

(87) プレライニングのあるトンネル切羽の 3次元FEM解析

ハザマ技術研究所	正会員	○粥川幸司
同 上	正会員	小杉安則
同 上	正会員	蓮井昭則
同 上	正会員	世一英俊

3-Dimensional FEM Analysis of Tunnel Face by Pre-Lining

Koji	KAYUKAWA, HAZAMA CORPORATION
Yasunori	KOSUGI, HAZAMA CORPORATION
Akinori	HASUI, HAZAMA CORPORATION
Hidetoshi	YOICHI, HAZAMA CORPORATION

NewPLS (New Pre-Lining Support) method was developed as a kind of tunneling method. This is the method of excavating with constructing concrete shell (slit concrete) along the surrounding tunnel face.

By the way, it is expected that there is the difference of the 3-Dimensional behavior of tunnel face between NewPLS method and NATM. Therefore, it is required to reserch that using 3-Dimensional FEM analysis.

In this papre, a plan of 2-Dimensional and 3-Dimensional analysis simulating NewPLS method was investigated and the excavation analysis with 3-Dimensional FEM was carried out.

1. はじめに

近年、未固結に近い地山あるいは土被りの浅い箇所にはトンネルを施工する事例が増加している。この場合、特に掘削による地表面沈下が懸念されその対策が重要となってくる。

プレライニングはトンネルの掘削に先立ってコンクリートなどによって切羽前方を防護しておくトンネル工法であり、上述の問題に対して効果があるといわれている。NewPLS工法は、トンネル切羽前方地山内にコンクリートシェル構造物(以下スリットコンクリートと称する)を構築し、切羽面の安定および天端沈下(地表面沈下)の防止を図る工法である。本工法は、先に現場試験施工を終えてほぼ実用化の段階に入っている。

NewPLS工法ではトンネル切羽前方にスリットコンクリートが構築されることから、切羽近傍の応力状態が3次元的に変化するものと考えられる。したがって、本工法における切羽前方での先受け効果について把握しておくことが必要となる。また、本工法では最終的にトンネル軸方向に連続したスリットコンクリートが構築されることになり(写真-1参照)、天端沈下特性などについても把握する必要があると考えられる。

ここでは、NewPLS工法を模擬した解析検討方針について述べるとともに、3次元FEM解析の方法および結果について報告することとする。

2. New PLS工法概要

New PLS工法は、先ず切羽前方地山の掘削外周をチェーンカッターを用いて切削し、その切削と同時に充填性の良いコンクリートを打設することによって、トンネル横断方向にアーチ状のスリットコンクリートを構築する。さらに、トンネル軸方向については各スリット施工段階において前スリットコンクリートの一部を切削しながら次のスリットコンクリートの施工を行う工法である。New PLS工法の概要を写真-1、図-1¹⁾²⁾に示す。このように切羽前方にスリットコンクリートを構築しながら施工するため、最終的にトンネル軸方向に連続した馬蹄形断面を有するコンクリート構造物が構築される。

スリットコンクリート厚さは32cm、スリットのトンネル軸方向の幅(1スリットの突っ込み長さ)は2.8mである。

3. 3次元FEM解析の位置付け

トンネル掘削の数値解析や設計に関する検討では、主としてトンネル横断面に関する2次元的な検討が行われる。これはトンネル完成後には、坑口付近を除きその形状および周辺地山の応力状態、挙動がトンネル軸方向でほぼ同様であること、また特性曲線法を用いた2次元解析によって、切羽の進行に伴う周辺地山の3次元効果を概略表現できること、および解析に要する時間、費用等の理由によるものと思われる。しかしながら、トンネル施工中の切羽近傍の地山挙動は本来3次元的なものである。これに加えてNew PLS工法では切羽前方約1mの先受け工を施工する工法ため、切羽近傍地山のトンネル軸方向の挙動を把握する必要がある。

