

吹付け後短時間で大きな剛性を発現する 吹付けコンクリートの支保効果について

Effectiveness of shotcrete that develops rigidity shortly
after its application for supporting the ground.

熊坂博夫

Hiroo Kumasaka

正会員 博士(工学) 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4番17号)

E-mail:h.kumasaka@mac.com

It is important to consider the relation of a excavation speed and a hardening velocity of shotcrete when it evaluates supporting effects of shotcrete to get stability after excavation. Therefore, in this study, it was analyzed by using sequential excavations and supports with an axisymmetrical model for new type shotcrete which developed rigidity by a short time and ordinary shotcrete. These types of shotcrete were compared with each other in terms of effectiveness for supporting the ground.

As a result, the former type of shotcrete was found to be more effective for ensuring the stability of the ground around the tunnel because it provides great reaction forces near the face.

Key Words : *effectiveness of shotcrete, hardening velocity of the shotcrete,
tunnel stability analysis, characteristics of the support curve.*

1. はじめに

トンネル掘削に伴う周辺地山の挙動は、鏡面・切羽近傍の極めて局所的な範囲で生じることが知られている。そのため、トンネルの合理的な設計を行うにはこの切羽近傍における地山と支保の相互作用などの挙動を把握することが重要となる。このようなトンネル掘削時の切羽近傍の挙動に影響を及ぼす因子には、地山の力学特性、初期地圧、地下水などの地質条件やトンネル形状、掘削方法、加背割や支保構造などの建設仕様など様々である。その中で、近年、支保工の主要部材である吹付けコンクリートの若材齢における材料特性とこれに強く関連する掘進速度に着目した研究が進められている。

Cosciotti ら¹⁾ は、吹付けコンクリートを時間とともに硬化する弾性材料とし、軸対称モデルによる切羽進行速度を考慮した逐次掘削・逐次支保解析を行ない、二次元安定解析に用いる応力解放率を求め、この応力解放率が地山強度比と地山と支保の剛性比に影響されることを報告している。さらに、彼

ら (Graziani ら²⁾) は、吹付けコンクリートの強度の時間依存性を考慮した検討を行い、特性曲線法で利用されている Panet ら³⁾ の式から得られる応力解放率と比較し、地山強度比が1以上ではこの式から得られる応力解放率は過大評価される傾向にあることを示している。久武ら^{4), 5), 6)} は切羽進行速度や吹付けコンクリートの硬化速度がトンネルの安定性に及ぼす影響について検討し、これらの因子がトンネルの安定性に大きな影響を及ぼしていることを報告している。また、Oreste⁷⁾ も同様に切羽進行時の吹付けコンクリートの強度と弾性係数の時間依存性を考慮した特性曲線法による計算方法を示し、吹付けコンクリートライニングの安全率が厚さやトンネル径および掘削速度により切羽からの距離で最小値をとる場合があることを報告している。著者⁸⁾ も地層処分の坑道を対象として弾性係数と強度の時間依存性を考慮した吹付けコンクリートと施工方法(一掘進長と掘進速度)を考慮した解析から、応力解放率が吹付けコンクリートの硬化速度に影響を受けていることを報告している。この結果から、著者

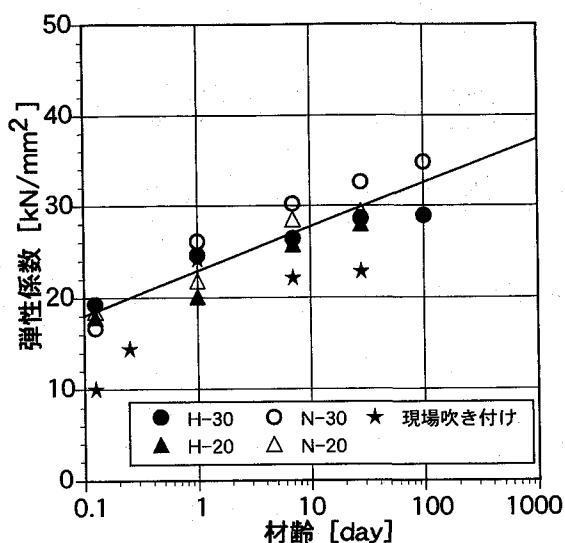


図-1 材齢と弾性係数の関係¹⁰⁾

図中の H,N はそれぞれ早強ポルトランドセメントと普通ポルトランドセメントである。また、付随する数値は養生温度である。

ら^{9), 10), 11)} は切羽における吹付け後短時間に高い剛性（弾性係数）あるいは強度が得られる吹付けコンクリート材料の開発を実施し、室内試験、模擬トンネルや実トンネルにおける吹き付け試験を行い、この力学特性試験結果を報告している。

本論文では、この短時間で高い剛性が得られる吹付けコンクリート（本論文では“短時間高剛性吹付け”と呼ぶこととする）を用いた場合の支保効果について解析的検討を行ったので報告する。

2. 短時間で高い剛性を発揮する吹付けコンクリートについて

前述の様に、この吹付けコンクリートは大深度での建設が望まれる高レベル放射性廃棄物処分の地下施設の支保に適用することを目指して開発した材料である。大深度での支保としての効果を発揮するために3時間で剛性（弾性係数）が18kN/mm² (GPa)以上となることを目標に開発した材料である。

模擬トンネルにおける吹き付け試験の供試体 (N, H) と実トンネルの側壁で実施した吹き付け試験の供試体に対する材齢と弾性係数の関係を図-1に示す。図に示される様に、模擬トンネルにおける短時間高剛性吹付けの弾性係数は所定の性能を発揮し、その増加は材齢を対数軸とする直線関係があることがわかる。ただし、トンネルにおける供試体（現場吹き付け）は小さな値となった。これは、吹き付け時の操作の関係で供試体が不均質となったためである。

材齢と圧縮強度の関係を図-2に示す。模擬トン

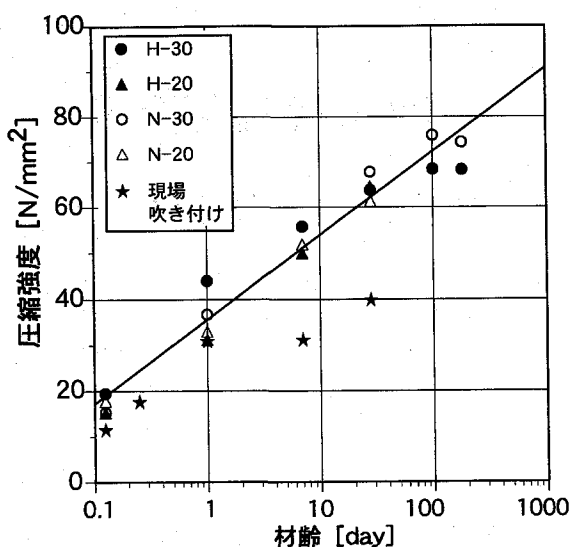


図-2 材齢と圧縮強度の関係¹⁰⁾

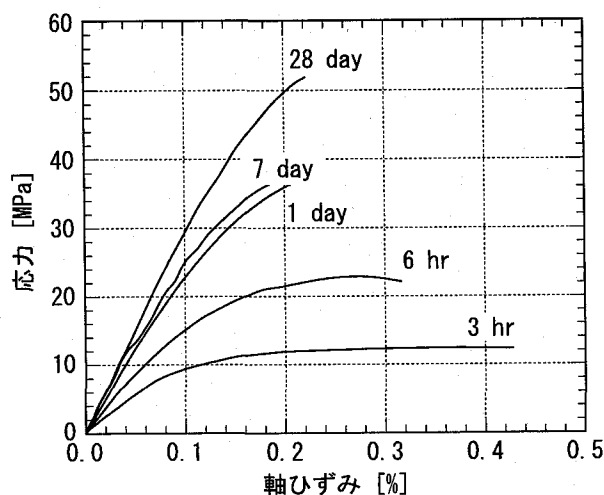


図-3 トンネル現場の側壁吹き付け試験結果⁹⁾

ネルの供試体では3時間で18N/mm² (MPa) の強度以上が得られており、弾性係数と同様に、その増加は材齢を対数軸とする直線関係があることがわかる。また、実トンネルにおける供試体（現場吹き付け）は小さな値となった。

