



(国研)土木研究所新技術ショーケース
特別講演会(2018.10.2)

鉄道におけるトンネル建設技術のあゆみ と新たな挑戦

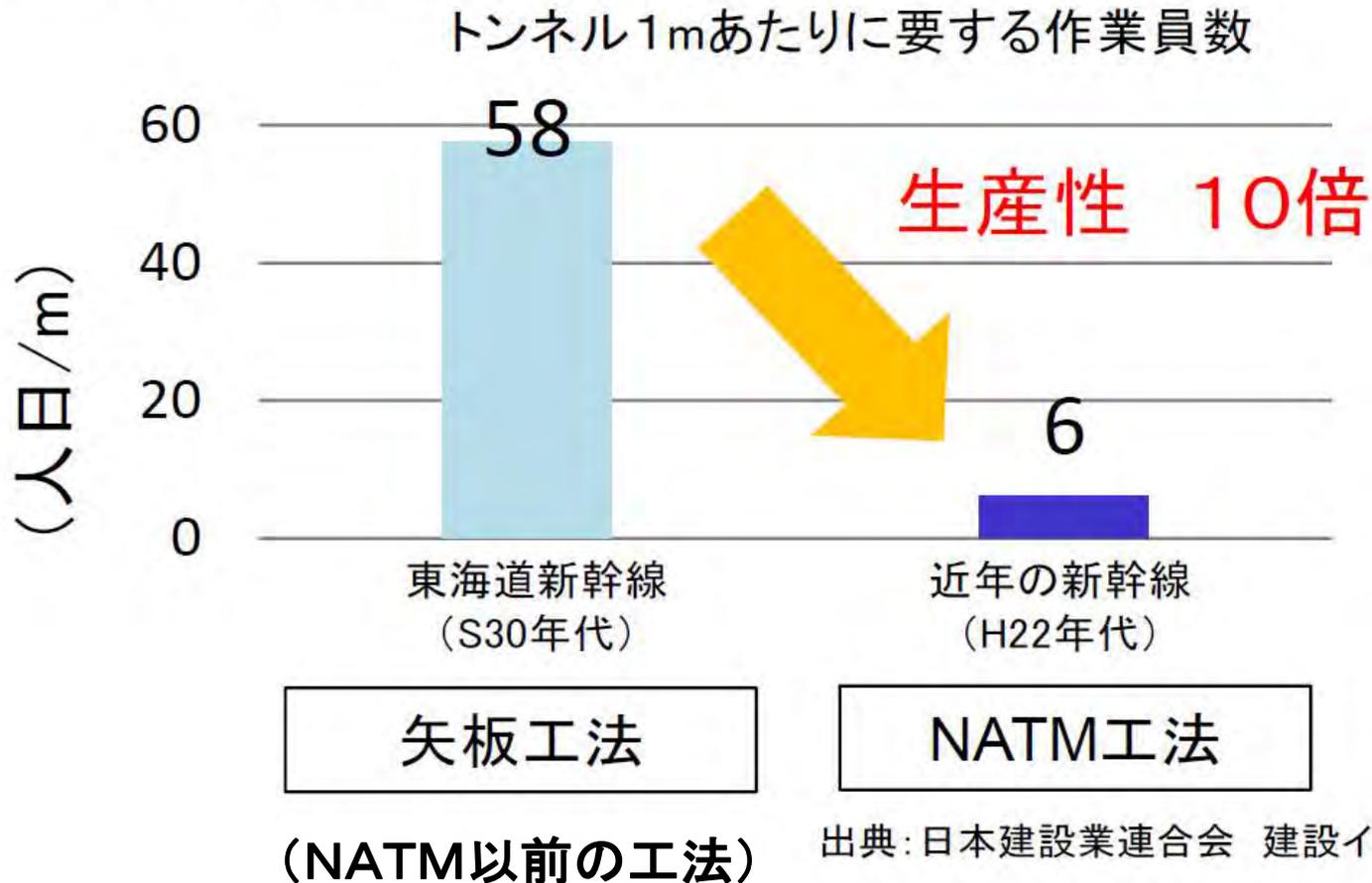
— 青函から羊蹄へ —

独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構

服部 修一

建設現場の生産性の向上

■ トンネル工事



本講演の流れ



1. ミューラー博士の“NATM22の原理”
2. NATMの萌芽
 - 青函トンネルの注入ゾーンの考え方
 - 中山トンネルにNATM導入
3. NATMの標準工法化
 - トンネル標準示方書山岳編(S62年版)
4. NATMの発展
 - 都市トンネルへのNATMの挑戦 —北総線、東葉高速線、仙台南北線—
 - 未固結地山への適用範囲の拡大 —東北新幹線八戸・七戸間トンネル群—
5. SENSの導入
 - 三本木原トンネル、津軽蓬田トンネル
 - 西谷トンネル、羽沢トンネル
6. 羊蹄トンネルにおけるSENSの挑戦

1. ミューラー博士の“NATM22の原理”

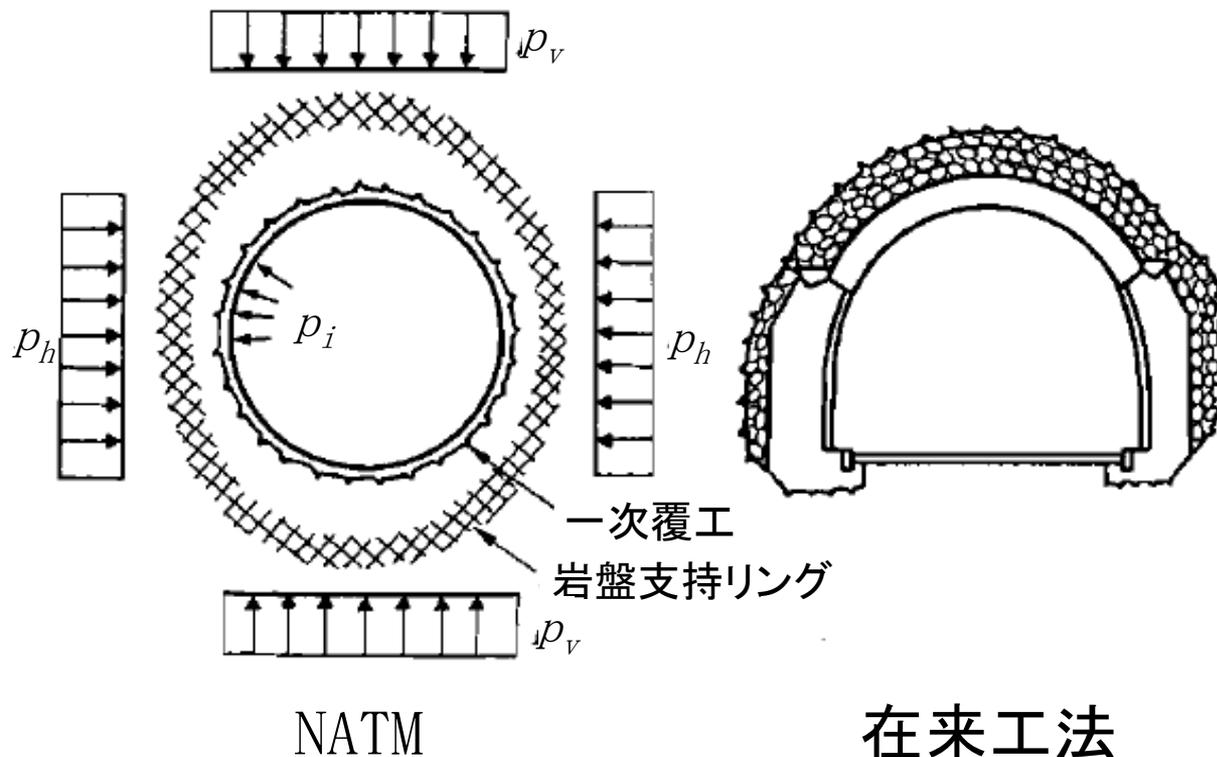
- **N**ew **A**ustrian **T**unneling **M**ethod
- 1962年, 第13回国際岩盤力学会議で命名
- 主にロックボルト, 吹付けコンクリートを支保工とする掘削(支保)工法の考え方

ミュラー博士の“NATM22の原理”

- 1978年, L.Mullerによる講演会で紹介される.
(Fundamental Ideas and Principles of the “New Austrian Tunnelling Method”)
 - ✓ 地山のもつ支保効果の積極的な利用法
 - ✓ フレックスな支保(覆工)の必要性
 - ✓ 地山を生かす施工法
 - ✓ 現場計測の重要性と有効利用

ミューラー博士の“NATM22の原理”