そのためNew PLS工法の解析では、基本的なパターンのケースについてのみ3次元解析を行い、これによってNew PLS工法での切羽の挙動特性の把握、天端沈下等に関する特性曲線の把握等を行う。そして、3次元解析で得られた知見に基づいてトンネル軸方向および横断方向に関する疑似3次元解析(3次元効果を表現した2次元解析)の方法を検討し、各種のパラメータスタディ(先受け効果あるいは支保効果等の検討)を疑似3次元解析にて行うこととする。本検討概要を図-2にフロー図にて示す。



写真-1 スリットコンクリート¹⁾²⁾

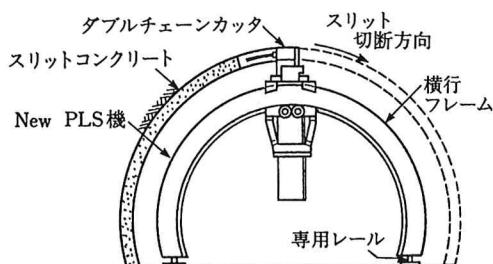
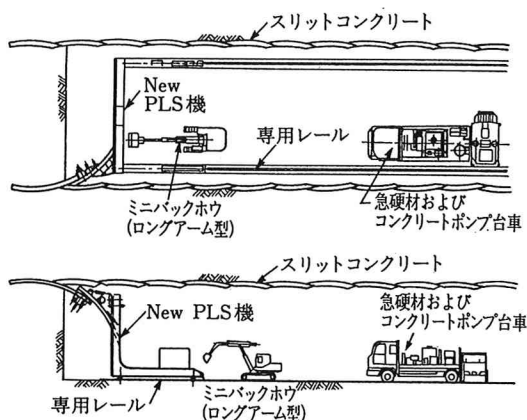


図-1 New PLS工法概要¹⁾²⁾

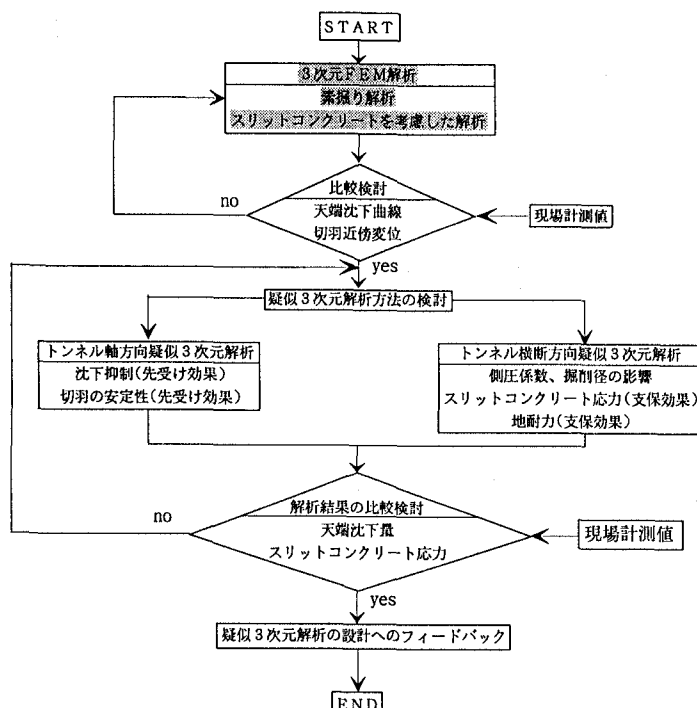


図-2 New PLS工法解析検討フロー(■:今回の3次元解析)

4. 3次元FEM解析概要および解析結果

4. 1 解析概要

今回の3次元解析は、第1段階としてNew PLS工法による基本的な地山挙動特性を把握するために理想的な条件で行った。

New PLS工法での施工工程は、New PLS機の前進、設置→カッターの突っ込み(突っ込み長さ2.8m)→スリット切削、コンクリート即時充填→カッターの引き抜き→New PLS機後退→切羽掘削(掘進長2m)である。このため解析では、特にスリットコンクリート構築および切羽掘削段階を図-3に示すようにモデル化した。すなわち、図中のステップ2の初期状態からスリットコンクリート2m(切羽より3m)を構築すると同時に切羽を2m掘進させる。解析ではこれを数回行い(ステップ3～6)、各ステップ間の変位増分値が収束に達した時正しい変位増分値が得られたとし、これを切羽進行過程

