

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

1

地球の構造

地盤: 地殻のごく表層

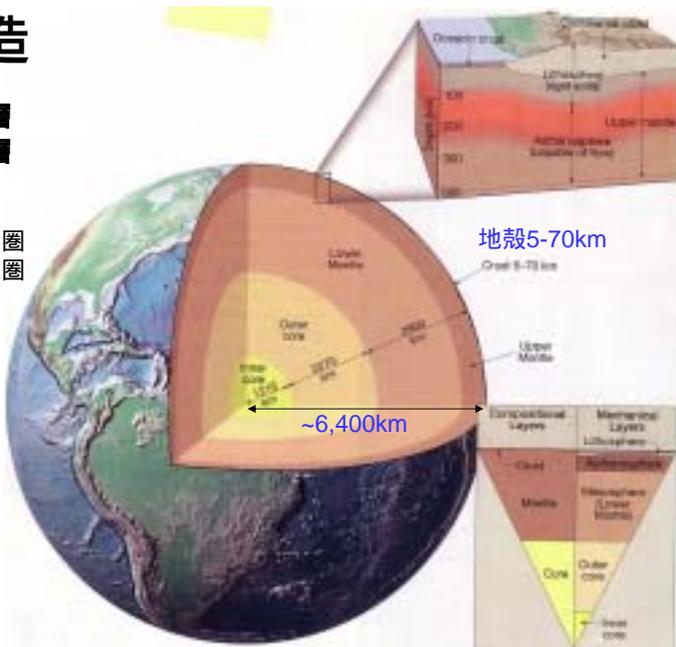
地殻: 地球のごく表層

Solid Earth(地圏)

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

Hydrosphere(水圏)

Atmosphere(大気圏)



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

2

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

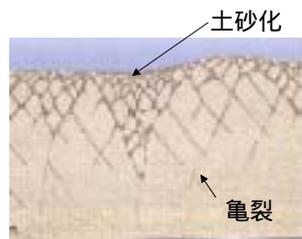
"Earth" 6th ed. Tarbuck & Lutgens,
Prentice Hall, 1999.



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^{mm}

•つまり具合

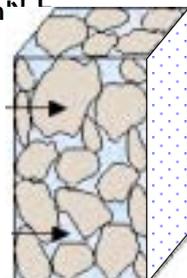
(間隙比(e)=間隙体積 / 土粒子の体積) 土粒子

•間隙の水の量

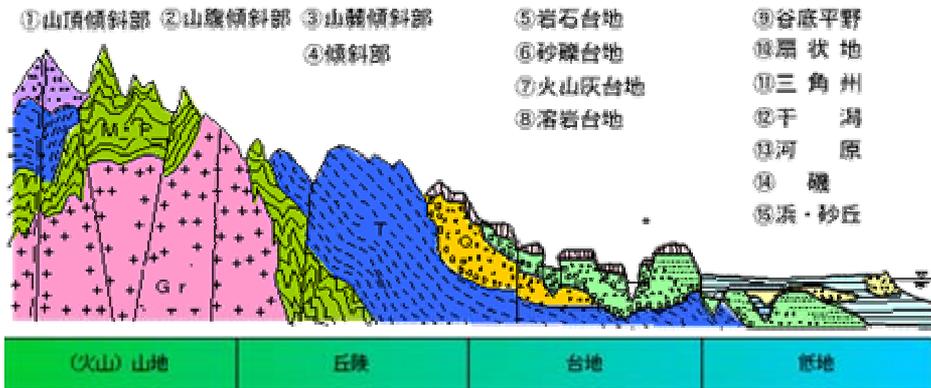
(含水比(w) = 水の重さ / 土粒子の重さ)

砂:e=0.5 ~ 1.0、粘土:e=1.0 ~ 15

(土粒子1に対し水15) 間隙 (液体+気体)

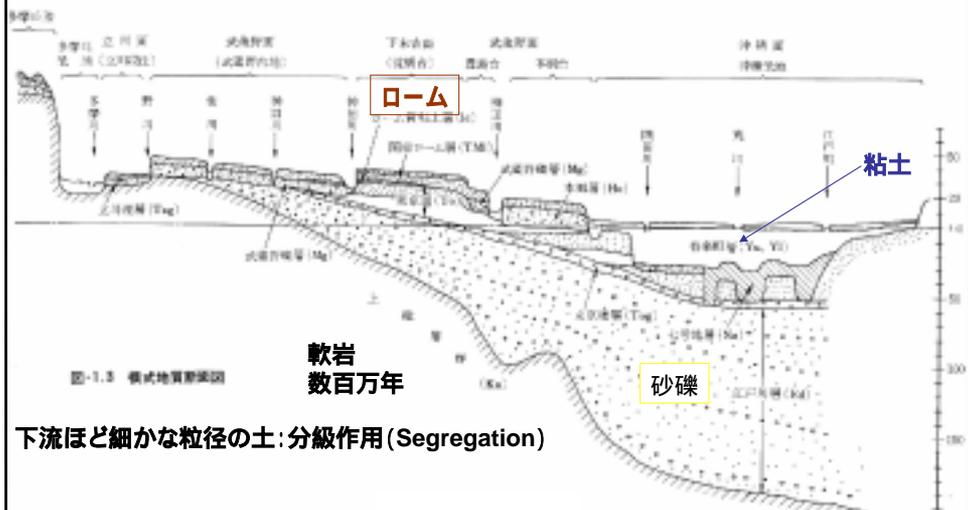


地形区分図



土の活用法入門: 地盤工学会

東京の地盤図(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

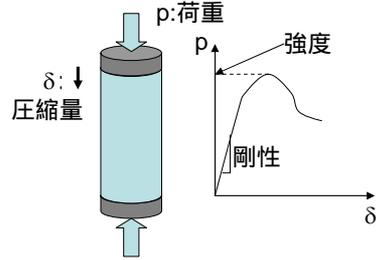
岩: 非常に強度が低い: チョーク、岩塩
1-25MPa

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



硬い岩は、鉄と同じ強さ、硬さ、
しかし、もろい

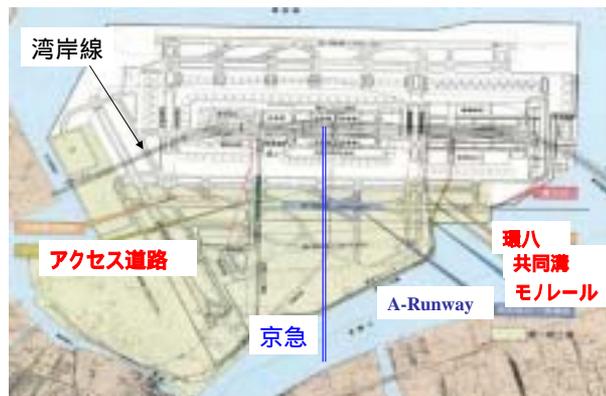
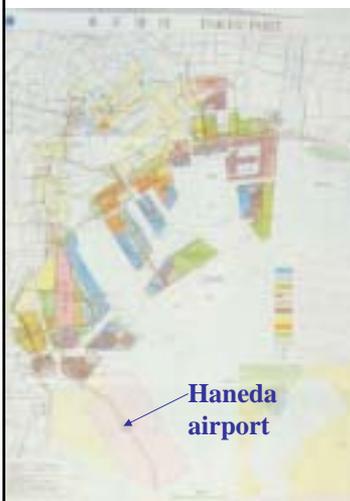
土: 強度 0 ~ 5MPa

