

地下空間建設技術

1. 地盤を構成する材料(土質と岩)

2. 地下空間建設技術

地盤を掘る(掘削):

開削

トンネル掘削

トンネルの種類:

都市トンネル
(地下鉄、下水)

{ 開削トンネル
シールドトンネル、都市NATM

山岳トンネル
(高速、鉄道)

{ 従来型
NATM

地球の構造

地盤:地殻のごく表層

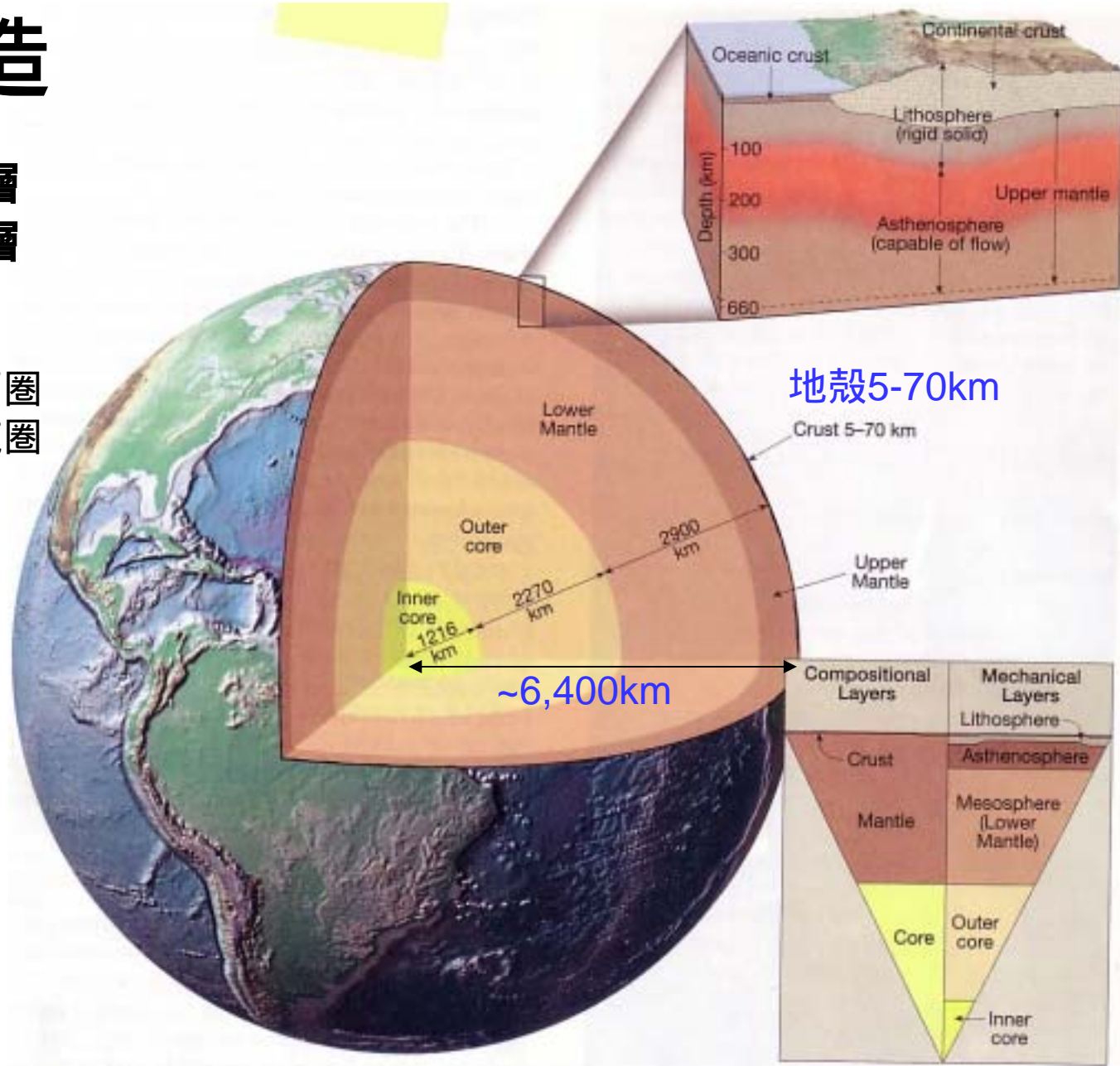
地殻:地球のごく表層

Solid Earth(地圏)

- 地殻
 - マントル(上部)
(下部)
 - 外核
 - 内核
- 岩石圏
岩流圏

Hydrosphere(水圏)

Atmosphere(大気圏)



岩石循環 Geologic (Rock) Cycle

何千万年のサイクル

地殻構成元素

Elements	% by weight
Oxygen (O)	46.6
Silicon (Si)	27.7
Aluminum (Al)	8.1
Iron (Fe)	5.0
Calcium (Ca)	3.6
Sodium (Na)	2.8
Potassium (K)	2.6
Magnesium (Mg)	2.1
All others	1.7
Total	100

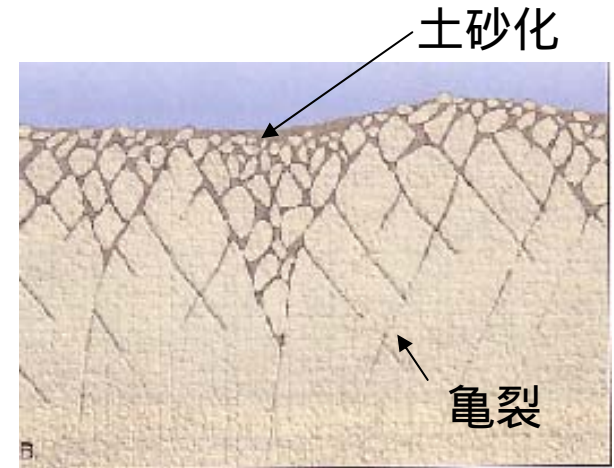


“Earth” 6th ed. Tarbuck & Lutgens,
Prentice Hall, 1999.

地盤材料

- 岩 (固結)

- 硬さ (軟岩、硬岩)
- 風化の程度 (風化岩)
- 亀裂、断層の存在



表層ほど風化大

- 土質 (未固結の粒状材の集合体、間隙 (粒々の間) あり)

- 粒の大きさ (粘土、シルト、砂、礫、石)

分子サイズ (10⁻¹⁰) ~ 5 μ m、~75 μ m、~2mm、~75mm、75m^{以上}

- つまり具合

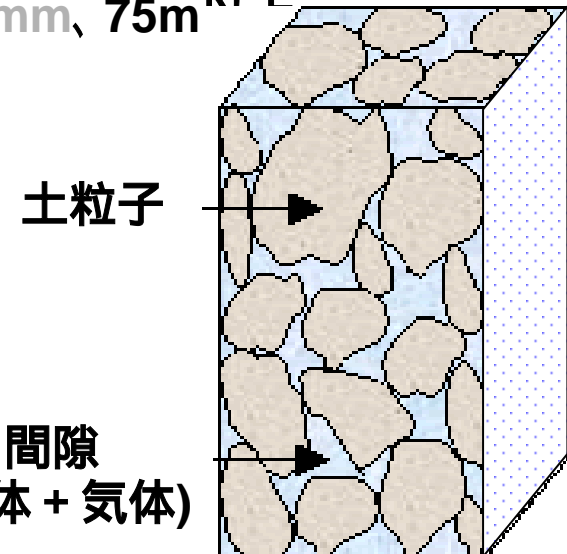
(間隙比(e) = 間隙体積 / 土粒子の体積)

- 間隙の水の量

(含水比(w) = 水の重さ / 土粒子の重さ)

砂: e=0.5 ~ 1.0、粘土: e=1.0 ~ 15

(土粒子1に対し水15) (液体 + 気体)

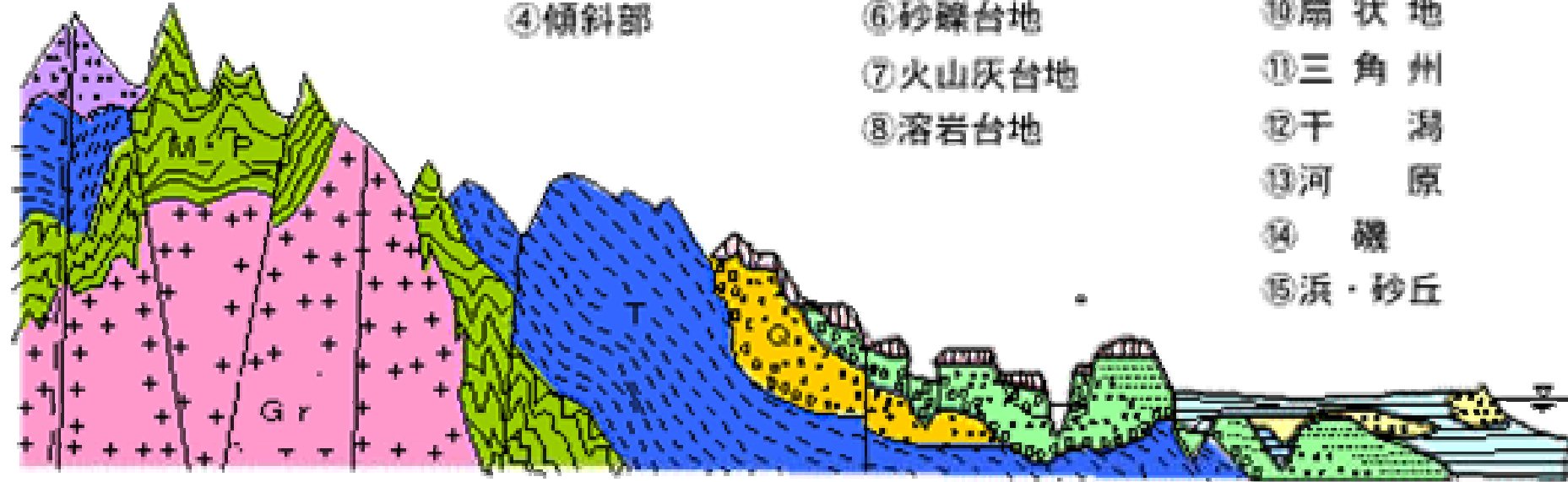


地形区分図

- ① 山頂傾斜部
- ② 山腹傾斜部
- ③ 山麓傾斜部
- ④ 傾斜部

- ⑤ 岩石台地
- ⑥ 砂礫台地
- ⑦ 火山灰台地
- ⑧ 溶岩台地

- ⑨ 谷底平野
- ⑩ 扇状地
- ⑪ 三角洲
- ⑫ 干 潟
- ⑬ 河 原
- ⑭ 磯
- ⑮ 浜・砂丘



土の活用法入門:地盤工学会

東京の地盤図(地質断面図)

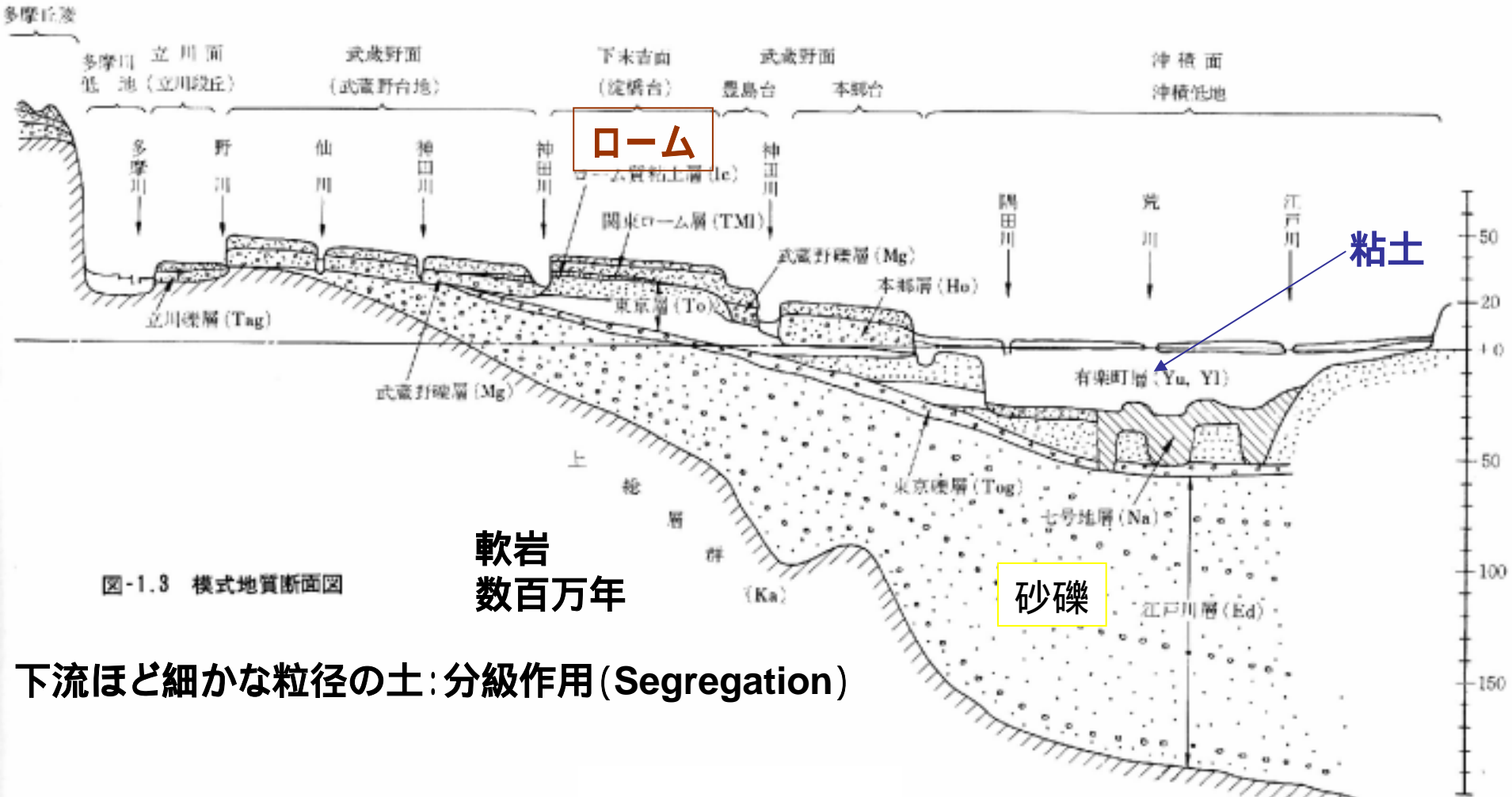


図-1.3 模式地質断面図

下流ほど細かな粒径の土:分級作用 (Segregation)

堆積地盤の年代測定: 絶対測定 (放射線同位元素: C_{14} 半減期5730年、 U_{238} :45億年)、
相対測定 (化石、風化の程度)

地盤材の力学特性：強さ、硬さ

岩：非常に強度が低い：チョーク、岩塩

1-25MPa

非常に強い(珪岩、玄武岩)

200MPa以上

参考：コンクリート20-50MPa、

鉄：200-800

硬さ：強度の100～500倍

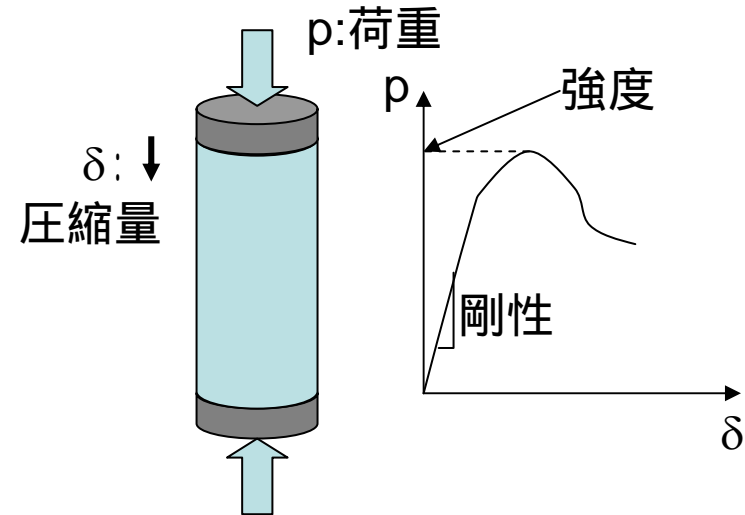
参考：コンクリート114GPa

鉄：200GPa

土：強度 0～5MPa

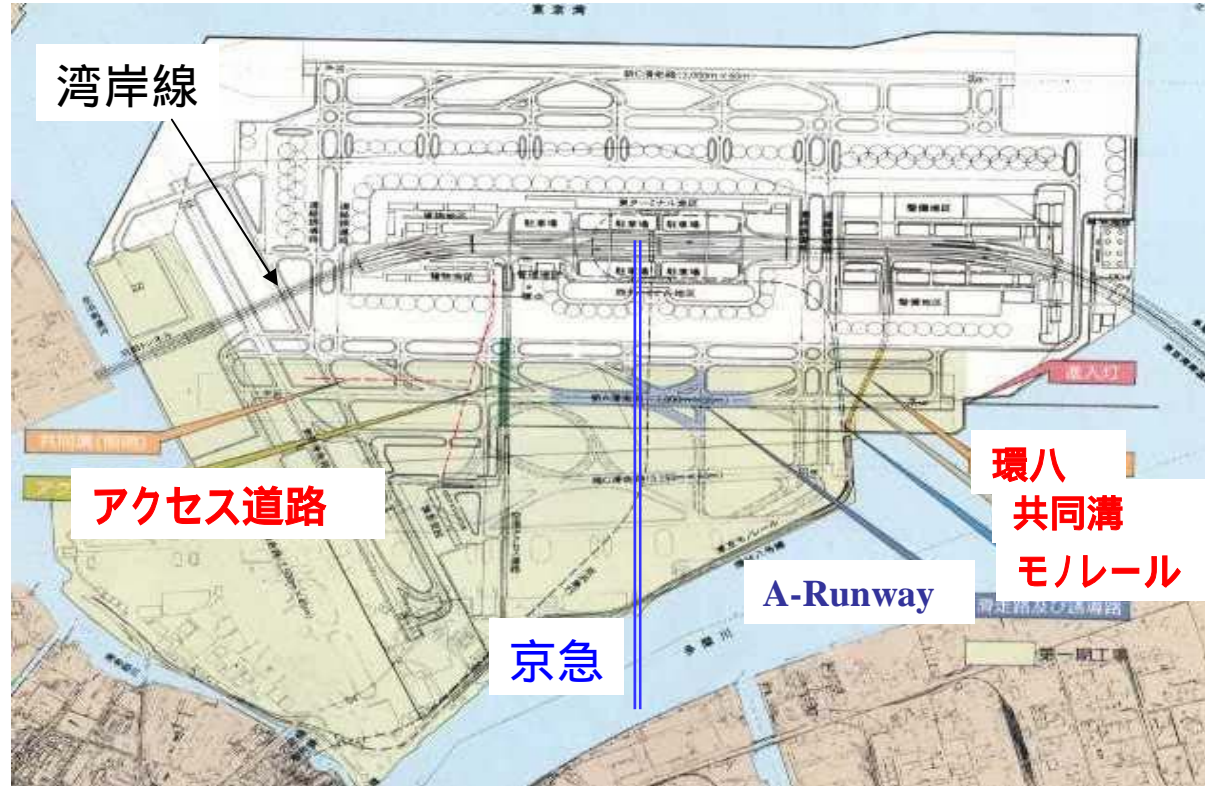
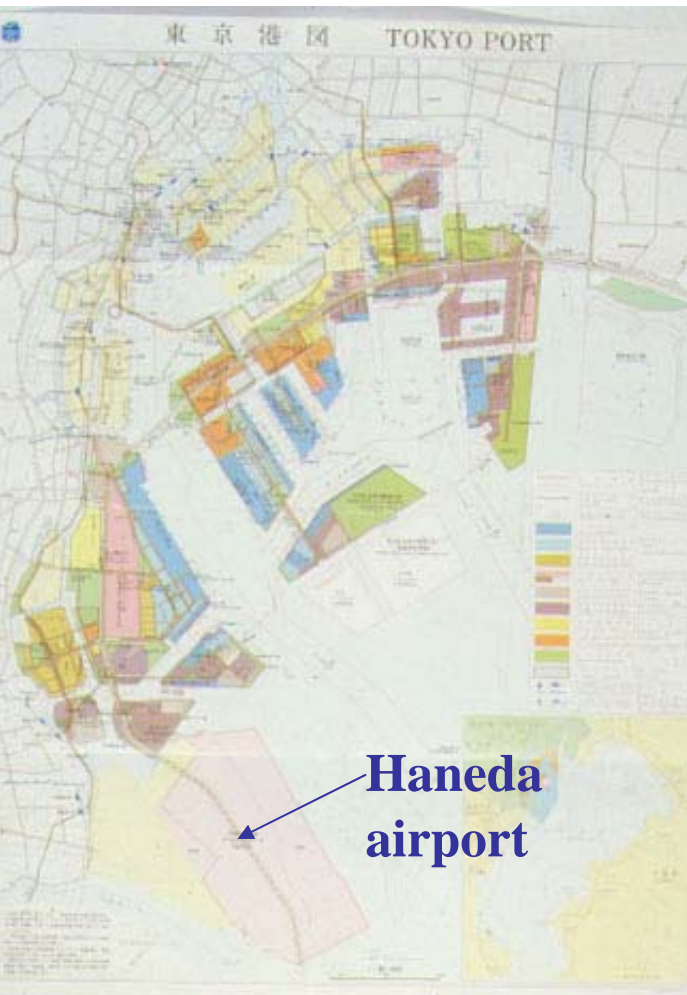
土の種類、詰まり具合、受けている圧力によって決まる