ステップ	1	2	3～6
模式図			
内 容	初期応力解析 (側圧係数 $\lambda = 0.54$)	トンネル軸方向32mまで スリットコンクリート打設、 全断面掘削	掘進長2mにて4掘進進行、 スリットコンクリート打設

図-3 解析ステップ図

を考慮して重ね合わせることによって最終変位量を算出している³⁾⁴⁾。

解析モデルを図-4に、トンネル断面での拡大図を図-5に、また、使用した材料定数を表-1に示す。解析対象領域は、トンネル横断方向の横方向約3.7D、縦方向約7Dおよびトンネル軸方向約6.5D(Dはトンネル径で約11.2m)を確保している。トンネル軸方向の要素分割は、解析モデル中央付近で2mの掘進長、1mの先受け長を考慮して、1mピッチで計10層の分割を行っている。なお、本解析モデルで要素数約2500、節点数約12800である。

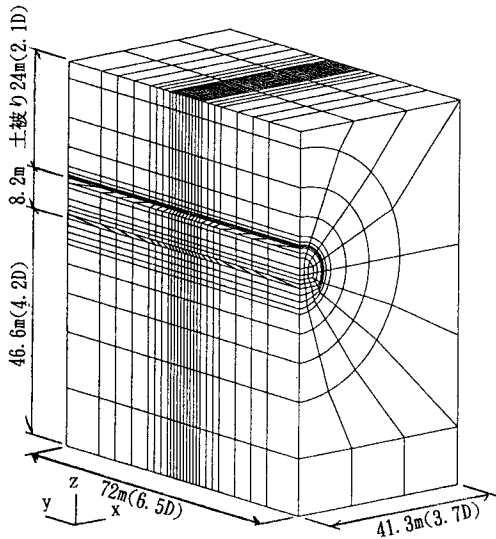


図-4 解析モデル

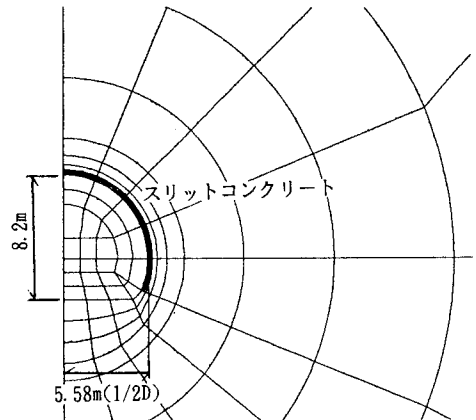


図-5 トンネル断面拡大図

表-1 解析モデル材料物性値

	単位体積 重量(t/m ³)	弾性係数 E(t/m ²)	側圧係数 λ	ポアソン比 ν	厚 さ t(m)
地 山	1.80	2.10×10 ³	0.54	0.35	—
コンクリート	—	2.10×10 ⁶	—	0.17	0.32

4. 2 解析結果

スリットコンクリートを考慮した場合および素掘りの場合の解析結果を、天端沈下、側壁水平内空変位、スリットコンクリート脚部沈下に注目してそれぞれ図-6～8に示す。

天端沈下においては、今回の解析条件で切羽位置で56.2mm、最終沈下量で約197mmとなっており、見掛け上切羽での解放率は約28.5%となっている。これに対してスリットコンクリートがある場合に

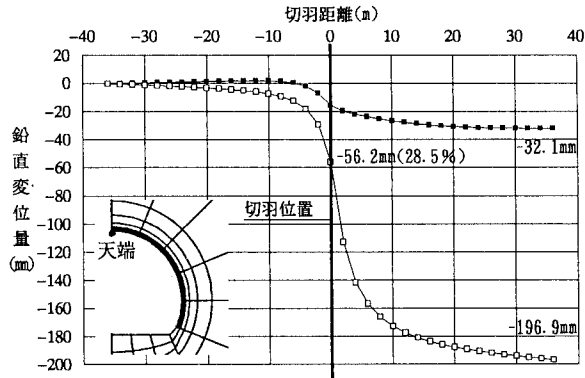


図-6 天端鉛直変位(---:沈下, ■:スリットコンクリート, ○:素掘り)