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

7

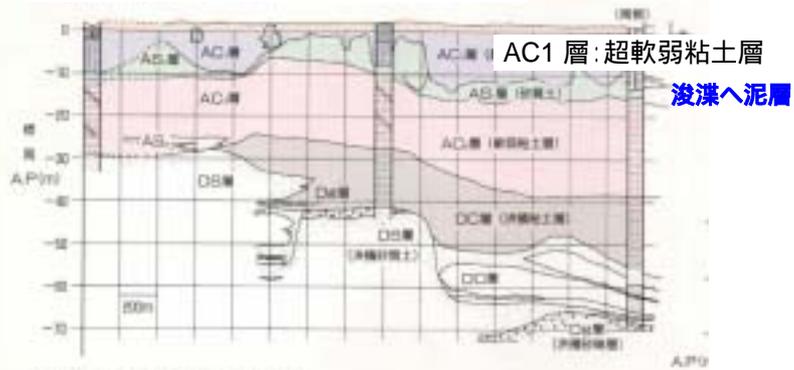
羽田空港沖合い展開工事



羽田空港沖合い展開事業パンフレット

8

Soil Profile along Runway A



Ac₁, Ac₂, Dc層の主な土質定数

層名	Ac ₁	Ac ₂	Dc
土の統一土質分類	粘土 (SH, 粘粒土 OOL)	SH, (DL)	(SH), (DL)
単位体積重量 (t/m ³)	1.7~1.8	1.5~1.6	1.6~1.8
自然含水比 w (%)	38~39	68~112	30~35
液性限界 PL (%)	20~30	30~32	20~25
塑性限界 LL (%)	50~100	55~120	45~100
一割圧縮率 (g/kg/cm ³)	2.1~2.2	1.6~2.2	1.7~2.5
液性比 (Liquidity Index)	18 ⁺	18 ⁺	18 ⁺
圧入係数 D ₁₀₀ (N/g)	19	正確な定値域 過大な定値域	100 ~ 100 700 ~ 1000
透水性係数 P ₁₀₀ (m/s)	0	0~5	5~100以上

