・制御	形状、方向、速度、距離、標高、接触、水質			
維持管理	地表と地中空間の保全	環境保全	地表・地中の変状	地下水管理計測、変形のモニタ、泥水管理、排土処理	

11. 研究・開発課題

水没工法によるドーム空間の建造の技術はまだないに等しい。しかし、ニーズはあるし、すでに別途、急曲シールド機によってスパイラルなトンネルを重ねて、疑似的に串団子状の連続地中壁をつくるための大型プロジェクトが、この報告の発想とは異なっているが独立に開始された。

その大型プロジェクトの成果は、こちらの方法の開発にも十分、有益な成果として利用されるものと期待される。

表—8には、今後10年間をかけて開発すべき目標を掲げておいた。

著者は、大学の研究者・教育者であり、次世代の青年とともに、小さな手づくりの技術を創造することに小さな喜びを感じている。大きな実証は建設業界を中心とした官・民の青年技術者たちにまっところが多い。

今後、産官学合同の研究・開発体制が役所間のなわ張

りを越え、土木学会、土質工学会、建設機械化協会その他で横断的に展開されることを期待したい。

12. 結論

世界のどの大都市も、21世紀には、地中化が望ましい施設が増えるし、苛酷な地下労働から人間を解放する要求が高まる。しかも地盤沈下のない地中工法が望まれる時代になろう。

ここでは、CASE、SMES、大深度地下駅等をイメージした深部軟岩でのドーム空間の水没工法の着想を論じた。その構想は次が論点である。①水没掘削し、まず崩れる土丹・泥岩は泥土化し、余掘りをした空間をセメントと攪拌・混合し、均質な人工の泥岩に地盤改良する。

②その人工泥岩を地中でドーム状に拡幅掘削する。その掘削は拡幅率をあげる方式として、パンタグラフ溝切り機を考えた。③水没ドーム空間はコンクリート覆工する。そのためは、可撓性に着目したチューブ型枠を考えた。

④水中コンクリート打設後はチューブ型枠を地上に撤去

し、水中のドーム形状を水中クレーンを用いて整形すれば、地中に水没ドームができることになる。⑤加重・泥水を用いれば掘削・覆工時のその比重と覆工完成後の淡水化した比重差に応じ、覆工コンクリートに均等な天然のプレストレスが導入される。⑥この天然のプレストレスの導入量をさらに大きくし、ドームの耐震性を高めるには、外周壁を先行し、内部掘削が後続する連続地中曲面壁工法の構想をたてた。それは曲線ルール・スライドカッター工法として提案した。

まだごく部分的な要素実験しか行っていないが、今後、小型・中型と模型実験を重ねつつ、実用化を図っていく予定である。

謝 辞：母なる大地と莫々たる空気と力強い水を結びつけるこのロマン³⁾は、大電力を都市の地下深くに圧縮空気として貯めるための水没・水圧補償式タンクの建造技術として着想し、5年間の歳月が経った。その間、硬岩^{41)~44)}の場合のプロジェクトはこの構想の一部で幸いにも1990年4月より国が採り上げることにつながり、いずれ実用化が図られるであろう。

軟岩の場合も、幸いにも電力中研の若い研究者¹⁹⁾、ゼネコン・建設機械・地中開発業界等から協力・示唆を受けつつ、着々と基盤研究が1986年以来続けられている。今後、実証研究の志を同じくするこれらの人たちの体制ができれば21世紀にむけて新しい都市土木の技術が生まれるであろう。このロマンの萌芽期における数多くの人々を思い出しつつ、教示と協力にお礼申します。