は、最終沈下量で約32.1mmと素掘りの場合の1/6程度となっており、かなりの効果が期待できるものと考えられる。また、切羽前方約1Dではスリットコンクリートが切羽前方に約1m存在することにより、若干の隆起現象が見られる。以上これらのことは側壁水平変位についても同様であると思われる。なお、側壁水平変位では切羽進行後約1Dから変位が収束する方向に向かっているが、これは切羽進行に伴いスリットコンクリートが上下方向に若干つぶれる状態になり、側壁部分で地山側に押し出されるためと考えられる。

脚部においては、素掘りの場合掘削による応力解放のため浮き上りを生ずるが、スリットコンクリートがある場合には逆に沈下する結果となった。これはスリットコンクリートが構築されることによって脚部が構想物の支承となり、鉛直土被り圧を支持することになるためであると考えられる。逆に言えば、New PLS工法ではスリットコンクリート脚部について十分な対策を施すことが必要になると考えられる。

5. おわりに

今回は、素掘り状態と切羽前方にスリットコンクリートが存在する場合の2ケースについて3次元解析を行った。解析の結果、New PLS工法では素掘りの場合と比較してスリットコンクリートが地山の变形挙動をかなり抑制する効果があることが判明した。今後は本解析値と現場計測値との比較検討を行うとともに、2次元解析での評価方法を検討する予定である。さらには、本工法における設計方針を確立していく所存である。

最後に、New PLS工法の開発は(社)日本建設機械化協会建設機械化研究所、(株)大林組、五洋建設(株)、東急建設(株)、日本国土開発(株)、ハザマ、(株)三井三池製作所の共同開発であり、本研究はその成果の一部である。

参考文献

- 1) 亀岡美友、指田健次：New PLS工法の開発(新プレライニングサポート工法)、土木学会誌、1992年9月
- 2) 原田暁、指田健次、世一英俊：New PLS (Pre-Lining Support) 工法、建設機械、1992年10月
- 3) 伊東淳、木崎明、樽井稔：切羽進行に伴う地山挙動における一考察、富士総研技法Vol. 2 No. 2 1991
- 4) 箱石安彦、安部吉生、亀村勝美：3次元逐次掘削プログラムによるトンネルの解析、トンネル工学研究発表会論文報告集第1巻、1992年12月

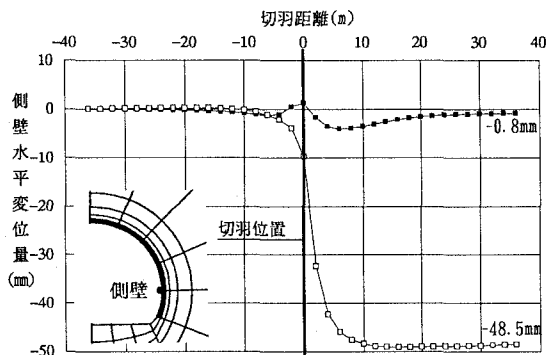


図-7 側壁水平変位

(○：内空側変位、■：スリットコンクリート、□：素掘り)

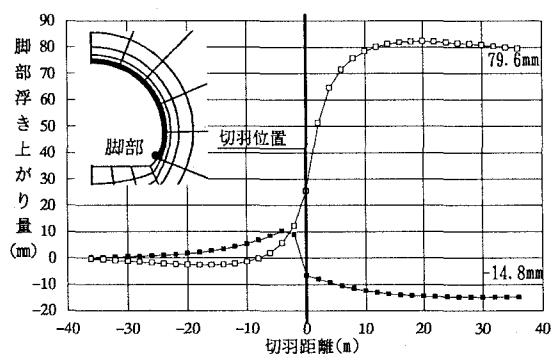


図-8 スリット脚部鉛直変位

(+：浮上、-：沈下、■：スリットコンクリート、□：素掘り)