現場吹き付けの供試体の3, 6時間, 1, 7, 28日における一軸圧縮試験において、コンプレッションメータタイプの計器を用いた場合の応力～ひずみ関係を図-3に示す。図に示される様に、吹付け直後の3, 6時間でそれぞれ圧縮強度が12, 22N/mm² と高い強度を発現するとともに、ピーク強度付近におけるひずみの伸びも大きく延性的な挙動を示すことより、高い強度でかつ地山の変形への追従性が良い材料といえる。

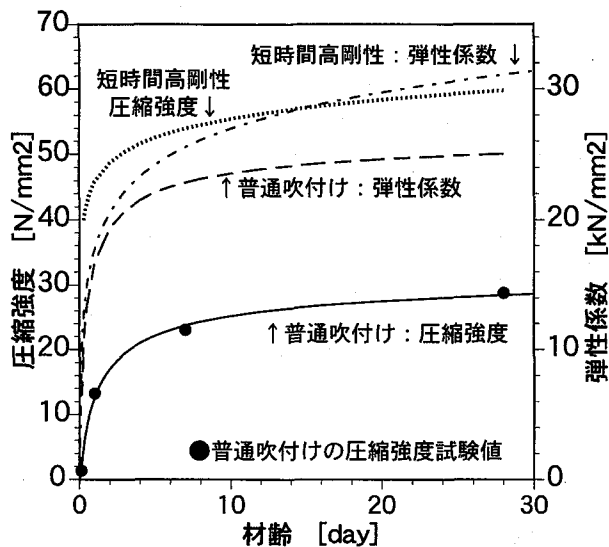


図-4(a) 短時間高剛性コンクリートと普通コンクリートの材齢と圧縮強度・弾性係数

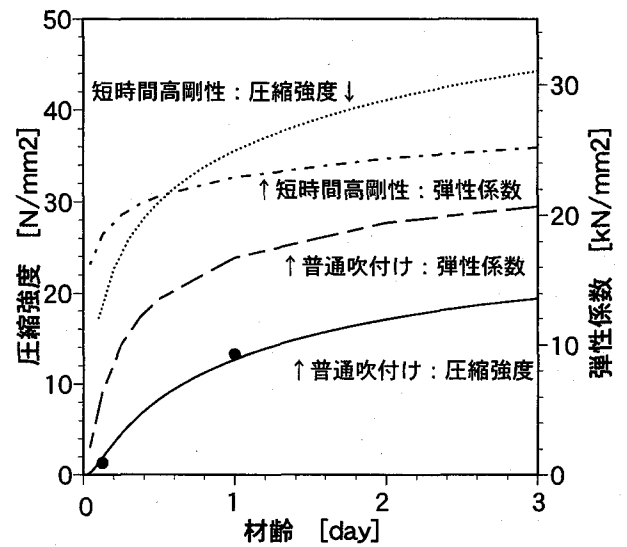


図-4(b) 短時間高剛性コンクリートと普通コンクリートの材齢と圧縮強度・弾性係数

3. 検討条件と解析方法について

3.1 吹付けコンクリートのモデル化

図-1, 図-2における直線近似には現場吹き付けのデータを除いて求めた材齢と圧縮強度および弾性係数の近似式を以下に示す。

$$\sigma_c = 18.3953 \cdot \log t + 35.56147. \quad (1)$$

$$E = 4.827188 \cdot \log t + 22.89268. \quad (2)$$

ここに、 σ_c は圧縮強度(単位:MPa), E は弾性係数(単位:GPa), t は時間(day)である。

吹付けコンクリートの降伏基準として Mohr-Coulomb の降伏基準を用いることとした。内部摩擦角 ϕ は時間で変化しないと仮定し、また、せん断強度 c は拘束圧による強度増加を小さく見込むこととし 10° と仮定する。したがって、以下のような条件式とした。

$$\phi = \text{const.} = 10^\circ. \quad (3)$$

$$c(t) = \frac{\sigma_c(t)}{2} \cdot \frac{1 - \sin \phi}{\cos \phi},$$

$$= 0.4195498156 \cdot \sigma_c(t). \quad (4)$$

普通吹付けコンクリートは市販の急結材のパンプレット¹²⁾に記載されていた材齢と強度のデータを利用してモデル化することとした。この吹付けコンクリートの材齢と強度の関係は、Chang の式^{1), 13)}

を用いて以下のように近似した。

$$\sigma_c = 33.782 \cdot e^{-0.9778/t^{0.52}}. \quad (5)$$

普通吹付けコンクリート弾性係数は試験結果より建築学会構造計算基準式が適用できるとして次式を用いた。

$$E = 21.0 \times \left(\frac{\gamma}{2.3}\right) \times \left(\frac{F_c}{20}\right)^{0.5} \quad (6)$$

ここに、 γ は単位体積重量, F_c は吹付けコンクリートの一軸圧縮強度(MPa)である。

それぞれの材齢と強度・弾性係数の近似曲線を図-4(a), (b)に示す。図に示される様に、両者は吹き付け直後に大きな違いがあることを示している。

3.2 地質条件と設置深度

地層処分施設の坑道安定性の検討^{14), 15)}に用いられている軟岩系岩盤データセットはSR-AからEの5つに区分されている。この中で、坑道の安定性解析に用いられた岩盤データセットは中間のSR-Cである。この軟岩系岩盤データセットの諸物性値と安定解析に用いられた支保仕様などを表-1に示す。なお、表中の一軸圧縮強度は15MPaであるが、粘着力・内部摩擦角から得られる一軸圧縮強度は約10MPaとなる。安定解析では Mohr-Coulomb の降伏条件を用いており、地山強度比はこの換算された一軸圧縮強度を用いると約1となる。したがって、地山強度に比べて、初期地圧(荷重)が厳しい検討条件となっている。

表-1 検討条件^{10), 11)}

岩盤 (SR-C)	一軸圧縮強度	MPa	15.0
	引張り強度	MPa	2.1
	弾性係数	MPa	3500.0
	粘着力	MPa	3.0
	内部摩擦角	Degree	28.0
	ポアソン比	—	0.3
	飽和密度	Mg/m ³	2.2
吹き付け コンクリート	設計基準強度	MPa	40.0
	弾性係数	MPa	4000.0
	ポアソン比	—	0.2
	厚さ	m	0.5
深度	m		500.0
初期地圧	MPa		10.8
掘進長	m		1.5
切羽の速度	m/月		92.0

