

場所打ちライニングの挙動に及ぼす 施工方法の影響～三次元解析を用いた検討～

Investigation of Effects of Construction Loads on Extruded Concrete Lining
using Three-Dimensional Numerical Analysis

飯田廣臣¹・磯谷篤実²・小山幸則³・N. YINGYONGRATTANAKUL⁴
Hiroomi Iida, Atsumi Isogai, Yukinori Koyama and Narentorn Yingyongrattanakul

¹フェロー 工修 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 (〒231-8315 横浜市中区本町 6-50-1)

E-mail: h.iida@jr-tt.go.jp

²正 会 員 工修 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 (〒231-8315 横浜市中区本町 6-50-1)

³フェロー 工博 (財)地域地盤環境研究所 東京事務所 (〒113-0034 文京区湯島 1-8-4)

⁴正 会 員 工博 (財)地域地盤環境研究所 東京事務所 (〒113-0034 文京区湯島 1-8-4)

The three-dimensional numerical analysis model of the Extruded Concrete Lining (ECL) using TBM has been proposed in this paper. This model is used to simulate the construction of the Sambongihara tunnel of Tohoku Shinkansen line for describing the behaviours of ground and ECL at each construction stage.

Moreover, the effects of construction loads are investigated by varying the concrete pressing pressure. Finally, the ground movements, stresses and section forces of ECL at each load case are compared and discussed.

*Key Words : shield tunnelling method, extruded concrete lining, numerical analysis,
3D analysis*

1. はじめに

東北新幹線三本木原トンネル工事では、場所打ちコンクリートライニング(ECL)を用いた新しいトンネル施工方法「シールドを用いた場所打ち支保システム¹⁾(SENS)」を適用してトンネルの建設を行っている。

三本木原トンネルの場所打ちライニングの設計²⁾では、シールドトンネルのセグメント設計を準用した設計でも行っている。しかし、この設計法は施工過程が考慮されていないモデルであるとともに、この設計法により設計された場所打ちライニングの妥当性についても、十分に検証されていないのが実情である。

また、シールドを用いた場所打ちライニングの力学挙動に関する解析についての過去の研究³⁾⁴⁾⁵⁾では、いずれも二次元解析によるものであり、トンネルの施工過程や施工条件がまだ十分に考慮さ

れていないと考えられる。場所打ちライニングの挙動は、地山の応力解放、コンクリートの打設圧、コンクリートの強度変化、内型枠の脱型など、多様な要因により変化すると考えられる。このような複雑な現象を考慮する場合は、三次元的シミュレーション解析での検討も必要になると思われる。

本件では、シールドの施工過程を考慮した場所打ちライニングの三次元数値解析の手法を提案し、三本木原トンネルについてのシミュレーション解析を行った。また、施工パラメータとして、主にコンクリート打設圧を選び、これを変化させて周辺地山の変形および場所打ちライニングに発生する応力または断面力に及ぼす影響を検討した。これらの検討により、場所打ちライニングの合理的な設計・施工方法を考察するものである。

2. 三次元解析手法の提案

(1) トンネル施工過程のモデル化

SENSではシールドテール内で組立てた内型枠と硬化した場所打ちコンクリートとの摩擦力を反力として、シールドの掘進を行い、また、同時にテールポイドにコンクリートを充填、加圧する。場所打ちコンクリートが硬化した後、推進力の影響が無くなった時点で、最後尾から順次脱型する。本解析ではこれらを図-1に示すようにモデル化した。

モデルでは地山の他に、シールド、内型枠、硬化した場所打ちコンクリートを弾性ソリッド要素としてモデル化した。

シールドは、地山、場所打ちコンクリートなどと比較して非常に変形し難いものと考えられるため、円筒形状の剛体と仮定した（面版はモデル化していない）。なお、三本木原トンネルにおけるシールドは、外径11.44m、機長11.12mであるが、便宜上、シールド機長を10.80m（内型枠幅の9リング分）とした。

三本木原トンネルで用いたシールドは泥土圧シールドであるので、シールドの切羽面には、泥土圧を水平方向の分布荷重として作用させる。その荷重は泥土の密度に応じた勾配を持つ分布となる。