9

超軟弱浚渫土 -羽田マヨネーズ層-



表層地盤改良



10

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



11

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。

12

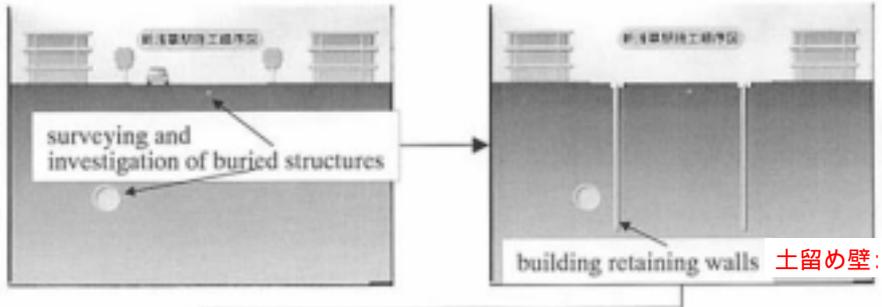
開削工法

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

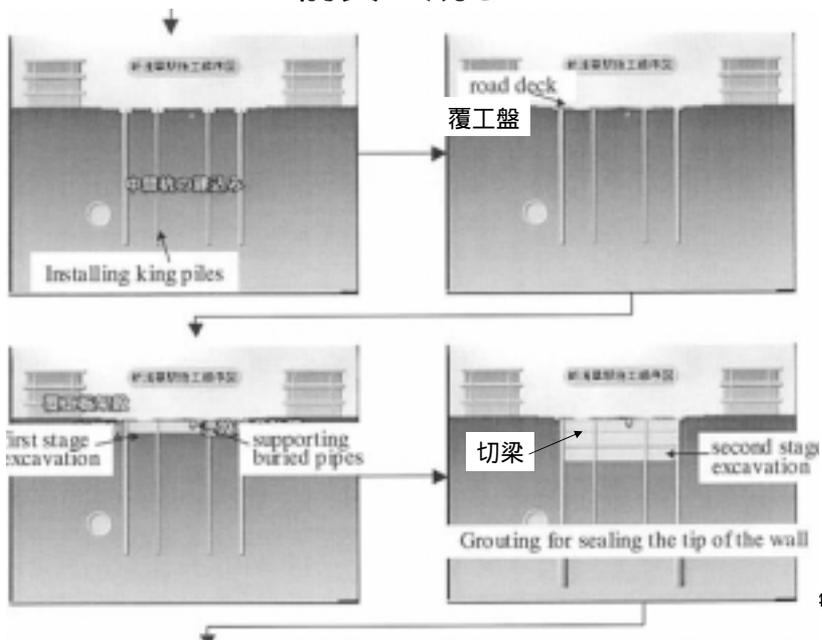
開削工法による地下施設(地下鉄駅)の建設



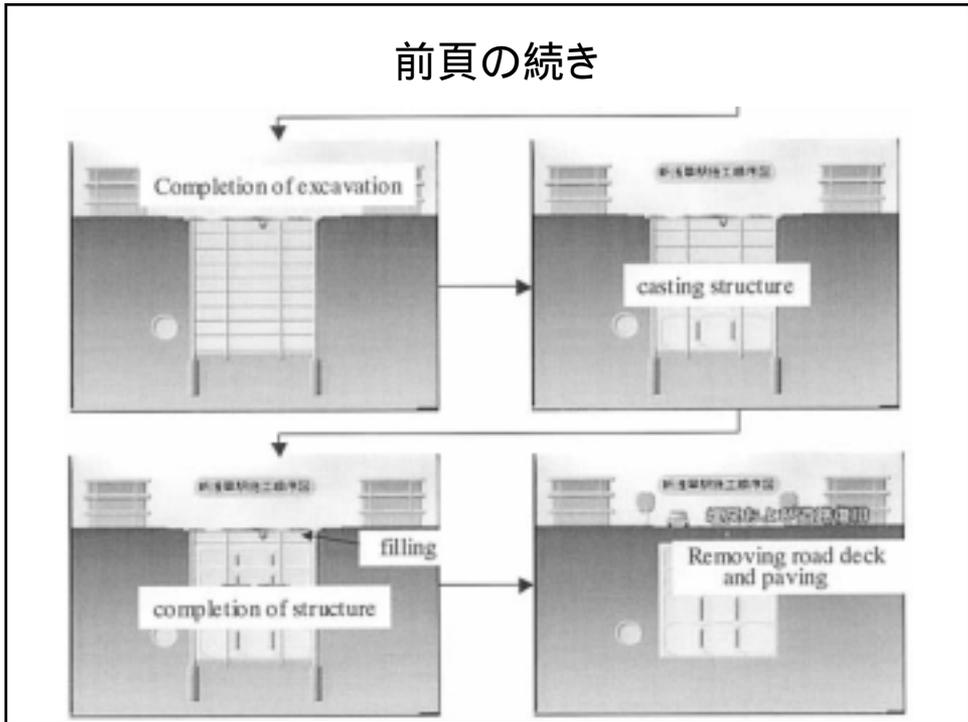
地下鉄関係ビデオ

鋼矢板、
地中連続壁(鉄筋コンクリート) 13

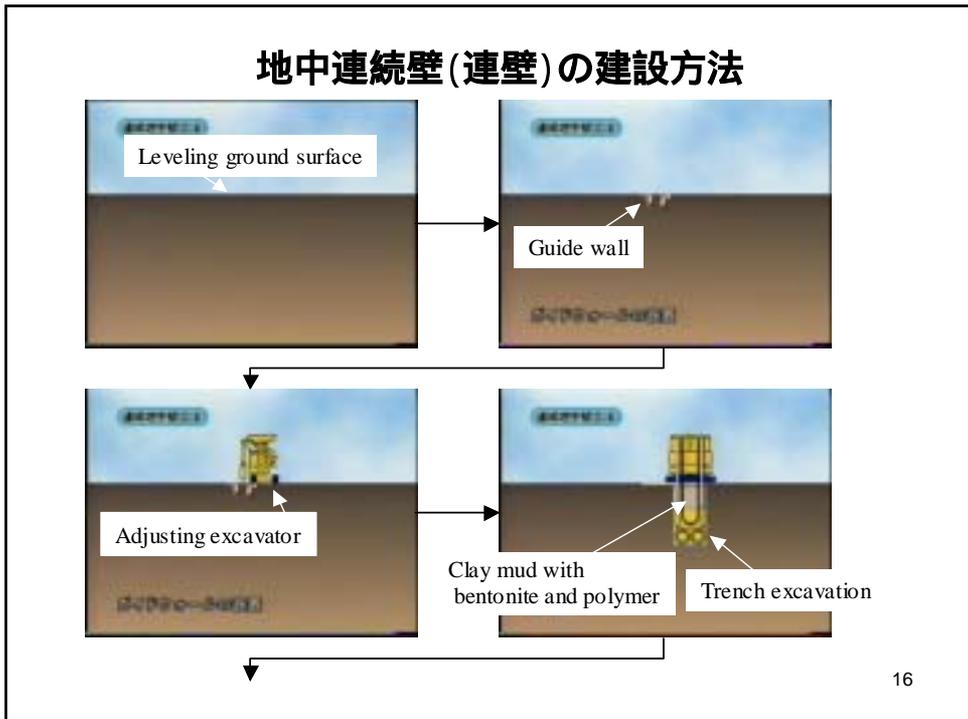
前頁の続き



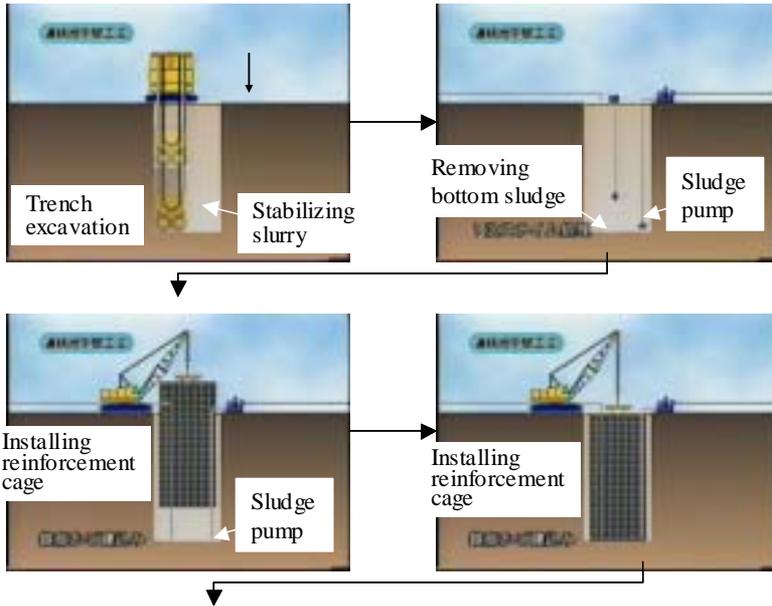
前頁の続き



地中連続壁(連壁)の建設方法

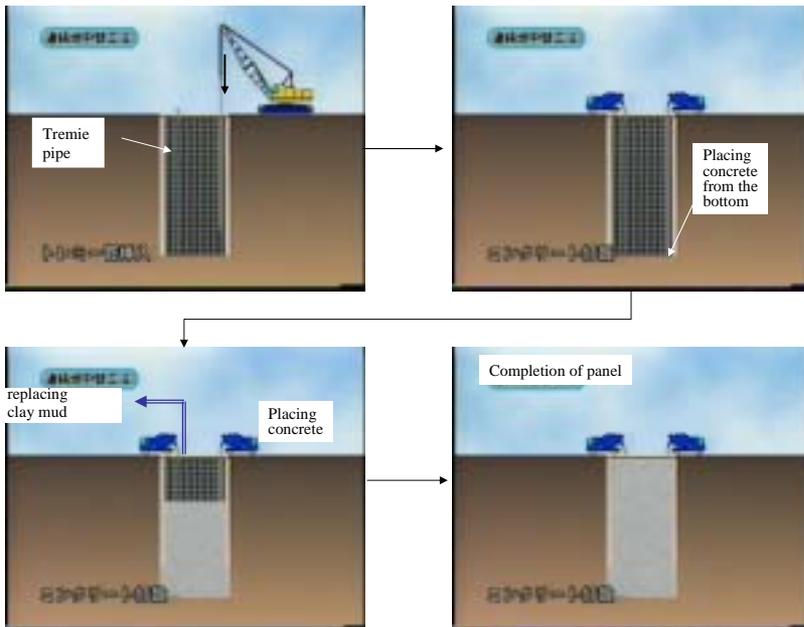


前頁の続き



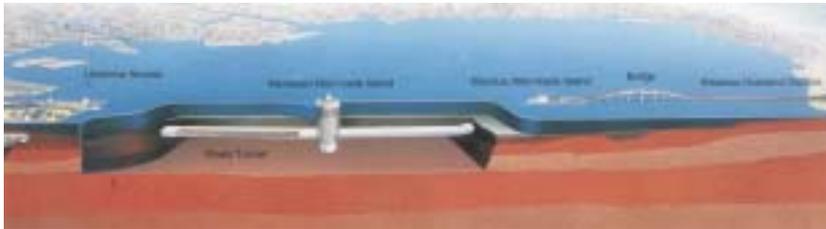
17

前頁の続き



連壁の建設例 アクアライン

参9)