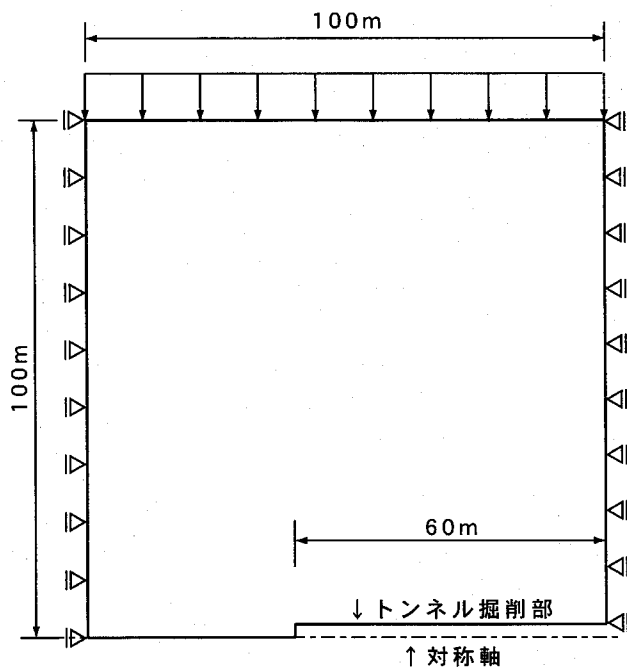


図-5(a) 解析モデルと境界条件

表-2 一掘進のサイクルタイム⁸⁾ (単位: 分)

	1.5m	0.5m
掘削	269	135
吹付け	145	70
ロックボルト + その他	66	35
合計	480	240

表-3 解析ケース

解析ケース	吹付けコンクリート	一掘進長：L(m)	吹付け厚(m)
01	短時間高剛性吹付け	1.5	0.5
02	普通吹付け		
03	短時間高剛性吹付け	0.5	
04	普通吹付け		
05	短時間高剛性吹付け	1.5	0.2
06	普通吹付け		

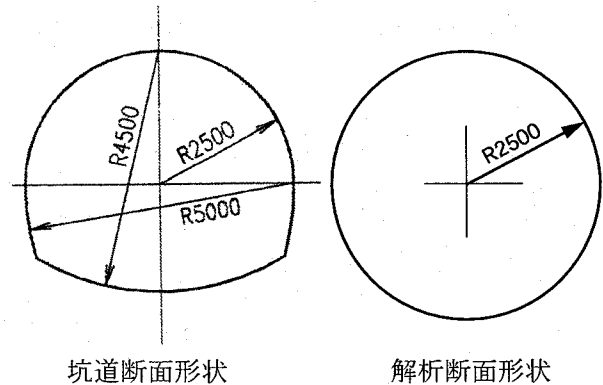


図-5(b) 坑道断面形状と寸法¹⁴⁾および解析モデル

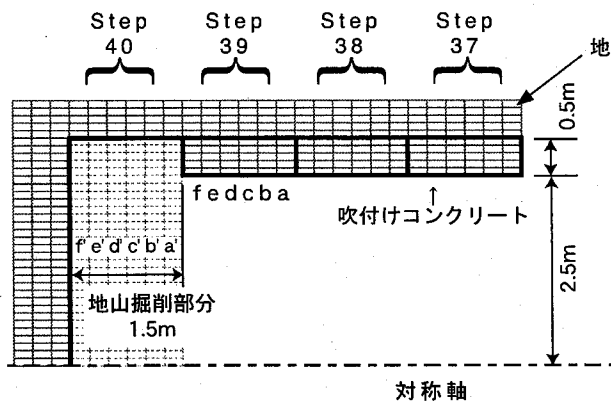


図-5(c) 一掘進長1.5mの切羽近傍のモデル

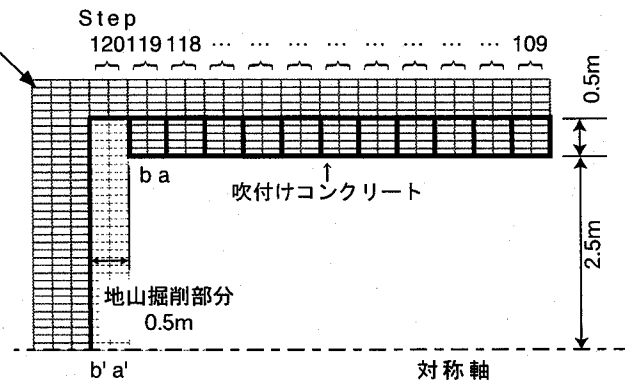


図-5(d) 一掘進長0.5mの切羽近傍のモデル

3.3 トンネル断面と支保仕様および解析モデル

解析全体領域と境界条件を図-5(a)に示す。図に示される様に解析領域は100m×100mとし、境界の影響を受けないよう最終切羽位置を境界より60mとした。

検討対象の軟岩坑道の断面形状および支保の寸法を図-5(b)に示す¹⁴⁾。本論文では、軸対称解析を用いるため、内径が5mの円形断面とおいた。支保は吹付けコンクリートのみを考慮し、厚さは0.5mを基準とし比較として厚さ0.2mの場合も設定した。

掘進長は支保効果に大きな影響を与えるため、一掘進長については地層処分施設の検討¹⁵⁾と同じ1.5mとした場合と2車線道路トンネルや複線新幹線トンネルと同等の掘削径10mで一掘進長1.0mと想定したときに掘削径と掘進長の比が同じとなる一掘進長0.5mの場合の2ケースとした。

3.4 掘削条件と切羽進行速度

地層処分施設の施工計画¹⁵⁾では、実稼働日数を23日/月で、切羽の速度を92m/月としている。これを参考に、稼働5日で週休2日とし、掘削長1.5mと0.5mのそれぞれの場合についてサイクルタイムを、掘削・吹付けコンクリート・ロックボルト・その他の項目に分けて算定した。その結果を表-2に示す。

なお、地層処分施設の検討ではインバートは別途施工されることとなっているが、本論文では、軸対称解析であることより、吹付けコンクリートはインバートも含めて一体として施工されると設定した。

一掘進長1.5mと0.5mの場合の切羽近傍の要素分割状況を図-5(c), (d)にそれぞれ示す。要素はトンネル近傍の地山と吹付けコンクリートをそれぞれ0.1m×0.25mに分割した。したがって、図に示されるように一掘進長が1.5mの場合、掘削部分はa'～f'、吹付けコンクリートはa～fに細分化される。図中のStep-40は最終の掘削部を意味し、Step-39, Step-38, …は切羽面からの掘進長ごとの区間を示している。

3.5 解析手順

解析手順は以下の通りとした。

Step-0: 初期地圧の設定

Step-1: 境界に隣接する一掘進部分を掘削0.25mごとに行なうこととして、一掘進長が1.5mの場合6回(a'～f'), 0.5mの場合2回(a', b')の掘削解析を行う(この場合は支保は設置されていない)。この掘削開始を月曜

日の1方目とした。

…

Step-i: Step-(i-1)に支保要素を設置し、Step-(i-1)～Step-1の区間の支保(吹付けコンクリート)の弾性係数と強度定数をStep-1からStep-iまでのそれぞれの経過時間により前節の材齢と物性との関係から設定して、掘削解析を実施する。

…

最終ステップ: 掘進長1.5mの場合の最終掘削状況(図-5(c))に示されるように、Step-39が掘削し吹付けコンクリートを設置し、Step-40部分の地山を図のa', b'…f'の順に掘削解析を実施して計算を終了する。掘進長0.5mも同様とした。