内型枠は、その横断面の曲げ剛性に関して継手部での曲げ剛性の低下を考慮した、単体での曲げ剛性にその有効率 $\eta=0.8$ を用いた等価剛性を有する要素として扱う。

シールドテール内に組立てた2リング分の内型枠は形状保持装置によって上下肩部の変位が抑制されている。そのため、形状保持装置は図-2に示すように梁要素としてモデル化した。

場所打ちコンクリートは、現場計測によりコンクリート打設から約6時間後に硬化することが確認されたため、場所打ちコンクリートのモデル化は液体状態（材齢6時間以下）と固体状態（材齢6時間以上）に分かれる。場所打ちコンクリートが液体である場合のモデルでは、シールドテールから脱出した直後の内型枠2リング分（2.4m）に、フレッシュコンクリートの密度を考慮した圧力分布を地山と内型枠へ作用させた。

場所打ちコンクリートの強度が発現するのは、打設してから材齢6時間以上、テールを脱出してから3リング目以降とする。硬化後の場所打ちコンクリートはソリッド要素としてモデル化し、材齢日数によって、そのヤング係数を変化させた。

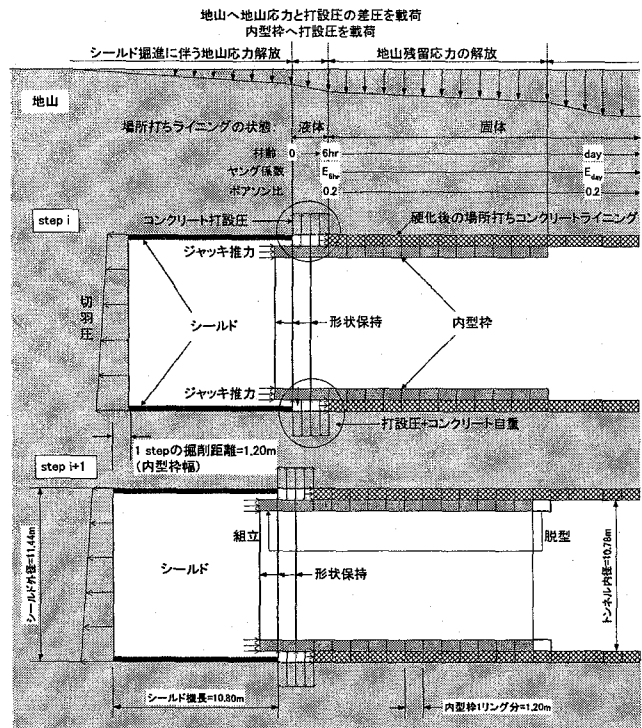


図-1 SENS施工過程のモデル化

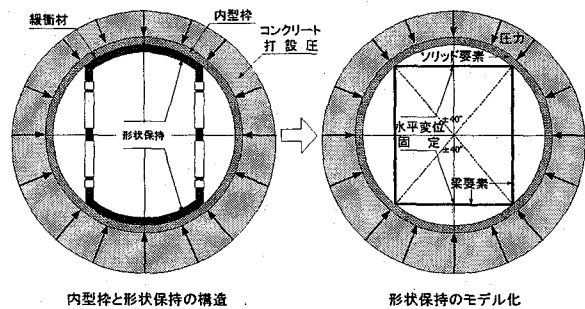


図-2 形状保持の構造とモデル化

(2) 解析手順

解析手順は以下の通りである。初期応力解析によって地盤に初期応力を発生させた後、内型枠の1リング分（1.2m）毎の掘進を行うものとする。各掘進ステップでは、切羽前面の地山要素1掘進分を削除し、掘進長分のシールド要素の付加、およびテールでの要素の削除を行う。これと同時に、シールドテール内に内型枠1リング分を組立て、最後尾の内型枠要素を削除する。また、シールドテールから3リング目に場所打ちコンクリート要素を付加する。この時、4リング目以降の場所打ちコンクリート要素のヤング係数をそれぞれ更新する。