9

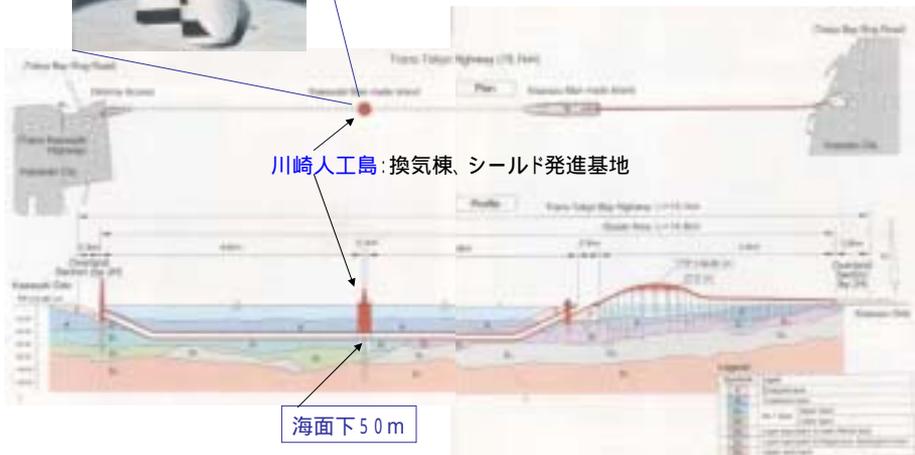
Cross section and plan of TTBH

Tower of wind
風の塔

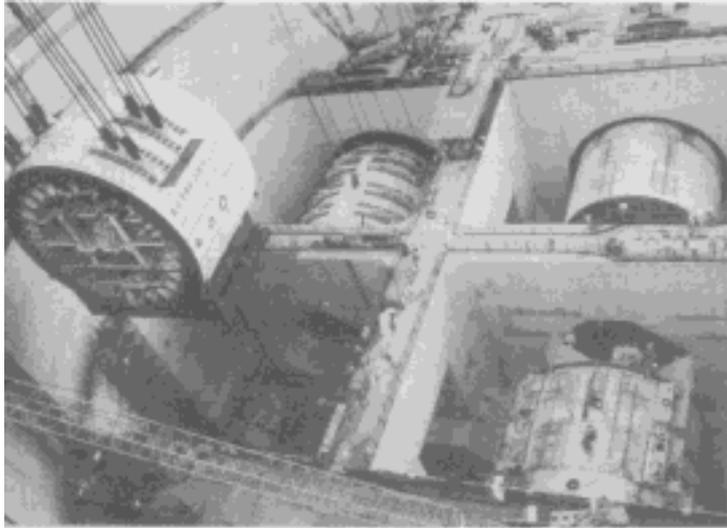


川崎人工島: 換気棟、シールド発進基地

海面下50m

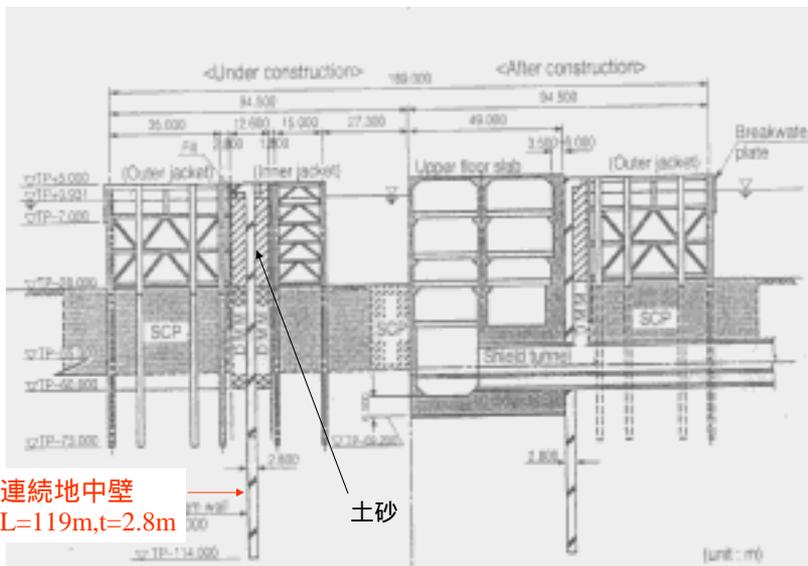


Kawasaki man-made island as launching shaft of shield tunnels



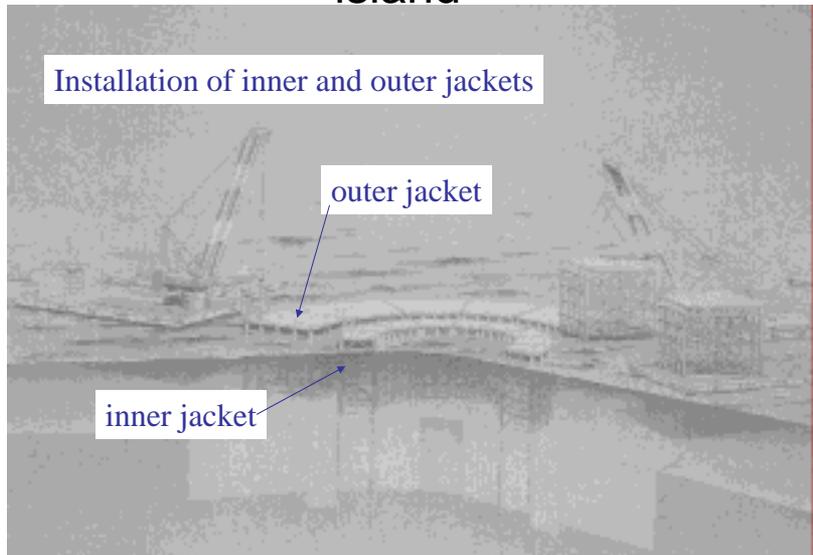
21

Kawasaki man-made island

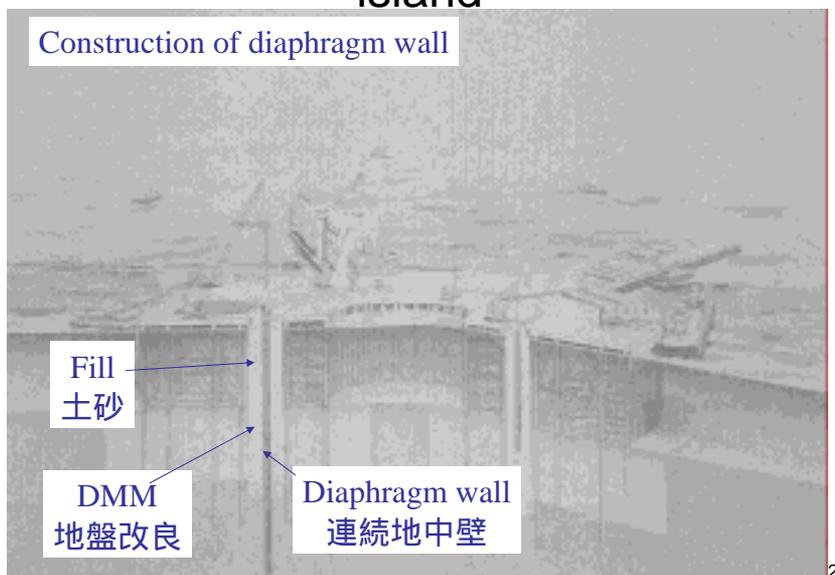


22

Construction of Kawasaki man-made island

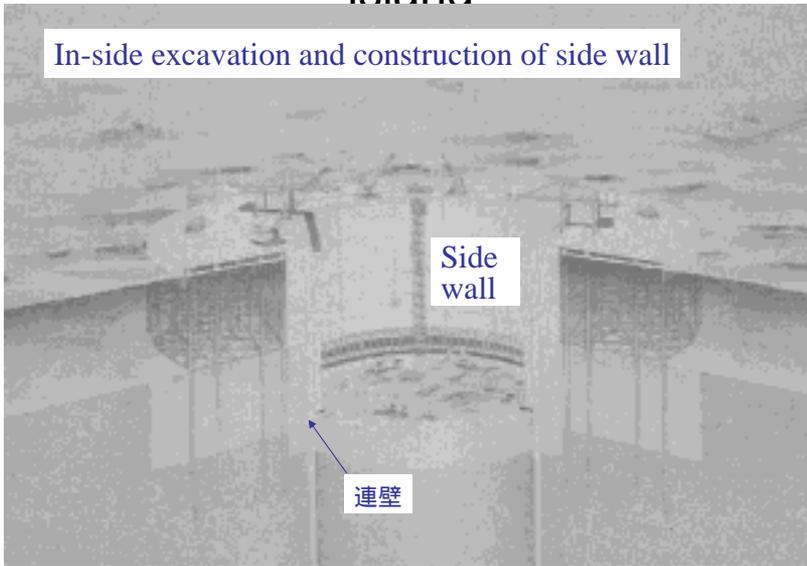


Construction of Kawasaki man-made island



Construction of Kawasaki man-made island

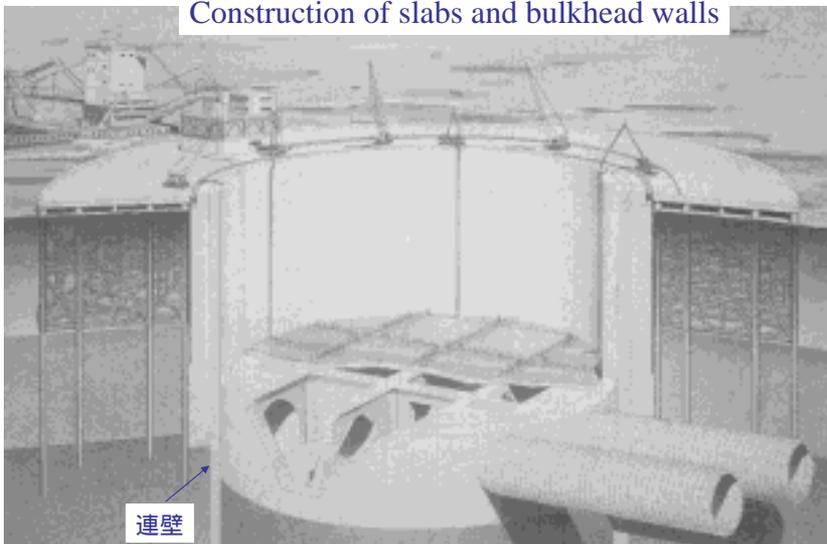
In-side excavation and construction of side wall



25

Construction of Kawasaki man-made island