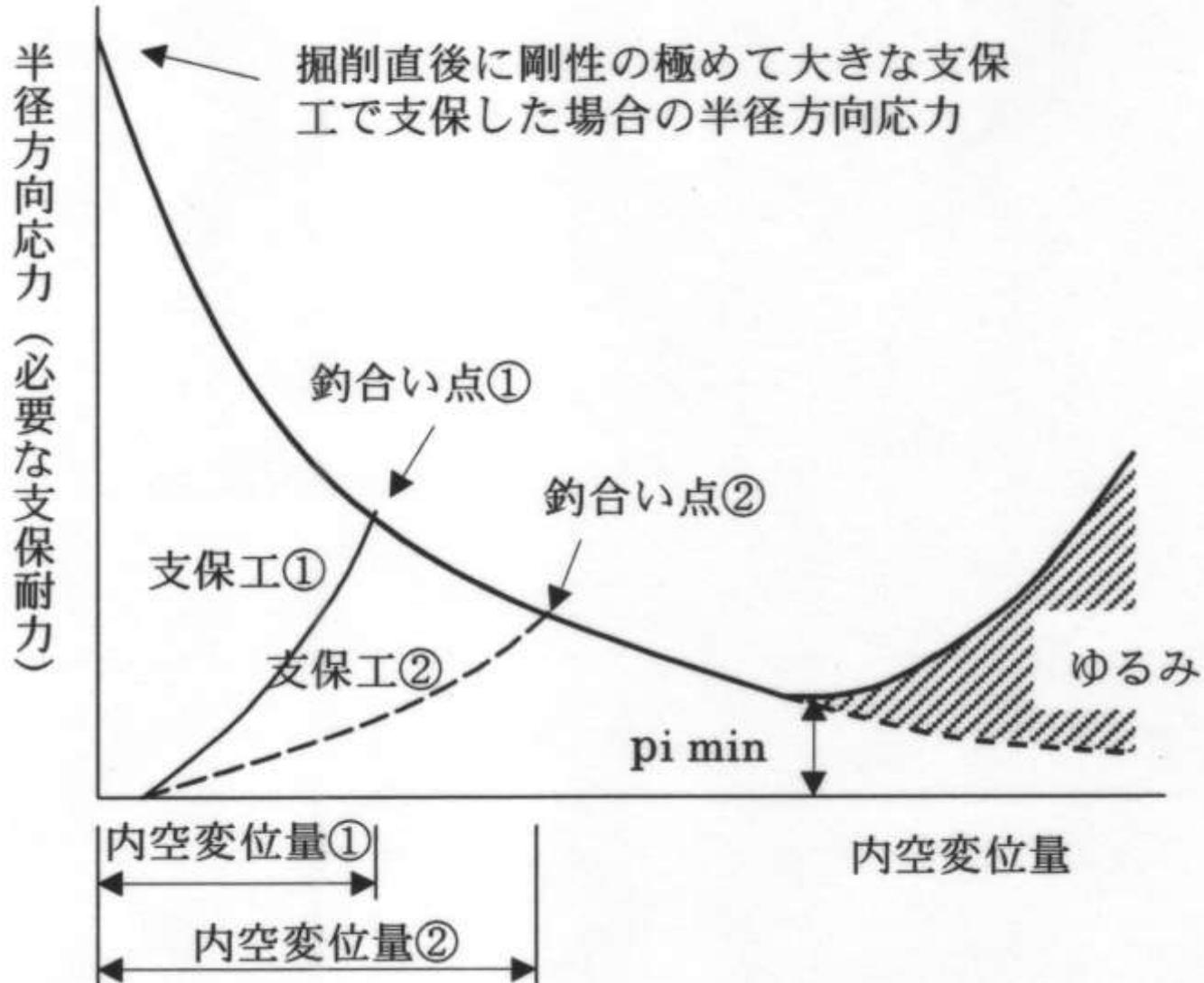
- トンネルは，力学的に地山の支持リングと支保工，覆工から構成される厚肉円筒である。





地山特性曲線

(どの程度の地山変位が許されるか?)



2. NATMの萌芽

青函トンネルの注入ゾーンの考え方



凡 例	
	東北新幹線
	北海道新幹線



開業当時の様子(昭和63年)



注入範囲の決定

(昭和46年度青函トンネル土圧研究調査報告書(1972、土木学会)より)

- 注入域内を弾性体と考えると、以下の式が成り立つ。

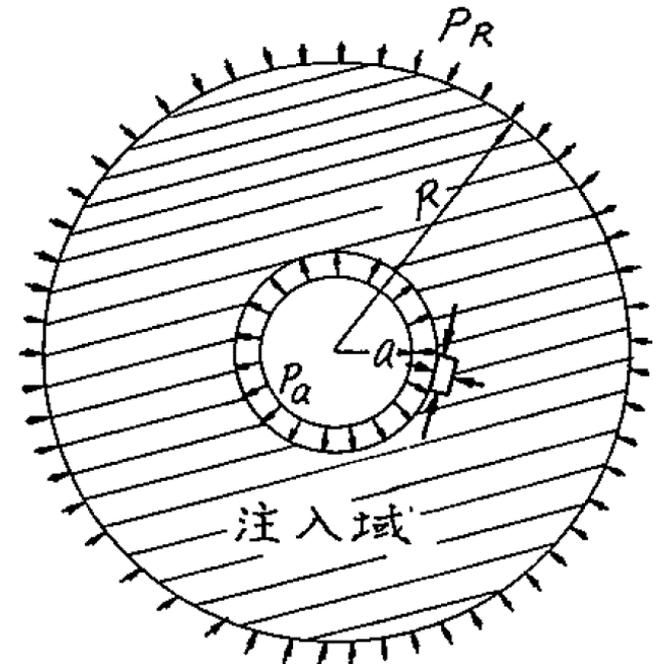
$$P_a = -C \cot \varphi + (P_R + C \cot \varphi) (1 - \sin \varphi) / \{1 - (a/R)^2 \sin \varphi\} \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

a : 掘削内空半径 R : 注入半径
 P_a : 支保圧力 P_R : 注入域外圧
 C : 粘着力 φ : 内部摩擦角

- 脆性度(brittleness index): n

$$n = \sigma_{ca} / \sigma_{ta}$$

σ_{ca} : 岩盤圧縮強度
 σ_{ta} : 岩盤引張強度





注入範囲の決定

- Mohr-Coulombの強度説に従い、①式の $C \cot \varphi$ 、 $\sin \varphi$ を n と σ_{ca} に換算。

$$P_a = \frac{-\sigma_{ca}}{n-1} + \left(P_R + \frac{\sigma_{ca}}{n-1} \right) \frac{1 - \frac{n-1}{n+1}}{1 - \left(\frac{a}{R} \right)^2 \frac{n-1}{n+1}} \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

a : 掘削内空半径

R : 注入半径

P_a : 支保圧力

P_R : 注入域外圧

n : 脆性度

σ_{ca} : 岩盤圧縮強度

- ここで、以下の数値を仮定すると、

$$\sigma_{ca} = 10 \text{kg/cm}^2, n = 3, \varphi = 30^\circ$$

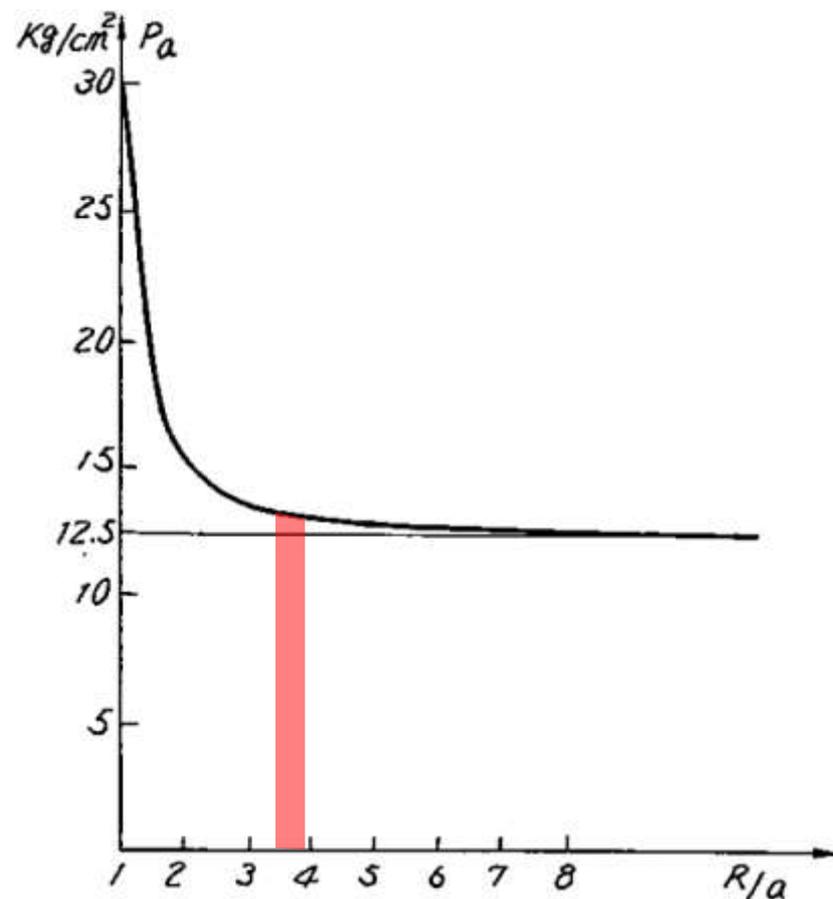
$$P_R = 30 \text{kg/cm}^2 \text{ (水圧 } 25 \text{kg/cm}^2 \text{、土圧 } 5 \text{kg/cm}^2 \text{)}$$

$$P_a = -5 + \frac{35 \times 0.5}{1 - 0.5 \left(\frac{a}{R} \right)^2} \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

となる。

注入範囲の決定

- 式③の支保圧力 P_a と a/R の関係を図示すると右図のとおり。
(ただし、 a/R は逆数 R/a で表示)
- 右図より、注入範囲として有利なところは $R/a = 3.5 \sim 4$ 前後。
(それ以上 R/a を大きくしても P_a はほとんど小さくならない)
- したがって、内空半径 $a = 4\text{m}$ のときは、注入域 $R = 14 \sim 16\text{m}$
(掘削面外方 $10 \sim 12\text{m}$)が効率の良い注入範囲となる。



