

トンネルのFEM解析における Duncan-Changモデルの適用性について

浅野 達也¹・土門 剛²・西村 和夫²

¹学生会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: asano-tatsuya@ed.tmu.ac.jp

²正会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

FEM解析では、解析領域の設定によって得られる結果が異なるという問題と、実際の変位と比べてトンネル下部の隆起量が過大に算出される解析上のリバウンドの問題があることが知られている。既往研究ではこれらの問題に対して、拘束圧依存性と載荷、除荷過程で異なる弾性係数を考慮できるDuncan-Changモデルを用いることで抑制できることを明らかにした。しかし、実際のトンネル解析にDuncan-Changモデルのような構成則が適用される事例は少ない。そこで、本研究では、Duncan-Changモデルの適用方法について検討し、Duncan-Changモデルの有用性について明らかにした。

Key Words : FEM analysis, analytical region, unloading stress path, Duncan-Chang model

1. はじめに

近年、経済性や断面形状の自由度、補助工法に関する技術開発の進展などの理由から山岳トンネルの標準工法であるNATMが都市部に多く導入されている。土被りが小さな都市部での施工においては、周辺構造物に影響を与える可能性が高いため、一般的に数値解析によって地表面沈下や周辺地盤の変位などを予測し、詳細な事前検討を行う必要がある。数値解析では、他の数値解析手法よりも取り扱いやすいことなどを理由にFEMが多く利用されている。

その一方で、FEM解析では、解析領域の設定によって得られる結果が異なるという問題と、実際の変位と比べてトンネル下部の隆起量が過大に算出される解析上のリバウンドの問題があることが知られている。そして、解析領域の設定については様々な研究¹⁾⁹⁾がおこなわれている。しかし、解析領域の設定による影響を検討する上で、下方領域を大きくとるほど地中内および地表面の鉛直変位が大きくなる問題やトンネル下部での解析上のリバウンドの問題を根本的に解決するまでには至っていない。

田村ら³⁾は深さ方向に線形的に増加する弾性係数を仮定することで解析領域の拡大とともに変位が増加していく傾向をある程度抑制できることを明らかにしている。

水谷ら⁵⁾は解析上のリバウンドに対して下方領域を1D

程度と小さくすることでこの問題を抑制している。

「地盤は無限に広がっていると考え、外側境界の影響を取り除くために解析領域は十分大きくとる」という考えが一般的となっているが、明確な基準がないため、解析に応じて解析領域の設定を行っているのが現状である。

そこで、筆者らは、解析領域の設定による影響や解析上のリバウンドの問題を抑制することを目的として、Duncan-Changモデルを用いて、拘束圧依存性と載荷、除荷過程で異なる弾性係数を考慮した解析を行った。その結果、解析領域によらず地表面沈下量が一致し、解析上のリバウンドを抑制することを明らかにした¹⁰⁾。図-1はDuncan-Changモデルで除荷過程を考慮した場合の地表面沈下量の解析結果を示している。解析モデルはトンネル径を1Dとして下方領域Hd、側方領域Hsを変化させた。

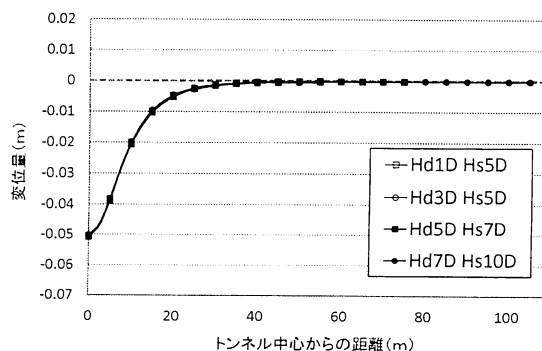


図-1 Duncan-Chang 地表面沈下量¹⁰⁾

トンネル解析において、Duncan-Changモデルのように拘束圧依存性や載荷、除荷過程で異なる弾性係数を考慮した例はあまりなく、これらを考慮することによる有用性は不明である。

本研究では、Duncan-Changモデルの有用性、実用性を明らかにすることを目的とした。そこで、実際のトンネル現場における計測データを用いて、FEM解析で一般的に用いられるMohr-Coulombの降伏基準を適用した弾完全塑性モデル（以下、Mohr-Coulombモデル）とDuncan-Changモデルの解析結果を比較することで、Duncan-Changモデルの有用性を明らかにし、Duncan-Changモデルの適用方法についても検討を行った。