Construction of slabs and bulkhead walls



26

Trench excavator and face of diaphragm wall



Horizontal multiple-axis
drum cutter

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



27

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。

28

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。

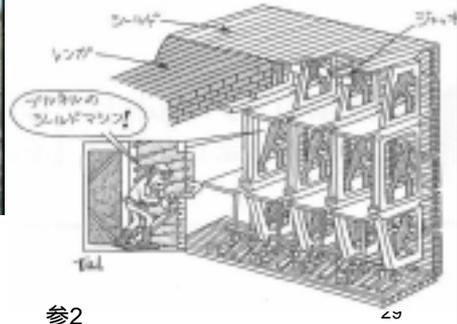
1824から幾多の事故にあい1841年完成

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。

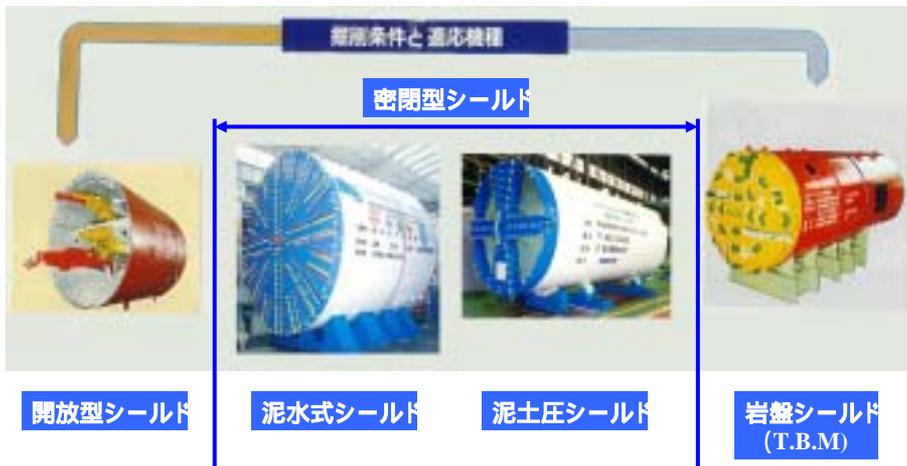
取った穴はすぐ、体液によって膜はりをして、穴が崩れないように保護する。



参2

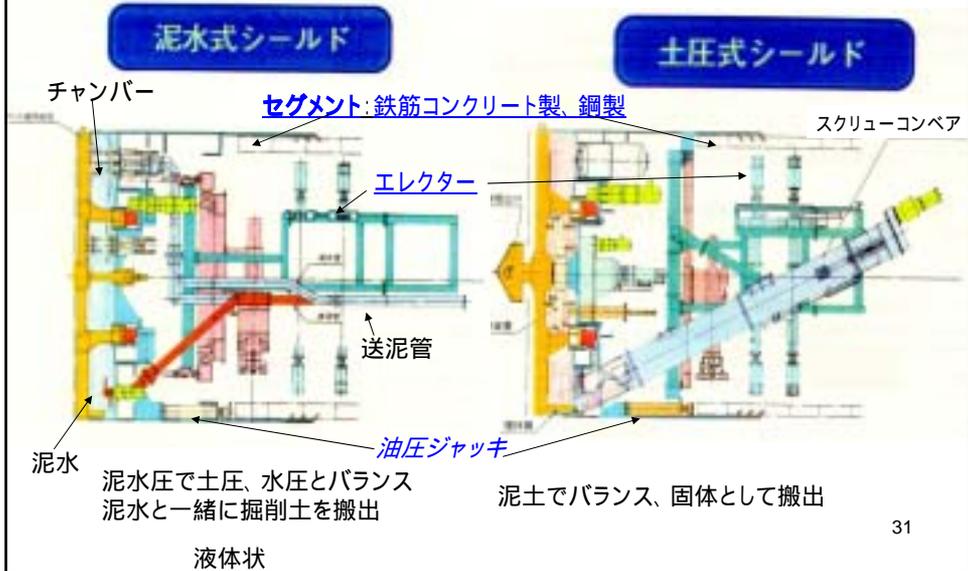
シールド工法の種類

参8)



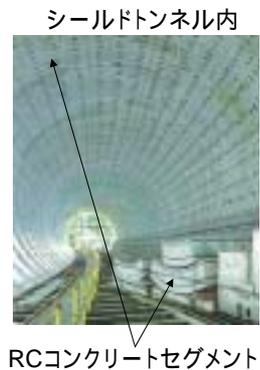
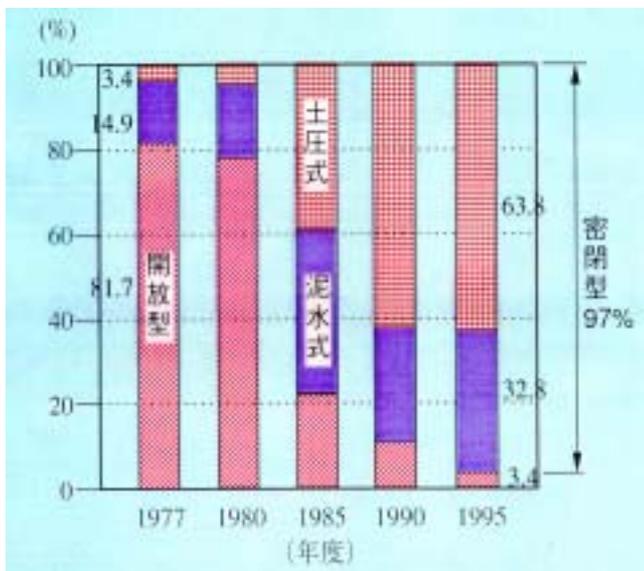
泥水式シールド・土圧式シールドの構造