荷重条件については、まず、切羽圧は分布荷重として切羽面に水平方向の分布荷重として載荷させる。ジャッキ推進力は等分布の水平荷重として、シールド内にある内型枠要素に作用させる。また、コンクリート打設圧はシールドテールから2リング分の地山と内型枠にトンネル半径方向の荷重として作用させるとともに、硬化直後の場所打ちコンクリートに水平方向荷重として作用させる。

3. 三本木原トンネルの解析

(1) 解析条件

本解析では、起点方坑口より約360m (616k204m 付近) を検討の対象とし、実施工と同様な条件下でシミュレーション解析を行った。解析検討区間の地質横断面を図-3に示す。掘削対象地質は、洪積層である野辺地上部砂層 (Nos1) が主体である。また、解析に用いた地山物性値は表-1に示すように設定した。地盤の変形係数については坑内水平載荷試験 (LLT) や平均N値から総合判断して設定した。

表-2に場所打ちコンクリートと内型枠の諸元と物性値を示す。硬化後の場所打ちコンクリート (テールから3リング目以降) は、図-4の室内試験結果をもとに材齢からヤング係数を求める。

切羽圧については、平均ジャッキ推進力 (39,600kN) からシールド外周面と地山との摩擦抵抗⁶⁾ (鋼と地山の摩擦係数=0.3) を差し引くことにより切羽面抵抗を算出し、切羽面抵抗を切羽面積 (102.78m²) で除した値 (0.25MPa) から、泥土の密度を考慮して水平台形分布荷重とした。

解析断面を通過する時のシールドの掘進速度は、リングの組立から脱型までを平均すると1.2m/6.4hr程度となるので、この速度に基づいて場所打ちコンクリートの材齢 (ヤング係数) を変化させた。また、脱型時の場所打ちコンクリートの材齢は4日である。

(2) 解析モデル

三本木原トンネルの三次元解析モデル図を図-5に示す。モデルは、トンネル径 (D) 11.44mの半断面モデルであり、土被り (H) 17.76m、鉛直下方境界約1.1D : 12.30m、トンネル側方境界⁷⁾ 約2.5H : 44.28m、トンネル縦断方向90.00mを解析領域とした。モデル端面の境界条件はローラー支承とした。

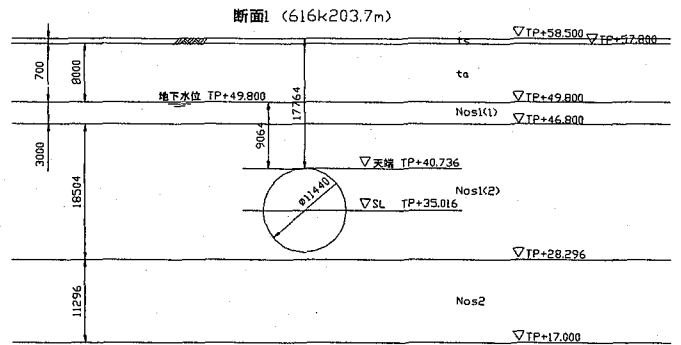


図-3 解析断面の地質横断面図

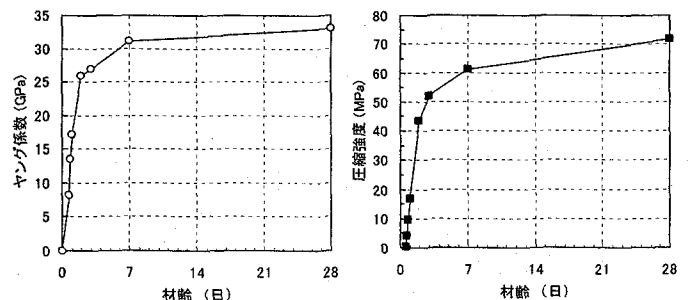
表-1 地山の物性値

地層	平均 N 値	単位体積重量 γ (kN/m ³)	変形係数 E (MPa)	ポアソン比 ν
ts	4	14.0	10	0.30
ta	13	14.0	20	0.45
Nos1(1)	24	19.0	60	0.30
Nos1(2)	>50	19.0	113	0.30
Nos2	>50	20.0	272	0.30

表-2 場所打ちコンクリートと内型枠の諸元と物性値

構造物	厚さ (mm)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ヤング係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
場所打ち コンクリート	330	23.5	図-4 参考	0.20
内型枠	450 (440)	78.5 (18.7)	210 (35)	0.3 (0.3)