また、Duncan-Changモデルの解析結果をもとに、Mohr-Coulombモデルを用いて除荷過程を考慮する方法についても検討を行った。

2. Duncan-Changモデルの概要

(1) 応力-ひずみ関係

Duncan-Changモデルは、応力ひずみ関係を双曲線で表現した非線形弾性モデルである。このモデルでは、図-2に示したように、応力状態に応じてその傾きが初期弾性係数 E_0 、接線弾性係数 E_t 、除荷および再載荷弾性係数 E_{ur} の3つに定義される。なお、載荷時の応力経路は非線形であるが、除荷時の応力経路は線形となる。双曲線に対する漸近線は粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ で定義されるMohr-Coulombの破壊基準によって決定される（図-2）。各弾性係数はそれぞれ次式によって表される。

$$E_0 = K \cdot P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (1)$$

$$E_t = \left(1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3) (1 - \sin \phi)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right)^2 E_0 \quad (2)$$

$$E_{ur} = K_{ur} \cdot P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (3)$$

ここで、 K は初期載荷係数、 n は初期剛性と拘束圧依存性を表すパラメータ、 P_a は大気圧、 R_f は破壊比、 K_{ur} は除荷-再載荷係数、 σ_3 は拘束圧である。破壊比 R_f は双曲

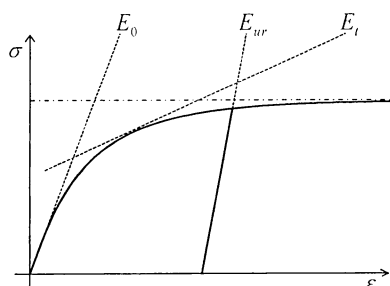


図-2 Duncan-Chang モデル 応力-ひずみ関係

線に対する漸近線と最大せん断強度の比で表され、 c 、 ϕ で決定される漸近線に対して任意の位置でせん断強度を定義できる。

(2) 拘束圧依存性

Duncan-Changモデルは除荷過程を考慮できるだけでなく、拘束圧依存による剛性変化も考慮することができる。これにより地盤の深さ方向に対する土圧の増加にもなった弾性係数の増加を表現できる。

3. Duncan-Changモデルのパラメータ設定

(1) K , n の設定

Duncan-Changモデルのパラメータ n 、 K を決定するためには、三軸圧縮試験を複数の拘束圧条件下で行い、拘束圧と弾性係数の関係を求める必要がある。しかし、トンネル施工の事前調査において、そのような試験が行われることは少ない。

Duncanらの実験結果¹¹⁾では密な砂であれば $n = 0.54$ 、緩い砂であれば $n = 0.65$ となっている。また、堀田¹²⁾は初期ヤング率と有効上載圧の相関関係を評価した場合、初期ヤング率は有効上載圧の0.48乗に比例するとして、既往の知見と一致するとしている。このことから、 $n = 0.5$ 程度が一般的な値であると考えられる。本研究では、載荷とは異なる除荷過程を考慮したことによる効果を明らかにするため、 $n = 0$ とし、拘束圧依存性を考慮しないこととした。

K 、 R_f は、Mohr-Coulombモデルの応力-ひずみ関係とできるだけ近似させることで決定した。Duncan-Changモデルの初期弾性係数 E_0 とMohr-Coulombモデルの弾性係数 E が等しくなっている。

(2) K_{ur} (E_{ur}) の設定

今回対象としたAトンネルでは、孔内水平載荷試験による繰り返し載荷が実施されている（図-3）。この試験

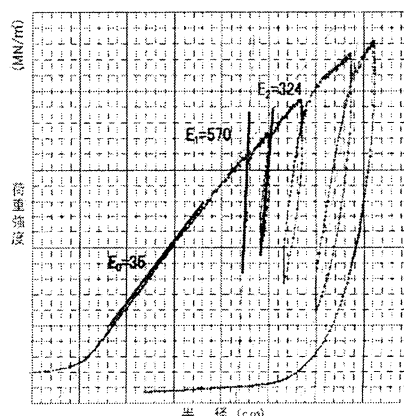


図-3 孔内水平載荷試験の計測結果例

表-1 Mohr-Coulomb 物性値 標準断面

	$E(kN/m^2)$	$\nu(kN/m^3)$	ν	$\phi(deg)$	$c(kN/m^2)$
Ag	6480	19	0.35	35	45
Mkt1	35000				
Mkt2	168000	0.3		36	510
Ts上	540000			26	880
Tm上	756000			23	1100
Ts下	394000			26	880
Tm下	744000			23	1100

表-2 Duncan-Chang 物性値 標準断面

	K	γ (kN/m ³)	ν	ϕ (deg)	c (kN/m ²)	P_a (kN/m ²)	n	R _f	K _{ur}	(Eur/E)
Abg	60	19	0.35	35	45	101.325	0	1.0	1920	32
Mkt1	350							1.0	7700	22
Mkt2	1660			24	510			1.0	11620	7
Ts上	5330	18	0.3	26	880			1.0	21320	4
Tm上	7460	17.5		23	1100			1.0	37300	5
Ts下	3890	18		26	880			1.0	31120	8
Tm下	7340	17.5		23	1100			1.0	44040	6