参 考 文 献

- 1) 星野・釜井：東京湾周辺深部軟岩層の地質・物性の概要，第21回岩盤力学シンポジウム論文集，pp.231~235，土木学会，1989.2.
- 2) 星野・渡辺・釜井：東京湾周辺深部軟岩層の地質・物性の概要（その2），第22回岩盤力学シンポジウム論文集，pp.491~495，土木学会，1990.2.
- 3) 林 正夫：ピーク発電とミドル発電を兼用できる新しい圧縮空気貯蔵-ガスタービンシステムの構想研究——都市型CAES-GTの実現性の予測——，土木学会論文集，No.412/III-12，pp.1~22，1989.12.
- 4) 林 正夫：新構想の深部軟岩での地中タンク（水没方式）の工法の概念，電力土木，No.219，pp.1~19，1989.1.
- 5) Vann, R. D. and Schainker, R. B. : Bubble Formation and the Champagne Effect, RP 1791-7, EPRI, Feb. 1986.
- 6) Giramonti, A. J. and Schainker, R. B. : Two Phase Flow Instability and Control Analysis of the Champagne Effect, RP 1791-2, EPRI, Feb. 1986.
- 7) Pellin, J. : Compressed Air Energy Storage using Hard Rock, Test Results and Evaluation of Test Results, Vol.1 and Vol.2, GS-6620, EPRI, Feb. 1989.
- 8) 沖野文吉：ボーリング用泥水，技報堂出版，1981.
- 9) 吉川・桜井・立松・佐久間・水野：軟岩の劣化特性に関する試験法の研究，鉄道技報報告，No.1231，1983.3.
- 10) 仲野良紀：粘土性岩における押し出し性—膨潤性トンネル地圧のメカニズムと実測例，応用地質，15-3，pp.27~43，1974.10.
- 11) 村山・関口・鳥井原・沢田：軟岩の吸水膨脹に関する一考察，京大防災研究所年報，No.17-B，pp.1~11，1974.4.
- 12) 小島・青藤・越智：泥質軟岩の膨潤性と力学試験値の評価，第5回岩の力学国内シンポジウム講演集，pp.25~29，1977.2.
- 13) 土木学会岩盤力学委：軟岩の調査・試験の指針，1977.1.
- 14) 宮沢・小柳・小泉・喜田・佐久・三浦：安定液掘削工法，1979.8.
- 15) 川村・青柳・成田・八尋・吉田・西：高速水噴射を利用した地下工法（その6），日本建築学会大会学術講演概要，1978.9.
- 16) 岸 清・野尻陽一：人工軟岩材料の開発，セメント・コンクリート，No.511，pp.78~86，1989.
- 17) Ronald P. Steiger : Fundamentals and Use of Potassium Polymer Drilling Fluids to Minimize Drilling and Completion Problems associated with Hydratable clays, Journal of Petroleum Technology, pp.1661~1670, Aug. 1982.
- 18) 林 正夫：軟岩での深部地下タンクの技術構想（Panto掘削システムとメンブレン・重液方式の構想の概念），第19回岩盤力学に関するシンポジウム，土木学会，1987.2.
- 19) 国生・藤原・西・林：深部軟岩を利用した圧縮空気貯蔵（CAES）空洞の成立性調査，電力中研調査報告，U88045，1988.10.
- 20) 林 正夫：水没工法による深部軟岩での大空洞建造の可能性（螺旋状管体型枠による覆工法および曲線ルール・スライドカッター工法の構想），第22回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.246~250，1990.2.
- 21) 林 正夫：深部の軟岩での大きな空洞の可能性の岩盤力学的考察——スライドカッター工法とエアドーム工法の構想，土木学会第20回岩盤力学に関するシンポジウム，1988年2月.
- 22) 安久津・古山・北沢・野永・百合山：横浜市金沢下水処理場におけるPC卵型消化タンクの設計と施工，プレストレストコンクリート，29-4，pp.16~27，1987.7.
- 23) 林 正夫・日比野敏：地下発電所の空洞掘削時の岩盤挙動解析，地下構造物の設計と施工，pp.81~112，土木学会，1976.
- 24) 林 正夫：深部軟岩における地中空間の掘削と覆工の構想——無人・水没工法の概念——，土木技術，第44巻，第7号，pp.60~70，1989.7.
- 25) 和泉 隆：水中不分離コンクリート——なぜ水の中で固まるか——セメントコンクリート化学とその応用，No.18，セメント・コンクリート，1987.8.
- 26) Akai, K., Hayashi, M. and Nishimatsu, Y. : Weak Rock, Proceeding of ISRM Symposium, Tokyo, 1980.
- 27) 西・川崎・桜井・窪田：東京湾東岸部における深部堆積物の高圧圧縮特性および工学的性質，第25回土質工学会