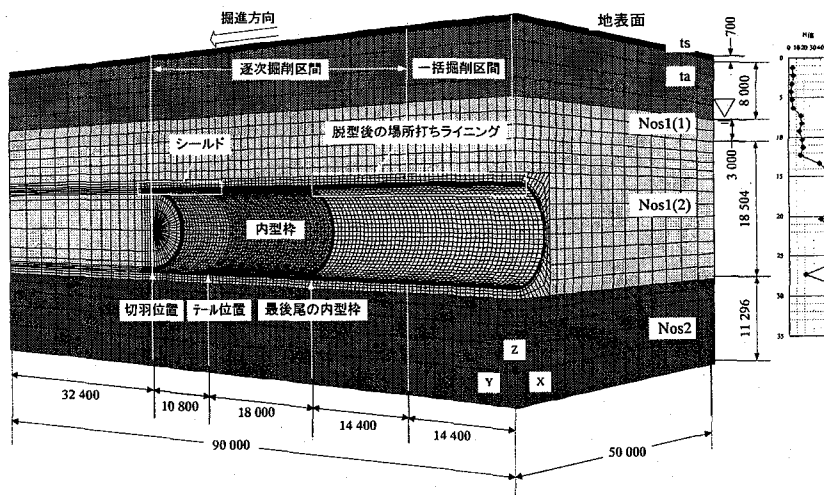
※()内は解析に用いた等価剛性物性値



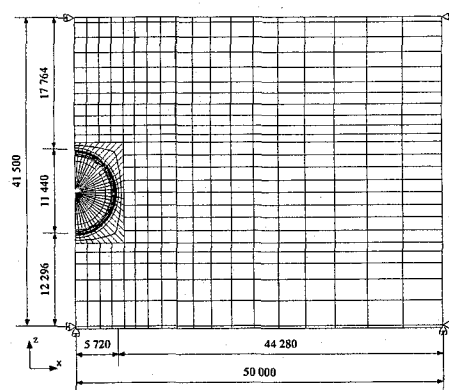
(a) ヤング係数

(b) 圧縮強度

図-4 場所打ちコンクリートの室内試験結果



(a) 解析モデル全体図



(b) 解析モデルの横断面

図-5 三次元解析モデル

解析では、端面から14.40m（12リング分）まで一括掘削を行い、その後、図-1に示した方法で1リング分（1.20m）毎の掘削、計36ステップ（43.2m）の逐次掘削解析を行った。

(3) 解析ケース

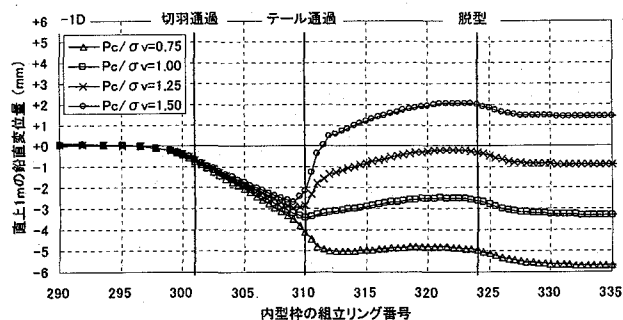
今回の解析では、SENS施工の際に周辺地山および場所打ちライニングに最も大きい影響を及ぼすと想定される打設圧をパラメータとして検討した。各ケースの打設圧を表-3に示すように設定した。

解析ケースはトンネル天端での打設圧（ P_c ）を地山の初期鉛直応力（ σ_v ）で除した値（ P_c/σ_v ）0.75～1.50で設定した。ケース1の打設圧は、テール脱出後の内型枠内面圧の計測値と等しい値に設定した。打設圧の分布については、下方になるに従いコンクリート比重相当の圧力が大きくなるような圧力分布荷重とした。

表-3 解析ケース

解析 ケ-ス	打設圧/地山応力 (P_c/σ_v ※)	打設圧 (MPa)		
		天端 (P_c)	S.L.	下端
1	1.50	0.44	0.55	0.66
2	1.25	0.37	0.48	0.59
3	1.00	0.29	0.40	0.51
4	0.75	0.22	0.33	0.44