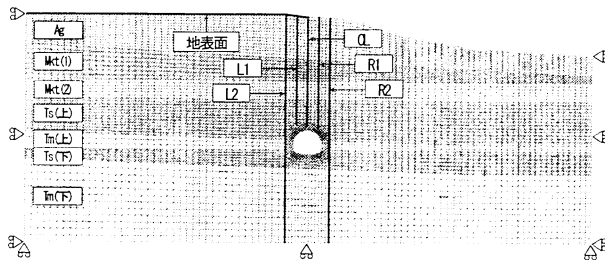


図-4 解析モデル 標準断面

より繰り返し載荷-除荷時のひずみ量とその時の弾性係数をプロットすることで、ひずみ量と弾性係数の関係が求まる。そこから、ひずみが0.1%時の弾性係数を算出し、Duncan-Changモデルの除荷時の弾性係数 $E_{\sigma'}$ として設定した。 $K_{\sigma'}$ は n 、 P_a 、 σ_3 を(3)式に代入することで求めることができる。本研究では $n=0$ としているので、 $K_{\sigma'}$ は $E_{\sigma'}/P_a$ として求められる。

4. 実トンネルによる検討

実トンネルの解析を行い、Duncan-Changモデルの解析結果を実測値とMohr-Coulombモデルの解析結果の両者と比較することで、Duncan-Changモデルの有用性を検討する。複線トンネルを山岳NATMで施工しているAトンネルの標準断面部と駅部大断面部を対象とした。標準断面はベンチカット工法が用いられ、駅部大断面では中壁分割工法が用いられている。

(1) Aトンネル(標準断面)

a) 解析条件

Mohr-Coulombモデル、Duncan-Changモデルの物性値をそれぞれ表-1、表-2に示す。

解析モデルを図-4に示す。トンネル径(1D)は約8.6mである。解析領域は土被りが約4Dであることを考慮して、下方領域を約3D、側方領域を約10Dとした。境界条件は3辺ローラ支持としている。

吹付コンクリートと鋼製支保工は、はり要素でモデル化した。なお、実際にはロックボルトが用いられているが、解析では考慮していない。

$E_{\sigma'}$ については3.(2)節で述べた方法を用いて算出した。その結果、弾性係数が比較的小さい上層部では、 $E_{\sigma'}/E$ が大きな値となった。それ以外の層では除荷時弾性係数

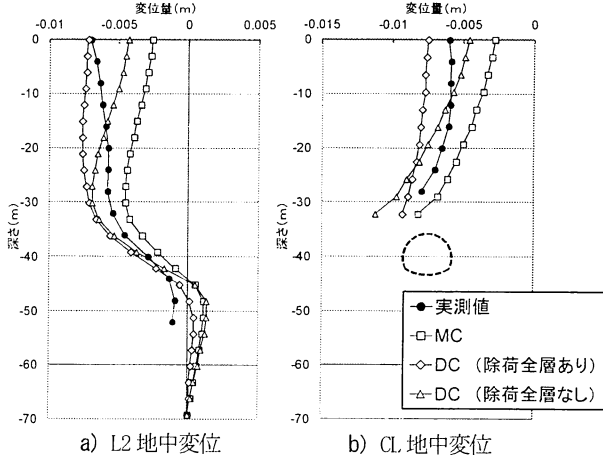


図-5 地中変位 標準断面

は載荷時の4~8倍程度の値となっている(表-2)。

b) 解析結果

変位の測定位置は地表面、L1、R1(トンネル中心から3.25m)、L2、R2(トンネル中心から6.5m)、CL(トンネル中心軸)となっており、解析結果も同じ位置で検討した。

L2、CL地中変位の結果を図-5に示す。MCはMohr-Coulombモデルを示し、表-1に示した物性値を用いている。DC(除荷全層あり)は、Duncan-Changで除荷過程を考慮した場合を示し、表-2に示した物性値を用いている。DC(除荷全層なし)は $K_{\sigma'}$ の設定していないケース、つまり $E_{\sigma'}=E_0$ としている。

L2地中変位の解析結果では、Duncan-Changモデルで除荷過程を考慮した場合、Mohr-Coulombモデルや除荷過程を考慮していない場合と比べて、トンネル下部での隆起量が小さく解析上のリバウンドが抑制されている。実測値を見ると、トンネル上部では地表面に向かって変位量が増加していく挙動を示している。しかし、解析ではこの傾向を再現することはできていない。