- 研究発表会, 1990. 6.
- 28) 林 正夫：軟岩における岩盤分類の工学的背景, (吉中等編：岩盤分類とその適用の第3編第1章), 土木学会, 1989.
- 29) 杉 正・森山 真：飽和軟岩の疲労破壊挙動——破壊の時間依存性について, 第21回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会, pp. 466~470, 1989.
- 30) 平井・吉村・世一：上総層群泥岩の繰返し荷重下における動力学的特性, 第21回岩盤力学シンポジウム, 土木学会, pp. 471~475, 1989.
- 31) 富沢・長谷川・池内・大西：東京港連絡橋の基礎地盤となる土丹の物性, 土と基礎, 35-3, 1987.
- 32) Southwell, R. V. and Gough, H. J. : On the concentration of the Neighbourhood of small flaw and on propagation of fatigue fracture in statically isotropic materials, Phil. Mag., Vol. 1, No. 1, pp. 71~97, 1926.
- 33) 西田正孝：応用集中, 森北出版, 1988.
- 34) 那須・誠他：地震被害と地盤構造 (その1)~(その5), 鉄道技研報告, 3-8, pp. 50~57, 1989, 土木学会第42回年次学術講演会, III-44, 1987, 同第44回年次講演会III, 1989, 第24回土質工学会研究発表会, pp. 895~898, 1989, 第17回土木学会関東支部技術組合発表会講演概要集, pp. 226~227, 1990.
- 35) 林 正夫：深部の軟岩での大きな空洞の可能性の岩盤力学的考察——スライドカット工法とエアドーム工法の構想——, 第20回岩盤力学に関するシンポジウム, 1988. 2.
- 36) (財) エンジニアリング振興協会：都市域の軟岩地帯中の無支保空間建設システムの開発に関する調査研究, ENAA-1988-プロ3, 1989. 3.
- 37) 林 正夫：水没工法による深部軟岩での大空洞建造の可能性——螺旋状管体型枠による覆工法および曲線レーン・スライドカット工法の構想——, 第22回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 246~250, 1990. 3.
- 38) 林 正夫・日比野敏：地下の削削に伴う周辺地盤の緩みの進展に関する解析, 電力中央研究所報告, No. 67095, 1968.
- 39) 日比野・本島・林：岩盤内大規模地下空洞の掘削時挙動とその安定性, 電力中研における一連の研究.
- 40) 林 正夫：深部地中タンクの無人工法の岩盤力学的考察——水没式タンクの試論——, 第21回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会, 1989. 2.
- 41) 林 正夫：新構想の深部軟岩での地中タンク (水没方式) の工法の概念, 電力土木, No. 219, 1989. 3.
- 42) 中川・駒田, ほか：岩盤内圧気貯槽からの漏気防止条件, 土木学会論文集, No. 370/III-5, 1986. 6.
- 43) 林 徹：圧縮空気貯蔵システム, 土木通信社, 第56回講習会, 1986. 11.
- 44) 電源開発 (株)：圧縮空気貯蔵発電システムに関する調査研究 (II), NEDO-P-8825, 新エネルギー, 産業技術総合開発機構より電発に委託した調査の報告書, 1989. 3.
- 45) 柴田徳衛：都市と人間, 東大出版会, 1984.
- 46) 高橋 裕：水資源をめぐる最近の課題, 学士会報, No. 775, 1987.
- 47) 茅 陽一：エネルギー新時代——ホロニックパスに向けて, 省エネルギーセンタ, 1988.

(1990. 4. 16・受付)