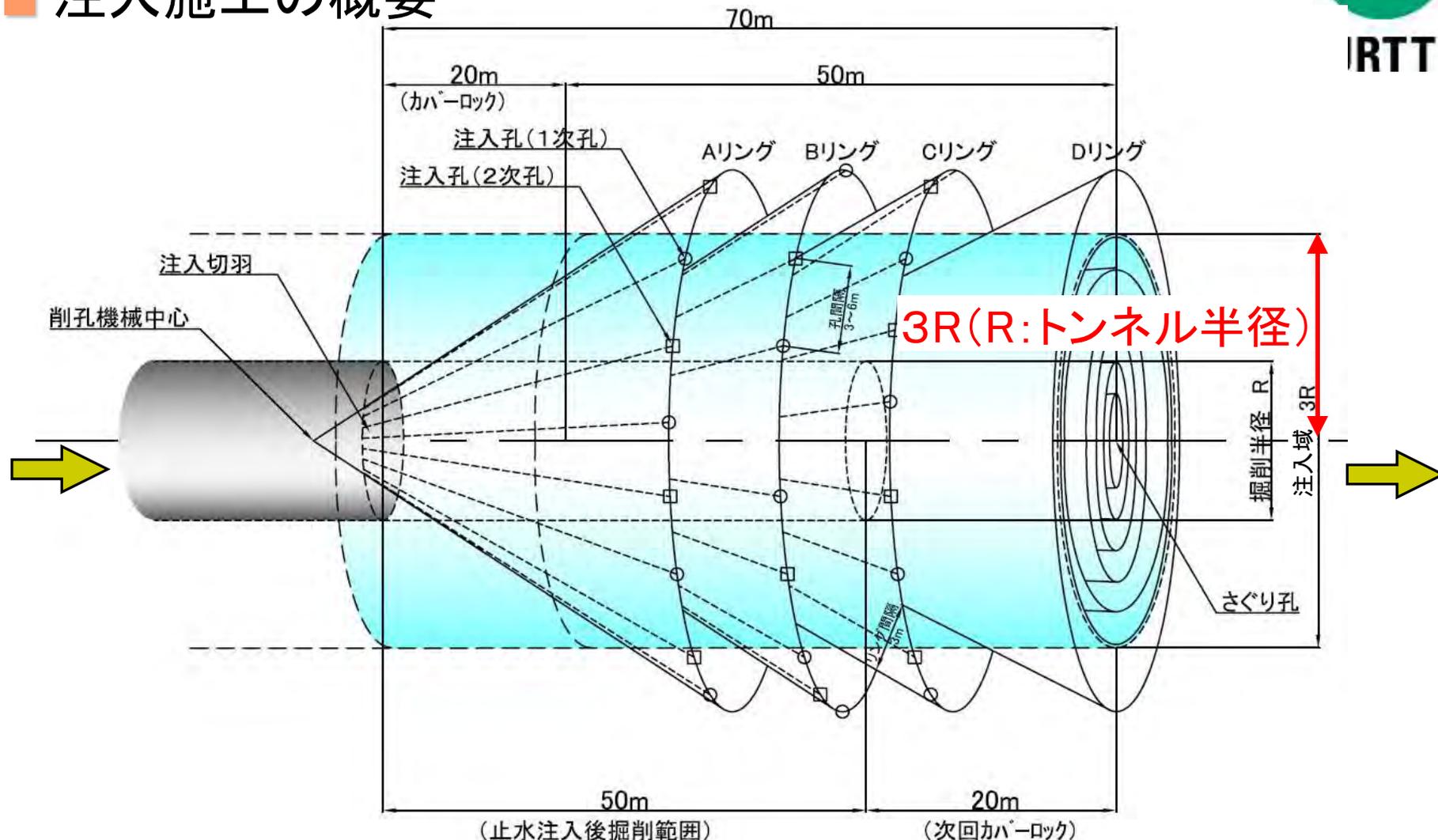
竜飛斜坑1223m付近の断層突破注入における目安として採用
(トンネル掘削径の3倍以上を基本)

青函トンネルの注入施工



JR TT

■ 注入施工の概要

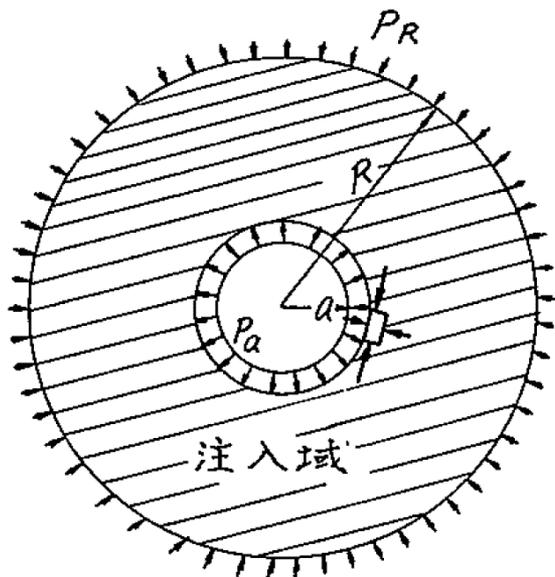


⇒ 傘状配置の最も狭い範囲であっても、トンネル半径の3倍以上の注入範囲を確保

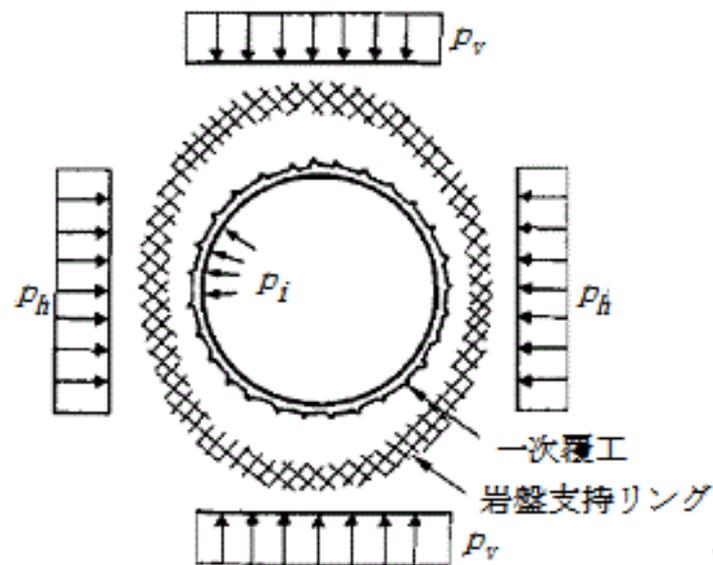
注入施工後の状況



青函トンネル注入範囲の考え方と NATM理論の比較



青函トンネルの注入範囲の考え方(再掲)
(昭和46年度青函トンネル土圧研究調査報告書)



L. Müller博士によるNATMの基本原理解
(昭和53年に日本国内にて講演)

青函トンネルの注入範囲の考え方の図と
NATMの原理の図は、トンネル周辺部の
地山で外部の地山の圧力を受ける点が
共通している。

わが国にNATMが
紹介される前から、
NATMと同じような
思想で青函トンネル
が作られていた。

青函トンネルにおける計測・測定項目

・掘削に伴う現象を理論的・定量的に把握するため、継続的に実施



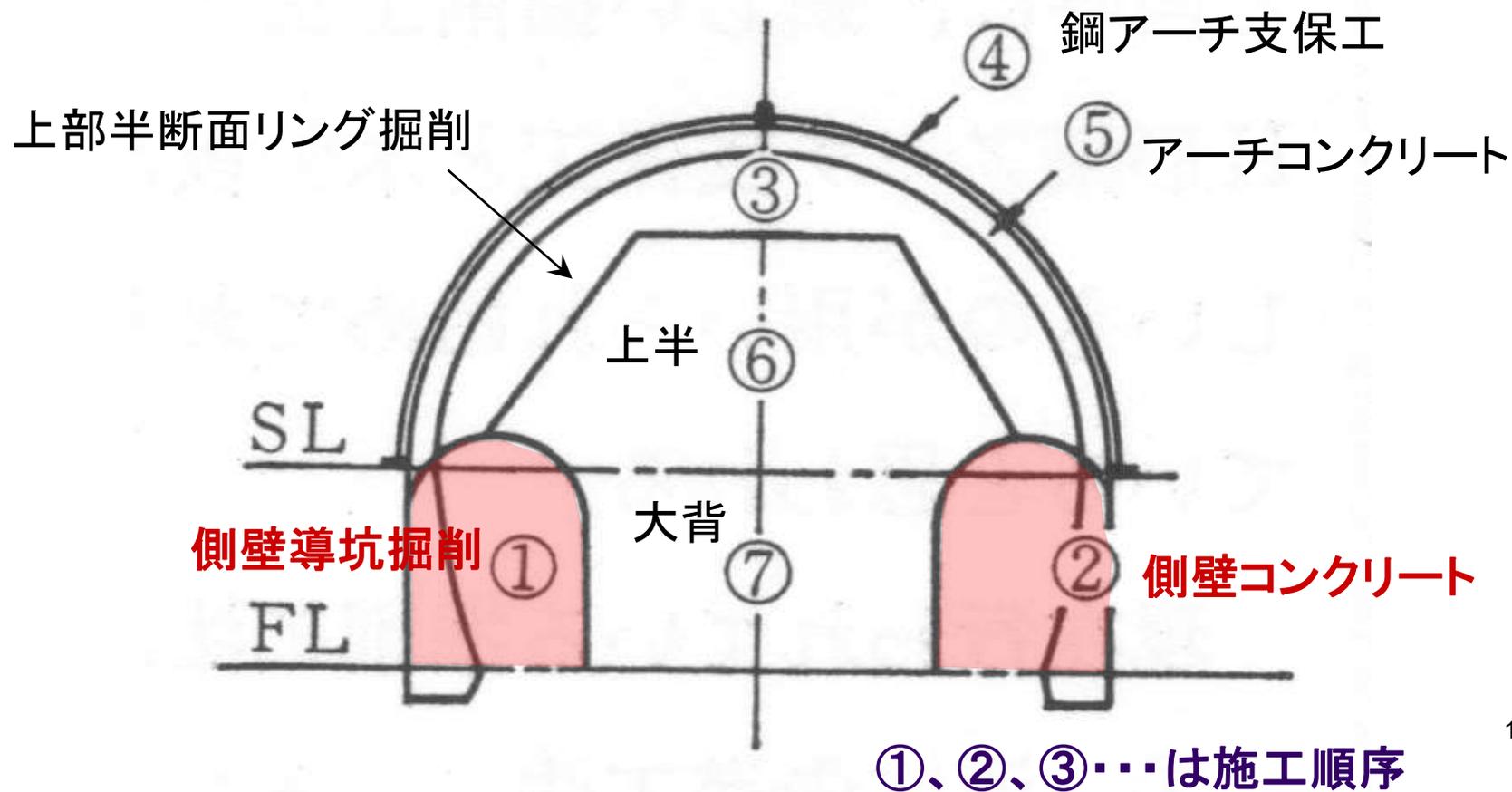
JR TT

項目		実施時期											
		S43	S44	S45	S46	S47	S48	S49	S50	S51	S52	S53	S54
地山変位	地山歪測定	○	○					○			○	○	
	内空変位測定	○										○	
	岩盤相対変位測定	○									○	○	
	間隙水圧測定						○						
	岩盤変位						○						
	地山変位(地山沈下)	○					○	○		○	○	○	
	地山クリープ測定							○		○	○	○	
岩盤物性	周圧載荷試験(孔内載荷試験)						○						
	鋼管引抜試験						○						
	せん断試験						○						
	ジャッキ試験						○						
	地山物性試験	○											
	孔底歪み測定						○						
	孔径変化測定				○		○						
計測支保工	支保工歪み測定	○		○		○	○	○		○	○	○	○
	支保工軸力測定	○		○		○	○	○		○	○	○	
	支保工変位測定					○	○						○
	支保工に作用する間隙水圧						○						
	背面地圧測定	○											
覆工応力	吹付け歪み測定	○											
	吹付け軸力測定											○	
	覆工コンクリート内部歪み測定		○	○									
	覆工コンクリート表面歪み測定		○										
	覆工コンクリート応力測定											○	
ロックボルト	ロックボルト応力試験		○									○	
	ロックボルト軸力												
その他	弾性波探査	○	○							○	○	○	
	電気探査試験		○							○	○		
	平板載荷試験									○	○		
	注入試験	○											
	AE法						○			○	○		
	スリット法									○	○		