CL地中変位の実測値では、深さ15m程度までは変位量が一定で、トンネル周辺で変位が増加する傾向を示している。Duncan-Changモデルで除荷過程を考慮していない場合やMohr-Coulombモデルでは、地表面から常に変位が増加していく傾向を示しており、深さ15m程度までの実測値とは挙動が異なる。しかし、Duncan-Changモデルで除荷過程を考慮した場合、実測値に近い挙動を示している。また、深さ15m~30m程度では、Duncan-Changモデルで除荷過程を考慮していない場合とMohr-Coulombモデル

表-3 Mohr-Coulomb 物性値 駅部大断面

	E(kN/m ²)	ν (kN/m ³)	ν	ϕ (deg)	c(kN/m ²)
Ag上	15000	19	0.35	35	45
Ag下	50000				
Tm上	60000	17.5	0.3	23	1100
Ts上	330000			26	880
Tm下1	150000			23	1100
Ts下1	280000			26	880
Tm下2	150000			23	1100
Ts下2	280000			26	880

表-4 Duncan-Chang 物性値 駅部大断面

	K	ν (kN/m ³)	ν	ϕ (deg)	c(kN/m ²)	Pa(kN/m ²)	n	Rf	Kur	(Eur/E)
Abg上	150	19	0.35	35	45	101.325	0	1.0	6600	44
Abg下	490							1.0	21560	44
Tm上	590	17.5	0.3	23	1100			1.0	5310	9
Ts上	1480			26	880			1.0	5920	4
Tm下1	3260			23	1100			1.0	26080	8
Ts下1	2760			26	880			1.0	19320	7
Tm下2	3260			23	1100			1.0	26080	8
Ts下2	2760			26	880			1.0	19320	7

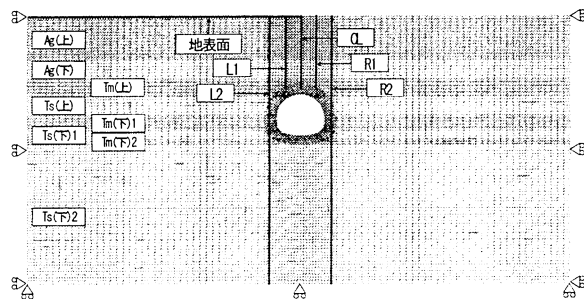


図-6 解析モデル 駅部大断面

の挙動が一致している。

(2) Aトンネル (駅部大断面)

a) 解析条件

Mohr-Coulombモデル, Duncan-Changモデルの物性値をそれぞれ表-3, 表-4に示す。

解析モデルを図-6に示す。トンネル径(1D)は約15mである。解析領域は土被りが1Dであることから, 下方領域3D, 側方領域5Dとした。境界条件は3辺ローラ支持としている。

吹付コンクリートと鋼製支保工は, はり要素でモデル化した。なお, 実際にはロックボルトが用いられているが, 解析では考慮していない。

b) 解析結果

変位の測定位置は地表面, L1, R1(トンネル中心から4.9m), L2, R2(トンネル中心から9.8m), CL(トンネル中心軸)となっており, 解析結果も同じ位置で検討した。

L2, CL地中変位の解析結果を図-7に示す。L2地中変位の解析結果ではDuncan-Changモデルで除荷過程を考慮した場合, トンネル下部での解析上のリバウンドが抑制されている。しかし, 実測値と比べて変位量が大きく異なる。

駅部大断面では中壁分割工法による掘削が行われおり, 中壁の撤去前と後で観測された変位量の差は小さい。載荷試験をもとに想定していたより実際には地盤が良く, 弾性係数が大きかったため, 変位差が出なかったと考えられる。そこで, 弾性係数を3倍として再度解析を行った。弾性係数を3倍とした場合のL2, CL地中変位の解析結果を図-8に示す。各モデルにおいても変位量が小さくなり, 実測値に近づいている。