特に、軟弱粘土(羽田マヨネーズ)、液状化した砂

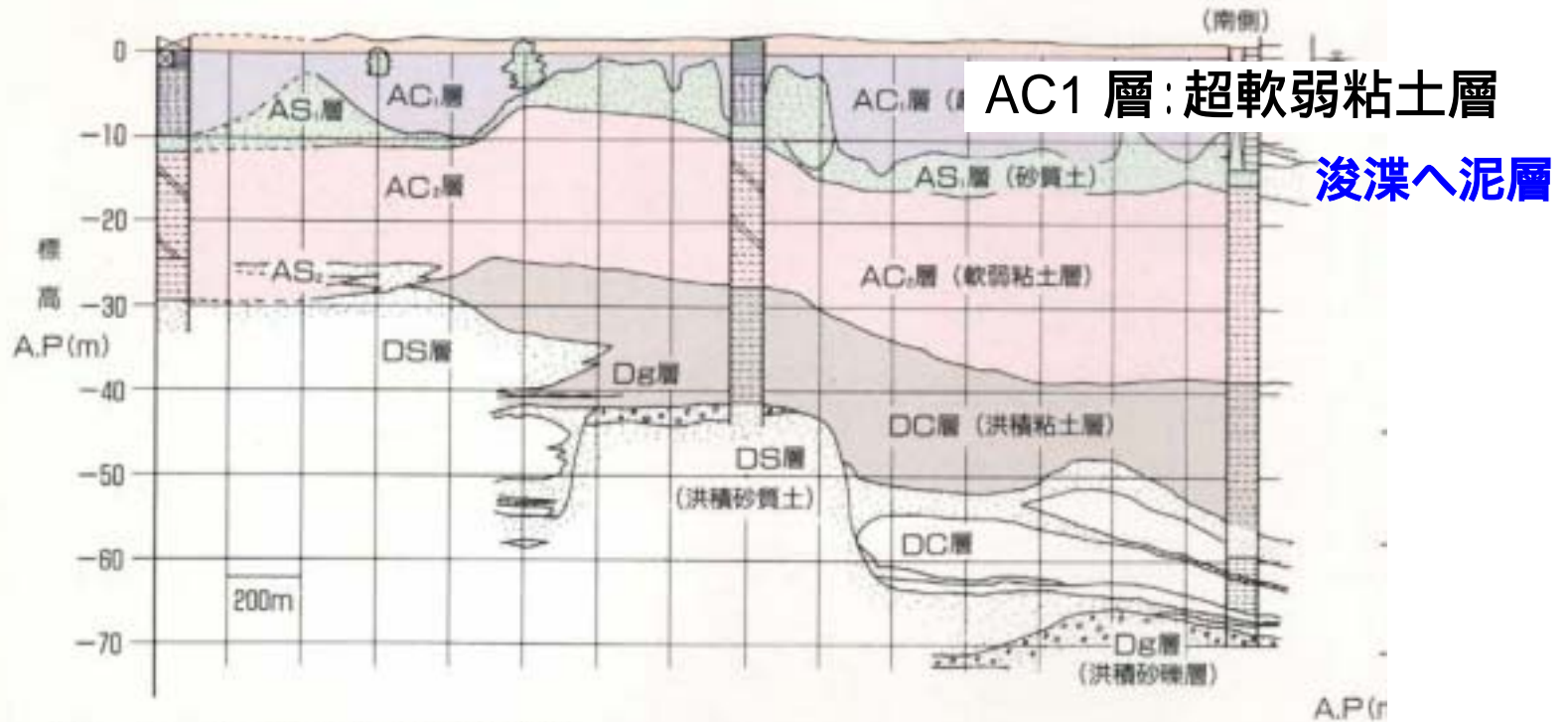


硬い岩は、鉄と同じ強さ、硬さ、
しかし、もろい

羽田空港沖合い展開工事



Soil Profile along Runway A



Ac₁ Ac₂ Dc層の主な土質常数

層名	Ac ₁	Ac ₂	Dc
土の統一土質分類	粘土(CH)、粘性土(CL)	(CH)、(CL)	(CH)、(CL)
単位体積重量 γ_t (tf/m ³)	1.2~1.9	1.5~1.6	1.6~1.8
自然含水比 w (%)	30~200	60~110	30~70
塑性限界 PL (%)	20~70	30~70	20~55
液性限界 LL (%)	50~120	50~120	45~120
一軸圧縮強度 q_u (kgf/cm ²)	0.1~0.5	1.0~2.0	1.7~2.5
体積圧縮係数 m_v (cm ² /kgf)	10^{-1}	10^{-2}	10^{-2}
圧密係数 O_v (cm ² /day)	70	正規圧密領域 過圧密領域	100 ~ 700 700 ~ 1000
過圧密応力 P_c (tf/m ²)	0	4~5	5~10以上