2. NATMの萌芽

中山トンネルにNATM導入

矢板工法の例
 (側壁導坑先進上部半断面工法 <サイロット工法>)





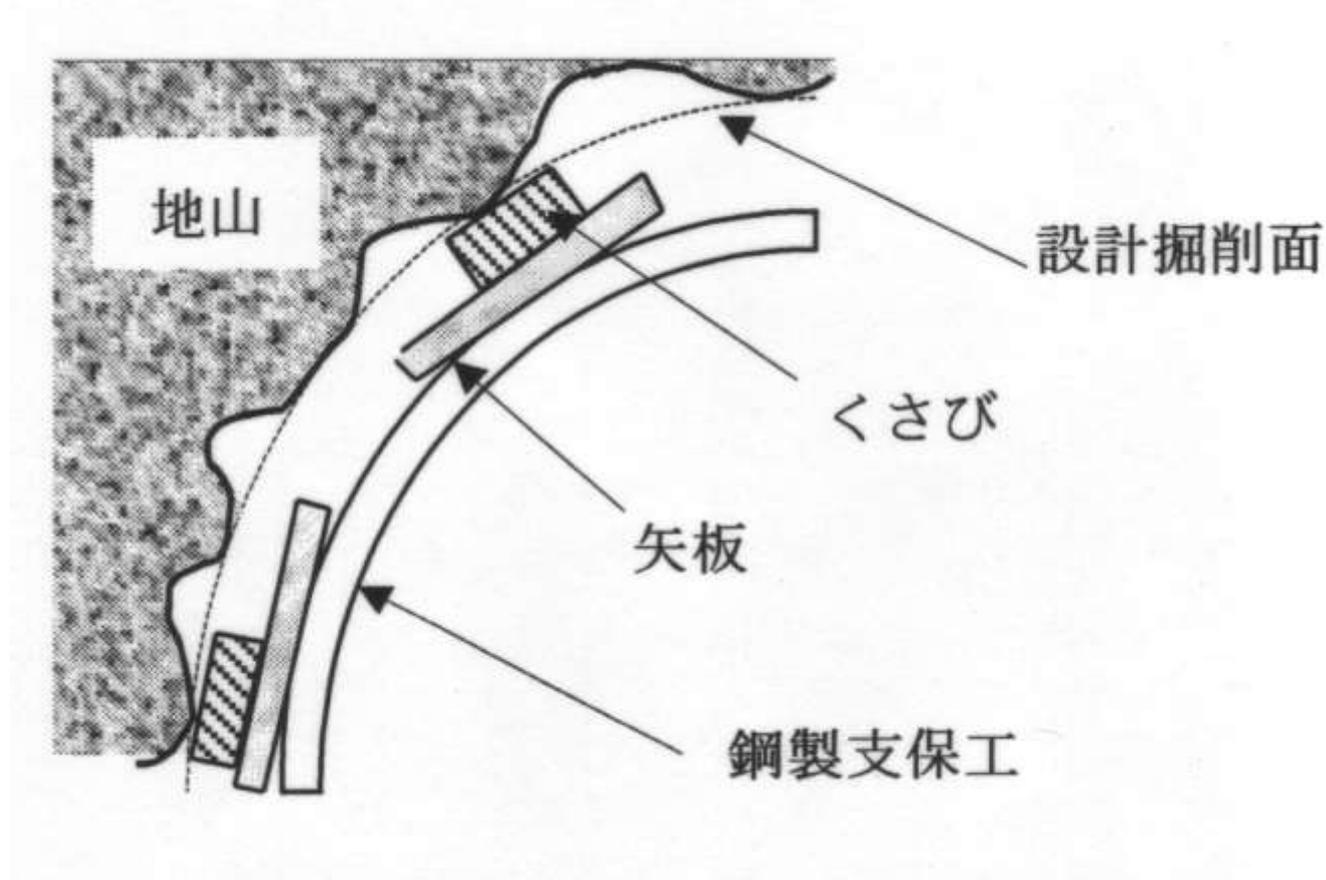
JR TT

中山トンネル(中山)でのNATM(ベンチカット)



写真提供:熊谷組

矢板工法における「鋼製支保工」と地山との関係



覆工コンクリート背面の空隙にはモルタル等を注入する。

中山トンネル(側壁導坑先進上部半断面工法)



上部半断面

大背

側壁導坑

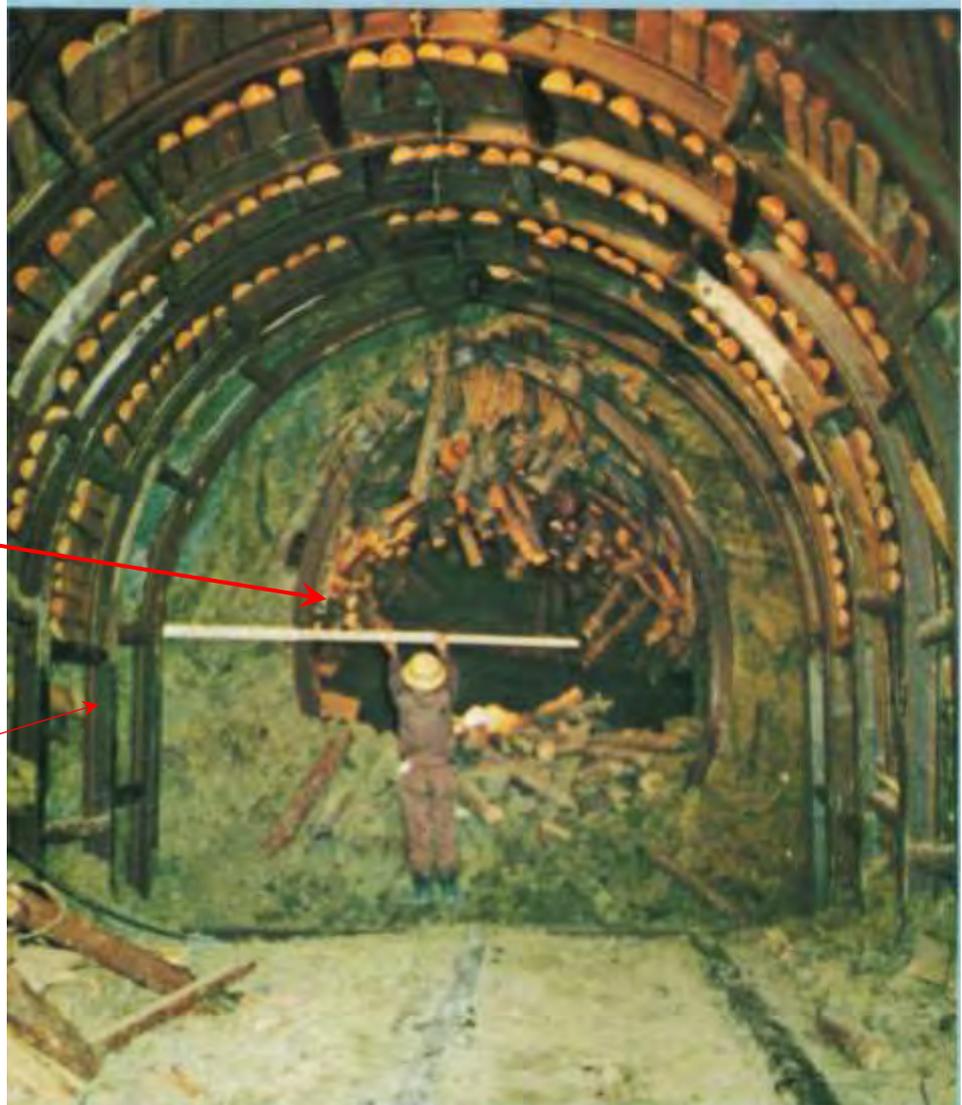
側壁導坑

側壁コンクリート

中山トンネル中山工区の側壁導坑の膨張性地山による変状 (矢板工法:ロックボルト ト施工前)

縫い返し前の導坑
(断面が1/3に縮小)