この二つがほとんど。



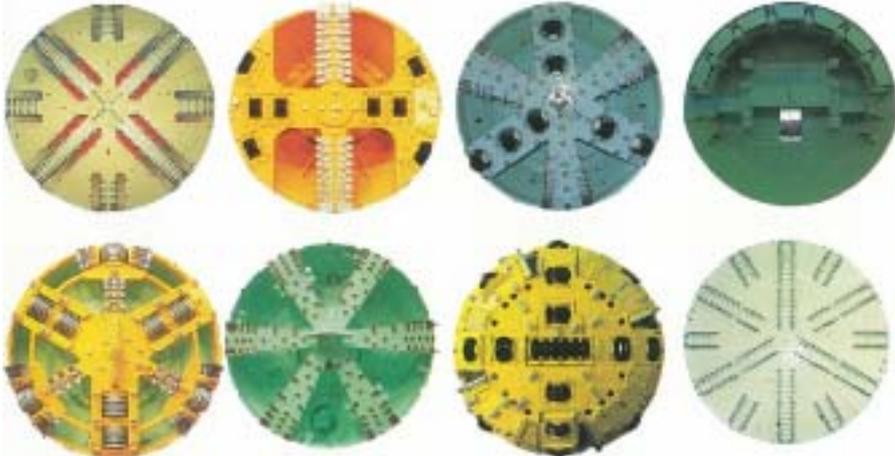
31

シールド形式の変遷



32

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

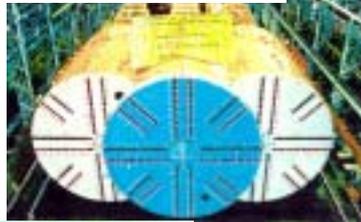


特殊なシールド工法

Double-O-Tube工法



マルチフェイズシールド工法



DPLEX工法



35

山岳トンネル

山岳(岩)トンネルの差: 支保工の差

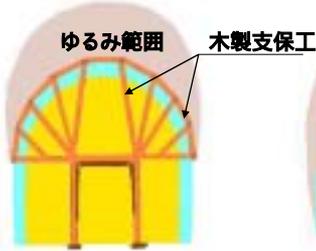
- 素掘り(支保工なし): 有史以前から
- 木製支保工: 鉾山
- 鋼製支保工
- NATM(吹き付けコンクリート+ロックボルト)
- 鋼製支保工とNATM併用

36

山岳トンネル技術の変遷

New Austrian Tunneling Method

木製支保工

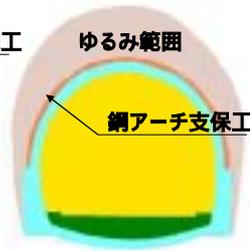


支保だけで地圧を支える

~昭和30年代末

鉱山掘削

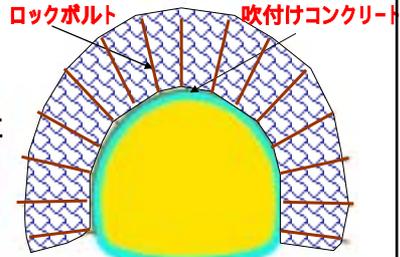
鋼アーチ支保工



昭和40年代初め~昭和50年代末

NATM

(吹付けコンクリート、ロックボルト)



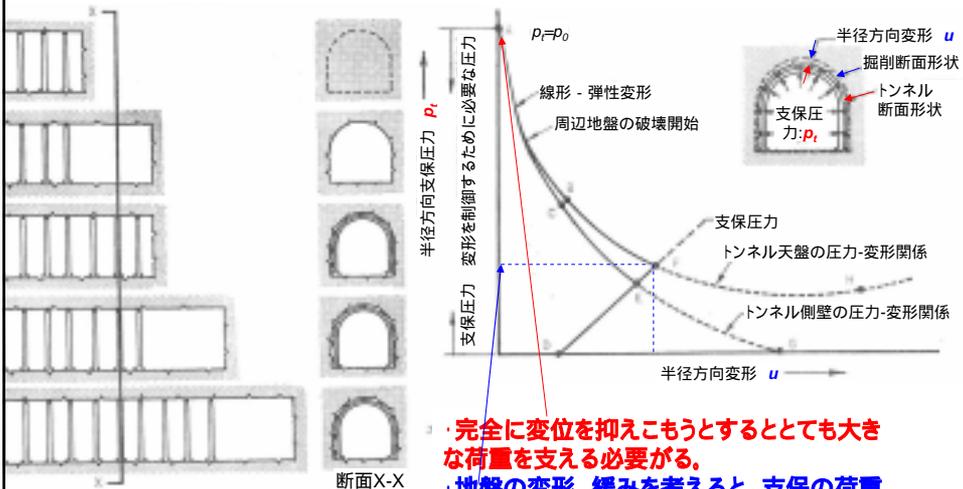
周辺岩盤も地圧を支える構造物

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)

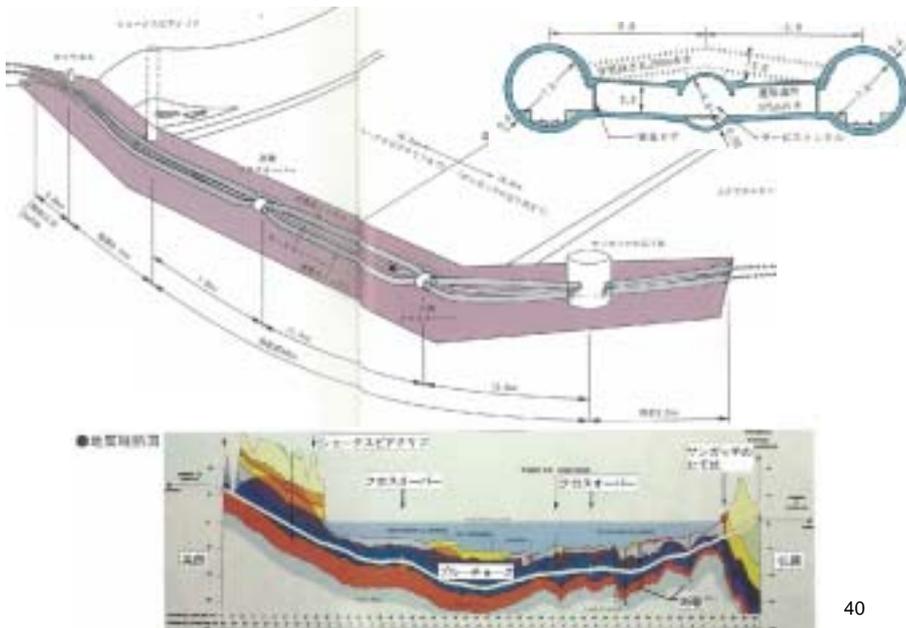
山岳トンネルの掘削方法

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

39

英仏海峡(ドーバー)トンネル 参8)