超軟弱浚渫土 -羽田マヨネーズ層-



表層地盤改良



羽田空港の各種掘削工事

アクセス道路(開削トンネル)の建設現場



都市トンネルの作り方

日本の都市部：未固結の土質地盤

- 開削工法

浅いと有利だが、深いと建設費大

- シールドトンネル工法

日本における都市トンネルの標準
土質の種類問わず、但し、高価

- 土砂NATM

シールドに比べると安い、但し、地盤の種類は限定される。
不明な点も多い、変形、地震時安定性。

開削工法

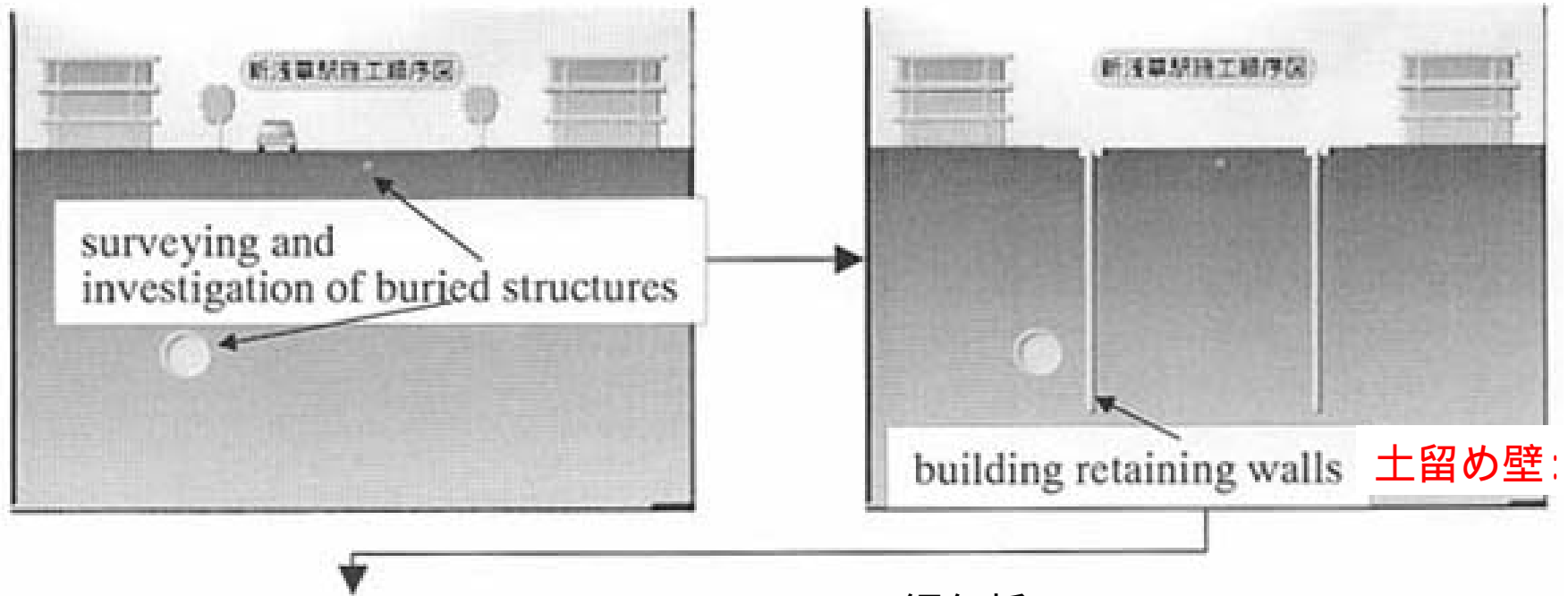
軟弱な地盤：
狭隘な現場：

いかに掘削面を支えるか

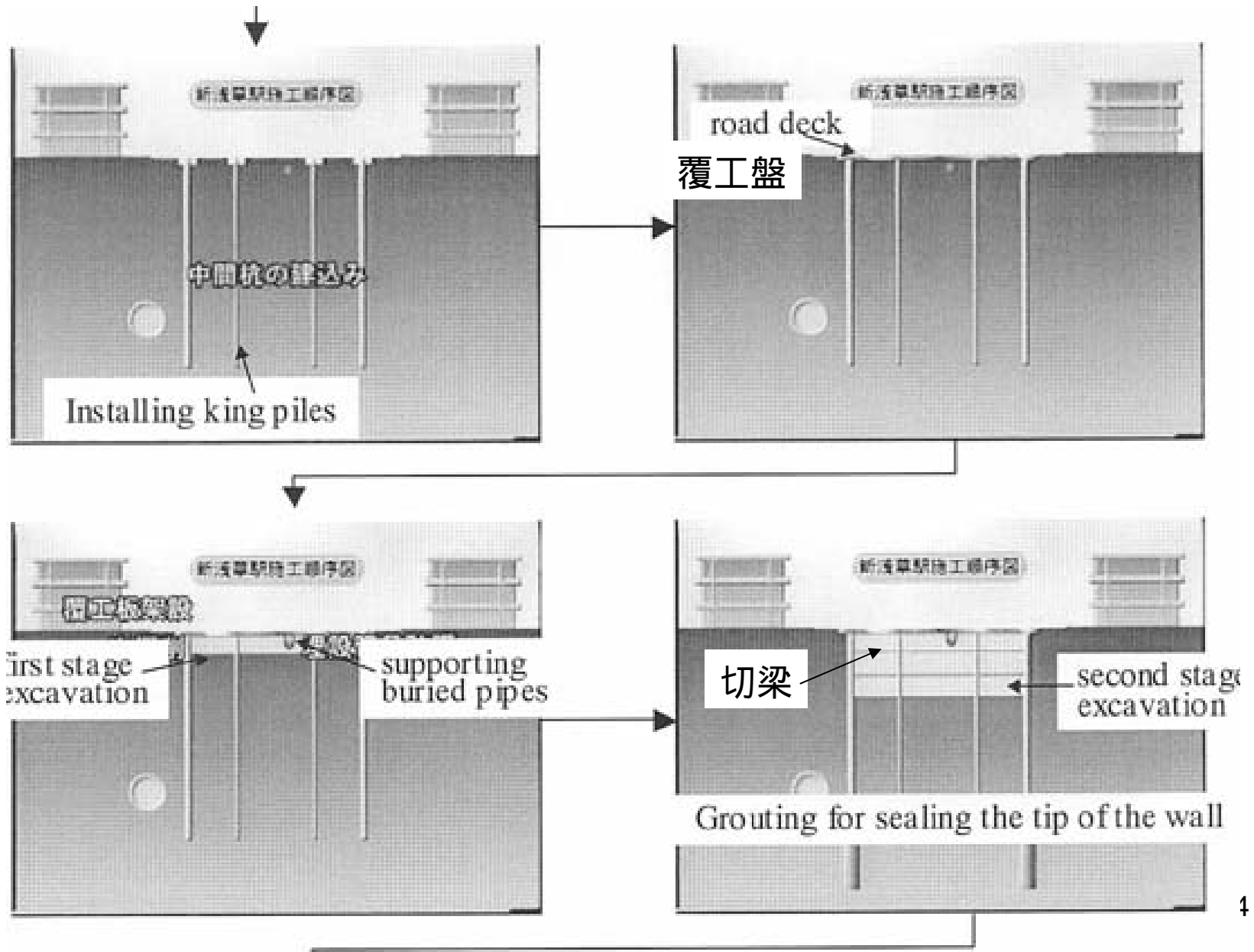
土留め壁と支保工

浅いと有利だが、深いと建設費大

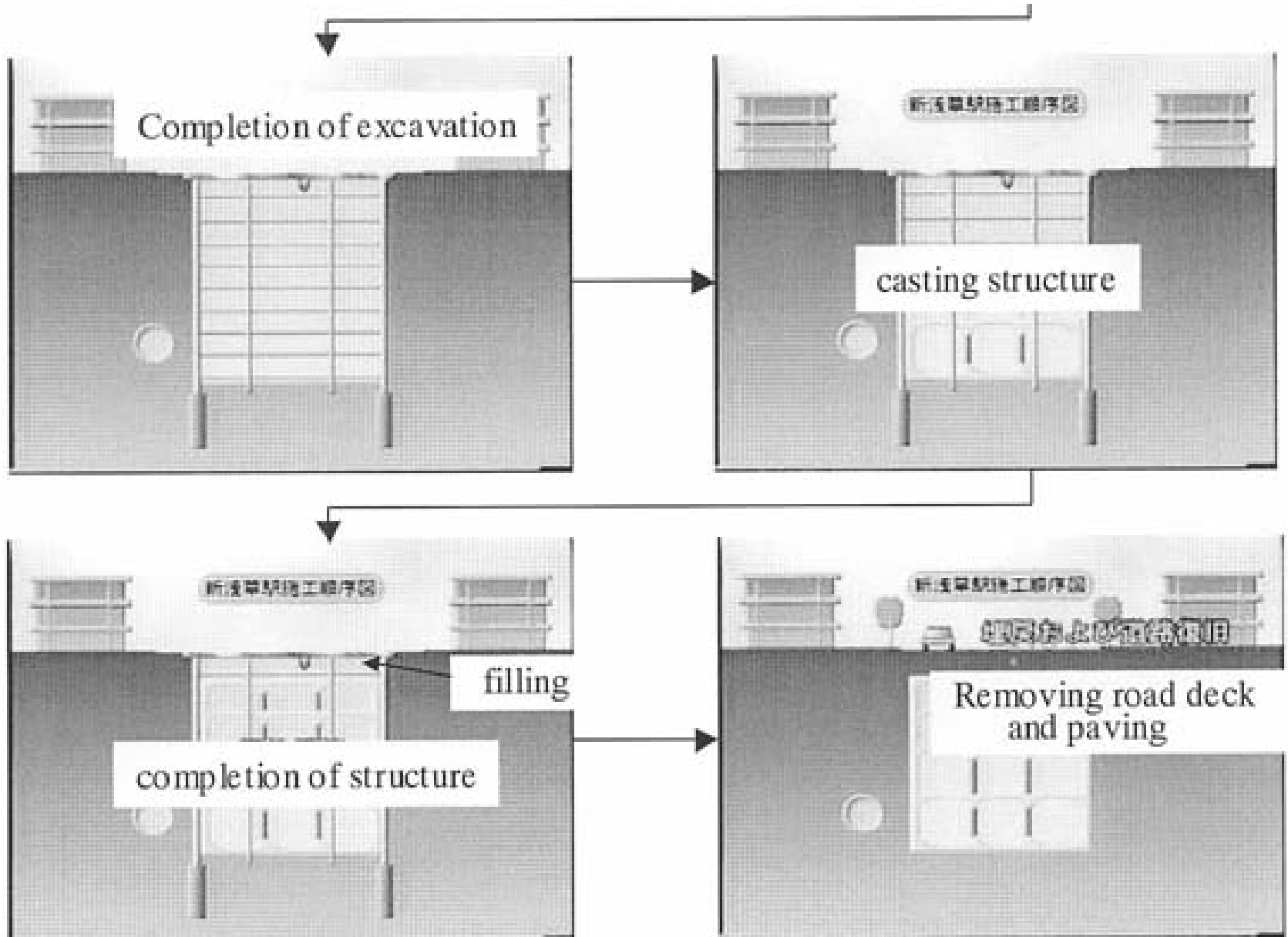
開削工法による地下施設(地下鉄駅)の建設



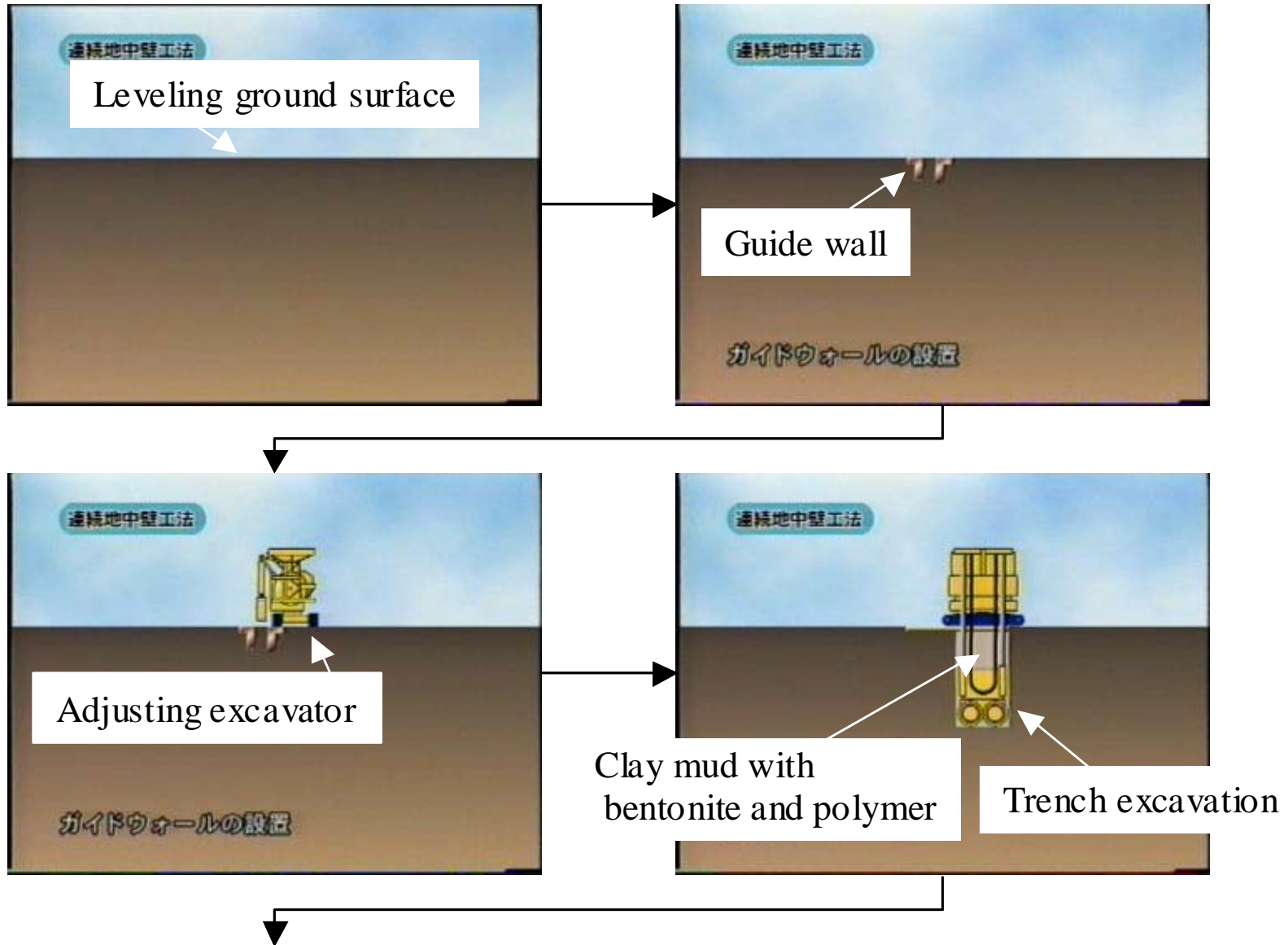
前頁の続き



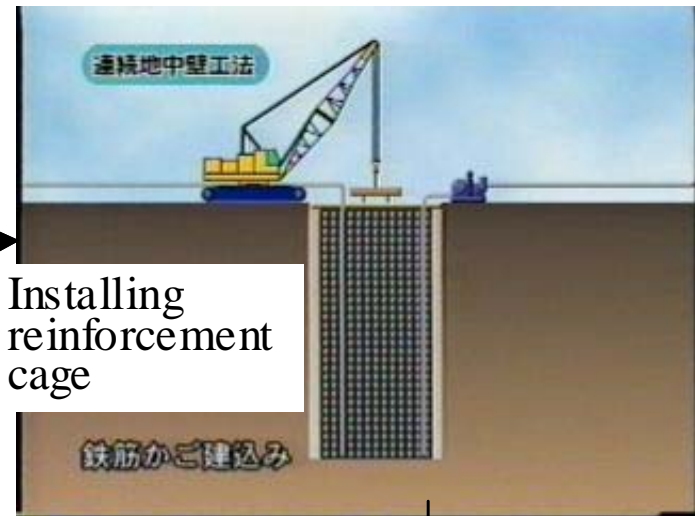
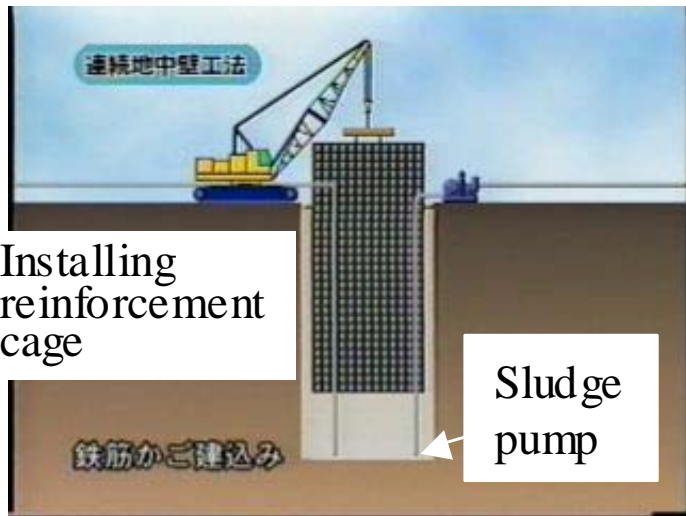
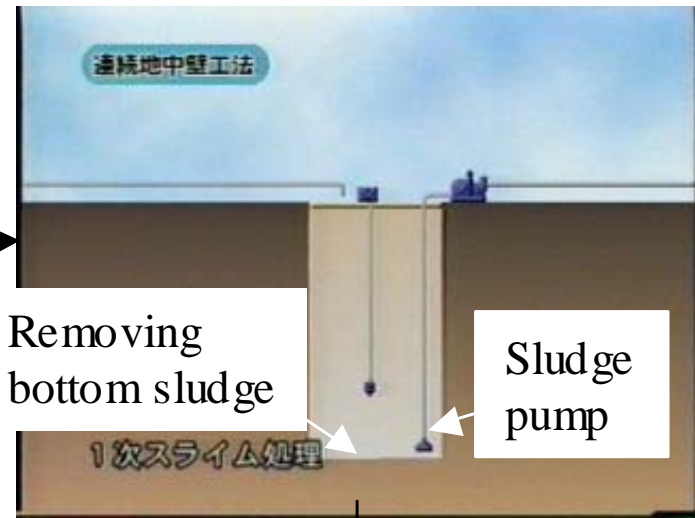
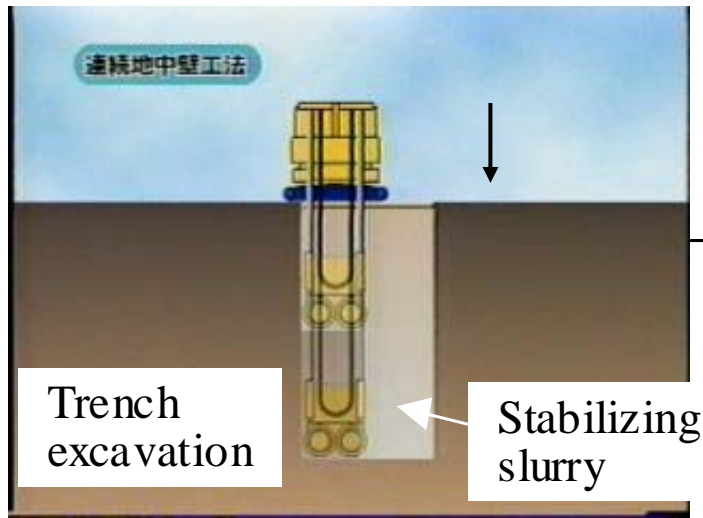
前頁の続き



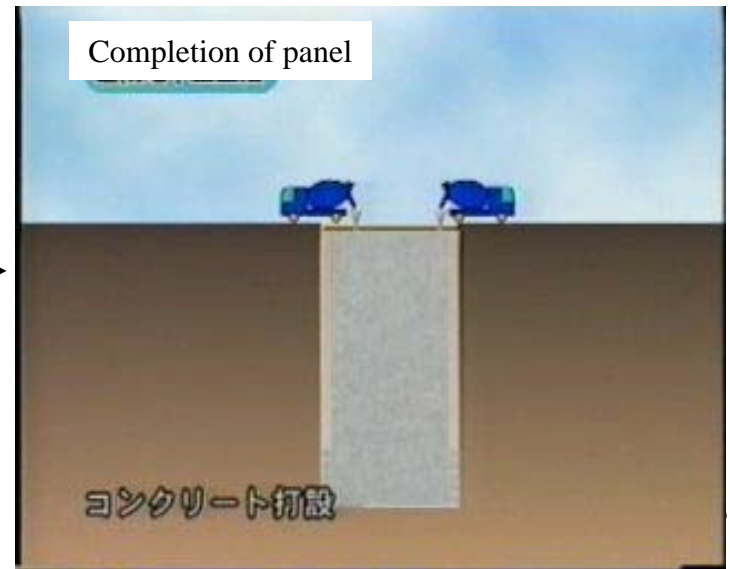
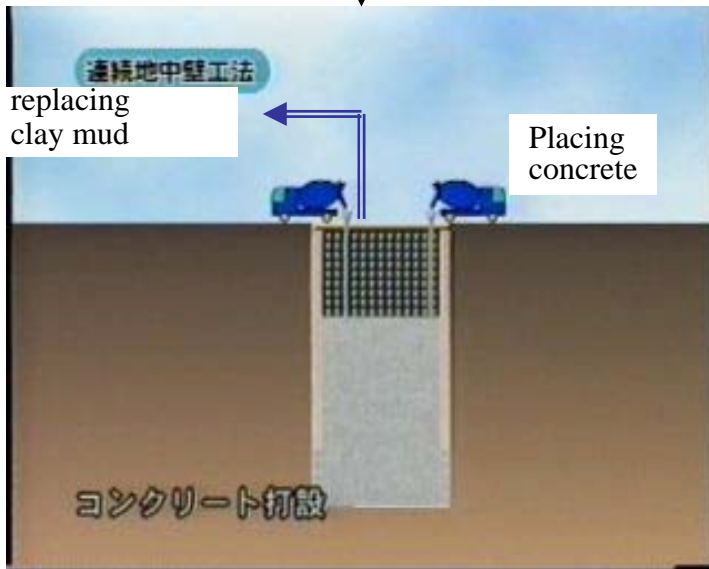
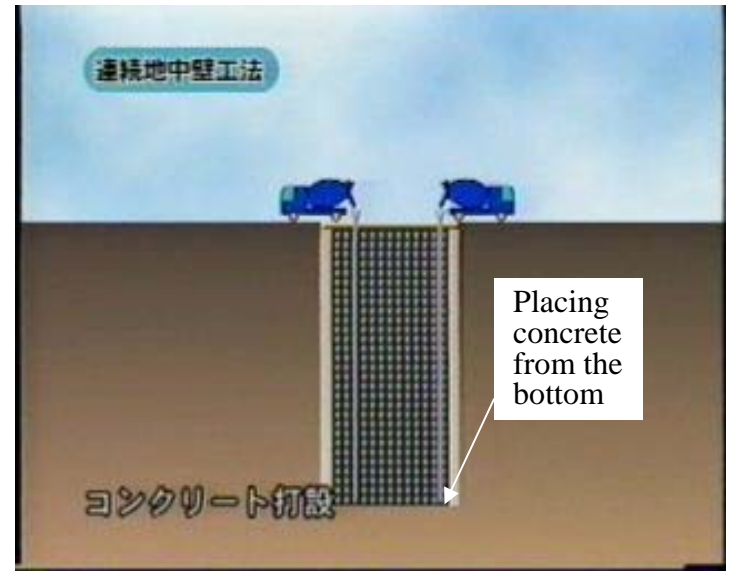
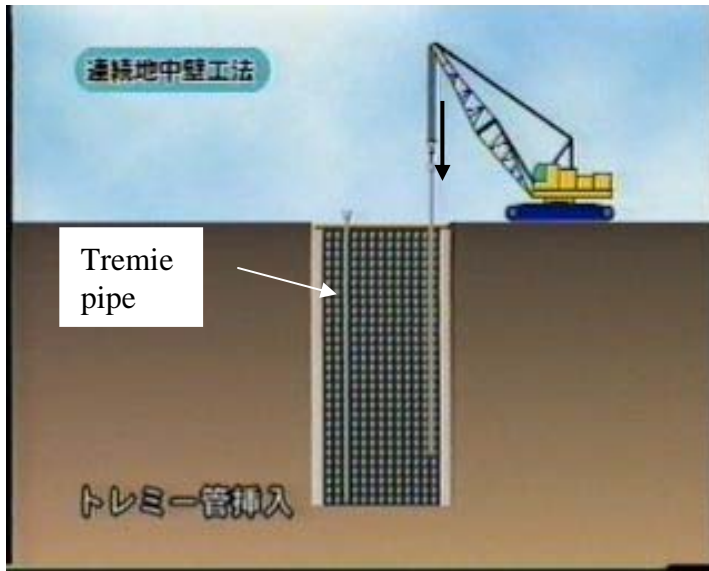
地中連続壁(連壁)の建設方法



前頁の続き



前頁の続き



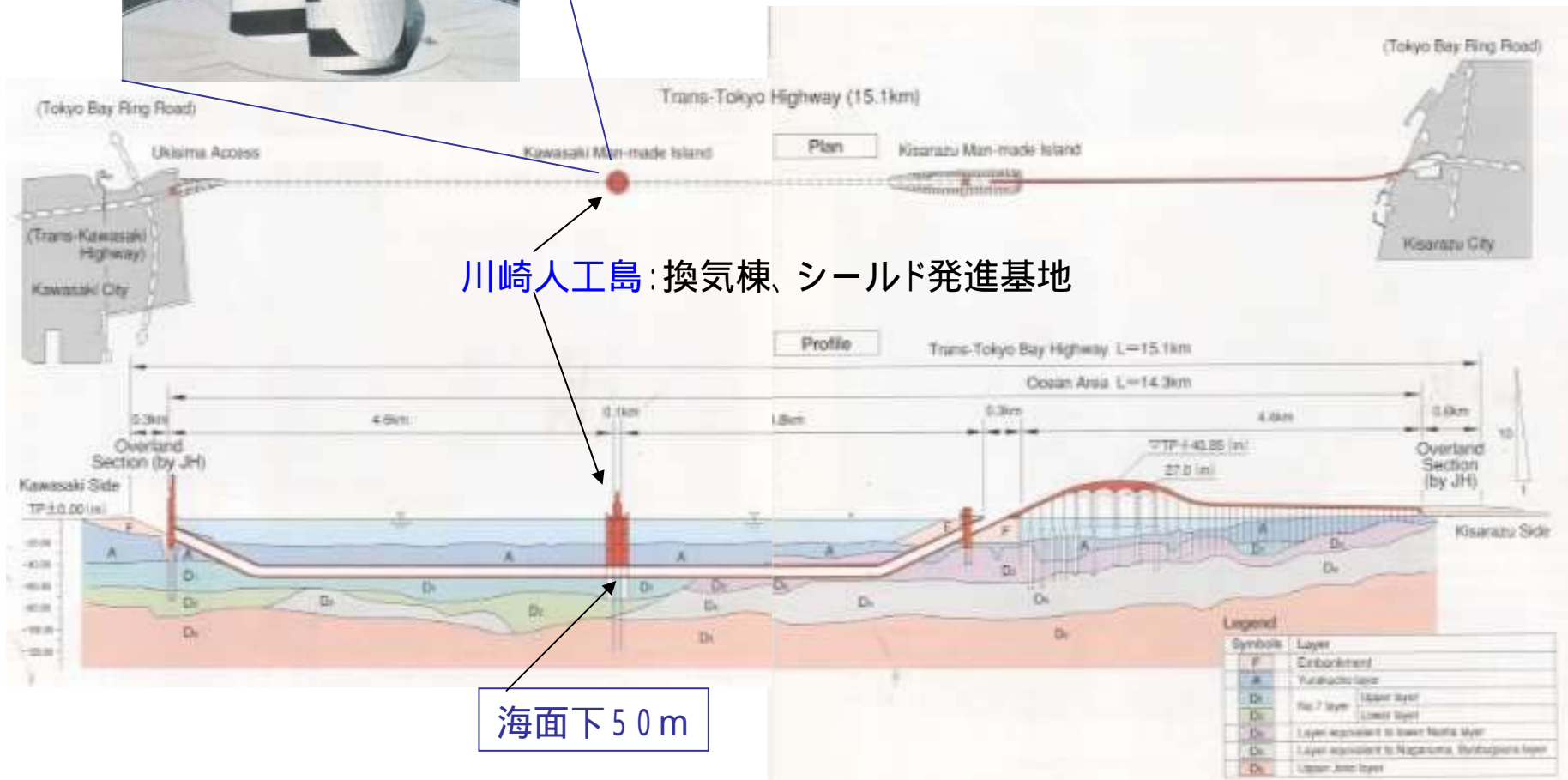
連壁の建設例 アクアライン

参9)