縫い返し後の導坑



中山工区地質縦断面図



IRTT

中山工区地質縦断面図



図-4 中山トンネル中山工区の地質縦断面図

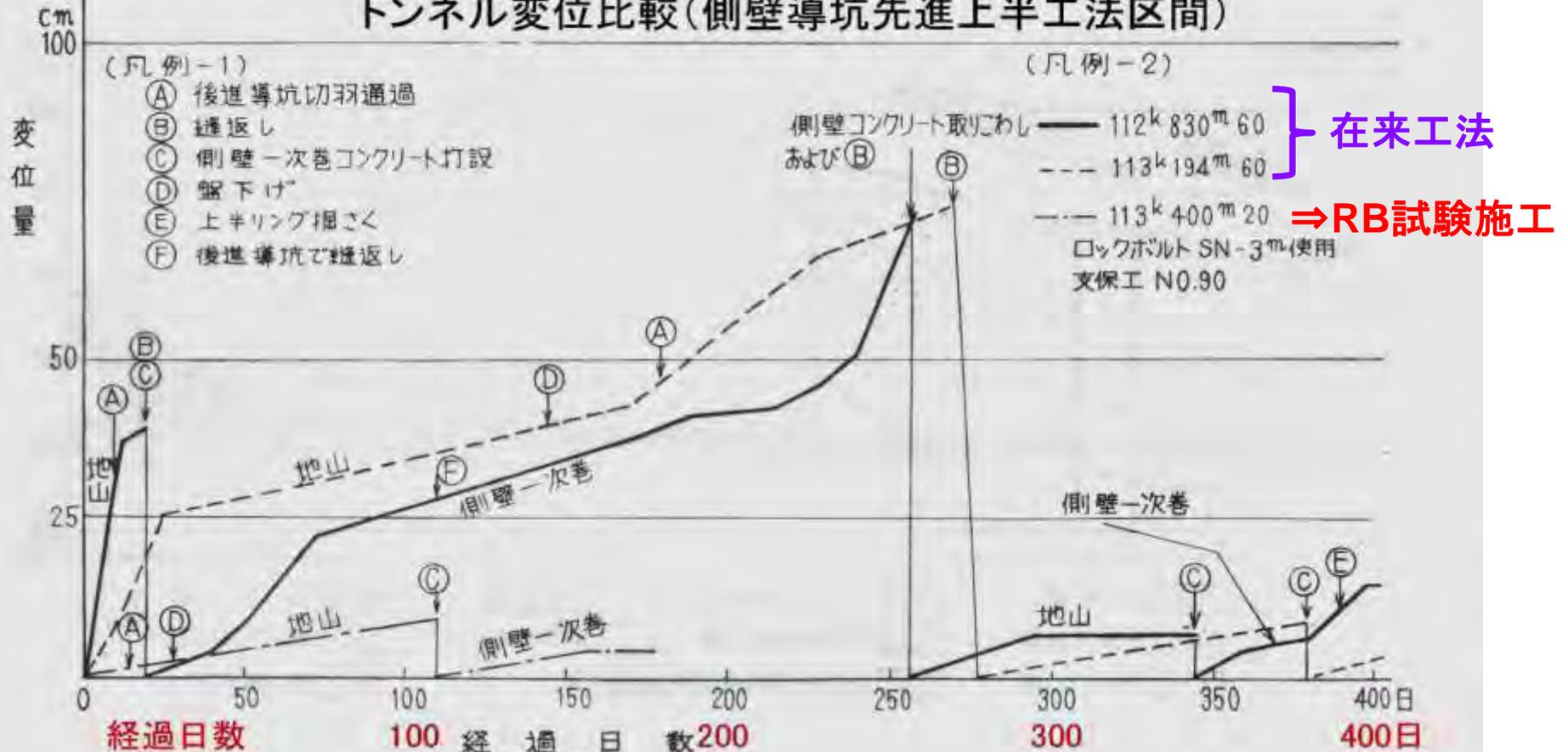
トンネル変位の比較



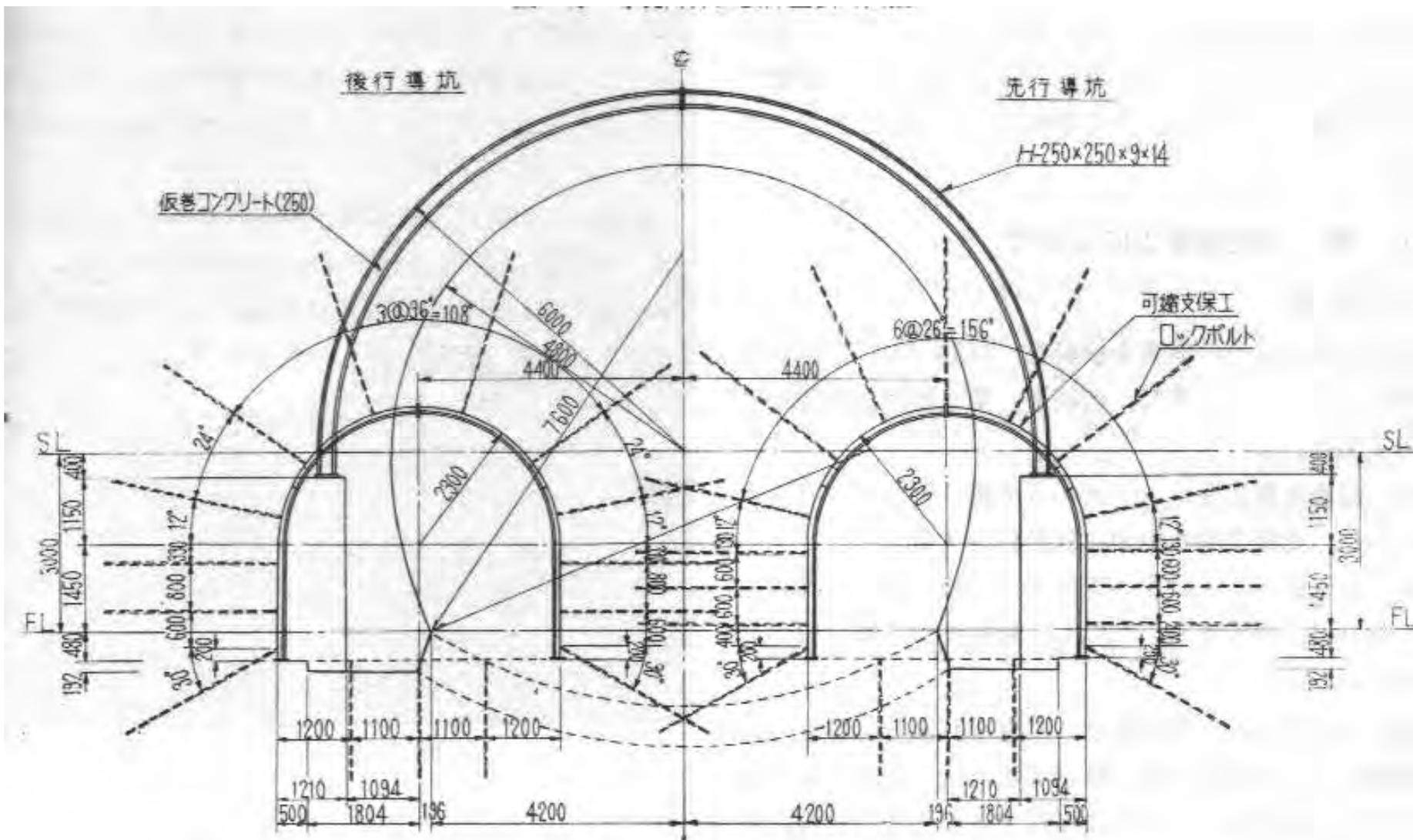
RTT

(注) 112^k 830^m 60 の位置は、岩の圧縮強度 48 kg/cm² 程度、この付近で上半の土圧測定を実施
 113^k 194^m 60 の位置は、岩の圧縮強度 130 kg/cm² 程度で、113^k 400^m 60 ロックボルト
 施工位置と岩の強度は同程度である。

トンネル変位比較(側壁導坑先進上半工法区間)



中山工区 側壁導坑におけるロックボルト打設試験 (U型可縮支保工+ロックボルト3m)



側壁導坑におけるU型可縮支保工+ロックボルト (3m)の施工状況 (底盤にもロックボルト施工)



JR TT

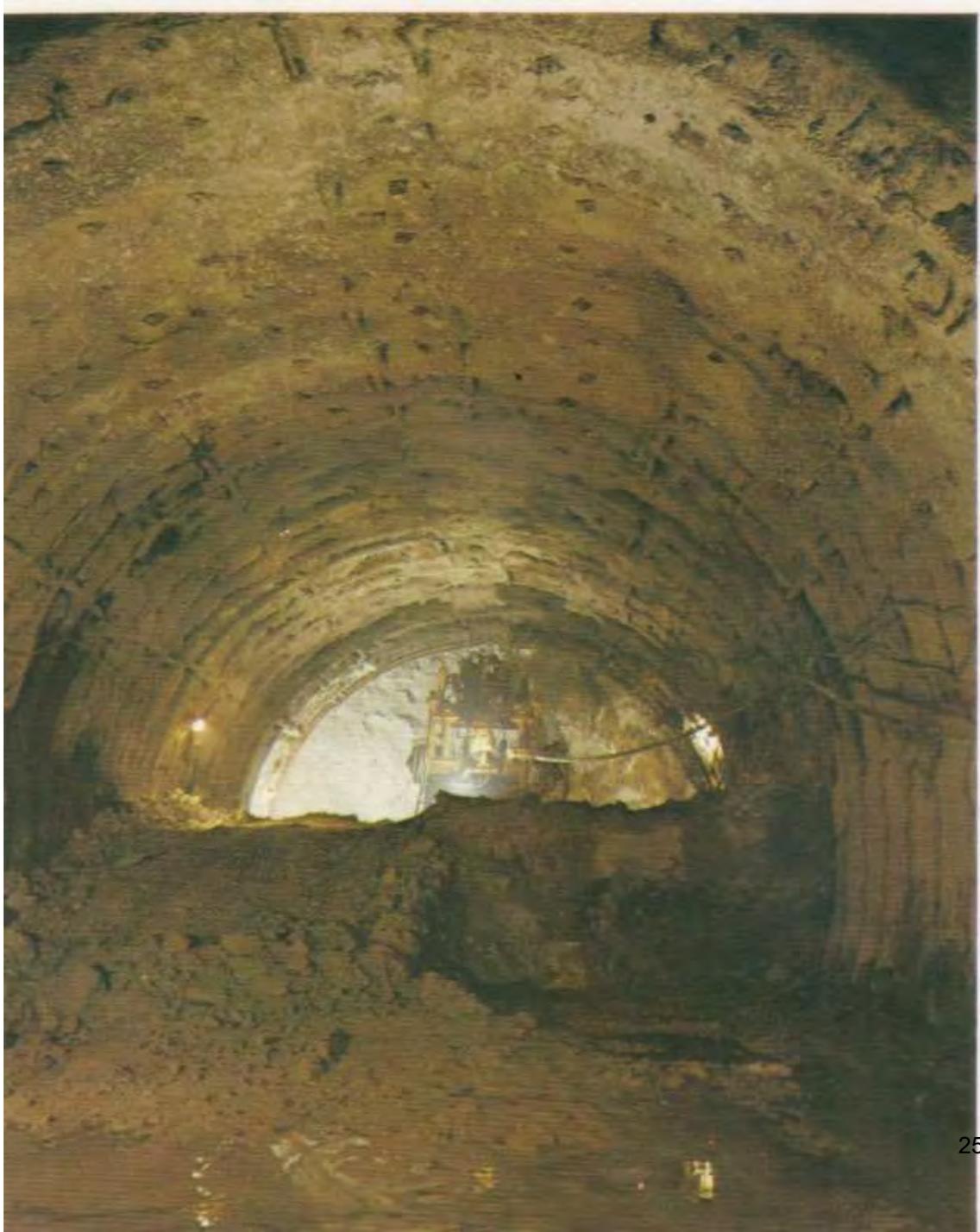


U型
可縮支保工
【拡大】



新潟側からの NATM施工状況

ベンチカット工法
本施工800m区間



新潟方からのNATM本格施工設計図(ショートベンチカット工法)