なお、解析は有限差分法コードFLAC¹⁶⁾を用いた。

4. 解析結果と考察

4.1 切羽からの距離と地山壁面変位および支保内面の変位の関係

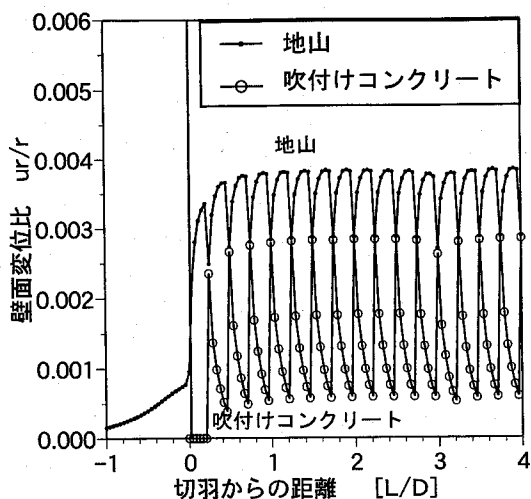
切羽が所定の位置(境界より60m)まで到達したときの全解析ケースにおける切羽からの距離と地山壁面変位比と吹付けコンクリート内面の変位の関係を図-6に示す。ここに、壁面変位比は内空変位をその位置の半径で除した値であり、トンネル横断面での接線方向ひずみとなる。ここで、壁面変位比を用いたのは解析ケースにより掘削径Dが異なるため、異なる径で比較するため正規化した。

地山と支保内面の変形は、掘削される部分と一掘進区間内の各要素との距離が異なるため、一掘進長ごとに波打つ形状となる。吹付けコンクリート内面の変位の変動は地山壁面変位よりも大きく、この変位量の差は吹付けコンクリート設置時の地山の先行変位量に依存している。

地山と吹付けコンクリートの変位量を短時間高剛性吹付けと普通吹付け(解析ケースの1と2, 3と4, 5と6)で比較すると短時間高剛性吹付けの方が小さく、また、一掘進長の切羽側の変位量が短時間高剛性吹付けの方が小さい。これらは吹付け直後に高い剛性を発現している効果と考えられる。

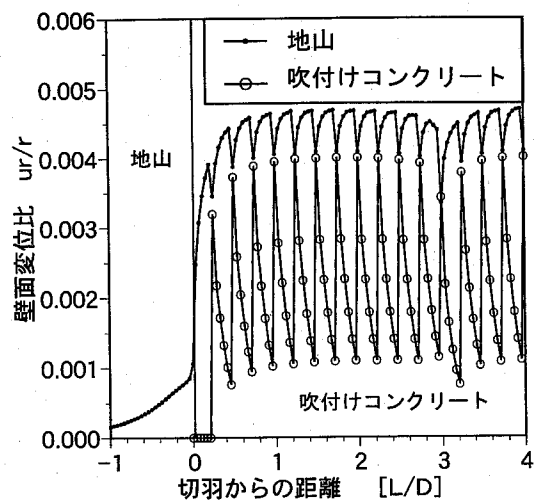
4.2 切羽からの距離と接線方向応力の関係

切羽からの距離と地山壁面および吹付けコンクリート内側要素の面外応力(σ_{zz} , すなわち、トンネル横断面における接線方向応力 σ_θ)と吹付けコンクリートの一軸圧縮強度と切羽距離の関係を図-7に示す。なお、xyz軸とトンネル横断面のr θ 軸に