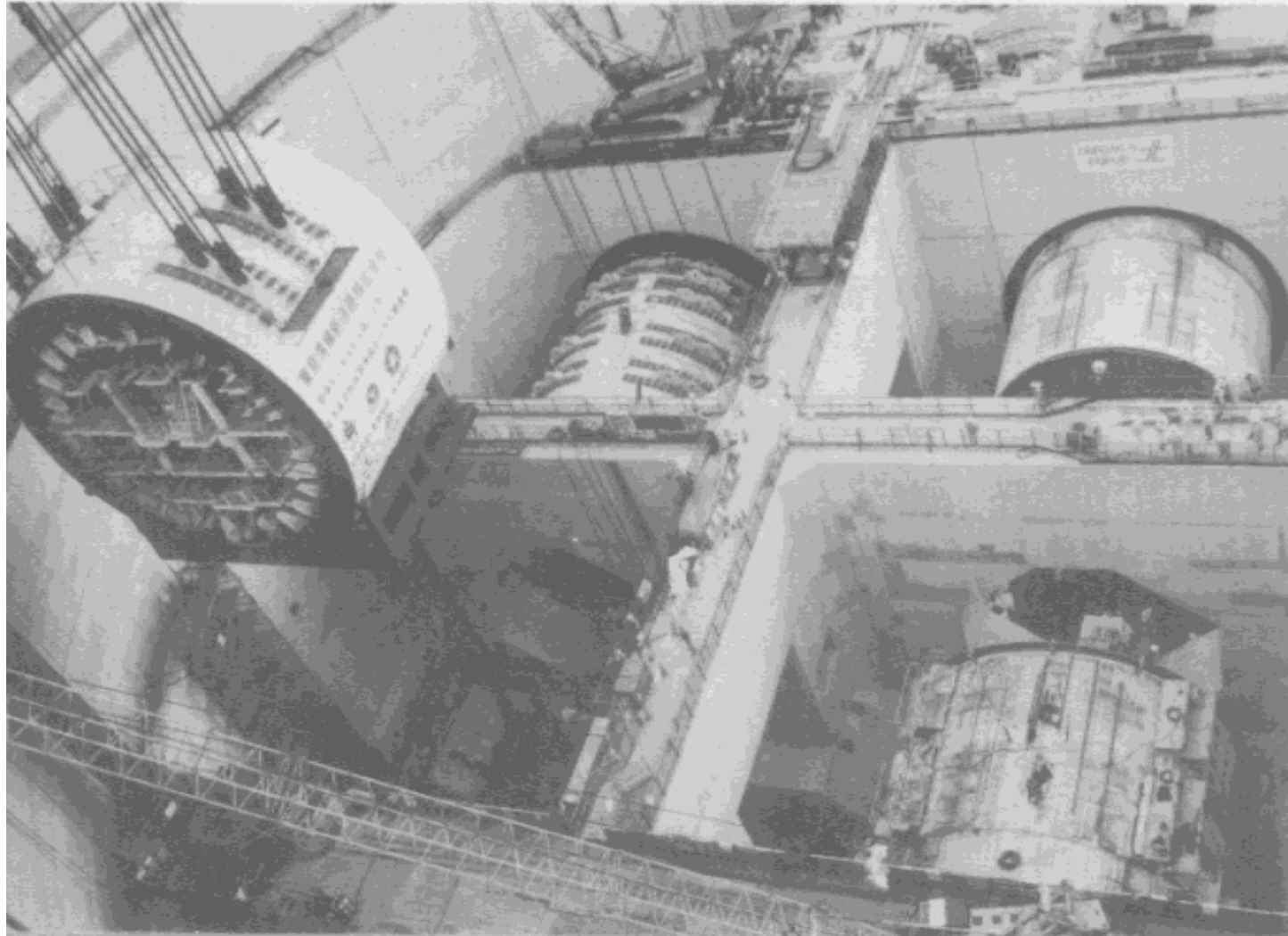


Cross section and plan of TTBH

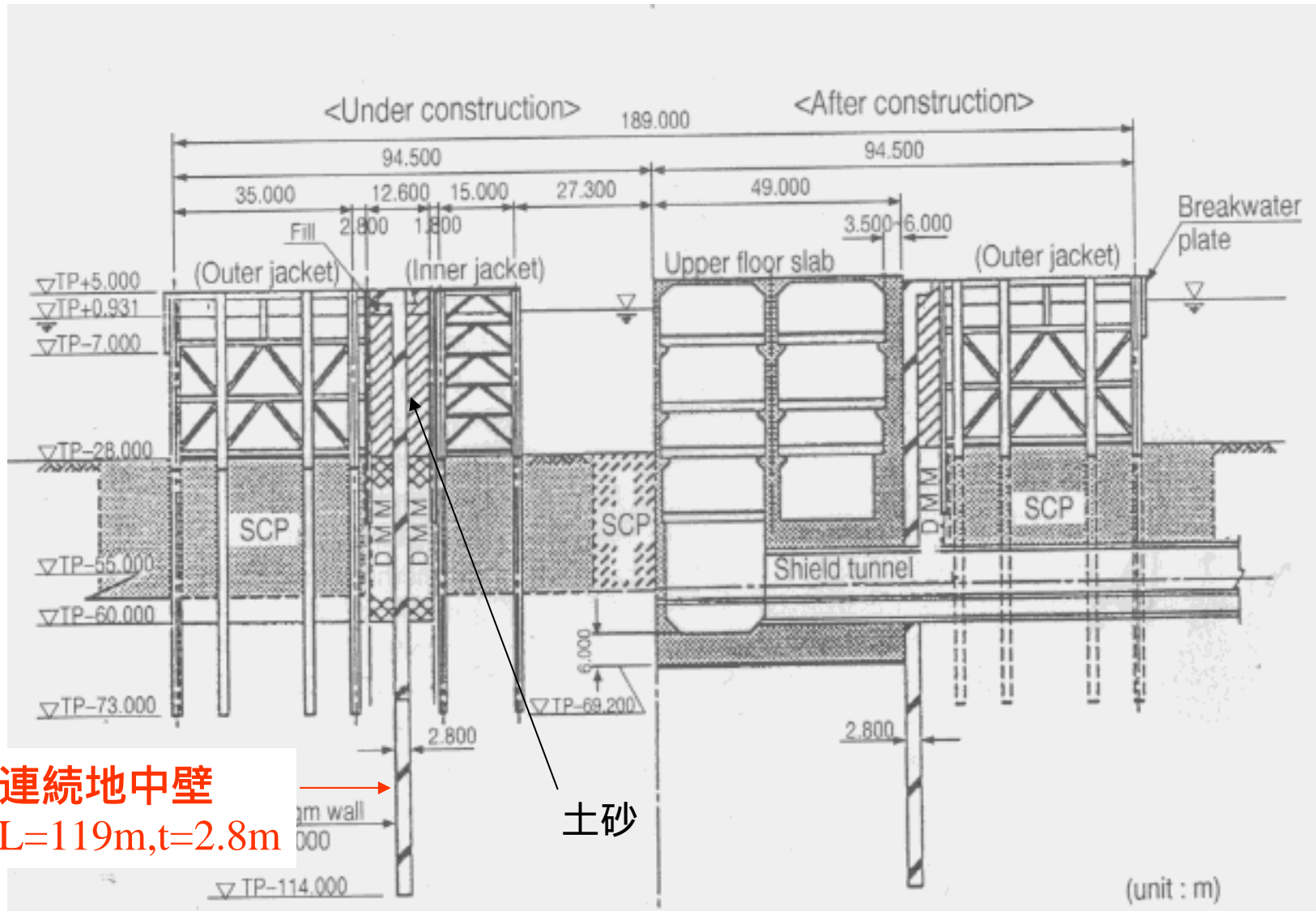
Tower of wind
風の塔



Kawasaki man-made island as launching shaft of shield tunnels



Kawasaki man-made island

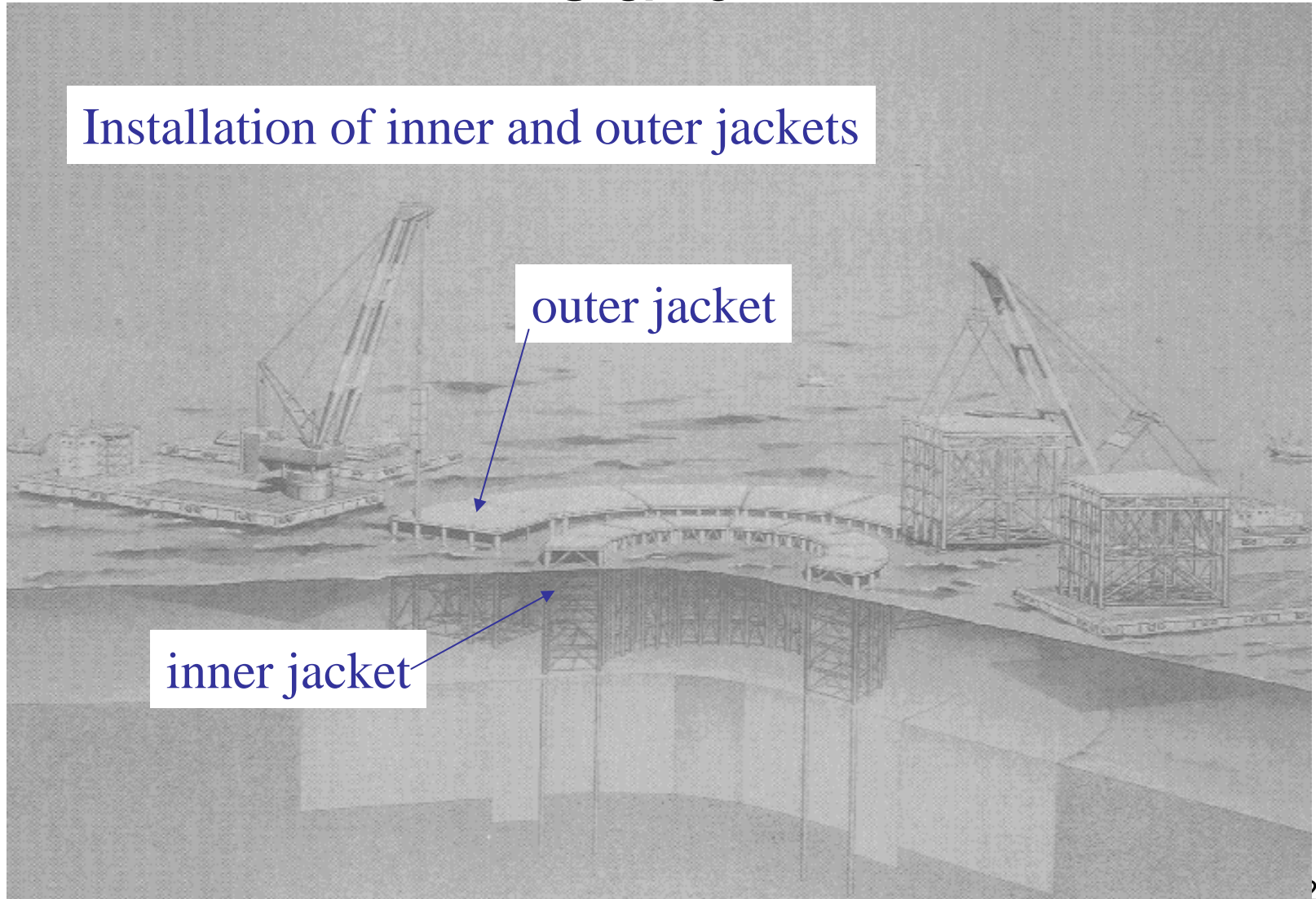


連続地中壁
L=119m,t=2.8m

土砂

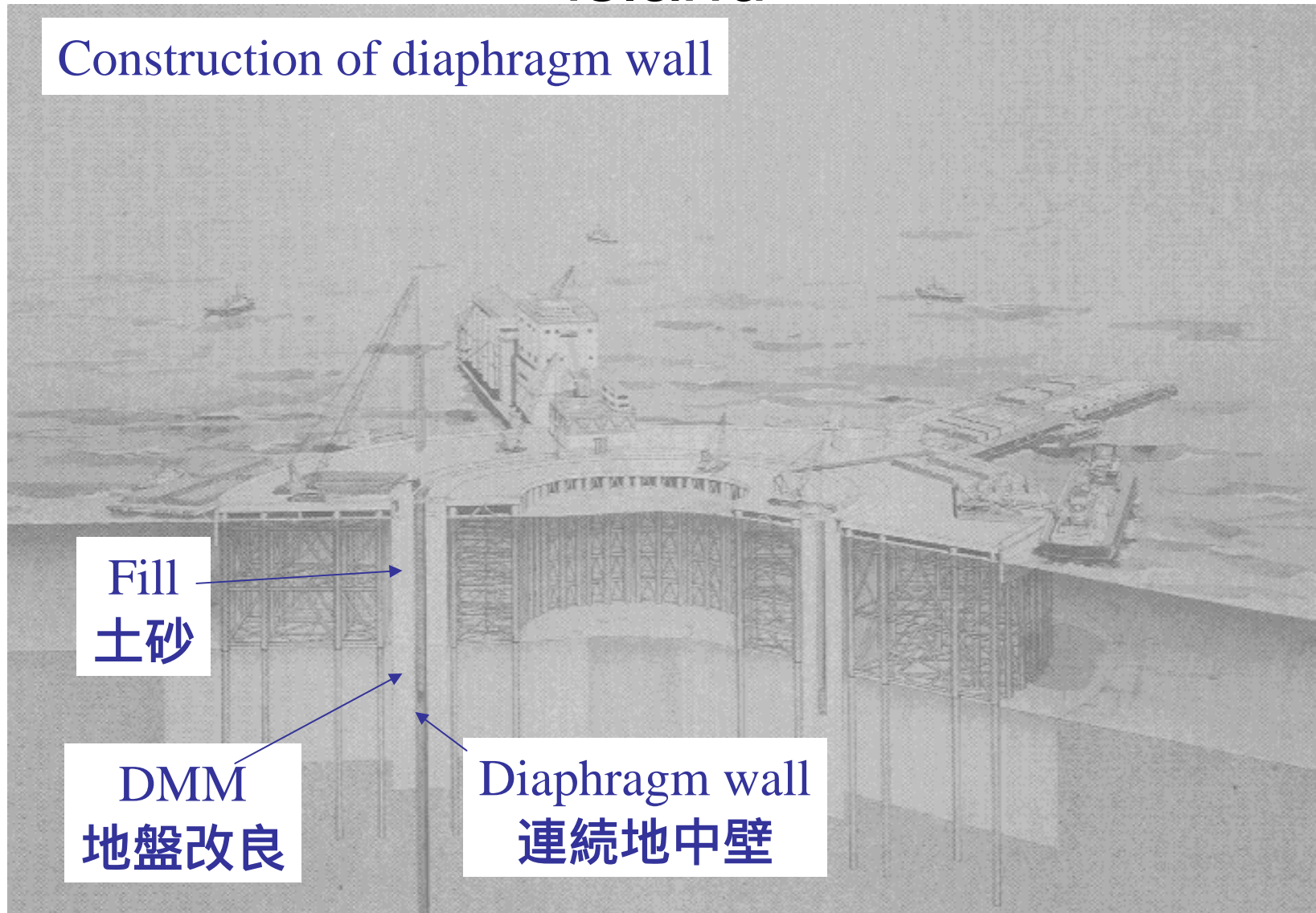
Construction of Kawasaki man-made island

Installation of inner and outer jackets



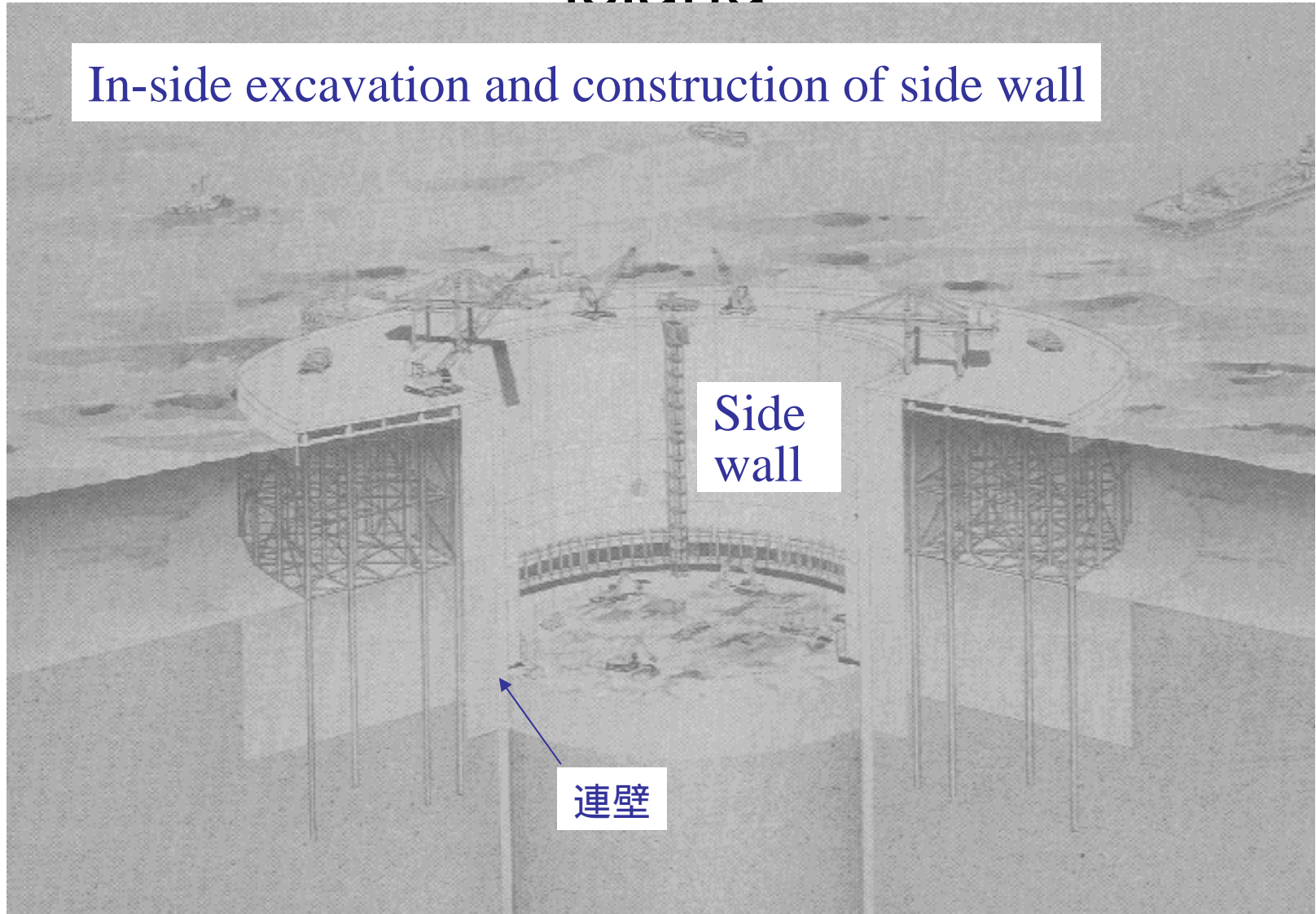
Construction of Kawasaki man-made island

Construction of diaphragm wall



Construction of Kawasaki man-made island

In-side excavation and construction of side wall

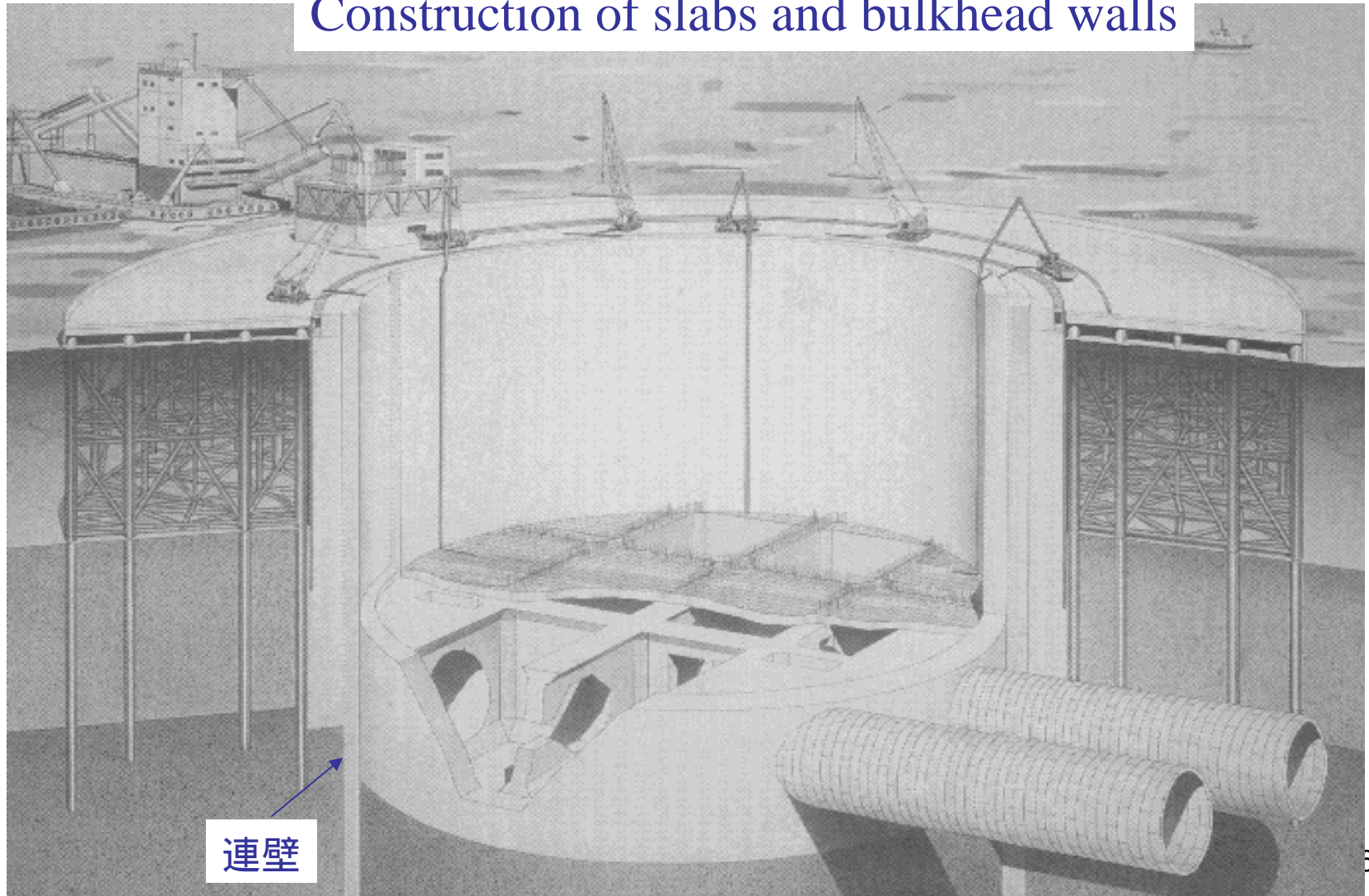


Side wall

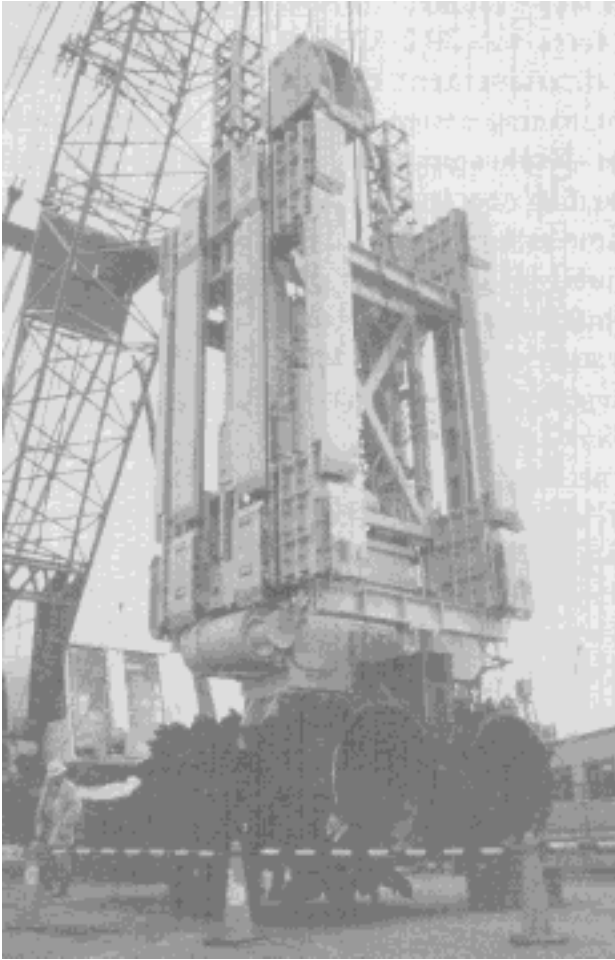
連壁

Construction of Kawasaki man-made island

Construction of slabs and bulkhead walls



Trench excavator and face of diaphragm wall



Horizontal multiple-axis
drum cutter

$L_{\max}=150\text{m}$, $t=2.8\text{m}$



連壁の例 (LNG地下タンク)