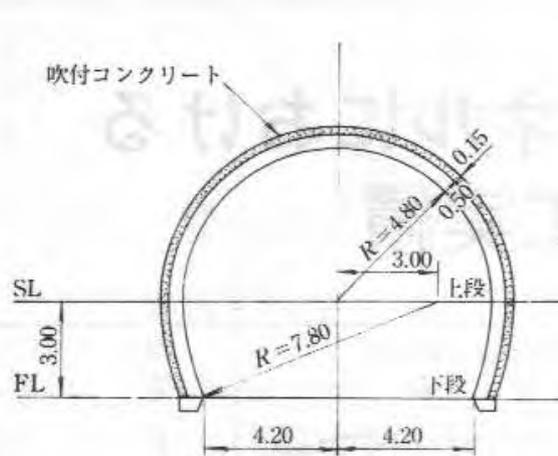


図-1 掘削(A)施工断面図 (計画L=250m)

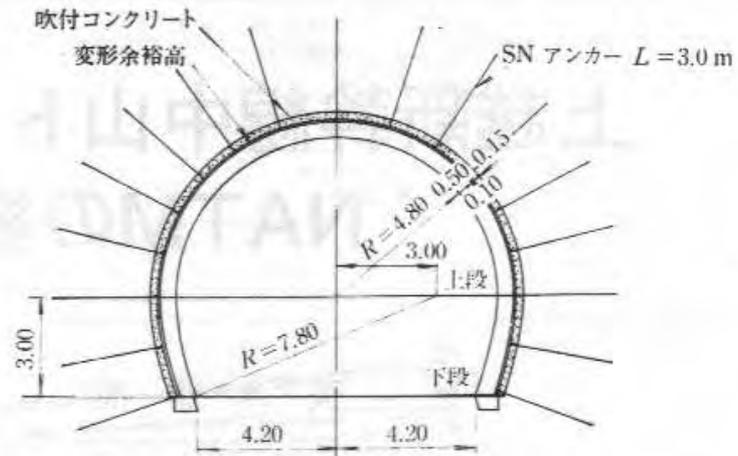


図-2 掘削(B)施工断面図 (計画L=300m)

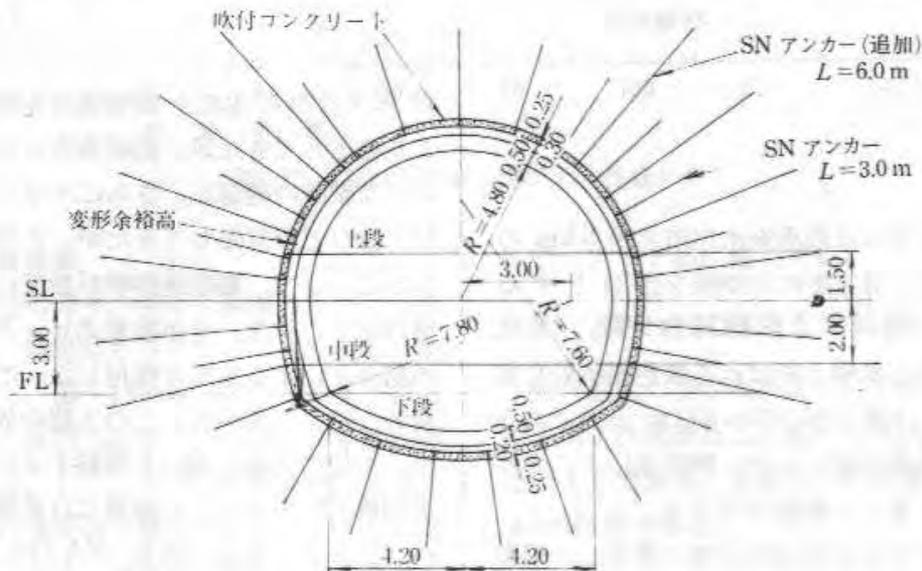


図-3 掘削(C)施工断面図 (計画L=250m)

ベンチカットのベンチ長は15~20mに保ち、1週間後位に全断面閉合を行っている。

3. NATMの標準工法化

トンネル標準示方書山岳編(S62年版)



1. “ロックボルトと吹付けコンクリートを主体とする工法”が標準工法に位置付けられた。
(NATMという用語は使用されていない)
2. 従来工法は「矢板工法」と命名され、特殊工法に位置付けられた。
3. 地山がもつ固有の強度を積極的に利用し、地山によってトンネルを安定に支持するという特有な概念が含まれている。

日本へのNATM導入関係年表 (その1)

昭和39年 (1964年)	オーストリアのラブセビッツ(Rabcewicz)教授 「The New Austrian Tunnelling Method」 論文発表
昭和40年 (1965年)	鉄道公団の粕谷部長は、ラブセビッツの論文を読み、オーストリアの現場を見学。 ドイツより吹付けコンクリート機(乾式)を購入し、青函トンネルに吹付けコンクリートを導入
昭和46年 (1971年)	山陽新幹線福山トンネル(国鉄)で、システムロックボルト(エクспанション型)施工 (47,000本)
昭和48年 (1973年)	青函トンネル本坑の膨張性地山に、全面接着型ロックボルト施工(公団) ($\phi 32 \sim 35\text{mm}$ 、 $L=6\text{m}$ を支保工1基当たり左右各4本、計8本)
昭和49年 (1974年)	岡行俊助教授「ロックボルトと薄肉ライニングによるトンネル工法の理論」発表 (日本トンネル技術協会の技術講演会)
昭和50年 (1975年)	国鉄の吉村恒部長・岡行俊助教授ら、オーストリアのアールベルグ道路トンネルのNATM施工現場を見学。吉村部長はNATMの日本への導入を決意

日本へのNATM導入関係年表 (その2)

昭和51年 (1976年)	側壁導坑で可縮支保工(U型鋼)とロックボルト工の試験施工開始。 第1次試験施工(L=96m)に引き続き、第2次試験施工(L=120m)を実施
昭和51年 (1976年)	岡助教授「薄肉覆工とその応用(1)、(2)」論文を発表 (トンネルと地下)
昭和52年 (1977年)	上越新幹線中山トンネルでNATM本格導入(公団、中山工区の強膨張性地山 L=800m)
昭和53年 (1978年)	東北新幹線第1平石・第1栗須・第2平石・第1広谷地トンネルへのNATM導入(国鉄、土被りの小さい土砂地山、オーストリアのコンサルタントの技師・ゴルサーの指導を受ける) NATMの適用地山の範囲が格段に広げられることが実証された。
昭和53年 (1978年)	オーストリアのミュラー教授が、「NATM工法の基本原理」を講演

日本へのNATM導入関係年表 (その3)

昭和54年 (1979年)	「NATMの計測指針に関する調査報告書(国鉄東京第二建設局委託) (社)日本トンネル技術協会
昭和54年～ 56年(1979 ～1981年)	鹿島線大貫トンネル(鉄道公団)・成田新幹線成田空港第8工区(国鉄)等の都市平野部の小土被り砂層でNATM施工
昭和57年～ 60年(1982 ～1985年)	(S57.5～)仙台地下鉄南北線、北四番丁トンネル、(S59.3～)北総線、栗山トンネル、(S60.3～)東葉高速線、習志野台トンネルの施工
昭和58年 (1983年)	「NATM設計施工指針(案)」(国鉄・鉄道公団)
昭和62年 (1987年)	土木学会「トンネル標準示方書」を改訂し、NATMを山岳トンネルの標準工法とした。 (従来工法は「矢板工法」と命名し、特殊工法に位置付ける。 委員長:山本稔教授)
昭和63年 (1988年)	桜井春輔教授・足立紀尚教授「都市トンネルにおけるNATM」刊行

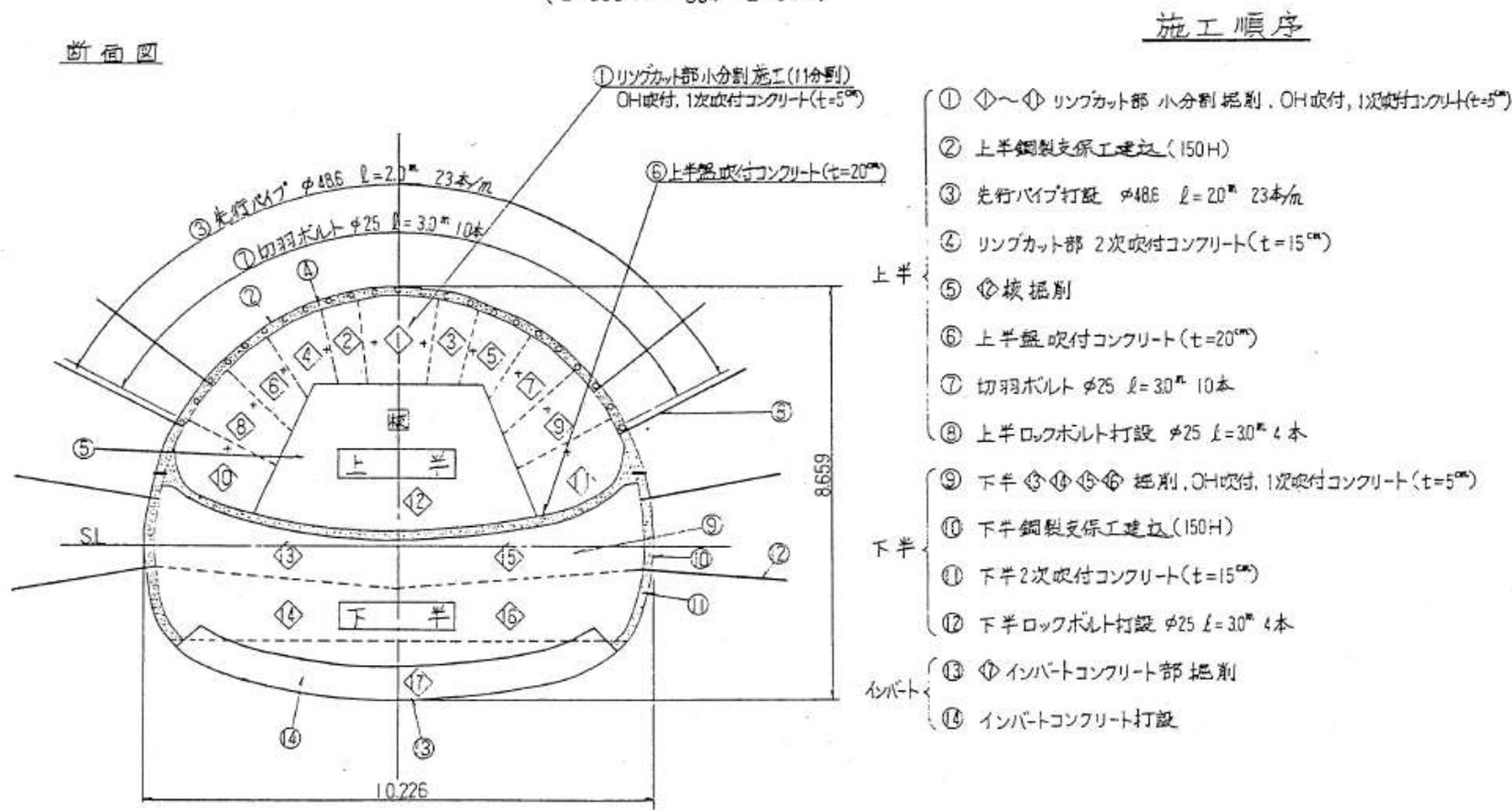
4. NATMの発展

—都市トンネルへのNATMの挑戦—

加背割り・支保の工夫により、洪積砂層(成田層)をNATMで施工
北総線、栗山トンネルの例(ショートベンチカットを採用した断面)