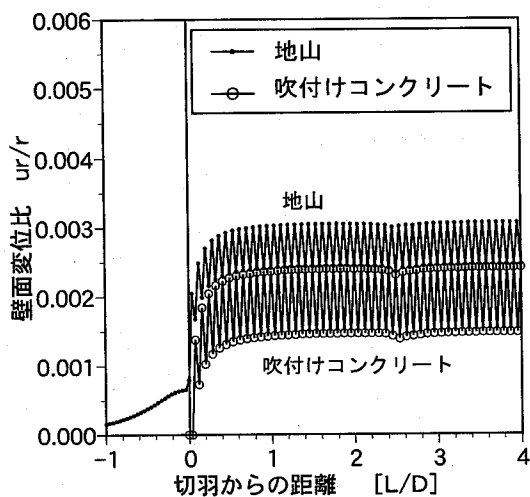
(a) 解析ケースー 1

掘進長 1.5m, 吹付け厚 0.5m, 高剛性吹付け



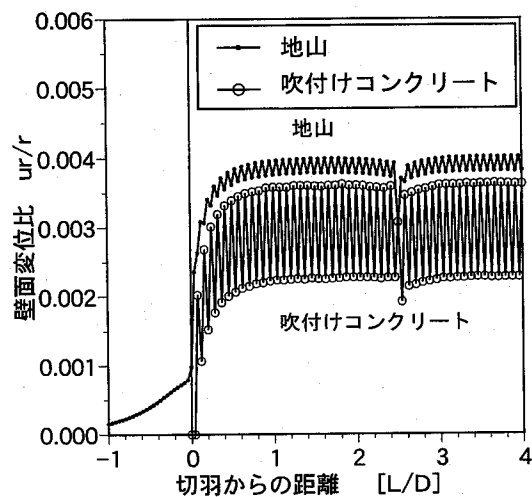
(b) 解析ケースー 2

掘進長 1.5m, 吹付け厚 0.5m, 普通吹付け



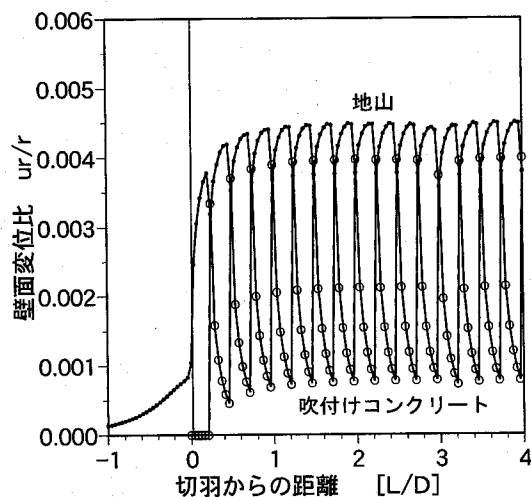
(c) 解析ケースー 3

掘進長 0.5m, 吹付け厚 0.5m, 高剛性吹付け



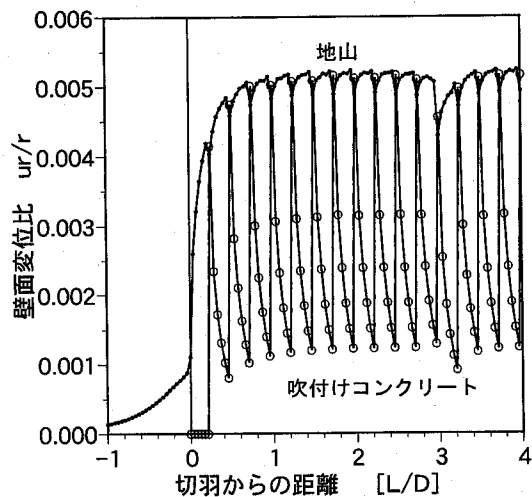
(d) 解析ケースー 4

掘進長 0.5m, 吹付け厚 0.5m, 普通吹付け



(e) 解析ケースー 5

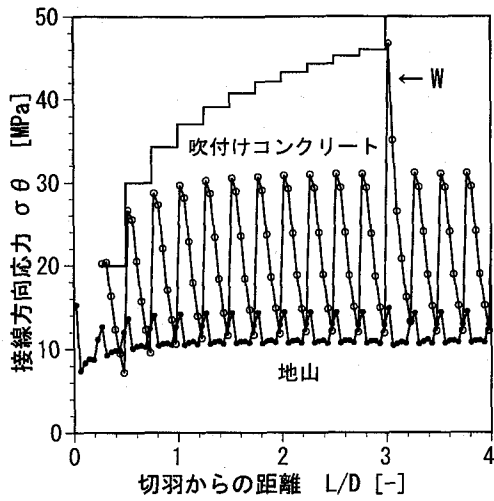
掘進長 1.5m, 吹付け厚 0.2m, 高剛性吹付け



(f) 解析ケースー 6

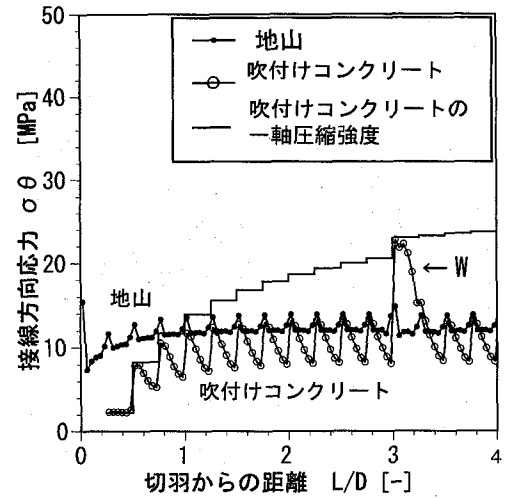
掘進長 1.5m, 吹付け厚 0.2m, 普通吹付け

図-6 切羽からの距離と地山の壁面変位（全変位）と吹付けコンクリート内側の変位の関係



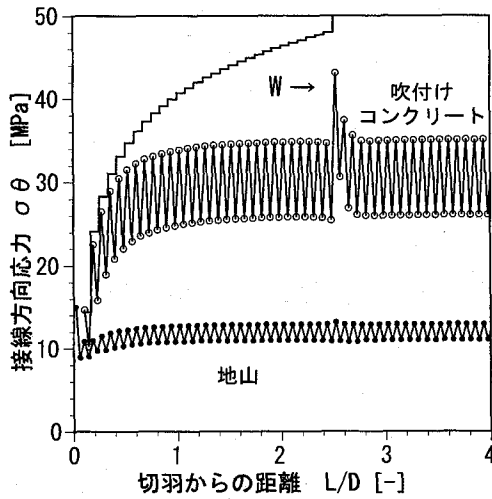
(a) 解析ケース－１

掘進長 1.5m, 吹付け厚 0.5m, 短時間高剛性吹付け



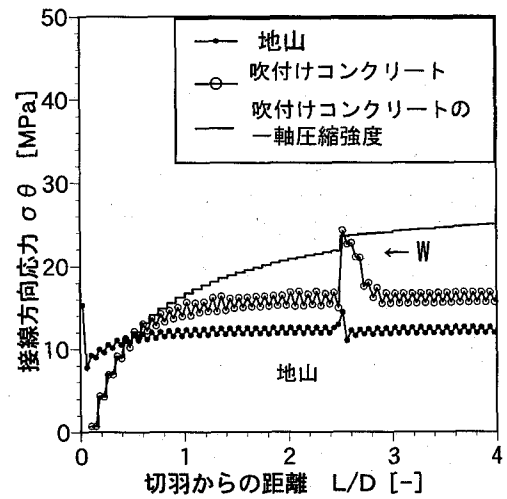
(b) 解析ケース－２

掘進長 1.5m, 吹付け厚 0.5m, 普通吹付け



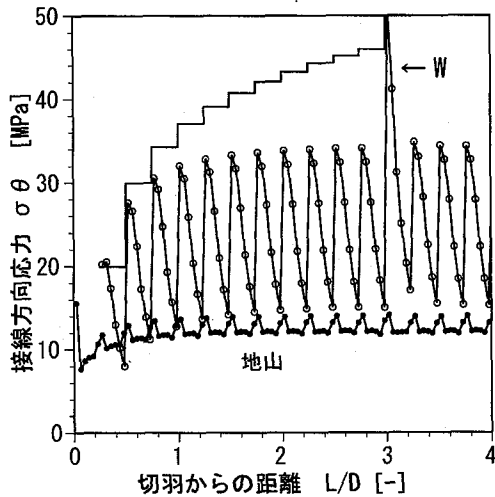
(c) 解析ケース－３

掘進長 0.5m, 吹付け厚 0.5m, 短時間高剛性吹付け



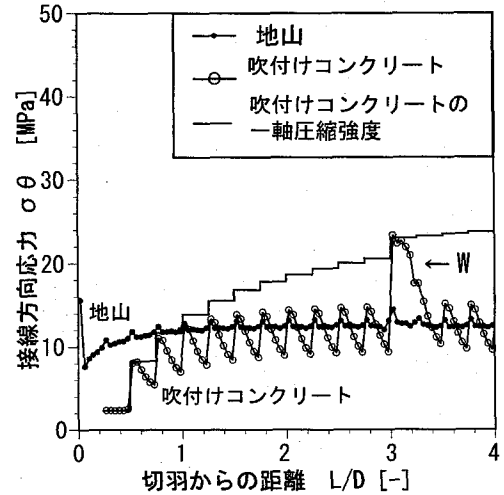
(d) 解析ケース－４

掘進長 0.5m, 吹付け厚 0.5m, 普通吹付け



(e) 解析ケース－５

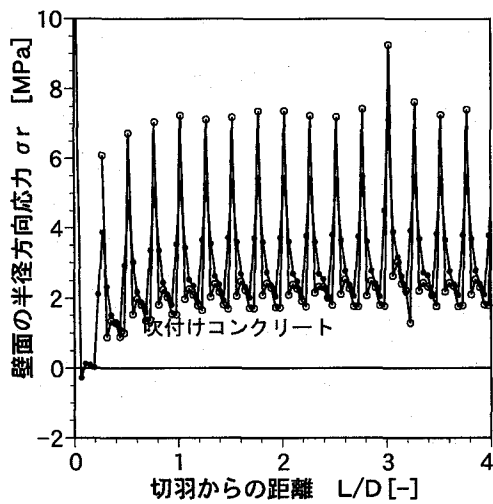
掘進長 1.5m, 吹付け厚 0.2m, 短時間高剛性吹付け



(f) 解析ケース－６

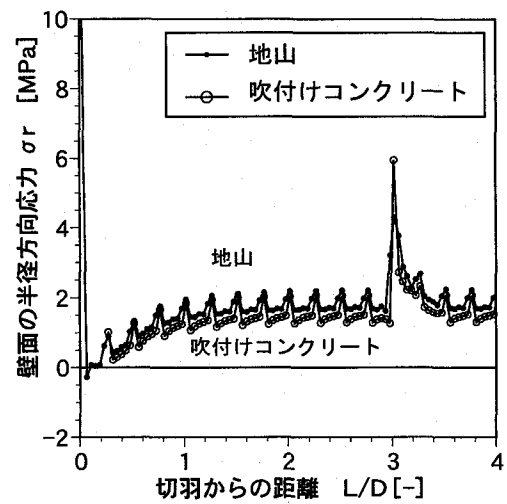
掘進長 1.5m, 吹付け厚 0.2m, 普通吹付け

図－７ 切羽からの距離と地山および吹付けコンクリートの接線方向応力 σ_θ の関係



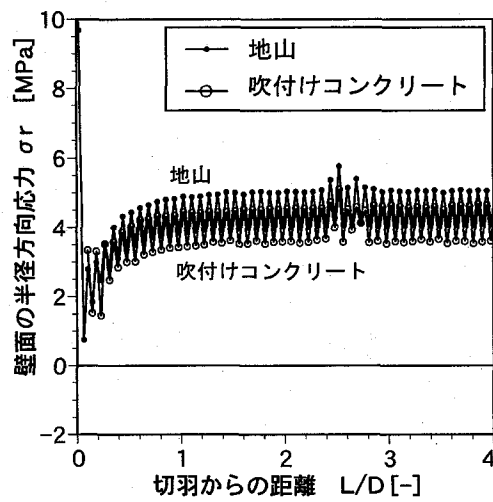
(a) 解析ケースー 1

掘進長 1.5m, 吹付け厚 0.5m, 短時間高剛性吹付け



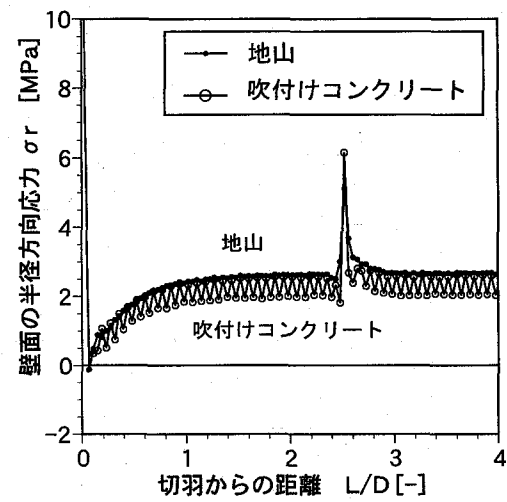
(b) 解析ケースー 2

掘進長 1.5m, 吹付け厚 0.5m, 普通吹付け



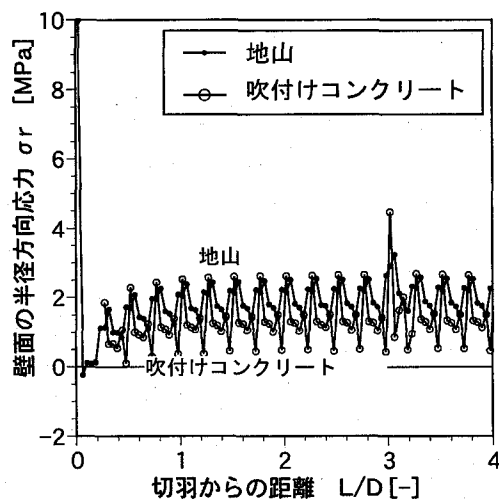
(c) 解析ケースー 3

掘進長 0.5m, 吹付け厚 0.5m, 短時間高剛性吹付け



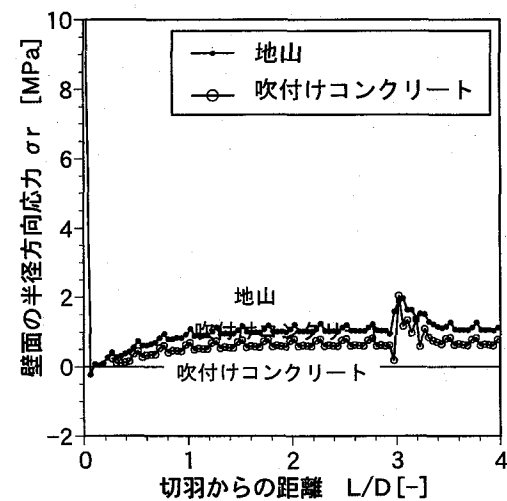
(d) 解析ケースー 4

掘進長 0.5m, 吹付け厚 0.5m, 普通吹付け