※トンネル天端での地山鉛直応力（ σ_v ）= 0.29MPa

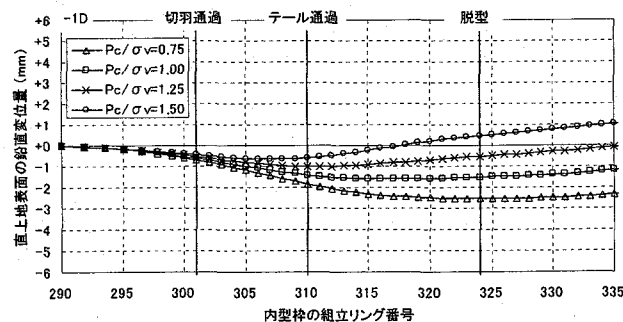


(a) 直上1m地山の鉛直変位

4. 解析結果および考察

(1) 地山の挙動

トンネル直上での鉛直変位の経時変化を図-6に示す。直上1mの変位ではいずれのケースにおいても掘削による地山応力解放により、地山が沈下する結果となっている。テール通過の際に、打設圧が地山応力より大きい場合は打設圧により地山を押し上げ、隆起傾向になる。打設圧が大きくなるほど、地山の隆起量が大きくなっている。しかし、打設圧が地山応力より小さい場合（ $P_c/\sigma_v=0.75$ ）はテール通過時にさらに沈下する傾向を示す。



(b) 地表面の鉛直変位

図-6 トンネル直上の地山鉛直変位

また、全てのケースにおいて脱型後に地山が若干沈下し、その後の変位はほぼ収束する。内型枠の脱型前には内型枠、場所打ちライニングとともに一体の構造として外圧（土水圧、打設圧等）に抵抗するが、脱型により構造全体の剛性が低下し、場所打ちライニングがさらに変形し、上下方向に押しつぶされた状態になっている。

地表面についてはシールド掘削により沈下傾向を示す。脱型後に、打設圧が高いケースにおいては若干の隆起傾向を示す。

図-7にトンネル側部での地山の水平変位分布を示す。解析では、テールボイドに充填するフレッシュコンクリートの打設圧を液圧（0.33～0.55MPa）としてモデル化しているため、トンネルスプリングライン付近での打設圧に対して地山の初期水平応力（0.23MPa）が大きい。そのため、地山を押し拡げることになる。

地山変位と打設圧の関係は図-8に示すように、打設圧が高くなるほど、地山が大きく押し拡げられ、その相互関係はほぼ線形であると言える。今回の解析によれば、打設圧が地山の初期応力より若干高い（ $P_c/\sigma_v=1.25$ ）場合の地山変位が最も小さい値となる。

また、ケース1のトンネル周辺における地山応力変化を図-9に示す。シールド通過に伴って地山応力が減少する傾向を示す。テール通過の際に打設圧により地山内応力が急激に増加し、打設圧相当の応力状態に達する。その後、場所打ちコンクリートの硬化に伴い地山応力が低下し、脱型後は場所打ちライニングの変形により、地山応力がさらに解放され、脱型2～3リング後にほぼ収束する。周辺地山の最終応力状態は、天端部において初期応力とほぼ同じであり、スプリングラインで初期応力より大きく、インバート部で初期応力より小さくなっている。

以上の解析結果から、SENSは掘削断面の周辺地山は場所打ちコンクリートの打設圧により圧縮され、その応力が残留し、硬化後の場所打ちコンクリートにその反力として載荷させると考えられる。

(2) 場所打ちライニングの挙動

図-10にケース1の場所打ちライニング周方向の応力変化を示す。硬化直後の場所打ちライニング応力は打設圧とほぼ同じ程度（0.44～0.66MPa）であり、内型枠の脱型前2～3リング間に圧縮応力が増加し、脱型の3～4リング後に最大値4.59～7.11MPaに達する。