図-20 ショートベンチ工法改良型施工順序図

(2K800M ~ 854M L=54M)



※ OH(オーファ)吹付 ----- ポリウレタン系樹脂

NATMの発展 —都市トンネルへのNATMの挑戦—



加背割り・支保の工夫により、洪積砂層(成田層)をNATMで施工
北総線、栗山トンネルの例(サイロットを採用した断面)

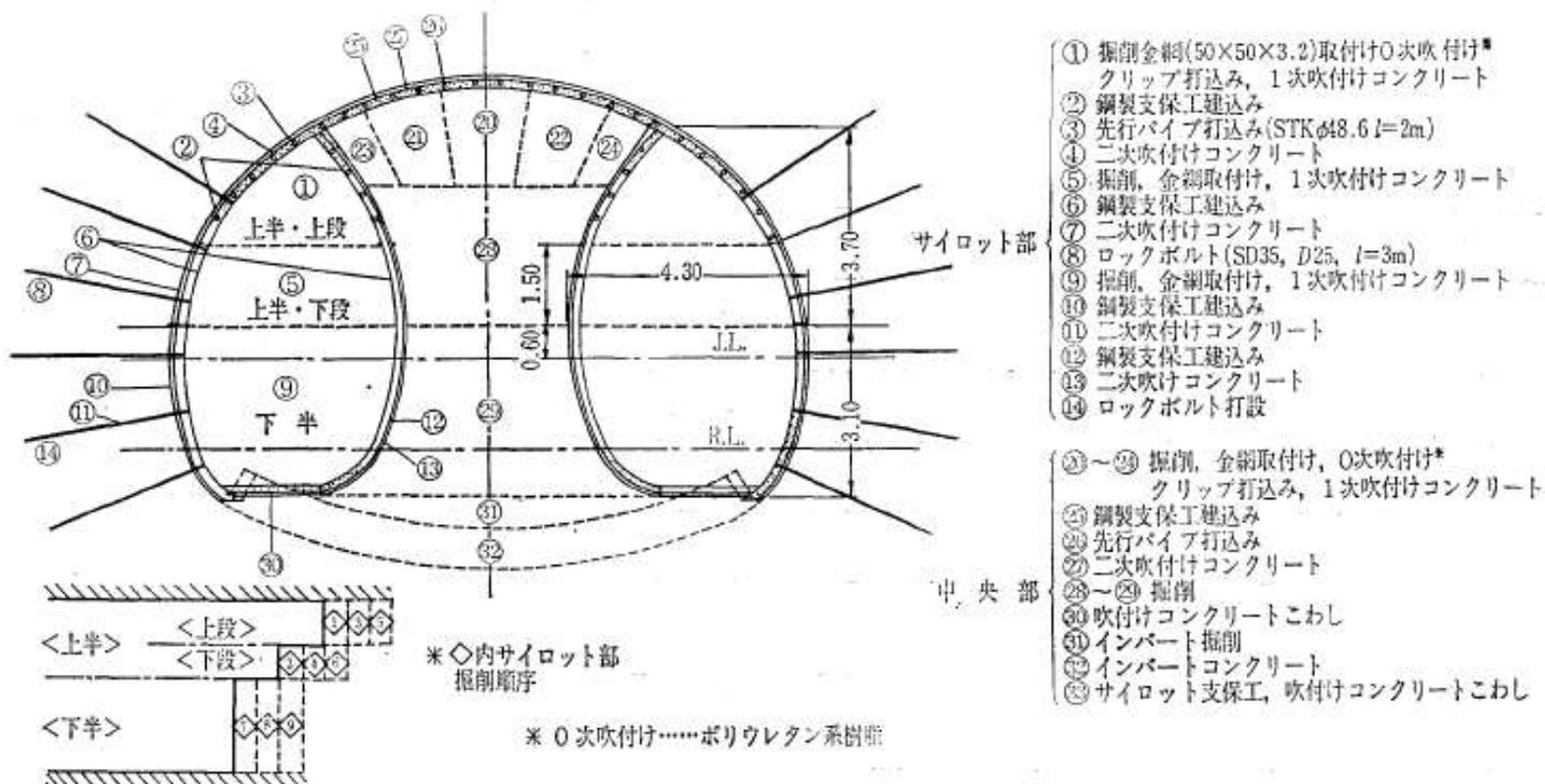
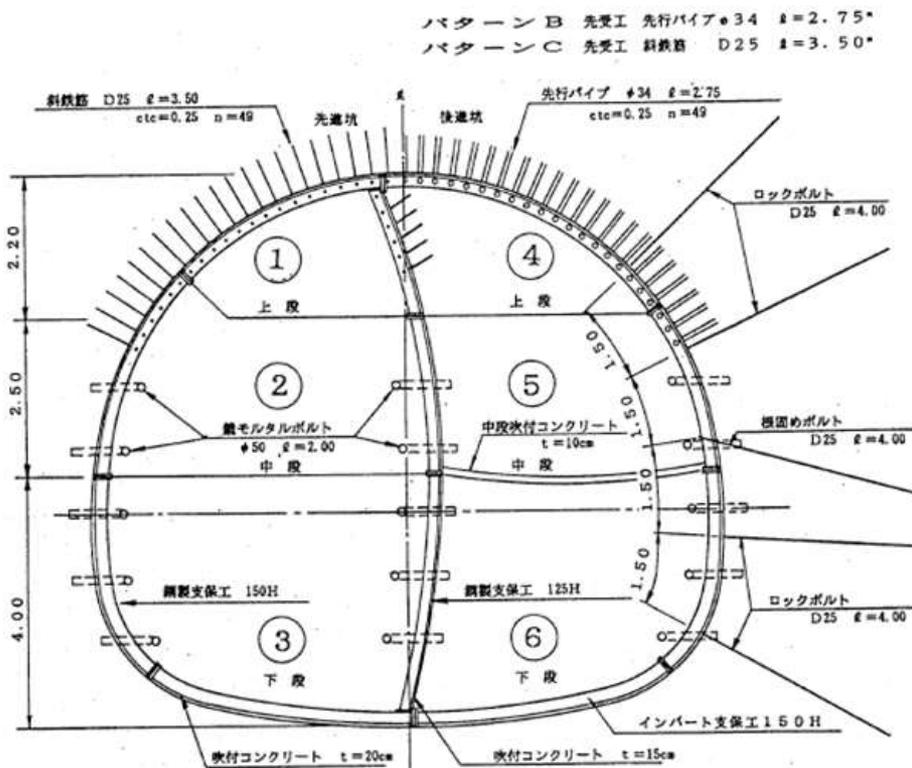