(e) 解析ケースー 5

掘進長 1.5m, 吹付け厚 0.2m, 短時間高剛性吹付け



(f) 解析ケースー 6

掘進長 1.5m, 吹付け厚 0.2m, 普通吹付け

図ー 8 切羽からの距離と地山および吹付けコンクリートの半径方向応力の関係

については、補足図－1に示した。

吹付けコンクリート内側の接線方向応力は短時間高剛性吹付けが普通吹付けよりも大きな応力となっている。特に、普通吹付けでは、吹付け直後（切羽近傍）の応力が小さい。これは内側の要素は一軸圧縮状態に近いことから、実線の吹付けコンクリートの一軸圧縮強度と対比すると吹付け後の強度が小さいため内側の要素が降伏していることがわかる。短時間高剛性吹付けは切羽直近（掘削長 1.5m：要素 e, f, 掘削長 0.5m：要素 b）で降伏または降伏に近い状態であるがそれ以外は弾性応力状態である。

一方、地山壁面の応力状態の差は小さい。この理由は、この面外応力は最大主応力であることから、同じ応力値で弾性あるいは塑性状態の両方が考えられること（後述する安全率分布参照）や三次元的な応力再配分の影響（後述する支保特性曲線参照）などが考えられるが今のところ明確な説明ができておらず、今後の検討課題としたい。

なお、図中の W に示される応力が高いところは、週末の最後の吹付けコンクリートを打設した区間で、他の区間と比べ剛性が高くなった後、次の区間を掘削するため大きな応力が生じたことを示している。

4.3 切羽からの距離と半径方向応力 σ_r の関係

切羽からの距離と地山壁面および地山と接する吹付けコンクリートの半径方向応力（ σ_r ）の関係を図－8に示す。

解析ケースの 1 と 2, 3 と 4, 5 と 6 を比較すると短時間高剛性吹付けの方が吹付けコンクリート・地山ともに一掘進区間内での応力の変動が大きい。また、各ケースとも短時間高剛性吹付けが約 2 倍の応力となっている。加えて、普通吹付けの場合、切羽近傍の 0.5D では半径方向応力（＝支保反力）が小さく、切羽近傍における支保効果があまり期待できないことを示している。

4.4 支保特性曲線の比較について

短時間高剛性吹付けの支保特性曲線における特性を把握するため、各解析ケースの支保特性曲線を求めた。支保特性曲線は、各要素について図－9で示される地山と吹付けコンクリート境界の節点と要素応力から支保内圧 P_i およびこれに対応する変位 u を求めた。さらに、各要素から求まる支保特性曲線 $u \sim P_i$ を一区間内の要素による算術平均として求めた。各解析ケースにおける支保特性曲線を図－10に示す。なお、図中の実線は表－1の地山物性と完全弾塑性理論解による地山特性曲線である。また、

横軸の地山壁面変位は解析ケースにより掘削径 D が異なるが比較するために無支保の弾性変位 u_{eo} で正規化した。

図中の記号“●”と“□”は短時間高剛性吹付けと普通吹付けの一回の掘削により求まる点を示している。短時間高剛性吹付けの一掘進長 1.5m の解析ケース－1, 5 は普通吹付けに比べて、吹付け直後の一掘進中の 6 回の掘削（a' ～ f'）による壁面変位は小さく、支保反力 P_i の増加は大きい。このことは、吹付け後の強度と剛性の発現が大きいことにより、掘削直後の変位を抑制し、その結果、支保反力が大きくなることを示している。