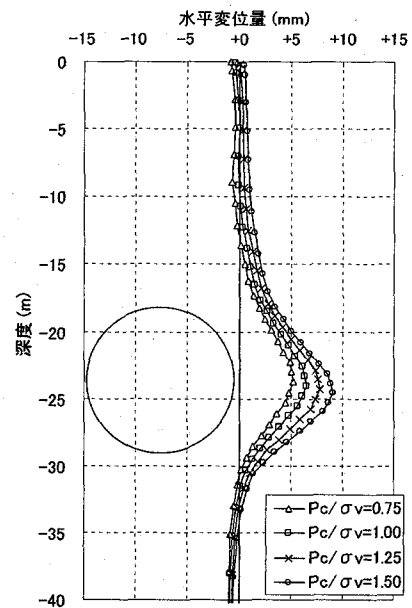


図-7 トンネル側部の水平変位分布

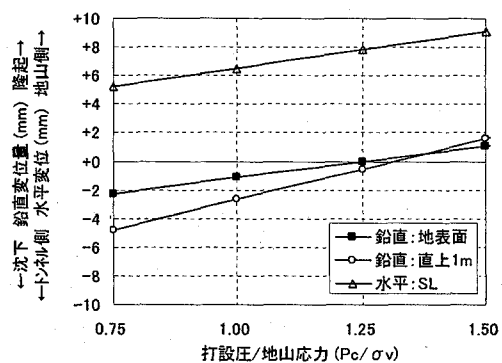


図-8 地山変位と打設の関係

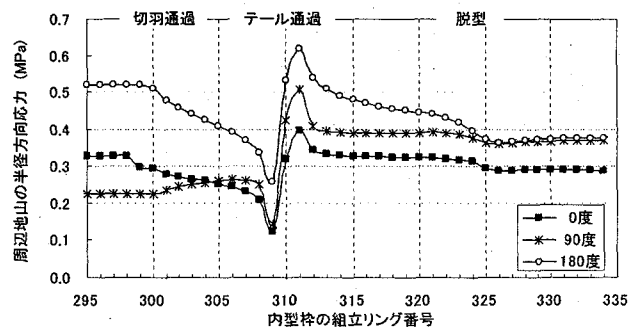


図-9 トンネル周辺地山の応力変化（ケース1）

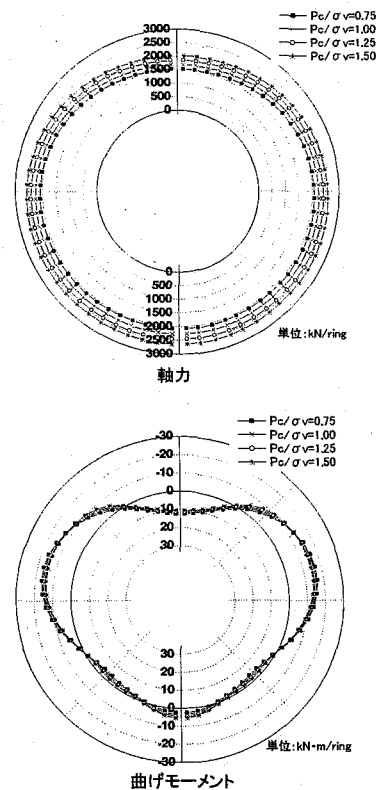
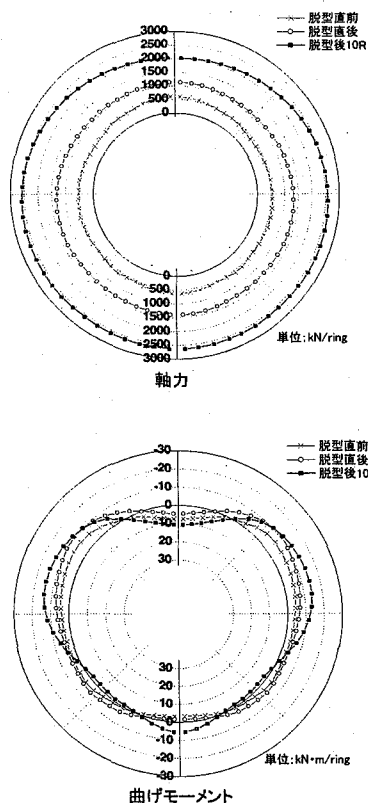
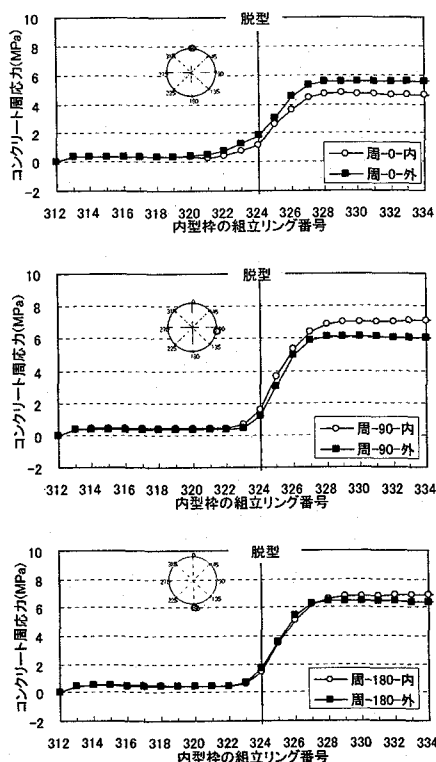