CL地中変位の解析結果では, Mohr-Coulombモデルの

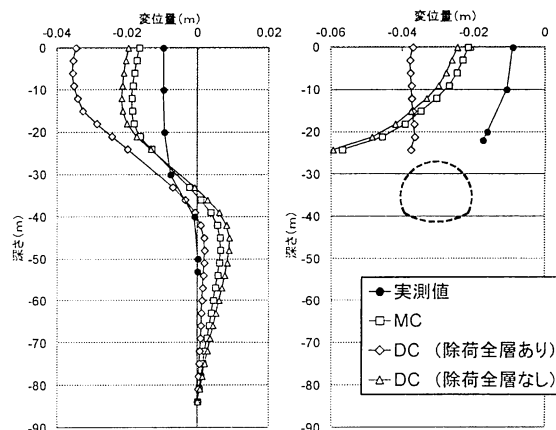


図-7 地中変位 駅部大断面

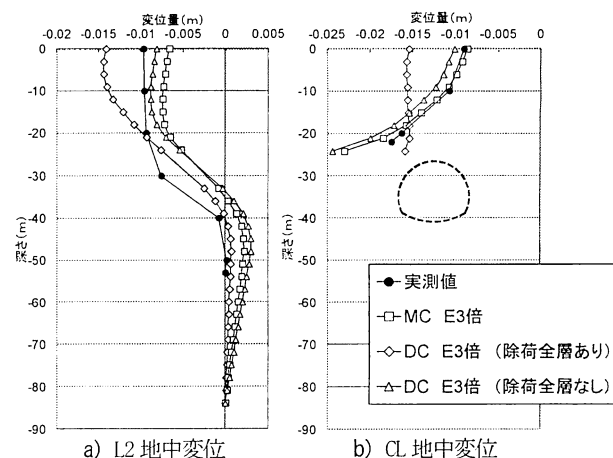


図-8 地中変位 E3倍 駅部大断面

変位挙動, 変位量ともに実測値とほぼ一致している。しかし, Duncan-Changモデルで除荷過程を考慮した場合, 実測値の変位挙動とは異なっている。沈下量が深さによらず一定となっており, とも下がりの変位挙動を示している。この傾向は, 標準断面の解析結果でも表れている。Duncan-Changモデルで除荷過程を考慮していない場合では, この傾向は表れていないことから, 除荷過程の考慮の有無が大きく影響していることが分かる。このことから, 解析ではトンネル上部においても除荷領域が生じており, 除荷領域では載荷領域と比べて弾性係数が大きい。ため, 剛体として動くことで, 沈下量が一定となり, とも下がりの変位挙動を示したと考えられる。

駅部大断面においても標準断面の解析結果と同様に,

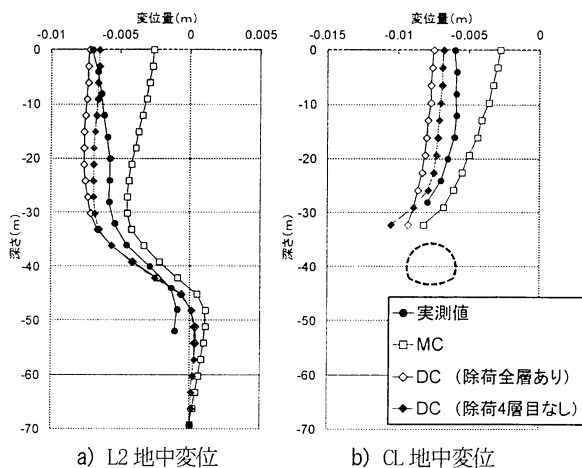


図-9 地中変位 除荷過程の考慮の違い 標準断面

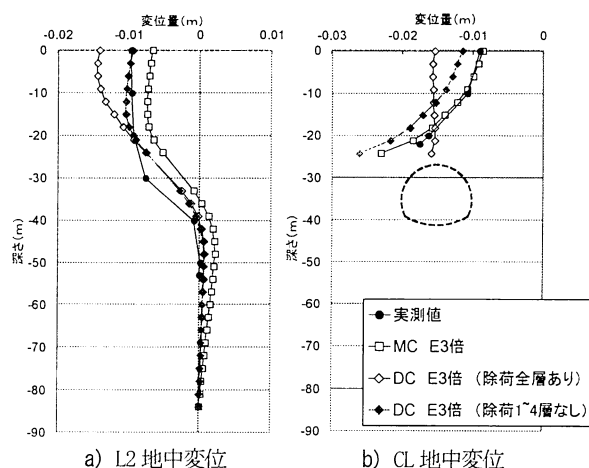


図-10 地中変位 除荷過程の考慮の違い 駅部大断面

トンネル上部の変位挙動は除荷過程を考慮しない場合が実測値に近い挙動を示す結果となった。

(3) Aトンネルにおける除荷過程の再検討

(1), (2)節から除荷過程の考慮の有無によって変位挙動が異なることが明らかになった。特に駅部大断面のCL地中変位の解析結果(図-8)では、Duncan-Changモデルで除荷過程を考慮した場合よりも除荷過程を考慮していない場合の方が実測値に近い挙動を示している。また、標準断面のCL地中変位の解析結果(図-5)では地表面付近ではDuncan-Changモデルで除荷過程を考慮した場合が実測値に近い挙動を示し、トンネル周辺では、除荷過程を考慮していない場合が実測値に近い挙動を示している。

そこで、地層ごとに除荷過程の考慮を行う。L2地中変位の解析結果において、トンネル下部では変位挙動が一致していることから、トンネル上部における除荷過程を考慮しないケースを検討した。