40

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

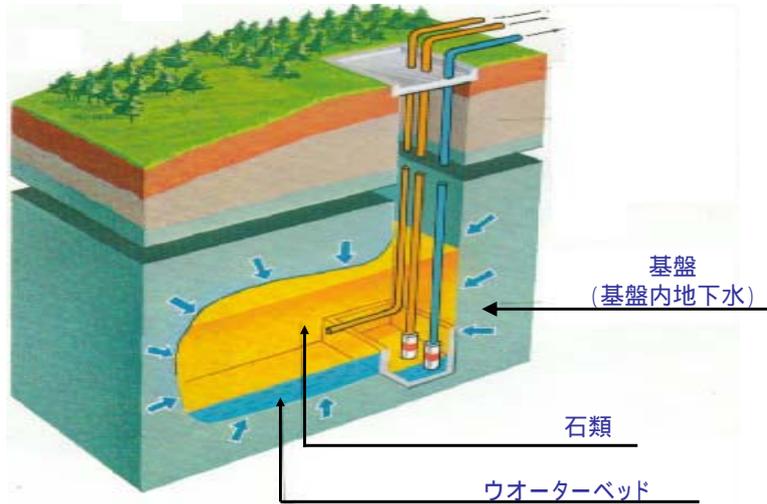
<http://www.tepco.co.jp/kanna-gawaindex-j.html>



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)



43

LPG地下水封式貯蔵概念図 液化プロパンガス

石油との差

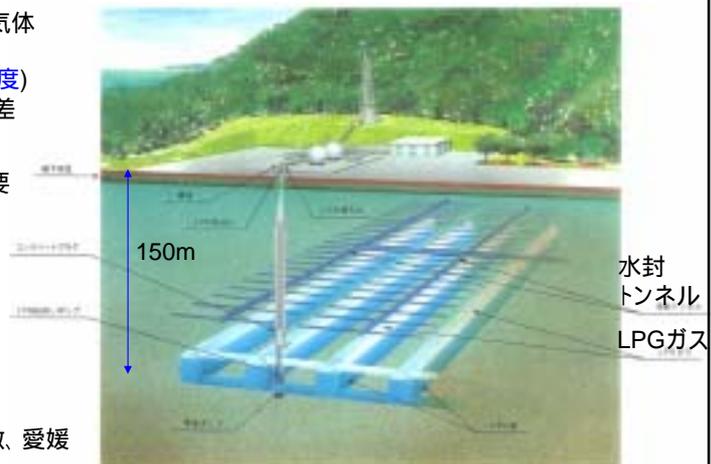
- 常温、大気圧では気体
蒸気圧
(1MPa、水100m程度)
- 液体と気体の体積差
250倍

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

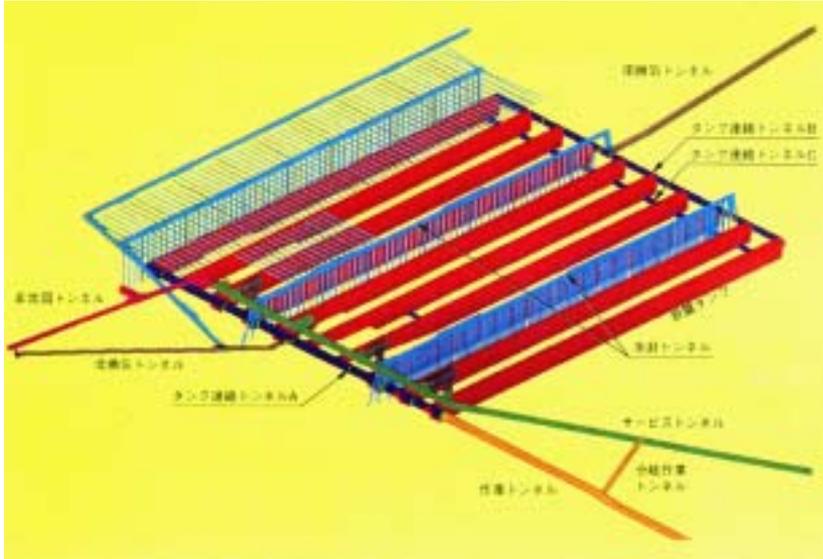
実証施設建設中-倉敷、愛媛



石油公団: LPG地下備蓄技術実証プラント、1990.

44

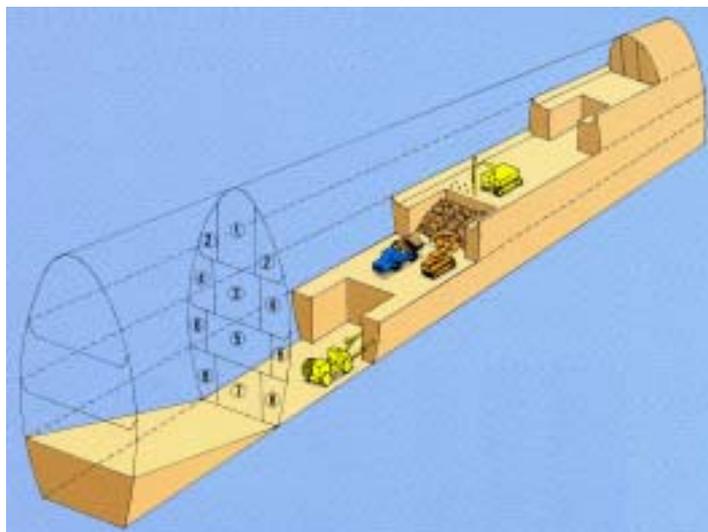
串木野地下石油備蓄基地(完成時鳥瞰図)



日本地下石油備蓄(株): 串木野地下石油備蓄基地 工事記録(岩盤土木)、1994.

45

空洞掘削順序図



清水建設他JV: 串木野地下石油備蓄基地建設工事の概要(パンフレット)、1990.

46

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



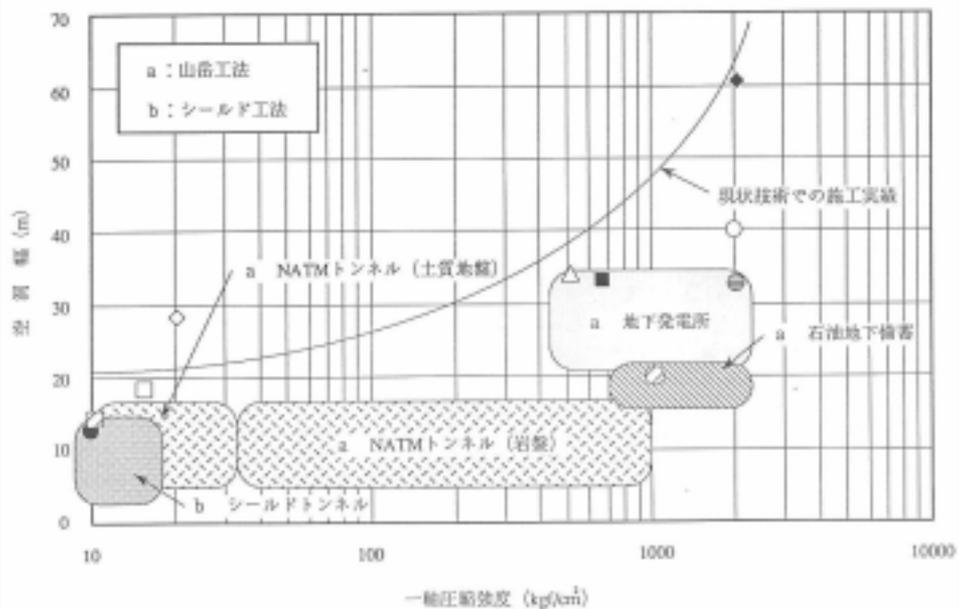
完成

47

清水建設提供

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	☑	東名新領トンネル (3車線)	日本 (静岡県)
△	チラナ地下発電所	インドネシア	⊙	菊井地下石油保管基地	日本 (愛媛県)
■	ヴェルデックII地下発電所	ドイツ	⊕	今市地下発電所	日本 (栃木県)
◆	ユーピ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)