図-10 場所打ちライニングの応力変化
(ケース1)

図-11 場所打ちライニングの断面力変化
(ケース1)

図-12 場所打ちライニングの
断面力の比較

また、ケース1の場所打ちライニングの断面力を図-11に示す。軸力は、全周にわたって脱型後に増加傾向を示す。天端に発生している軸力は最も小さく、深度方向に大きくなっている。脱型10リング後の場所打ちライニングには、2,020～2,610kN/リング（奥行き1.2m）の圧縮軸力が発生している。

曲げモーメントの場合は、クラウン部に正曲げ、肩部、スプリングラインとインバート部に負曲げとなっている。脱型後の曲げモーメントは-14～+11kNm/リングであり、天端から80°で最大負曲げモーメントが発生する。軸力の最大偏心量 ($e = M/N$) は6.0mmであり、場所打ちライニングの厚さ330.0mmに対して十分小さく、軸力が卓越した構造物といえる。

また、各解析ケースの最終断面力の分布を図-12に示し、打設圧と最大断面力、最大応力の関係を図-13に示す。この結果により、打設圧が大きくなるほど、場所打ちライニングの軸力が大きくなり、曲げモーメントが小さくなる傾向がわかる。打設圧の影響による曲げモーメントの変化は軸力の変化と比べて非常に小さい。場所打ちライニングの最大応力については、軸力と同様に打設圧が大きくなると圧縮応力が増加している。これは、場所

打ちライニングに発生している応力が軸力による
応力のほうが卓越するためであると考えられる。

また、最大軸力、最大曲げモーメント、最大応力と打設圧の関係はほぼ線形であると言える。

打設圧が地山初期応力より大きくなると、打設圧による地山応力が増加し、硬化後の場所打ちコンクリートの地山反力になると考えられる。このため、打設圧が大きくなるほど、場所打ちライニング全周に作用する応力（荷重）が大きくなり、軸力が増加する。地山の初期応力を超えた場合の打設圧は地山内応力の増分、いわゆる地山反力になり、打設圧と地山初期応力の差が大きい箇所に顕著な影響を生じるので、天端部よりスプリングライン付近のほうが大きくなると考えられる。このことから、地山の反力により場所打ちライニングに作用する水平荷重の増分が鉛直荷重の増分より大きいため、打設圧が大きくなると曲げモーメントが小さくなると考えられる。

以上の結果より、場所打ちライニングの断面力、応力は打設圧の大きに大きく依存すると考えられる。SENSによる場所打ちライニングの設計に際しては、コンクリート打設の管理が重要であると考えられる。