標準断面のL2、CL地中変位の解析結果を図-9に示す。トンネル上部の4層目(図-4のTs(上)で示される層)で除荷過程を考慮していないケースでは、全層で除荷過程を考慮したケースに比べて実測値に近い挙動を示しており、地表面付近の変位が一定である挙動とトンネル周辺で変位が増加する挙動がよく再現できている。

駅部大断面のL2、CL地中変位の解析結果を図-10に示す。1-4層目(図-5のAgからTs(上)までの層)の除荷過程を考慮していないケースが、実測値の変位挙動に近づいている。全層で除荷過程を考慮しないケースでは、解析上のリバウンドが抑制されないが、トンネル上部の層だけを考慮しない場合は抑制されている。標準断面と同様にMohr-Coulombモデルと比べて、トンネルインバート部の隆起量(絶対変位量)は1/5程度に抑制されている。

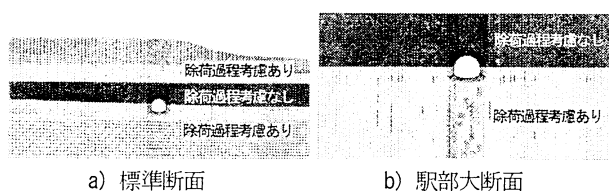


図-11 除荷過程を考慮する領域

除荷過程を考慮しなかった領域を図-11に示す。トンネル天端部より1.5D~2.0D程度上部からトンネル上半を含む層の除荷過程を考慮しないことで実測値に近い結果を得られることが分かった。この結果より、実際のトンネル掘削においてもトンネルの上部で除荷が生じている場合、トンネル上部での除荷時の応力経路は載荷時と比べてあまり大きくならないことが考えられる。

5. 除荷時弾性係数の簡略化

今回の解析では繰り返し載荷試験の結果をもとに除荷時弾性係数の設定を行った。しかし、実際のトンネルでは除荷時の弾性係数を求める試験が行われることはあまりない。そこで、Aトンネルの解析結果を参考にして、汎用的に用いることができる除荷時弾性係数 E_{σ} の値について検討を行う。

標準断面の場合、除荷時弾性係数は載荷時の4~32倍の範囲で変化しており、平均すると12倍となっている(表-2)。駅部大断面の場合、除荷時弾性係数は載荷時の4~32倍の範囲で変化しており、平均すると約16倍となっている(表-4)。除荷時弾性係数は一般に3倍程度と言われており、かなり大きな値を適用していることになる。

Changの実験結果¹³⁾では、除荷時弾性係数は載荷時の3~5倍程度となるとしている。しかし、(旧)日本鉄道建

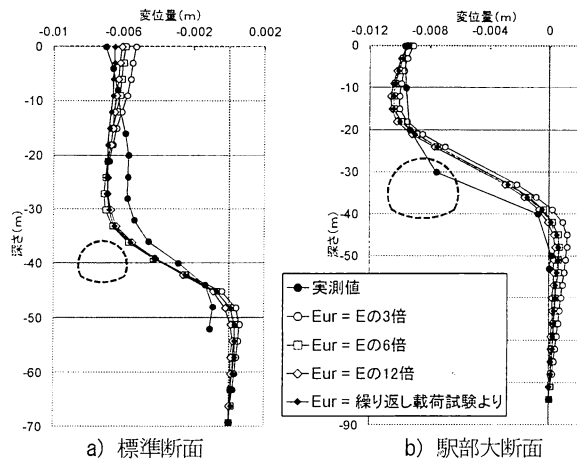


図-12 除荷時弾性係数の検討 L2 地中変位

設公団の「深い掘削土留工設計法¹⁴⁾」では、リバウンドの計測値より除荷時変形係数補正案を孔内載荷処女荷重時の平均12倍としている。また、図-3に示すようにひずみ量に応じてその値は変化することから、除荷時弾性係数は検討方法によってばらつきがあると考えられる。そこで、除荷時弾性係数を載荷時の3倍、6倍、12倍の3ケースで検討を行い、除荷過程を考慮するすべての層に対して統一的に適用を行った。

標準断面で4層目の除荷過程を考慮していないケースと駅部大断面で1~4層目の除荷過程を考慮していないケースのL2地中変位の解析結果をそれぞれ図-12に示す。各除荷時弾性係数の設定によって変位に大きな違いは生じていない。これはCL地中変位の解析結果においても同様であった。解析上のリバウンドのみに着目すれば、 E_{ur} は大きい方が望ましい。よって、除荷時弾性係数は載荷時の12倍程度とすれば、繰り返し載荷試験をもとに設定した場合の解析結果とほとんど変わらない結果を得ることができる。