49

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

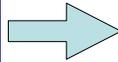
50

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

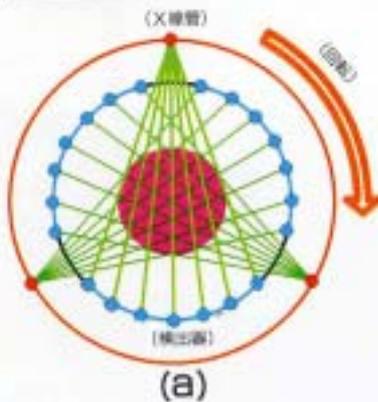


- ◇対象は地下
- ◇ジオトモグラフィー
- ◇地震探査(弾性波探査)
- ◇ボアホールスキャナ
- ◇電気探査

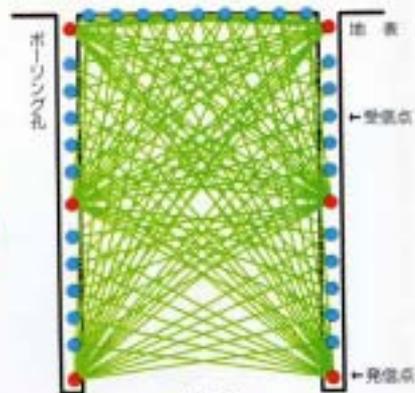
51

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



(a)



(b)

医療用トモグラフィー

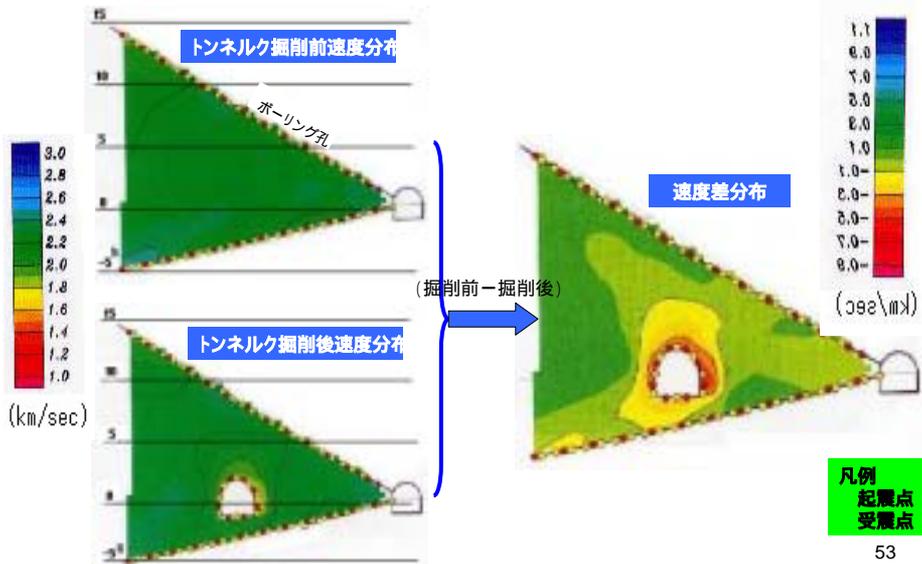
ジオトモグラフィー

CT (computer tomography)

Geo-tomography

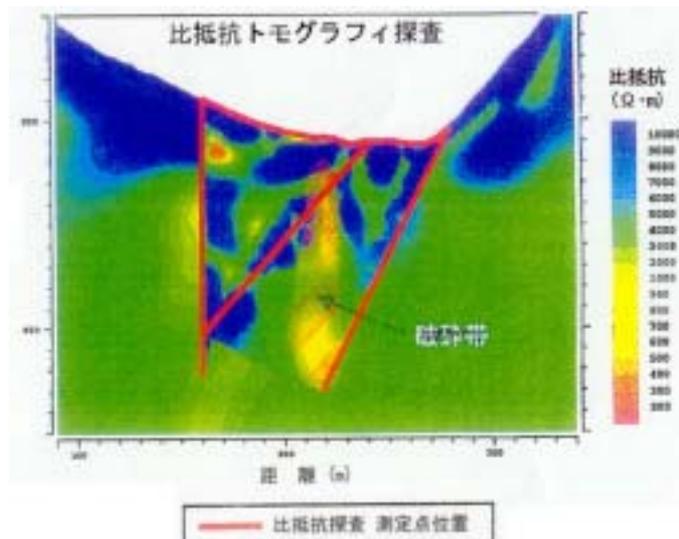
52

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



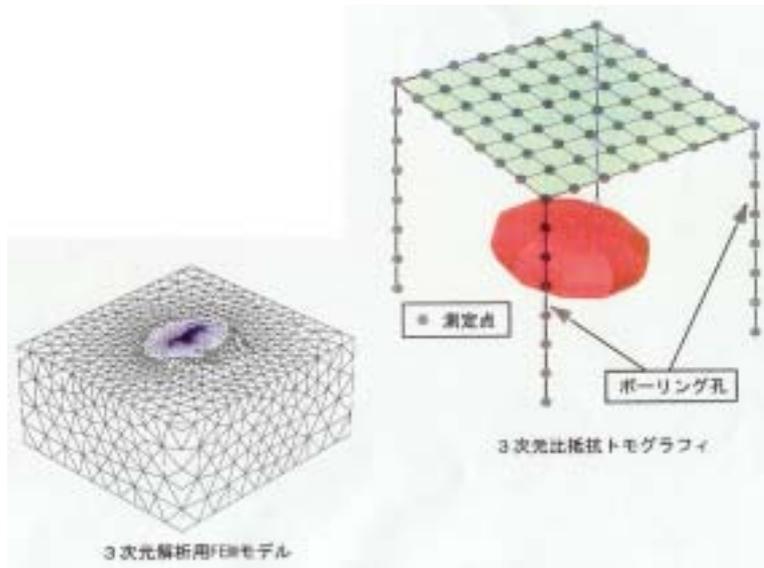
53

地質の高精度探査(比抵抗トモグラフィー)

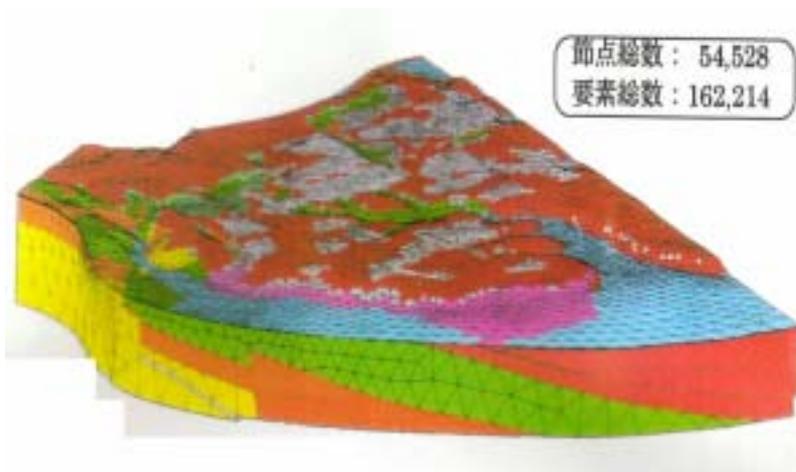


54

3次元地質探査



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、斉藤正忠、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)

57

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

58