また、図に示される様に、各支保特性曲線は地山特性曲線と交差する、そのため、変位と支保反力が通常の特曲線法で得られる釣合い点の変位と支保反力よりそれぞれ大きくなる。一方、地山と吹付けコンクリートを弾性材料とした場合この釣合い点はほぼ地山と支保の特性曲線の交点となることを既に報告¹⁷⁾している。このことは、地山あるいは吹付けコンクリートの非線形な力学特性の影響によると考えられる。

4.5 トンネル近傍の地山の局所安全率分布について

一掘進長 1.5m の解析ケース－1, 2, 5, 6 の切羽近傍地山の局所安全率分布を図－11に示す。図において局所安全率が 1.0 以下が降伏領域である（実際には降伏曲面上にあるため局所安全率 1.05 以下を降伏領域として表示している）。

図に示される様に、吹付け厚 0.5m と吹付け厚 0.2m で短時間高剛性吹付けを採用した場合（解析ケース－1, 2, 5）、切羽近傍で降伏領域が生じているが、切羽から離れるにしたがって、弾性応力状態に回復している。また、この 3 ケースは吹付けコンクリートと接している地山壁面の要素は降伏していない。一方、吹付け厚 0.2m で普通吹付けを採用した場合（解析ケース－6）、切羽近傍から生じた降伏領域はそのまま残り、吹付けコンクリートと接している地山の要素も降伏している。これらの局所安全率の分布の大小と変化で評価すると、地山の安定性は解析ケース：1 > 5 > 2 > 6 の順番で低くなる。これは、図－10の支保特性曲線の釣合い点での支保反力の大きな順番と一致しており、同じ吹付け厚の場合には短時間高剛性吹付けが高い支保効果を発揮していることを示している。ただし、前述したように地山強度比が小さいことから解析ケース－6では支保内圧が小さいため明瞭に塑性領域が生じている。

なお、特性曲線法による二次元完全弾塑性解析で

$$u = \frac{1}{2}(u_i + u_{i+1}).$$

$$P_i = \frac{1}{2}(\sigma_{g,r} + \sigma_{s,r}).$$

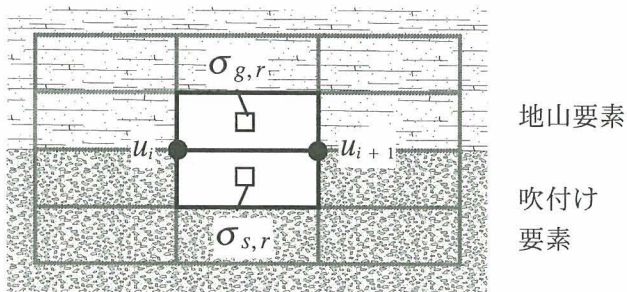


図-9 支保特性曲線を求めるための
支保内圧 P_i と地山変位 u の算出方法

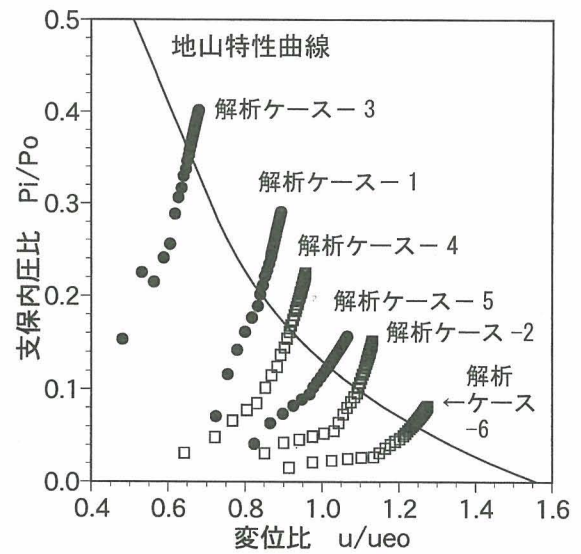
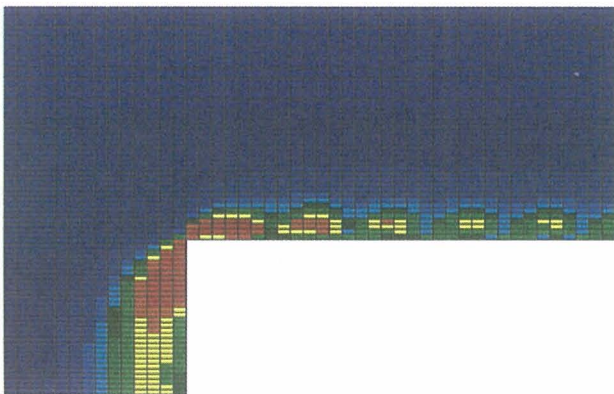
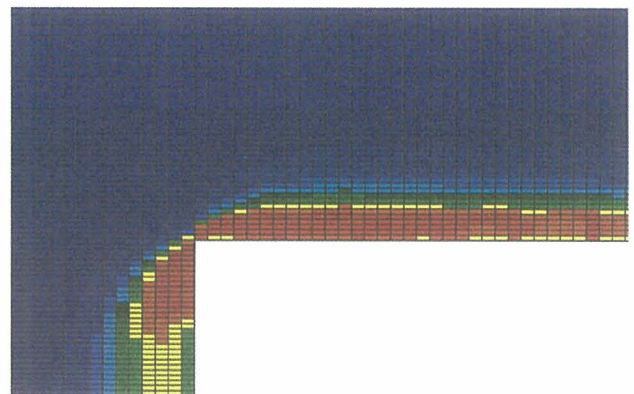


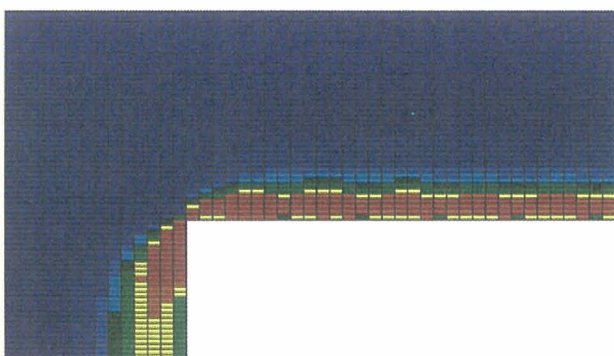
図-10 支保特性曲線と地山特性曲線
(u_{eo} は無支保の弾性変位)