この結果より、トンネル解析においてDuncan-Changモデルを適用する場合、 E_{ur} は E の12倍程度とすればよいと考えられる。

6. 弾塑性解析による除荷領域の考慮

本研究では、載荷とは異なる除荷過程を考慮するためにDuncan-Changモデルを用いた。しかし、一般には弾塑性モデルが用いられることが多い。そこで、Duncan-Changモデルの解析結果より、載荷、除荷領域を把握し、Mohr-Coulombモデルを用いて除荷領域に対して、あらかじめ弾性係数を大きくしておくことで、除荷過程を考慮した場合と同じ結果が得られないかを検討する。

FEM解析において、載荷、除荷の判定は塑性領域であ

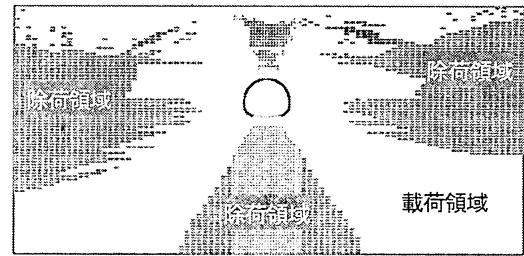


図-13 最大せん断応力による除荷領域 駅部大断面

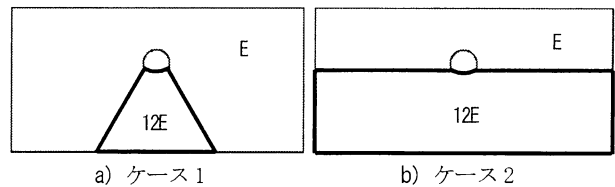


図-14 弾塑性解析における除荷領域

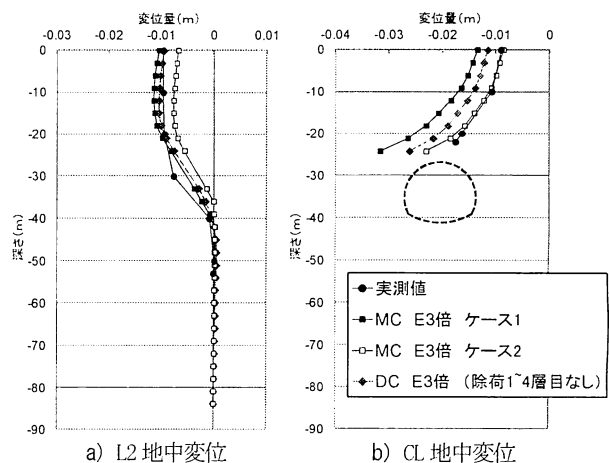


図-15 地中変位 駅部大断面

れば降伏関数を用いられる。Duncan-Changモデルでは、Tresca応力（軸差応力）によって判定が行われる。Tresca応力の1/2が最大せん断応力となる。そこで、最大せん断応力を用いて、初期応力状態と掘削後の応力状態における応力の増減を判定することで掘削による応力経路が載荷、除荷のどちらであったか判断することができると考えた。

最大せん断応力によって判定した駅部大断面における除荷領域を図-13に示す。標準断面においてもほぼ同様の結果を示した。除荷領域はトンネル下部だけではなく、トンネル上部や側方に広がっていることが分かる。トンネル側方での相当応力の減少量はわずかであり、変位に対してはほとんど影響を与えないと考えられる。また、駅部大断面では、4.(3)節での検討においてトンネル上部の除荷過程は考慮しない方が実測値に近い挙動を示したことから、弾塑性解析において除荷時弾性係数を設定する領域は図-14 a)に示すようにした。また、図-14 b)

表-5 内空変位 駅部大断面

	Mohr-Coulomb E3倍			Duncan-Chang E3倍 (除荷1/4層目なし)
	通常	ケース1	ケース2	
天盤沈下量	-23.76	-23.76	-32.24	-22.40
インバート隆起量	9.38	0.77	1.07	1.60
内空変位 S.L.	-1.58	-3.01	6.27	-1.90

(mm) 沈下/縮み -
隆起/伸び +

のようにさらに簡略化したケース2による比較も行った。除荷領域の弾性係数は12倍としている。駅部大断面のL2, CL地中変位の解析結果をそれぞれ図-15に示す。

トンネル下部の弾性係数を大きくすることで、それぞれ解析上のリバウンドは抑制されている。ケース2では、変位量に大きな変化は見られない。ケース1では、変位量が相対的に増加している。地中変位のみを比較した場合、どちらのケースも変位挙動は実測値に近く、実際の変位挙動を捉えた結果が得られているように見える。しかし、トンネル内空変位を比較すると、ケース1では側壁部が外側に向かって引っ張られており、実測値とは異なる挙動を示している(表-5)。また、トンネル周辺の主応力ではDuncan-Changモデルではトンネル周辺は圧縮を示しているのに対して、ケース1およびケース2ではトンネルインバート付近に引張応力が発生している。これらは、各掘削段階ごとに载荷、除荷領域が考慮されていないことや、掘削部分では除荷領域が考慮できていないことなどが要因として考えられる。