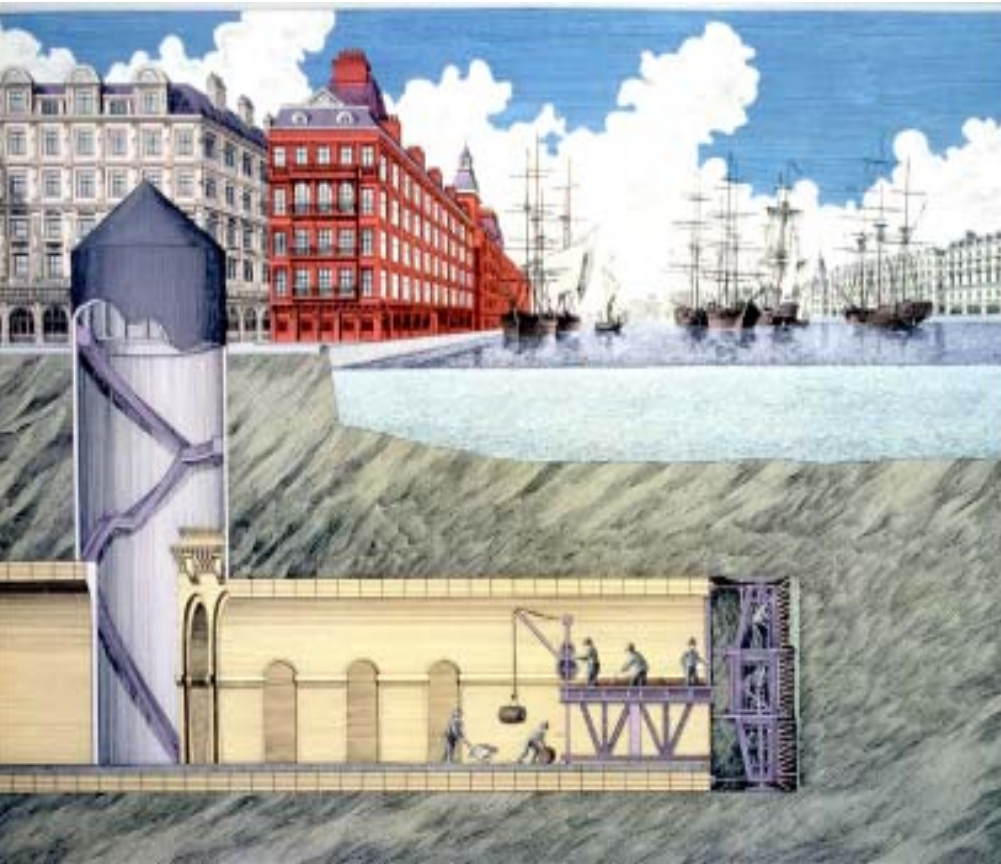


東ガス扇島LNG

円形: 支保工なしでOK
フープコンプレッション
但し、地中の接続面
非常に高い精度必要。

シールドトンネル

ブルネイの世界最初のシールド



フランス人ブルネイ1818年
テムズ川の川底トンネル工事で発明。

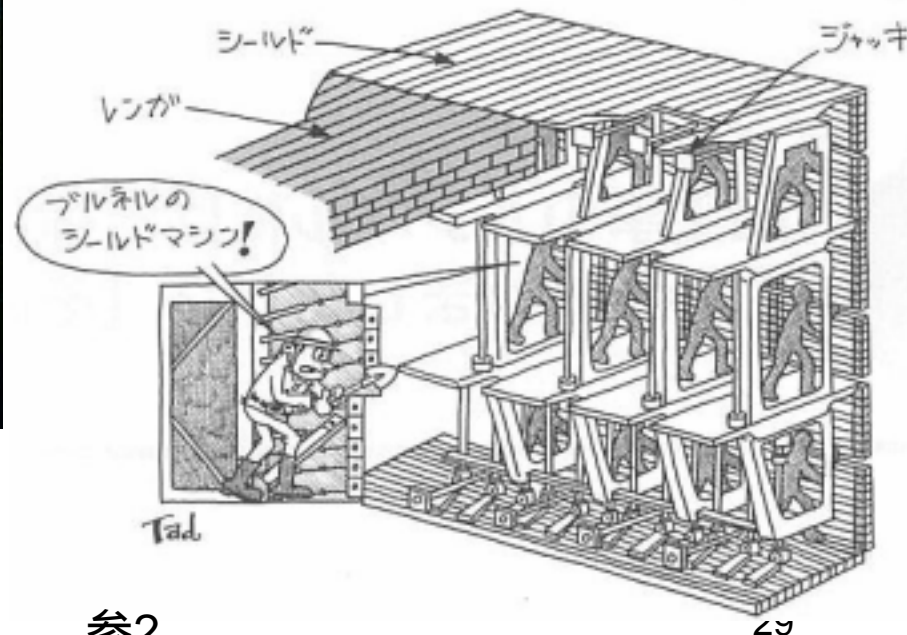
1824から幾多の事故にあい1841年完成

発明のヒント

木に穴を開けるフナクイ虫の特性

丈夫な殻で体を保護
穴を掘り進むにつれて、削った木を後方に送り出す。

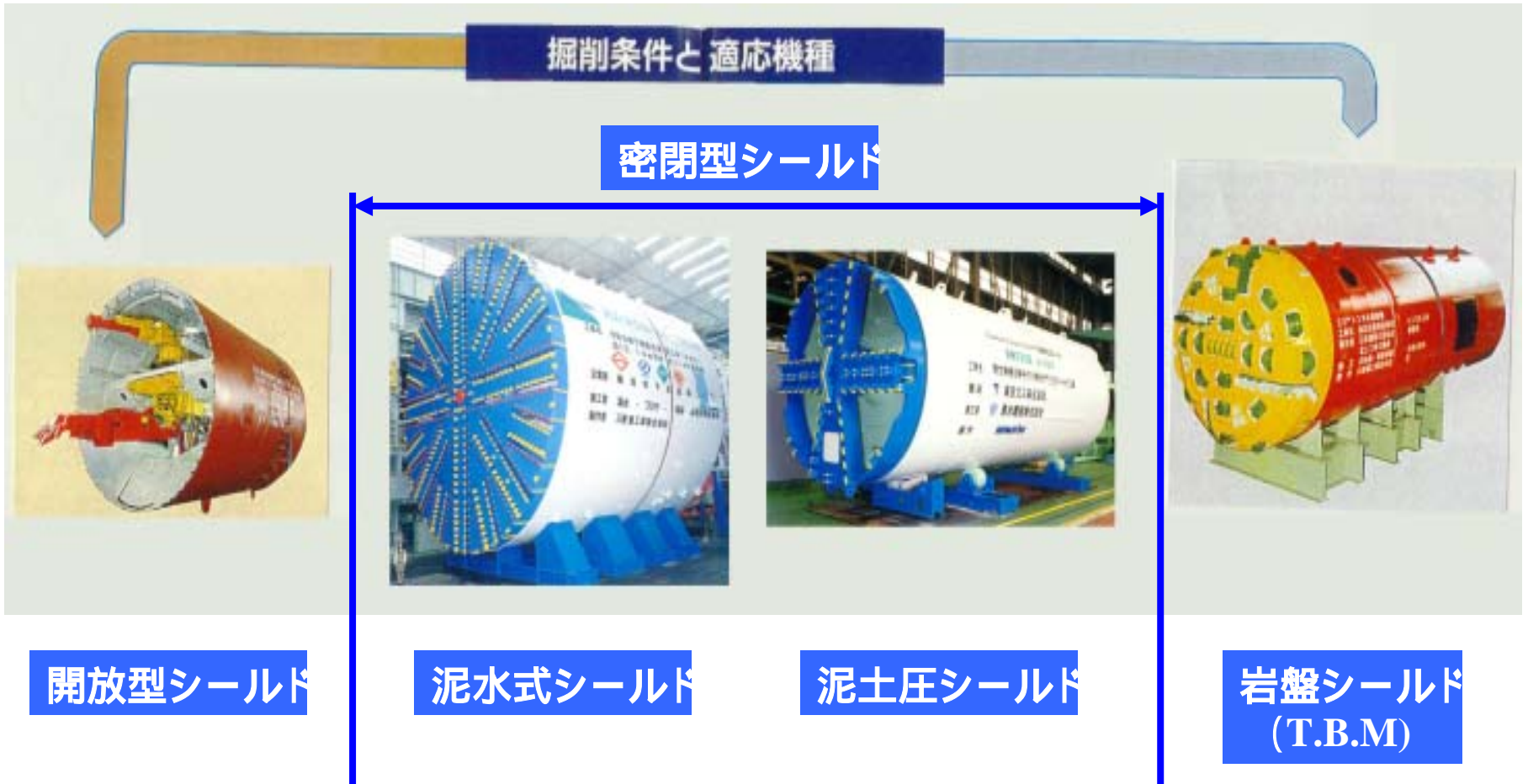
取った穴はすぐ、体液によって膜はりをして、穴が崩れないように保護する。



参2

シールド工法の種類

参8)



泥水式シールド・土圧式シールドの構造

この二つがほとんど。

泥水式シールド

土圧式シールド

セグメント: 鉄筋コンクリート製、鋼製

エレクター

スクリーコンベア

送泥管

油圧ジャッキ

チャンバー

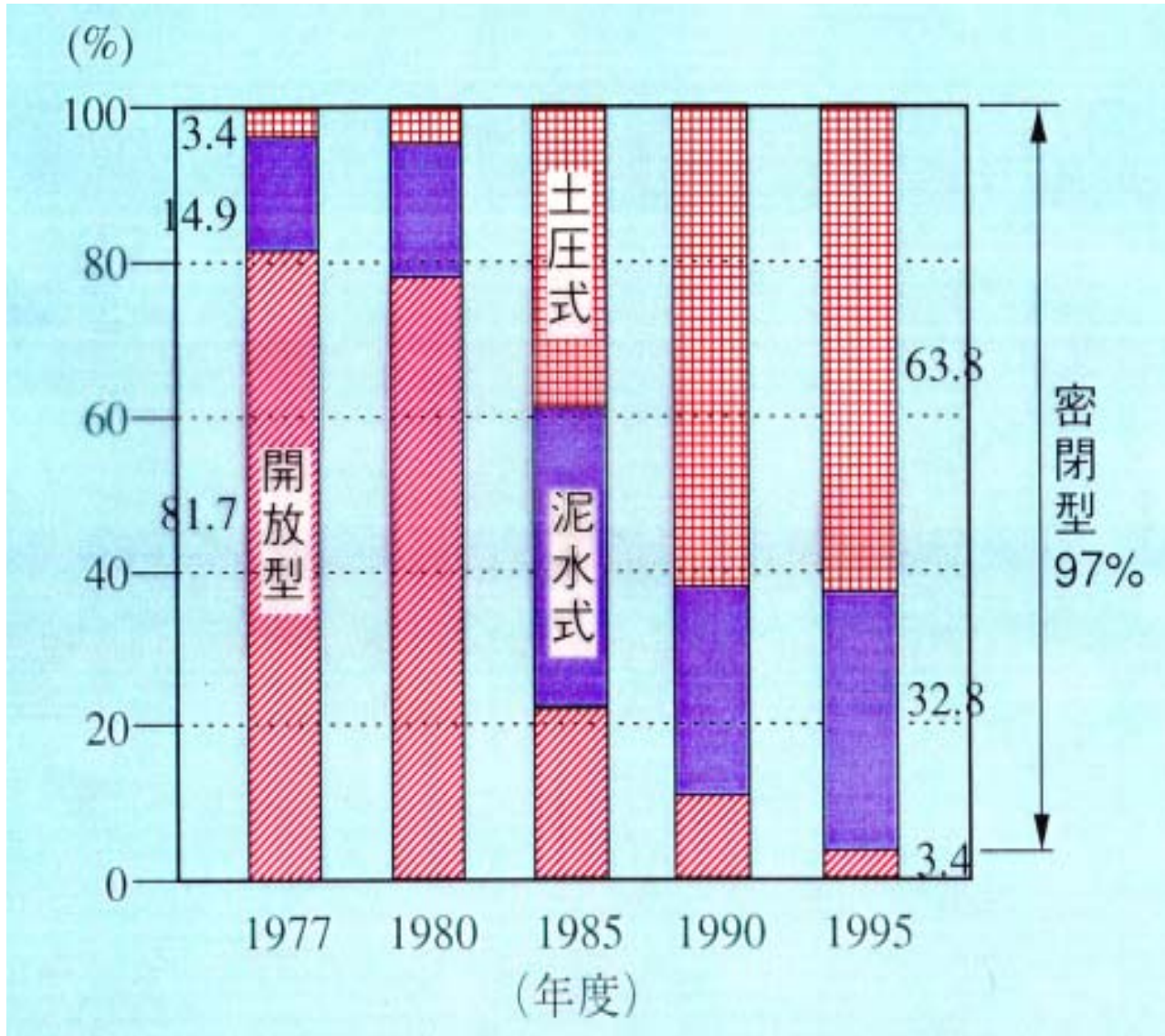
泥水

泥水圧で土圧、水圧とバランス
泥水と一緒に掘削土を搬出

泥土でバランス、固体として搬出

液体状

シールド形式の変遷

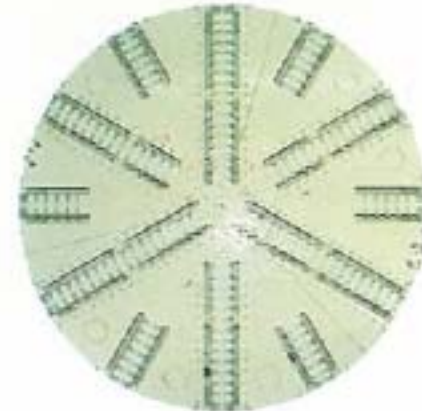
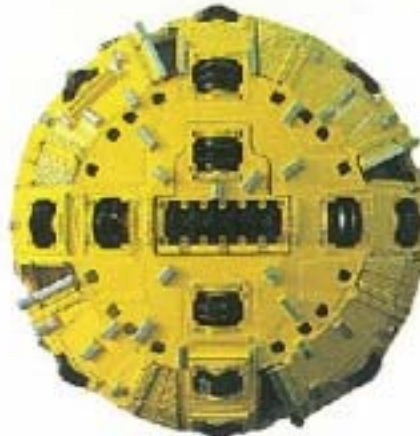
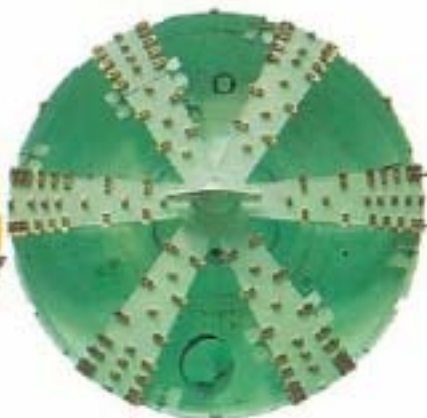
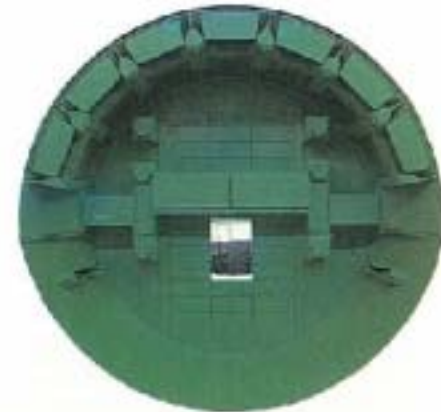
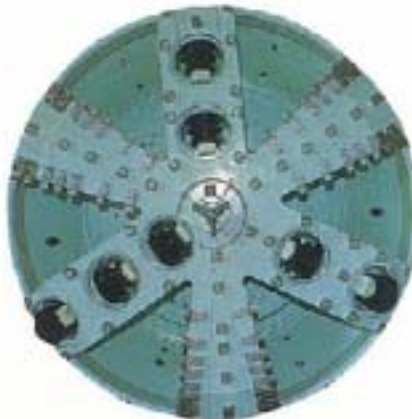
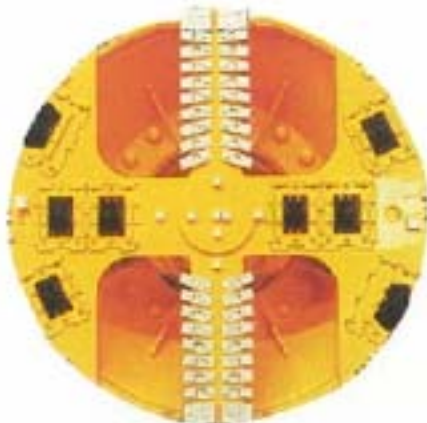
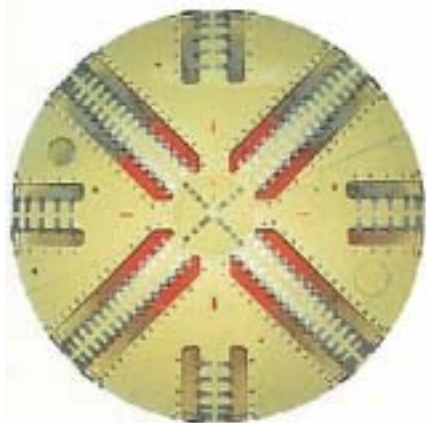


シールドトンネル内



RCコンクリートセグメント

シールド盤面とビット 参8)



土砂用: 削る



岩用: 砕く



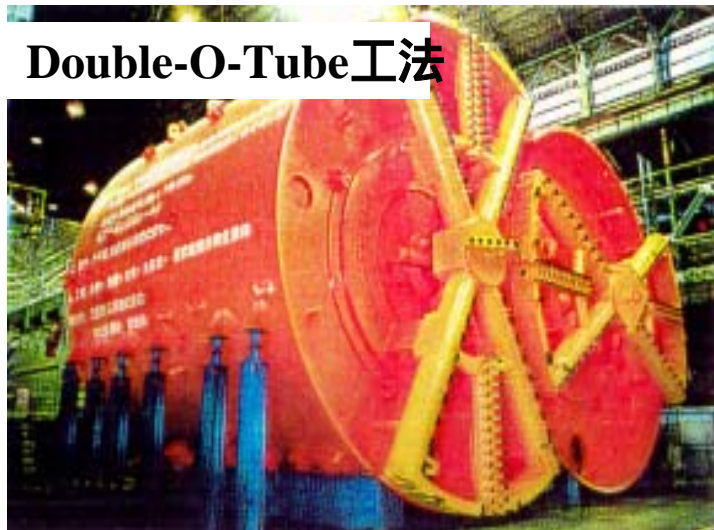
ビットの磨耗

シールド工法の適用

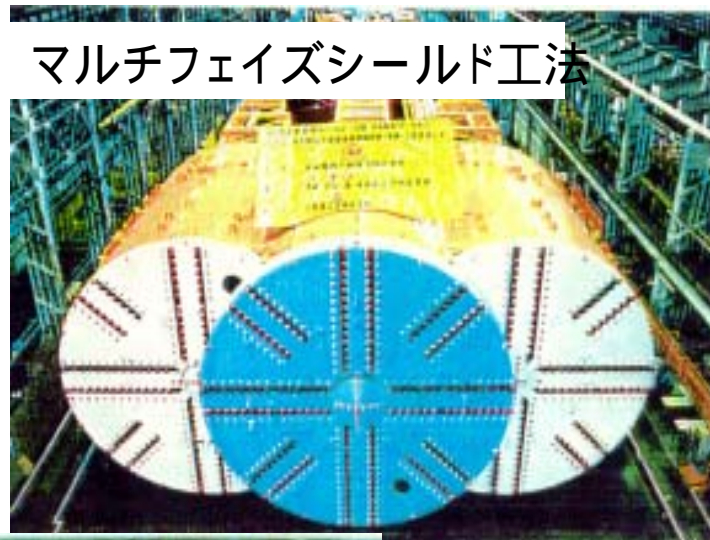


特殊なシールド工法

Double-O-Tube工法



マルチフェイズシールド工法



DPLEX工法



山岳トンネル

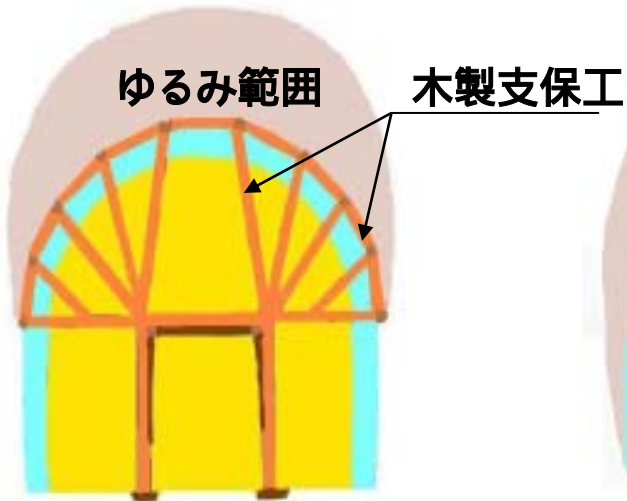
山岳(岩)トンネルの差: 支保工の差

- 素掘り(支保工なし): 有史以前から
- 木製支保工: 鉱山
- 鋼製支保工
- NATM(吹き付けコンクリート + ロックボルト)
- 鋼製支保工とNATM併用