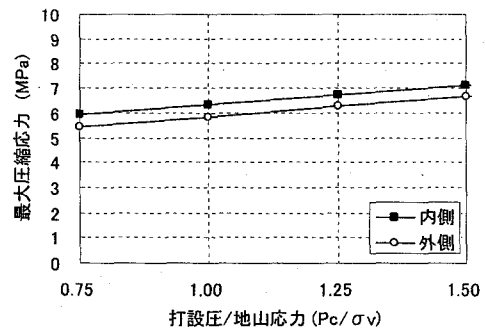
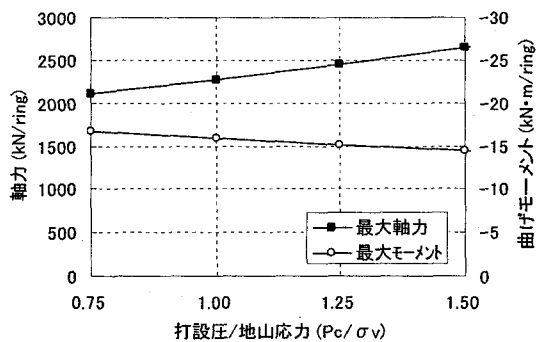


図-13 場所打ちライニングの最大断面力、応力と打設圧の関係

5. おわりに

シールドを用いた場所打ち支保システム (SENS) では周辺地山の変状、場所打ちライニングの断面力の挙動を把握することが重要となる。そこで、その施工過程を考慮し、解析的に表現することを目的として、三次元解析方法を提案した。そして、三本木原トンネルをモデルとした三次元解析を実施し、打設圧をパラメータとして変化させたケースの解析を行い、打設圧の大小の影響を検討した。その結果、以下のことが判明した。

- トンネル直上での地山鉛直変位は、シールド掘削時に沈下し、テール通過の際に打設により隆起傾向になる。また、内型枠の脱型後に、場所打ちライニングの変形により沈下傾向を示す。
- 場所打ちライニングの断面力は脱型後に増加し、特に、軸力は全周にわたって増加する。また、場所打ちライニングに発生している曲げモーメントは小さい値であり、SENSによる場所打ちライニングは軸力が卓越した構造物であるといえる。
- 打設圧は周辺地山の変状に及ぼす影響が大きく、打設圧は大きくなるほど地山は大きく押し拡がり、近接構造物がある場合には、これに大きい影響を及ぼすと考えられる。
- 打設圧のパラメータスタディにより、打設圧は大きくなるほど、場所打ちライニングの軸力が大きくなるが、曲げモーメントは若干小さくなる。
- 今回の解析により、打設圧は地山初期応力より若干高い圧力 ($P_c/\sigma_v=1.00\sim1.25$) で管理する場合は地山の変位を抑制することができる。しかし、高打設圧 ($P_c/\sigma_v>1.50$) で施工

した場合は地山を大きく押し拡げ、地表面を隆起させる可能性がある。

今後は、現場計測結果と比較し、本解析手法の妥当性検討を行っていく予定である。また、打設圧と場所打ちライニングに作用する荷重の具体的な関係、場所打ちライニングの設計荷重の確立を図っていく所存である。

謝辞：本原稿のとりまとめに際して貴重な助言やご指摘を頂いた「東北新幹線トンネル施工技術委員会 機械化施工WG」(主査：田村武京都大学大学院教授)の委員各位ならびに、関係者に、この場を借りて深い感謝の意を表します。

参考文献

- 飯田廣臣, 磯谷篤実, 井浦智実, 川嶋潤二, 小西真治: シールドを用いた場所打ち支保システムの施工, トンネル工学報告集第14巻, pp. 195-202, 2004.
- 日本鉄道建設公団: 併進工法設計施工指針(案)都市トンネル編, 1994.
- 笹尾春夫, 熊耳哲雄, 堀地紀行, 田代美樹男, 鬼頭誠: 北陸新幹線秋間トンネルにおける計測結果(2)併進工法(ECL)での地山変位計測, 覆工応力の解析, 第49回土木学会年次学術講演会, pp. 1266-1267, 1994.
- 荻迫栄治, 後藤茂, 杉山博一: ECL覆工に作用する土圧の評価解析, 第55回土木学会年次学術講演会, pp. 314-315, 2000.
- 荻迫栄治, 後藤茂, 杉山博一: ECLシールド覆工体の断面力算定のための有限要素法解析, 第57回土木学会年次学術講演会, pp. 349-350, 2002.

- 6) 土木学会：トンネル標準示方書 シールド工法・同解説，2006.
- 7) 建設省土木研究所：トンネル掘削時地盤変状の予測・対策マニュアル（案），1995.