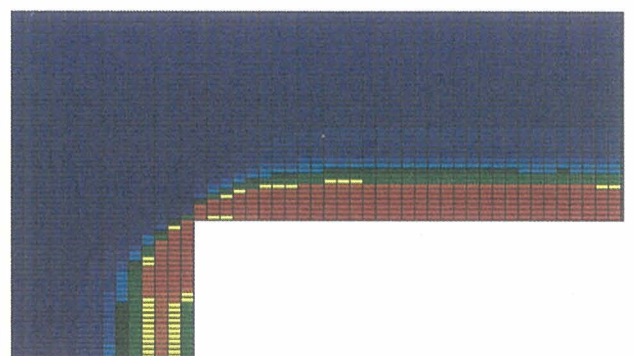
(a) 解析ケース-1
掘進長 1.5m, 吹付け厚 0.5m, 高剛性吹付け



(b) 解析ケース-2
掘進長 1.5m, 吹付け厚 0.5m, 普通吹付け



(c) 解析ケース-5
掘進長 1.5m, 吹付け厚 0.2m, 高剛性吹付け



(d) 解析ケース-6
掘進長 1.5m, 吹付け厚 0.2m, 普通吹付け

図-11 切羽近傍の地山の局所安全率分布図

は、地山が一度降伏してから弾性応力状態に回復する挙動を表現することや地山の降伏領域が地山壁面より若干奥のところ（10～20cm）で生じることを表現することは難しい。これらの現象・効果は、切羽近傍の三次元挙動の影響や吹付けコンクリートにおける若材齢の力学特性と時間依存性を考慮した効果と考えられる。

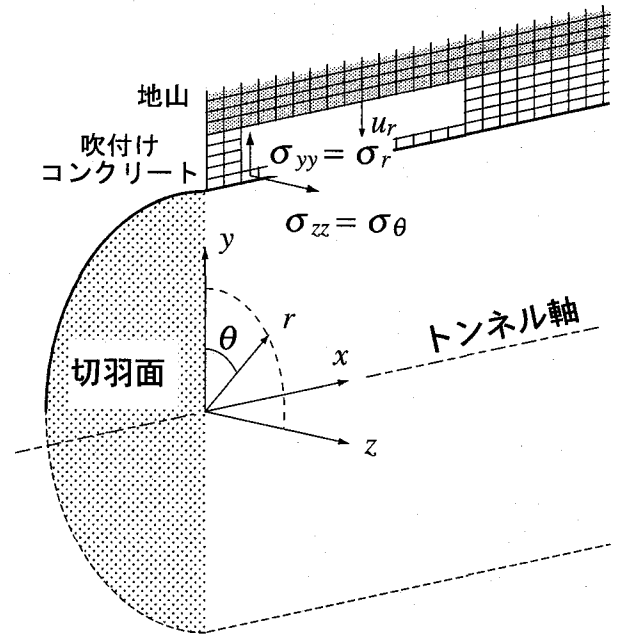
5. 結論

吹付け後短時間で大きな剛性を発現する吹付けコンクリートの支保効果を把握するために、軸対称モデルによる逐次掘削・逐次掘削を実施し、以下の様な知見を得た。

- ①地山と吹付けコンクリートの変位量を比較すると短時間高剛性吹付けの方が小さく、また、一掘進長の切羽側の変位量も短時間高剛性吹付けの方が小さい。
- ②吹付けコンクリート内側の横断面における軸応力は短時間高剛性吹付けが普通吹付けよりも大きい。特に、普通吹付けでは、吹付け直後（切羽近傍）の応力が小さい。
- ③支保反力（半径方向応力）は各ケースとも短時間高剛性吹付けが約2倍となり、また、普通吹付けの場合切羽近傍の0.5Dで支保反力が小さい。
- ④支保特性曲線より短時間高剛性吹付けは普通吹付けに比べて、吹付け直後の一掘進時による壁面変位は小さく支保反力の増加は大きい。
- ⑤切羽近傍の局所安全率分布より、高い支保剛性が得られる場合、切羽から離れるにしたがって降伏領域が弾性応力状態に回復している。

以上の様な結果は、吹付けコンクリート支保が吹付け直後に高い剛性を発現している効果と考えられる。

今回の解析的な検討より、トンネルの安定性に係る切羽近傍の変形や応力は極めて三次元的な挙動や状態を示すことがわかる。このことは、短時間高剛性吹付けの様に切羽近傍で支保効果を発揮する支保部材を用いて安定・支保設計する場合には、従来の特性曲線法による二次元安定解析に加えて、この三次元的な応力配分の影響を考慮した安定解析に基づく安定設計や支保設計が重要となると考えられる。



補足図－1 本論文で用いている座標系について
切羽面上のトンネル軸（ x 軸）との交点を原点として、 xyz 軸がとられている。また、 r - θ 軸は yz 平面における極座標とした。

参考文献

- 1) L.Cosciotti, A.Lembo-Fazio, D.Boldini, A. Grazian : Simplified behavior models of tunnel faces supported by shotcrete and bolts, Int. Conf. Conference on Modern Tunneling Science and Technology (IS-Kyoto 2001), vol.1, pp.407-412, 2001.
- 2) A. Graziani, D. Boldini, R. Ribacchi : Practical estimate of deformations and stress relief factors for deep tunnels supported by shotcrete, Rock Mech. Rock Engng.,38(53),pp.345-372,2005.
- 3) M.Panet,A.Guenot : Analysis of convergence behind the face of a tunnel,Tunneling 82, Brighton,United Kingdom,pp.197-204, 1982.
- 4) 久武勝保, 伊藤富雄, 桜井春輔 : 時間依存性を示す膨張性軟岩トンネルの一次覆工挙動, 土木学会論文集, 第412号/III-12, pp. 153-160, 2004. 2.
- 5) 久武勝保 : 膨張トンネルにおける高強度鋼繊維補強吹付け吹付けコンクリートの支保効果, 土木学会論文集, No. 701/III, pp. 99-106, 2002. 3.
- 6) 久武勝保 : 膨張トンネルの高強度鋼繊維補強吹付けの有効性, トンネルと地下, 第35巻2号, pp. 41-47, 2004. 2.
- 7) P.P.Oreste : A procedure for determining the reaction curve of shotcrete lining considering transient

- conditions, *Rock Mech. Rock Engng.*, 36(3), pp. 209-236, 2003.
- 8) 熊坂博夫：掘進長と吹付けコンクリート硬化速度が支保特性曲線に及ぼす影響について，トンネル工学研究論文集，第14巻，pp. 35-44，土木学会，2004. 11.
- 9) 中谷篤史，高橋圭一，熊坂博夫，石田積，岩崎昌浩：小型載荷装置を用いた吹付けコンクリートの若材齢における応力～ひずみ特性に関する検討，トンネル工学報告集第15巻，土木学会，pp. 23-27，2005. 12.
- 10) 栗田守朗，石田積，岩崎昌浩，藤野晃：短時間高強度吹付けコンクリートの基礎的性状，コンクリート工学年次論文集，vol. 28, No. 1, pp. 1337-1342, 2006.
- 11) 石井卓，熊坂博夫，栗田守朗，石田積，岩崎昌浩：材齢3時間で 18kN/mm^2 の剛性を発揮する吹付けコンクリート，土木学会第61回年次学術講演会，2006.（投稿中）
- 12) 電気化学工業：パンフレット，デンカナトミック.
- 13) Chang, Y. : Tunnel support with shotcrete in weak rock - A rock mechanics study. Ph.D. Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1994.
- 14) 核燃料サイクル機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－，分冊2 地層処分の工学技術，JNC TN1400 99-022, 平成11年11月.
- 15) 黒木繁盛，谷口航，小尾繁，長谷川宏，杉野弘幸，窪田茂，出羽克之：地下空洞の力学的安定性評価，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-037, pp. 43-44, 1999.
- 16) Itasca Consulting Group, Inc. : *FLAC User's Guide*, 2000.
- 17) 藤野晃，熊坂博夫，石井卓：吹付けコンクリートの剛性が応力解放率に及ぼす影響について，土木学会第61回年次学術講演会，2006.（投稿中）