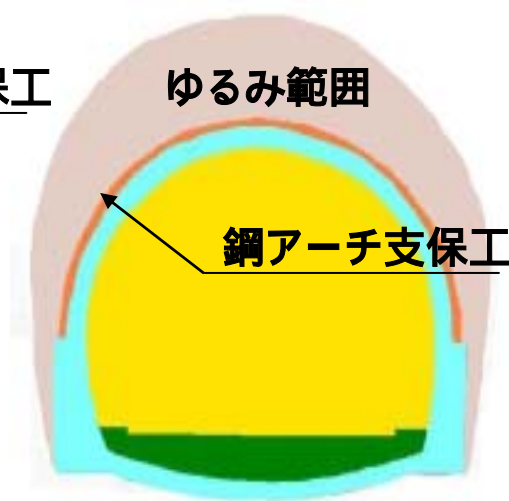
山岳トンネル技術の変遷

New Austrian Tunneling Method

木製支保工

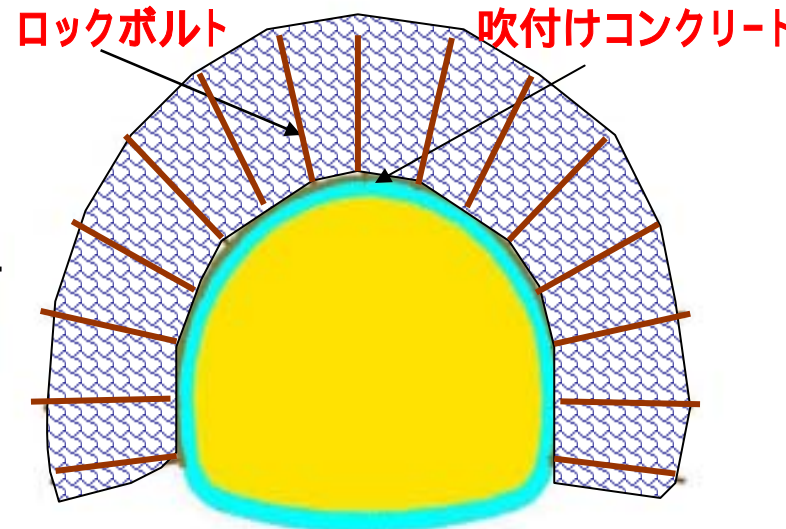


鋼アーチ支保工



NATM

(吹付けコンクリート、ロックボルト)



支保だけで地圧を支える

周辺岩盤も地圧を支える構造物

～昭和30年代末

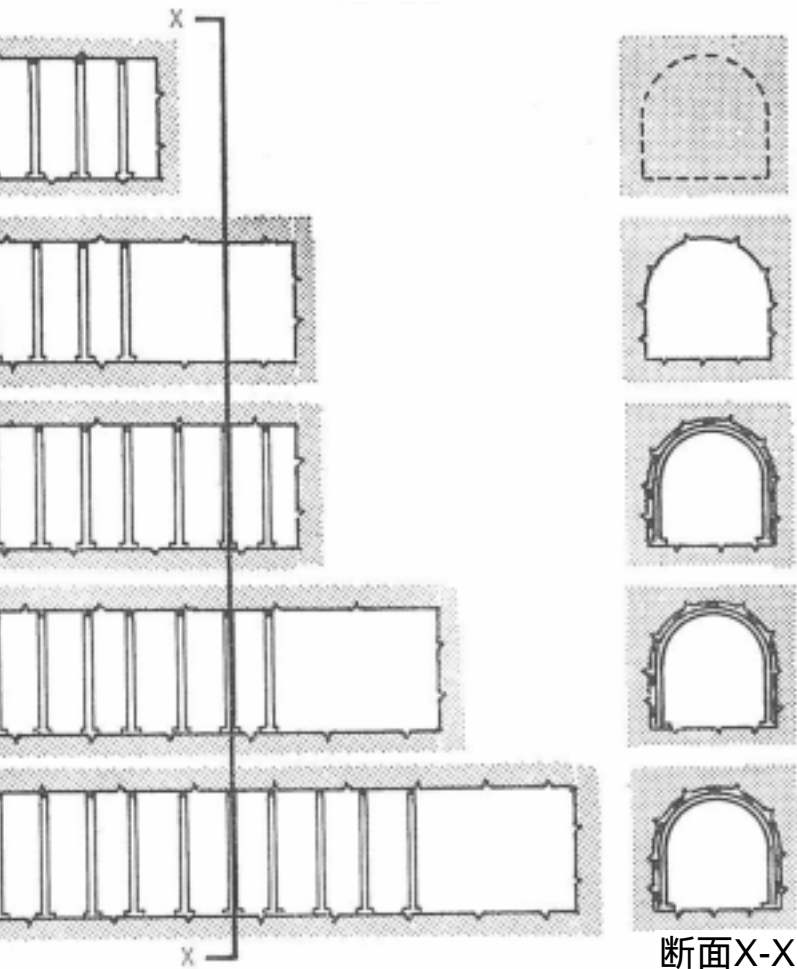
鉋山掘削

昭和40年代初め～昭和50年代末

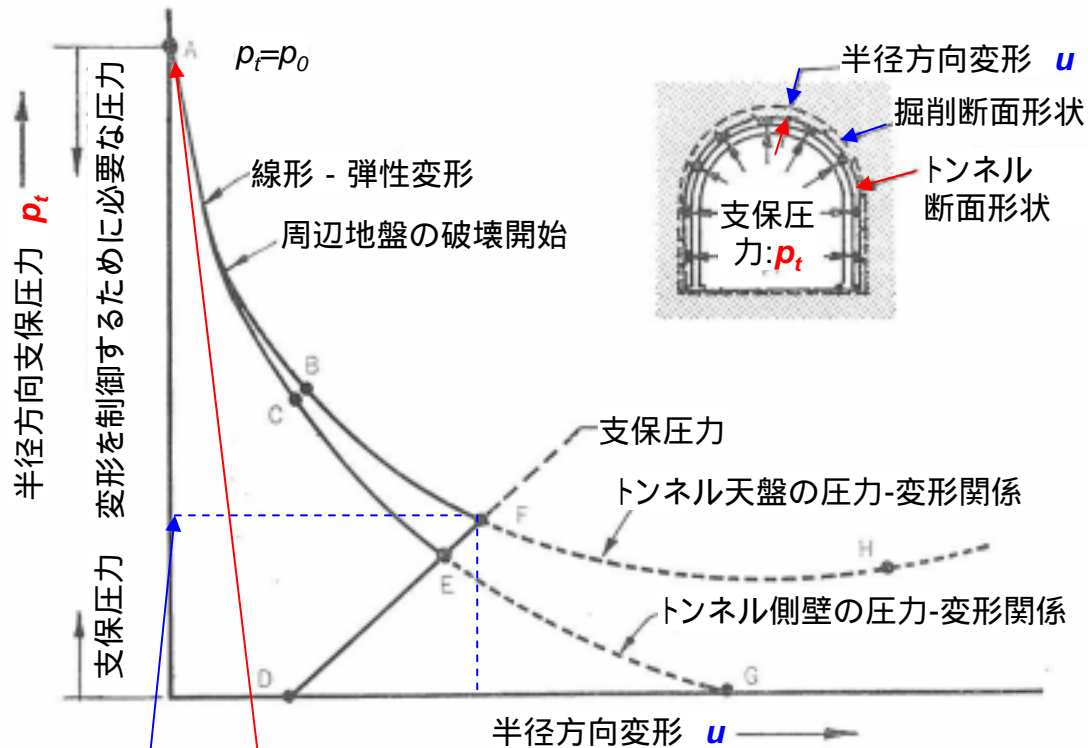
昭和50年代初め～現在

現在の山岳トンネルの標準

山岳トンネルにおける施工過程と断面変位 参10)



岩盤(トンネル内空変位と支保に作用する圧力)



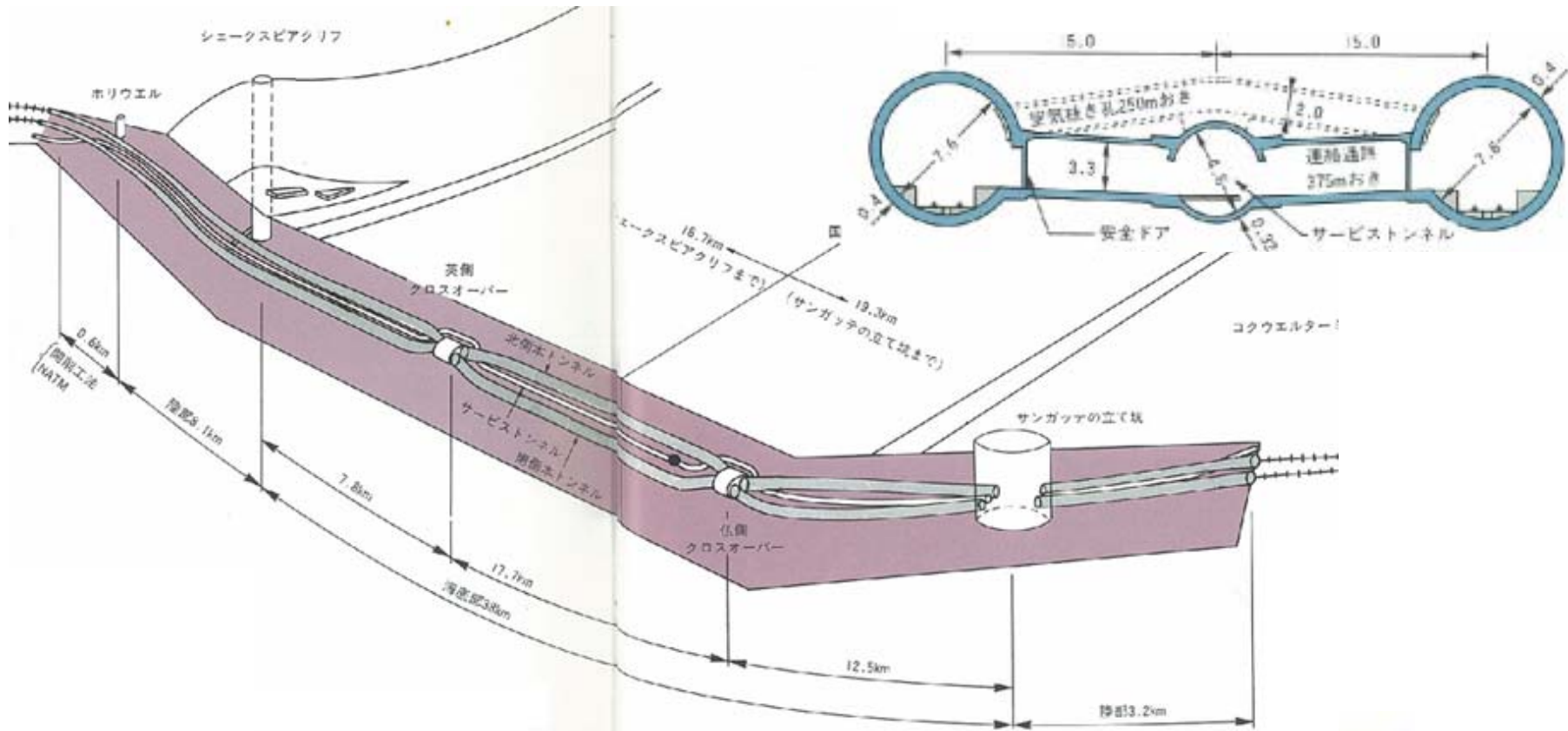
- ・完全に変位を抑えこもうとするととても大きな荷重を支える必要がある。
- ・地盤の変形、緩みを考えると、支保の荷重小さくなる。
- ・支保工だけで荷重を持たせることには限界がある。(地盤自体が強度を持っている)

山岳トンネルの掘削方法

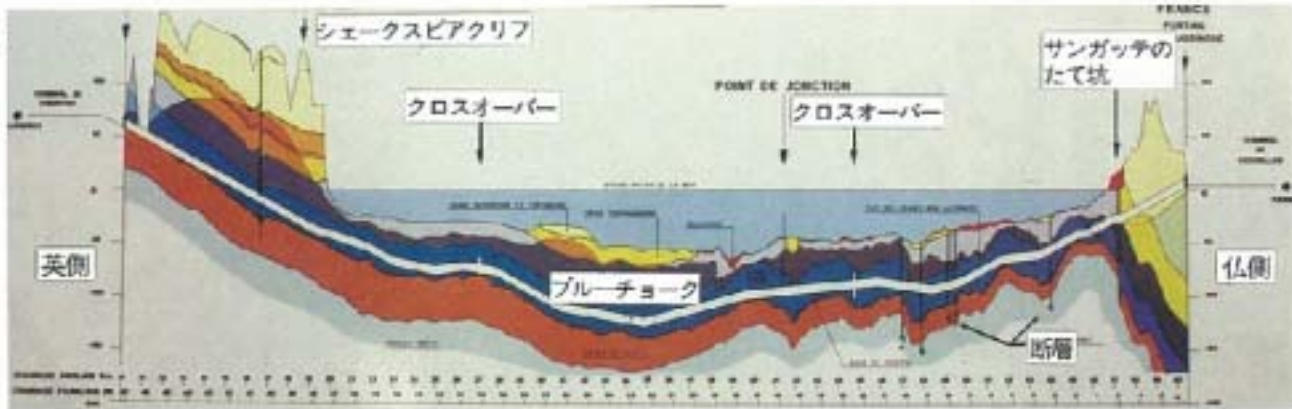
岩の状態(硬さ、亀裂)、水条件によって

- 機械堀
- TBM (Tunnel boring machine)
 - シールドとの違い:反力はマシン自身でとる
 - 安全、施工速度: Euro tunnel、神流川発電所の圧力管
- 発破(ダイナマイト)掘削
 - 硬い岩では一般的、一番経済的

英仏海峡(ドーバー)トンネル 参8)



●地質縦断面図



英仏海峡トンネルの建設 参8)



英国シェークスピアから掘り進んだTBMのホリウエル立て坑への到達



フランスサンガッテ立坑、両側：本トンネル
中央：サービストンネル

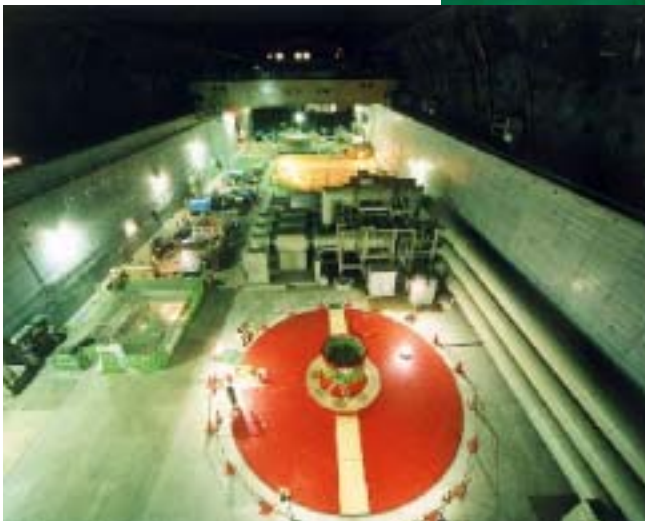
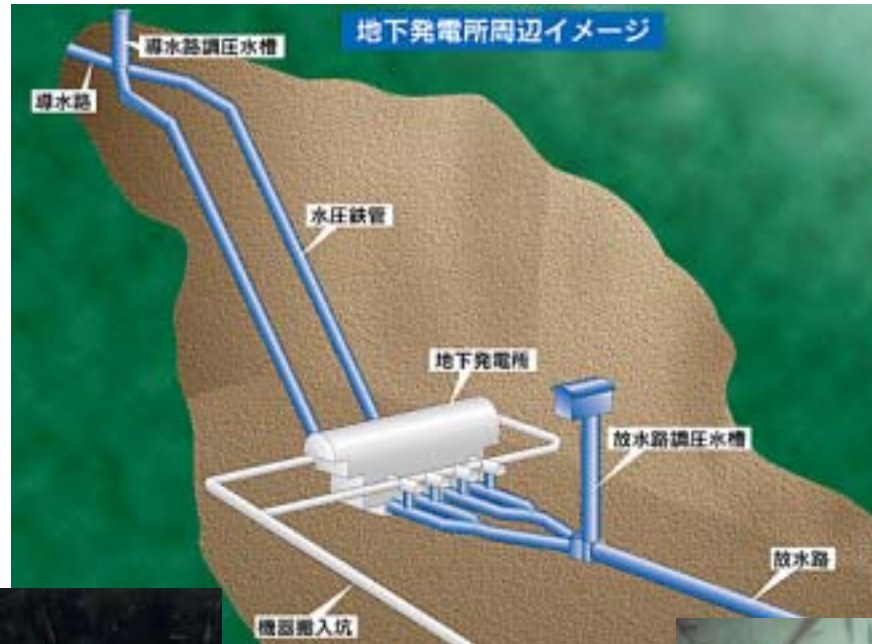


フランス海底部を掘ったTBM
川崎重工
外径：8.78m、長さ：13.7m
総重量：900ton、
トルク：11,500tf

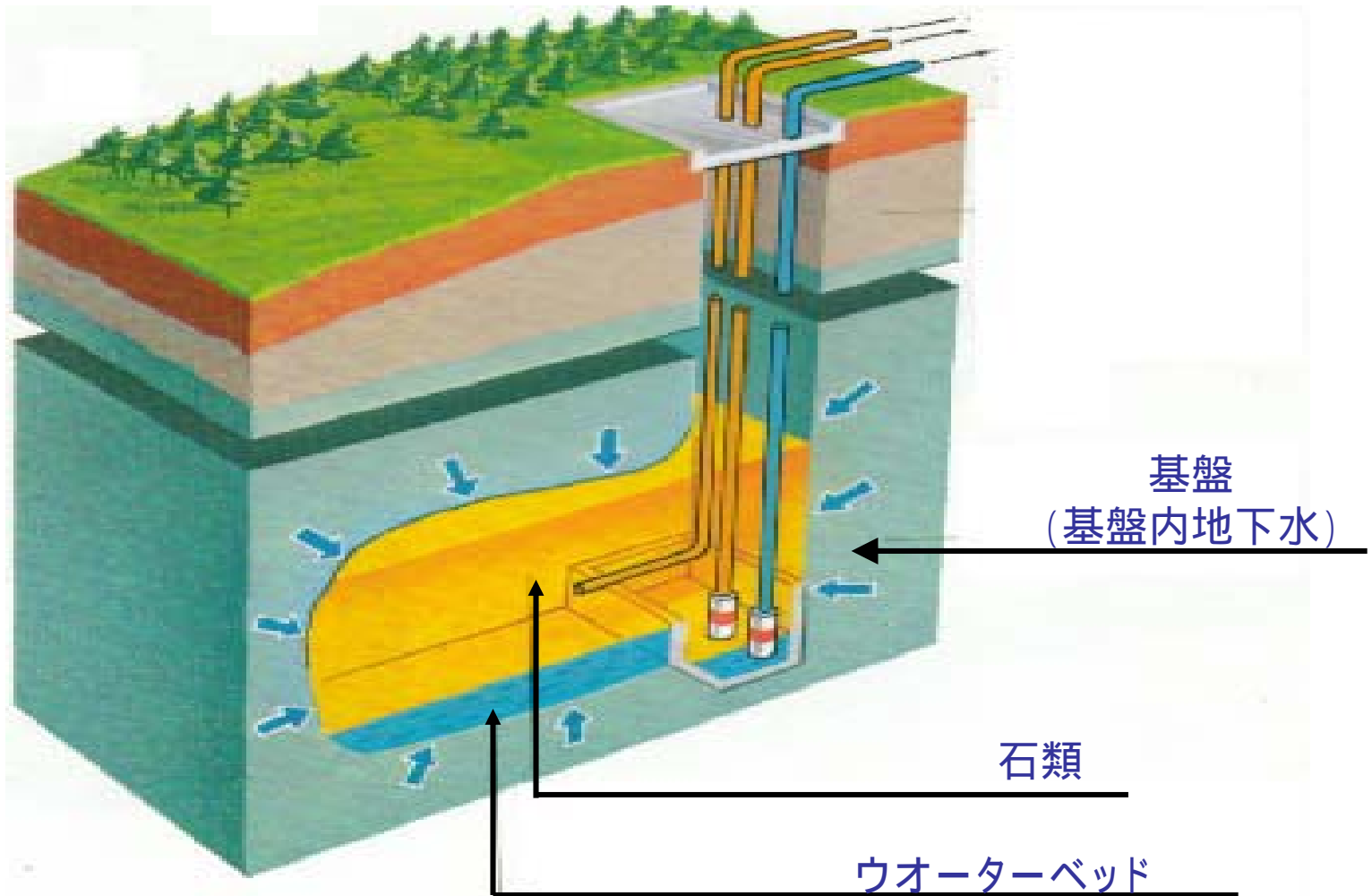
NATMを使った大規模空洞の建設

<http://www.tepco.co.jp/kanna-gawaindex-j.html>

神流川揚水式
地下発電所



石油類の岩盤内貯蔵(水封方式の原理)