図-1(b) III型断面

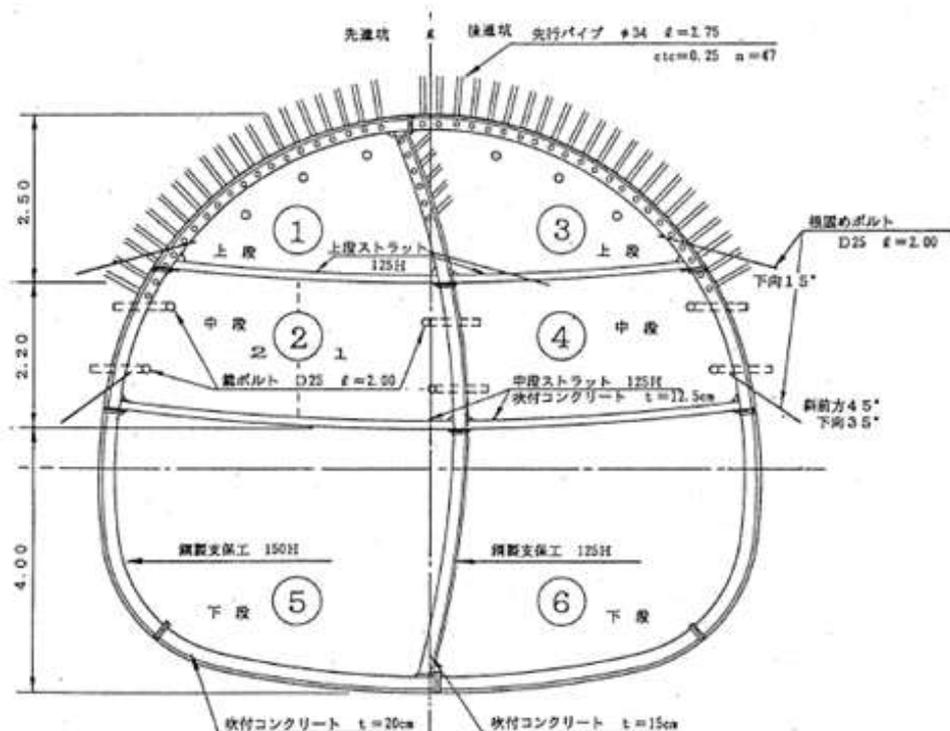
NATMの発展 —都市トンネルへのNATMの挑戦—



地表面沈下対策に有効な、CRD工法を開発
東葉高速線、習志野台トンネルの例



CD工法の支保パターン



CRD工法の支保パターン

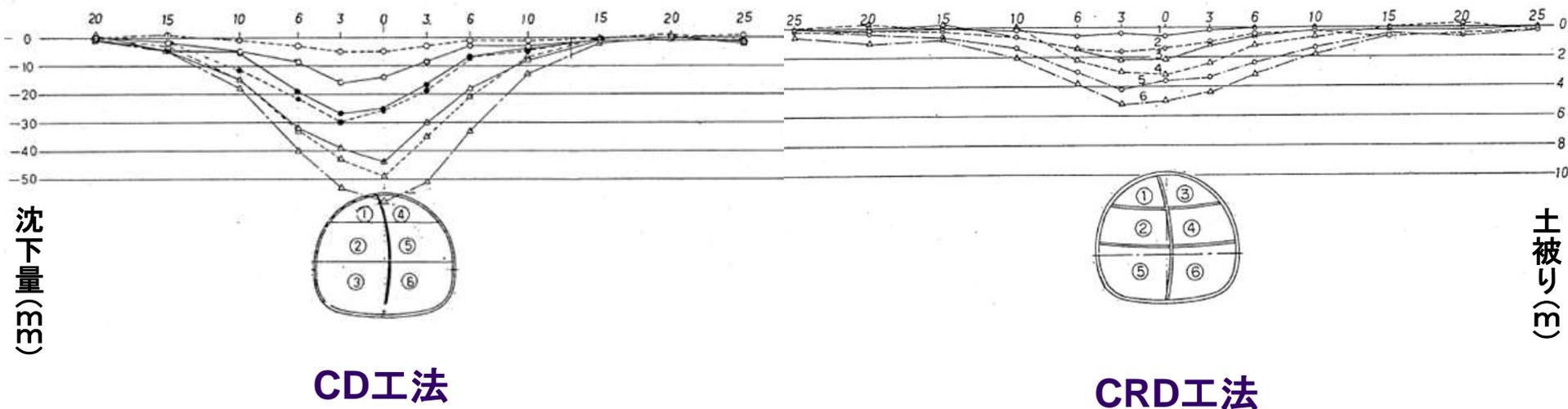
NATMの発展 —都市トンネルへのNATMの挑戦—



地表面沈下対策に有効な、CRD工法を開発
東葉高速線、習志野台トンネルの例

図5-5 9k190m地点横断方向地表沈下図 (CDI法)

図5-6 9k210m地点横断方向地表沈下図 (CRD法)



地表面沈下および沈下勾配の横断分布比較

NATMの発展 —都市トンネルへのNATMの挑戦—



幹線道路直下と住宅密集地下をミニパイプルーフ工法で施工
 仙台地下鉄南北線、北四番丁トンネルの例

トンネル断面に出現する凝灰質・礫質・軽石質砂岩層を
 水抜ボーリングとミニパイプルーフを用いて山岳工法での施工に挑戦

図-10 地質別物性値比較表

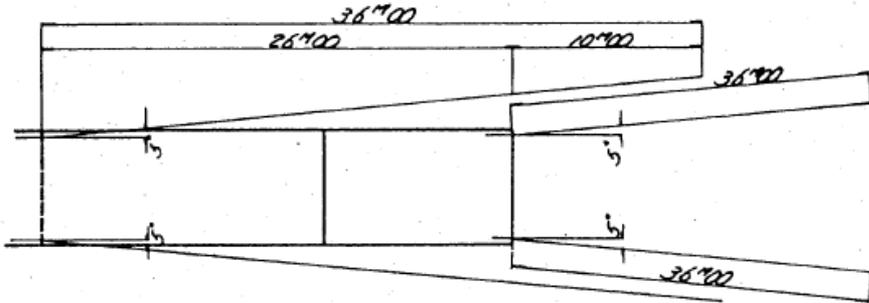
地質横断面図		土質 岩質	層	N値	R.Q.D	1軸 圧縮 強度	透水 係数	変形 係数	弾性球 速度 (V_p)	粘土・ シルト分 含有量	均等 係数	比重	浸水 崩壊度	内部 摩擦角	粘着力	地山 強度比
				(%)	(%)	(kg/cm^2)	(cm/sec)	(kg/cm^2)	(km/sec)	(%)			(度)	(kg/cm^2)		
0	GL.															
1	A	砂, 砂礫	埋 埋 層 物 (<u>求</u> 層世)	18 ~50			4×10^{-3}	30	0.6 5 1.9							
2																
3																
4	Tr2	シルト岩	向 山 層 (<u>鮮</u> 新世)	50	40 ~50	16	6×10^{-7}	525	1.4 5 1.8	24 ~54	23	2.63	B	27.6	9.6	10
5																
6																
7		凝灰質砂岩	向 山 層 (<u>鮮</u> 新世)	21	0	4.6	2×10^{-4}	630	1.7 5	9	4.5 ~60	2.64	A			2
8		礫質砂岩		~27	~40	~18	2×10^{-4}			1.8	~16 ~50					~8
9	Mns															
10		軽石質砂岩	向 山 層 (<u>鮮</u> 新世)	<50	40 ~60	49	2×10^{-4} ~ 4×10^{-5}	2500	1.5 5 2.0	24 ~59	48	2.44	A D	29	12	18
11	Mcs															
12		凝灰岩	向 山 層 (<u>鮮</u> 新世)	25		50	2×10^{-4}	1650		60	24	2.46		46	6.8	16
13		シルト岩互層			~30						~74	~49				
14	TPs4		向 山 層 (<u>鮮</u> 新世)	<50	35 ~90	8 ~28	1.5×10^{-4}	3250		18	30	2.59		45	5.7	2.5 ~8
15		軽石質砂岩 ~凝灰岩														
16			向 山 層 (<u>鮮</u> 新世)	50		33	1.3×10^{-4}	5100						46	6.8	8
17		凝灰質シルト岩			~65											
18	Ta.lt		向 山 層 (<u>鮮</u> 新世)	<50	35	28		3600						45	5.7	6
19		軽石混り 中粒砂岩														
20	TPs3		向 山 層 (<u>鮮</u> 新世)	55		49		3500		86	7	2.37	A	47	7.2	10
21		凝灰質シルト岩			~90			~12000		~97	~16					
22			向 山 層 (<u>鮮</u> 新世)													
23		凝灰質シルト岩														
24	TPs2		向 山 層 (<u>鮮</u> 新世)													
25		凝灰質シルト岩														
26	TPs1		向 山 層 (<u>鮮</u> 新世)													
27		凝灰質シルト岩														

NATMの発展 —都市トンネルへのNATMの挑戦—

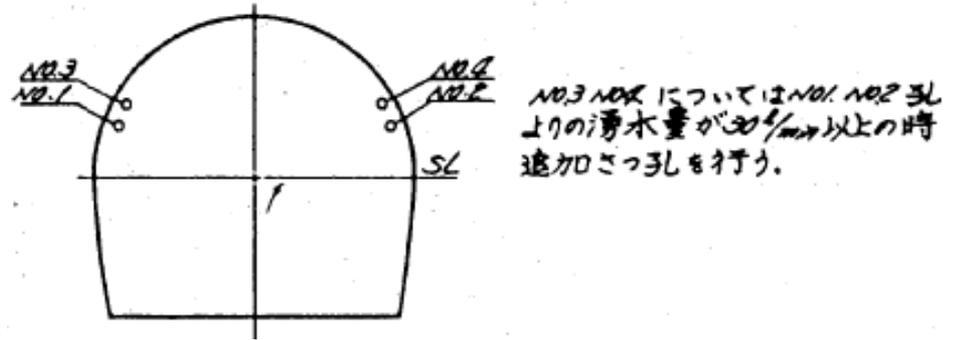


幹線道路直下と住宅密集地下をミニパイプルーフ工法で施工
 仙台地下鉄南北線、北四番丁トンネルの例

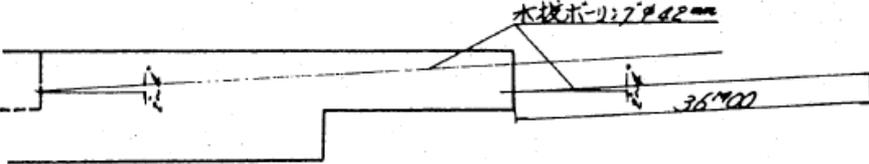
木抜ボリング平面図



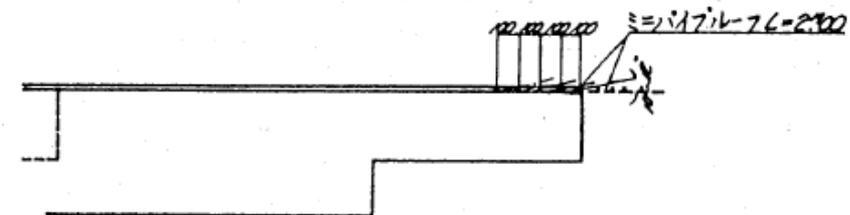
木抜ボリング断面図 S=1:50



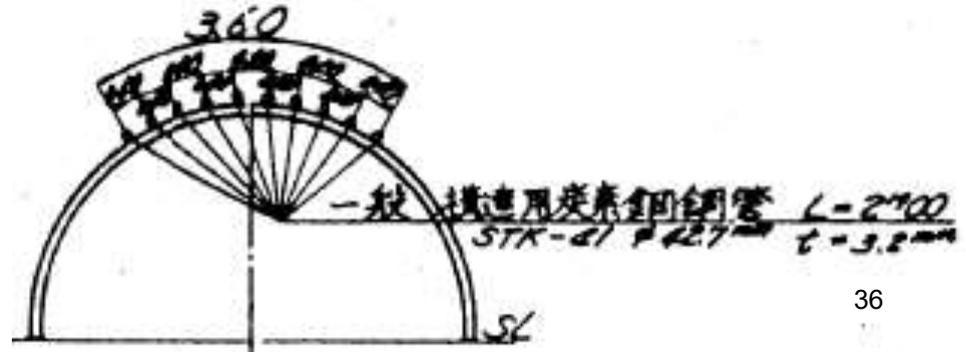
木抜ボリング縦断面図 S=1:100



ミニパイプルーフ縦断面図 S=1:100



ミニパイプルーフ打込図 S=1:50



ミニパイプルーフ平面図 S=1:100