LPG地下水封式貯蔵概念図

液化プロパンガス

石油との差

- 常温、大気圧では気体蒸気圧
(1MPa、水100m程度)
- 液体と気体の体積差
250倍

常温では大きな圧力必要

参考: 気化温度 (1気圧)

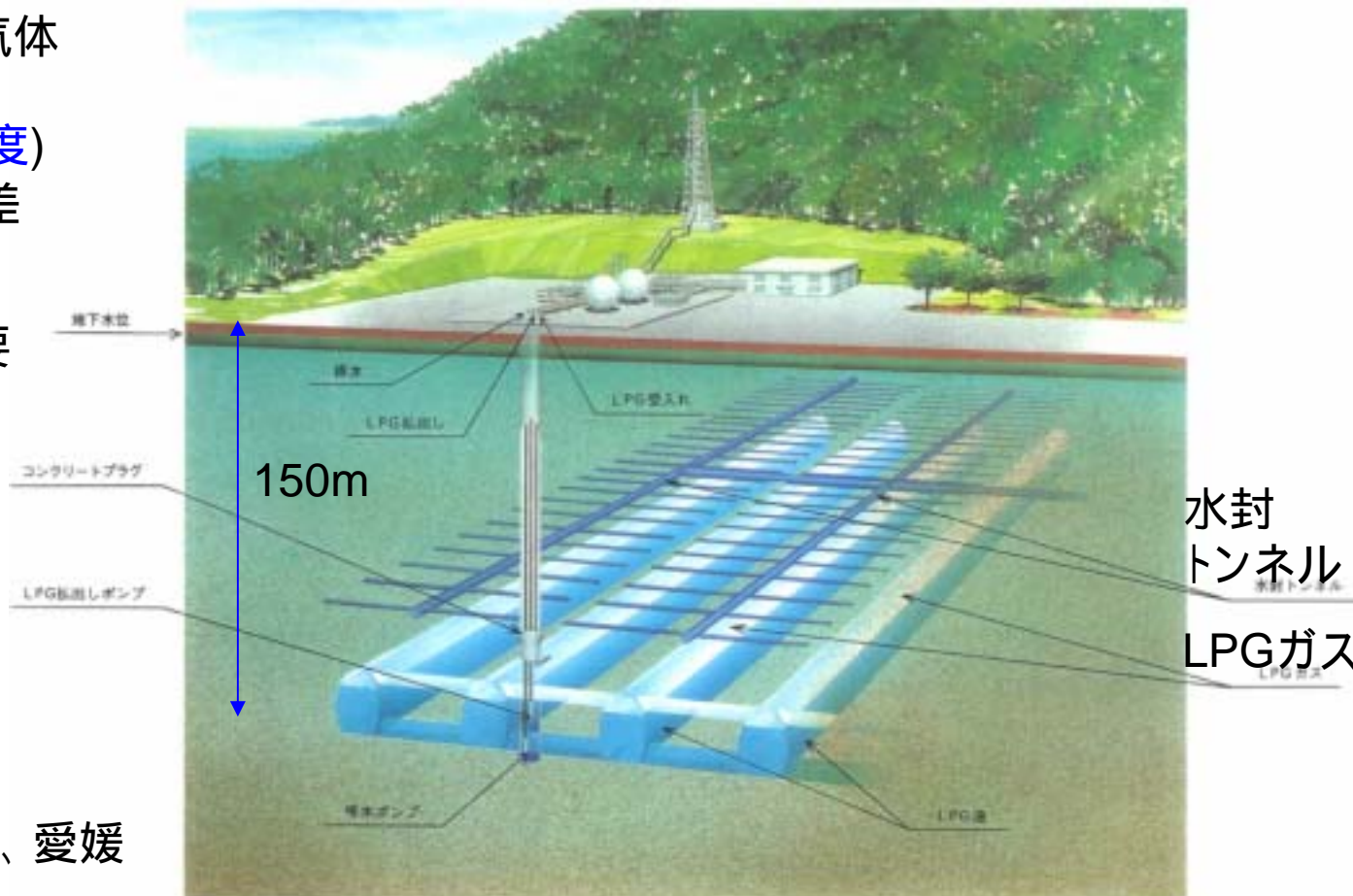
メタン: -161.5

エタン: -88.6

プロパン: -42.1

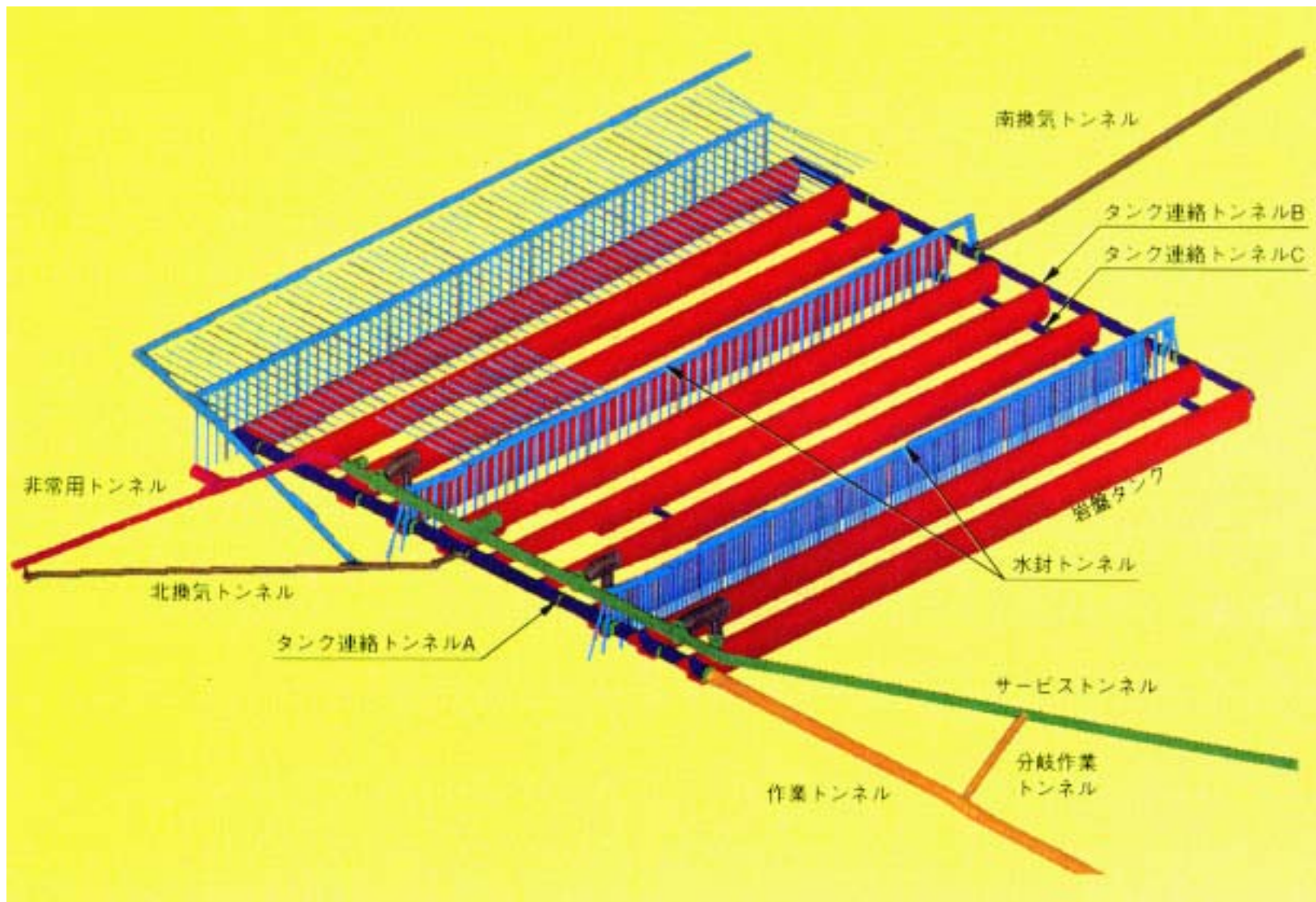
ブタン: -0.5

実証施設建設中-倉敷、愛媛

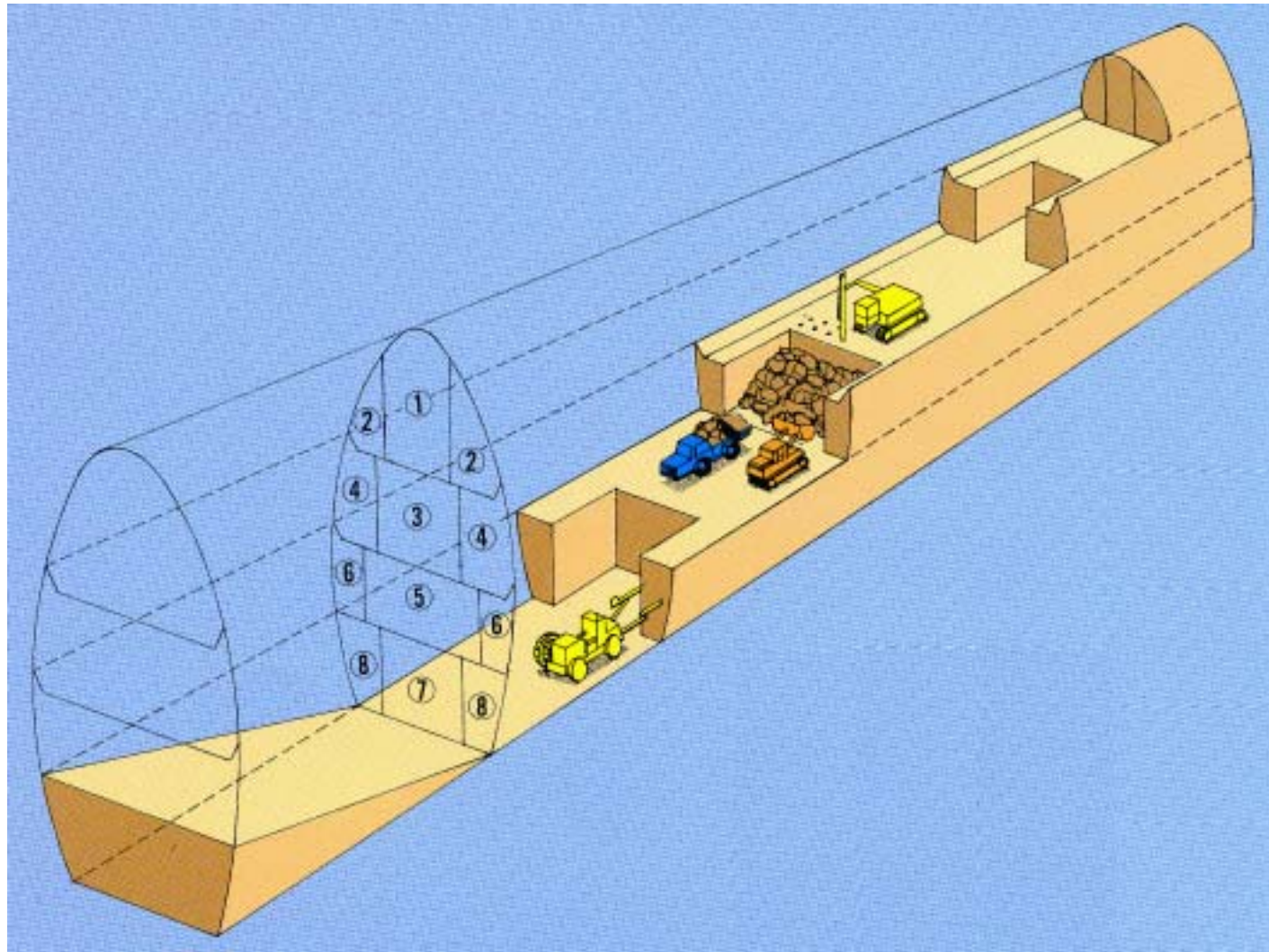


石油公団: LPG地下備蓄技術実証プラント、1990.

串木野地下石油備蓄基地(完成時鳥瞰図)



空洞掘削順序図



串木野地下石油備蓄基地建設工事(施工時写真-1)



アーチ部掘削



第1段ベンチ掘削



第2段ベンチ掘削



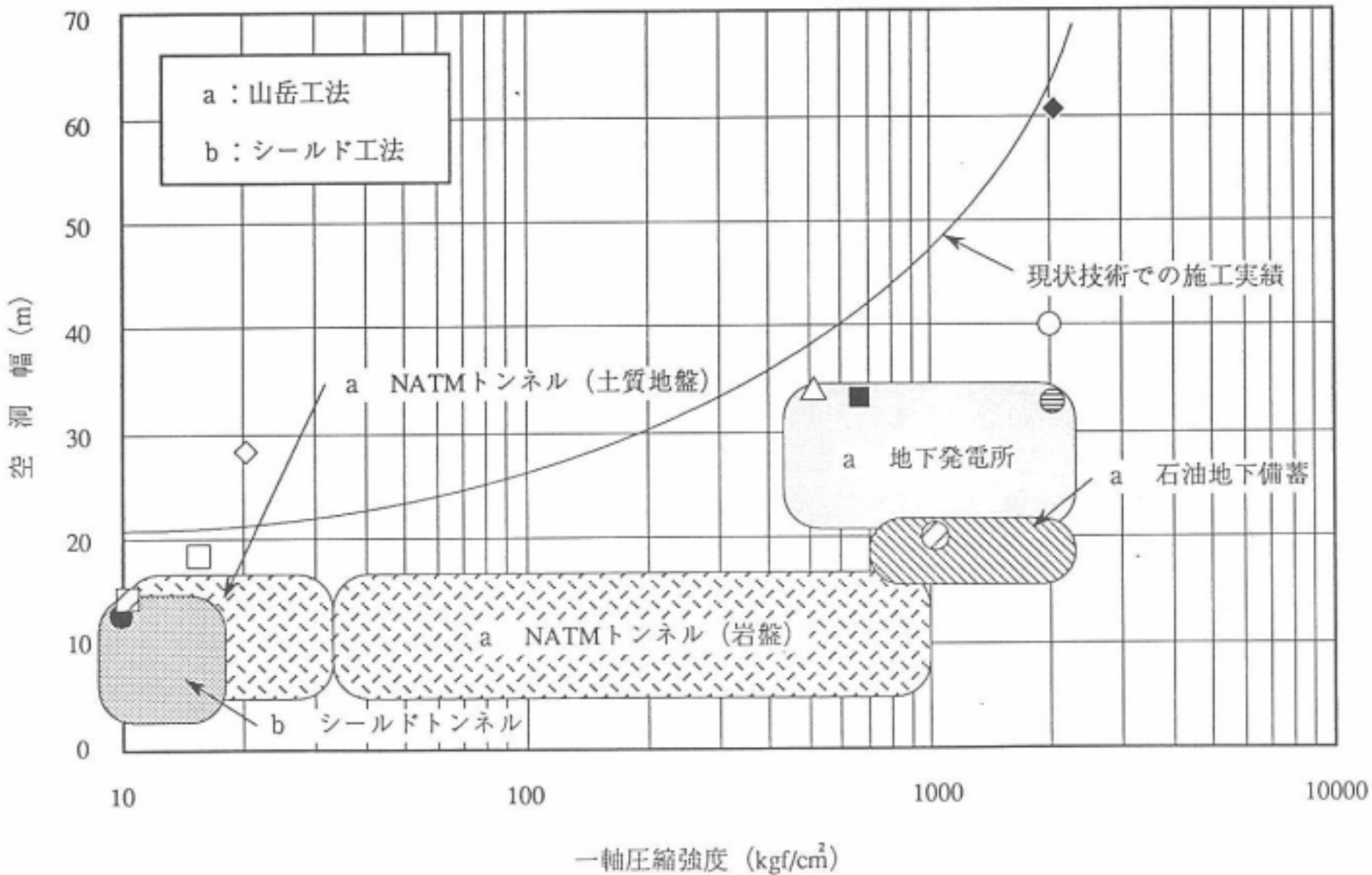
第3段ベンチ掘削



完成

各種岩盤施設における空洞幅と一軸強度との関係：

参11)



前頁の凡例

□	ランツベルク地下駐車場	ドイツ	●	京葉線東京駅	日本（東京都）
◇	ミラノトンネル（補助工法付）	イタリア	▣	東名所領トンネル（3車線）	日本（静岡県）
△	チラタ地下発電所	インドネシア	⊙	菊間地下石油備蓄基地	日本（愛媛県）
■	ヴァルデックII地下発電所	ドイツ	⊕	今市地下発電所	日本（栃木県）
◆	ユービクアイスホッケーアリーナ	ノルウェー	○	スーパーカミオカンデ	日本（岐阜県）

地盤状況を調べる

ボーリング、サンプリング

もっとも精確、但し、点としての情報

面、空間としての情報

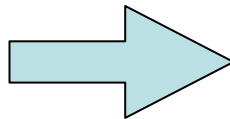
物理探査

物理探査の方法と種類

非破壊で地下を調べる

医学に例えると

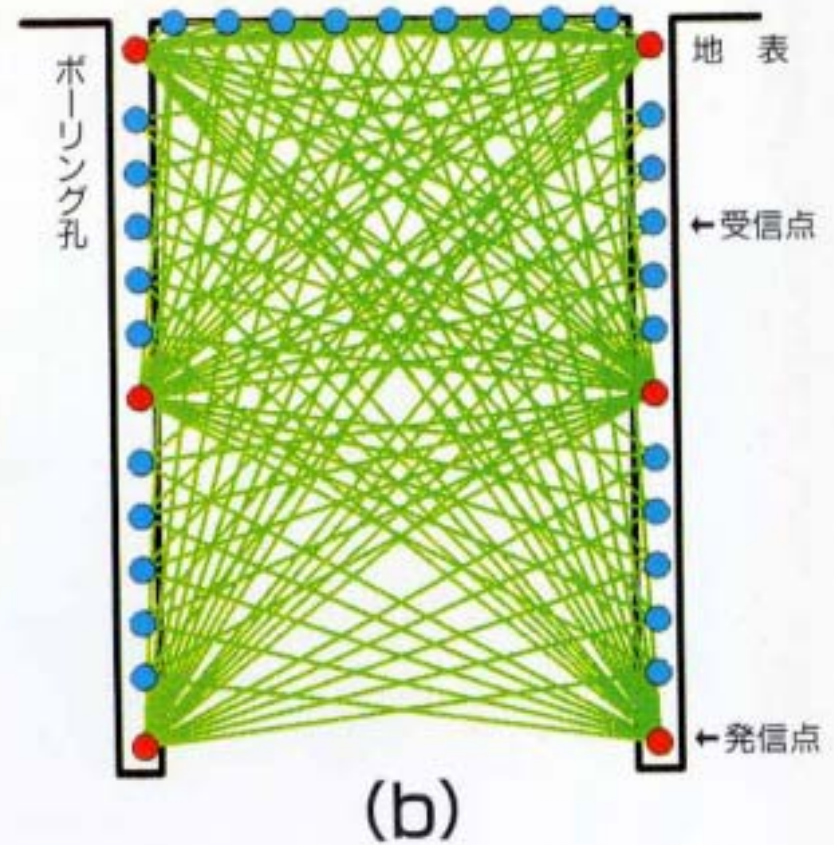
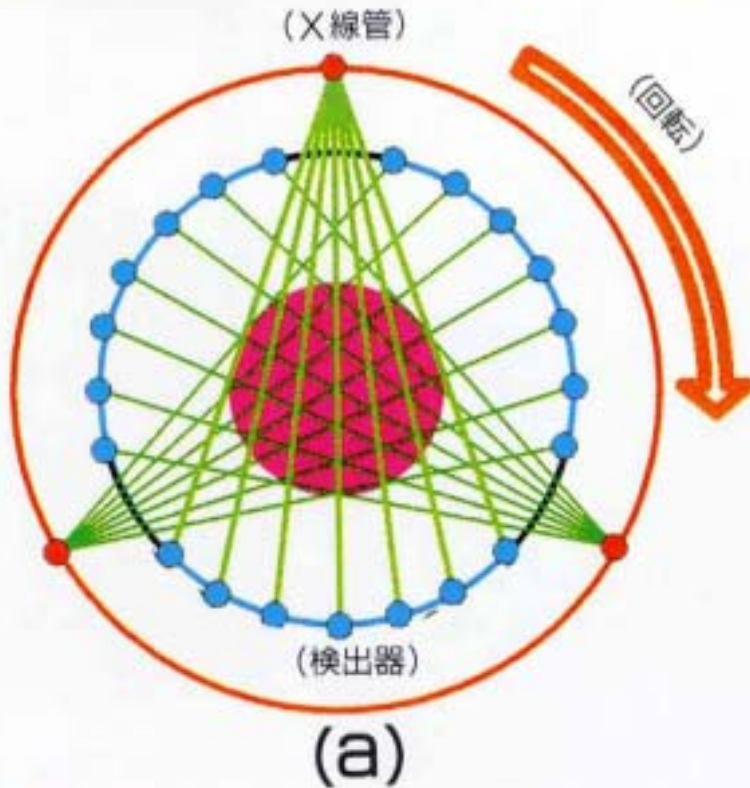
- ◇対象は人間
- ◇CTスキャン
- ◇超音波診断
- ◇内視鏡
- ◇心電図



- ◇対象は地下
- ◇ジオトモグラフィー
- ◇地震探査(弾性波探査)
- ◇ボアホールスキャナ
- ◇電気探査

医療用トモグラフィーとジオトモグラフィーの原理

測定



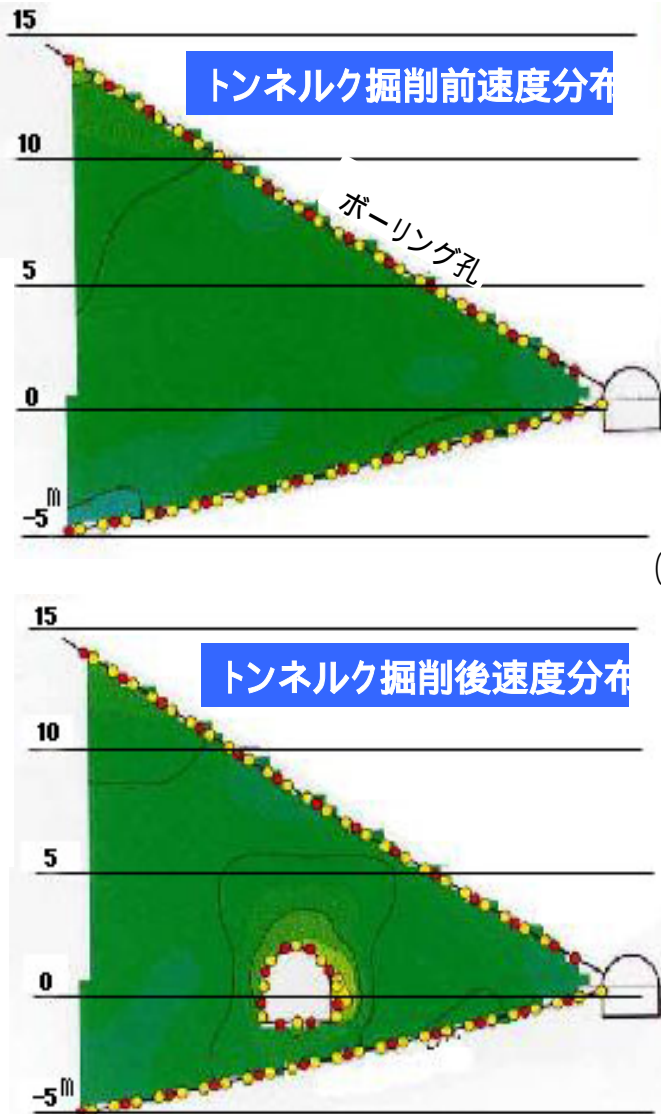
医療用トモグラフィー

CT (computer tomography)

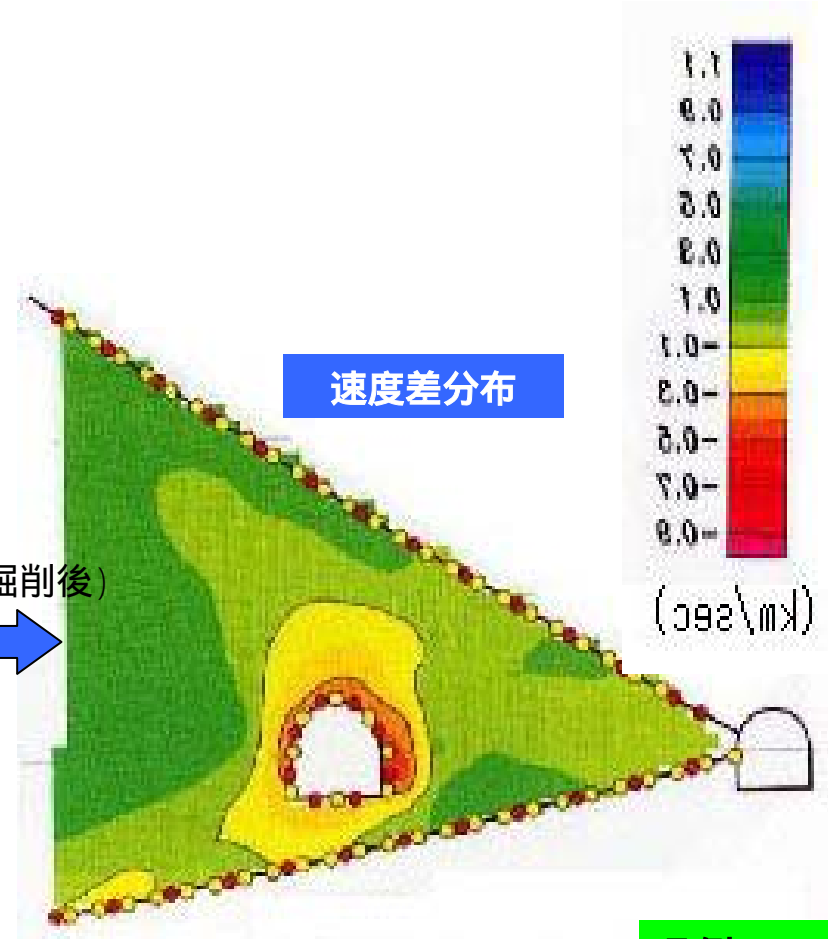
ジオトモグラフィー

Geo-tomography

弾性波トモグラフィーによる地山岩盤のゆるみ領域の把握

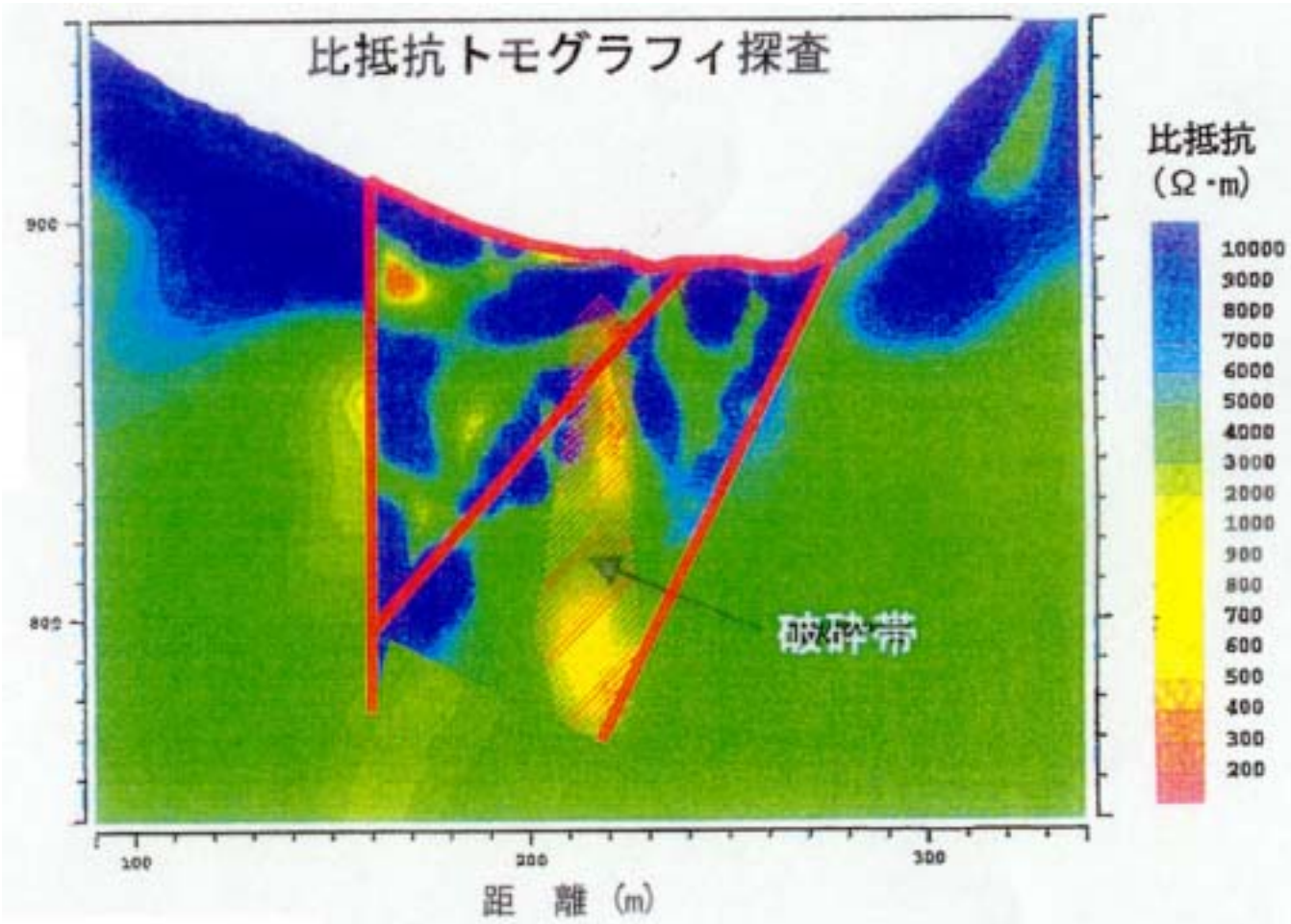


(掘削前-掘削後)



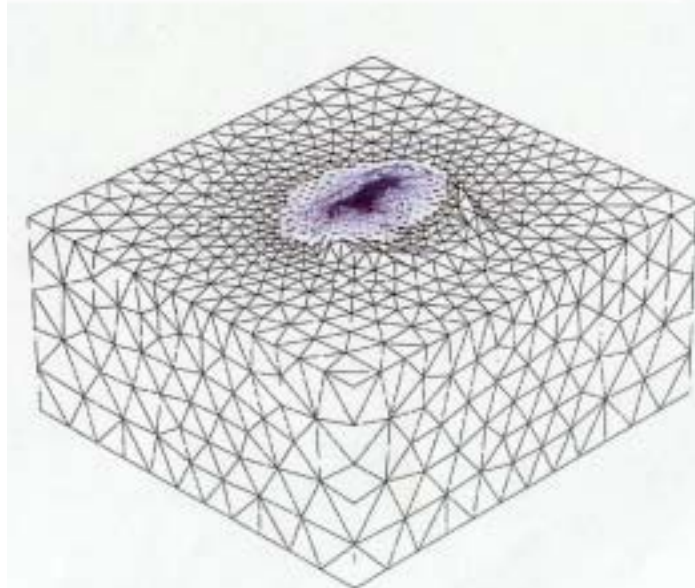
凡例
起震点
受震点

地質の高精度探査(比抵抗トモグラフィー)

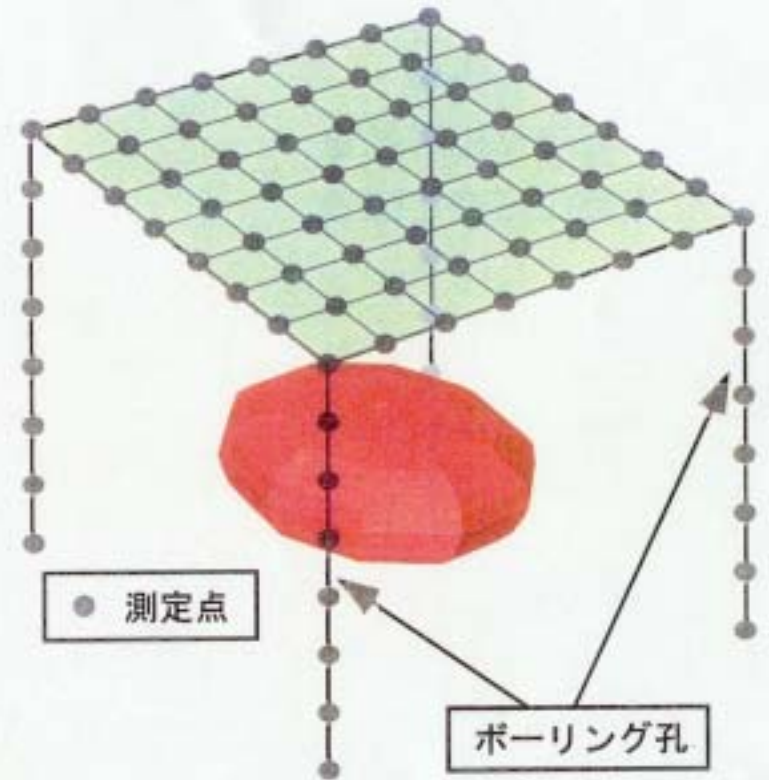


比抵抗探査 測定点位置

3次元地質探査

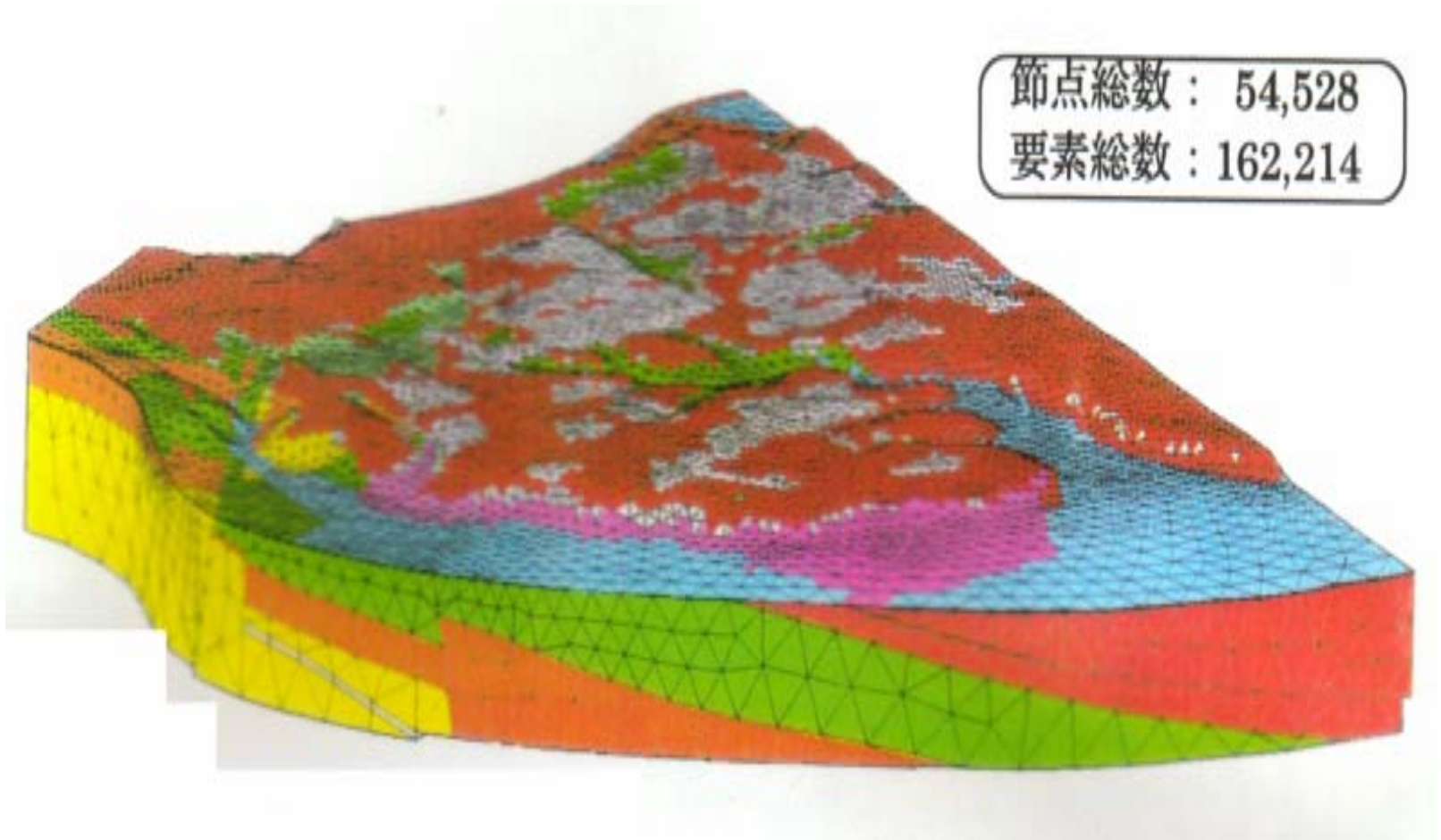


3次元解析用FEMモデル



3次元比抵抗トモグラフィ

3次元地下水流動解析



参考文献

参8):「最新シールドトンネル」日経BP社(1994)

参9):「Trans-Tokyo Bay Highway Project」JSCE,JHPC,TTBHC(1996)

参10)小野寺透、吉中龍之進、齊藤正忠、北川隆(共訳):岩盤地下空洞の設計と施工(E.フック、E.T.ブラウン共著):土木工学社(1985)

参11):花村哲也:”都市地下空間利用と技術革新の方向”,都市開発と土木工学、土木学会(1994)

その他)大野春雄監修:トンネル、なぜなぜおもしろ読本、山海堂(2003)

課題

- 地下空間利用案を提案し、その地下空間建設及び管理上の問題点、必要な技術等について講義内容と自分の自由な発想を交えて論ぜよ。(図表等は別として文章はA4、2枚程度)
- 提出期限:2月4日(金) 午後5時まで
- 提出方法:メール提出、郵送(?)

jtakemur@cv.titech.ac.jp

〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1

東京工業大学土木工学専攻 竹村次朗