弾塑性解析において除荷領域を考慮する手法を用いて、実測値やDuncan-Changモデルを適用した場合の解析結果と同様の結果を再現するにはさらに検討を行っていく必要がある。

7. 結論

既往の研究において、Duncan-Changモデルで除荷過程を考慮することによって、解析領域の設定によって結果が異なる問題や解析上のリバウンドが抑制できることは明らかになっていたが、トンネル解析において、Duncan-Changモデルのような拘束圧依存性や除荷過程を考慮したモデルを適用されることが無く、その有用性は不明確であった。しかし、実トンネルの解析を行った結果、Duncan-Changモデルで载荷、除荷で異なる応力経路を考慮することで実測値に近い結果を得ることができ、有用性を確認することができた。

Aトンネル標準断面と駅部大断面を対象にDuncan-Changモデルを適用した結果、以下のことが明らかになった。

- ① E_{or} を繰り返し载荷試験の結果をもとに設定を行い、トンネル上部の1.5D-2.0D程度の層において除荷時

の応力経路を载荷時と同様とすることで実測値に近い変位挙動を示した。さらに、 E_{or} を E の12倍程度とすることで繰り返し载荷試験をもとに設定したものと同程度の解析結果を得ることができた。

- ② 最大せん断応力を用いて応力の载荷、除荷を判定した場合、トンネル下部だけではなく、トンネル上部にも広がっていることが分かった。そして、弾塑性解析においてこの除荷領域をモデル化することで、解析上のリバウンドは抑制することができたが、トンネルの変形モードや応力状態は大きく異なる結果が生じてしまった。
- ③ 载荷、除荷で異なる応力経路を考慮した場合としていない場合では解析結果に大きな違いが生じた。本研究では、実測値の挙動から除荷過程を考慮する領域を決定したが、実際のトンネル施工における载荷、除荷領域は不明である。解析において実現を再現するためには除荷がどのように生じているか検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 久武勝保：トンネル建設における地盤沈下解析法に関する考察，トンネルと地下，第40巻2号，pp.135-142，2009.
- 2) 森崎泰隆，蔣宇静：数値解析による地表面沈下の評価に関する一考察，トンネルと地下，第38巻2号，pp.43-50，2007.
- 3) 田村武，足立紀尚：トンネル掘削における領域設定の影響，土木学会論文集，No701/III-58，pp.231-242，2002.
- 4) 久武勝保，山崎康裕：トンネル沈下のFEM結果に及ぼす解析領域の影響，トンネルと地下，第32巻11号，pp.45-50，2001.
- 5) 水谷弘次，山本秀樹，木谷努，岡島正樹，海瀬忍：FEMによる地盤変状解析における下方領域の重要性，土木学会年次学術講演会概要集第3部(B)，第56巻，pp.132-133，2001.
- 6) 関森貴紀，土屋敬，小野田滋，宮崎健治：トンネル掘削による地表面沈下解析における領域の影響，土木学会年次学術講演会概要集第3部，第48巻，pp.242-243，1993.
- 7) 角湯克典，猪熊明，山村浩介：未固結含水地山トンネルにおける地盤変状予測に関する考察，トンネル工学研究発表会論文・報告集，第1巻，pp.159-165，1991.
- 8) 朝位充，鈴木健之，土門剛，西村和夫：トンネルのFEM解析における解析領域の影響，トンネル工学報告集，第19巻，pp.125-132，2009.
- 9) 朝位充，鈴木健之，土門剛，西村和夫：トンネルのFEM解析における解析領域の影響，トンネル工学報告集，第18巻，pp.91-96，2008.
- 10) 浅野達也，土門剛，西村和夫：FEM解析の領域設定における構成則の影響，トンネル工学報告集，第21巻，pp.9-15，2011.
- 11) James M.Duncan, Chin-Yung Chang: Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils, Proc.ASCE, Jour. of SM, Vol.96, No.SM5, pp.1629-1653, 1970.

- 12) 堀田洋之：拘束圧とひずみへの依存性を同時に考慮した
施工時の実測に基づく地盤の応力-ひずみ関係の評価,
日本建築学会構造系論文集, 第 608 号, pp61-68, 2006.
- 13) Chin-Yung Chang, James M.Duncan : Analysis of Soil movement
around a deep excavation, Proc.ASCE, Jour. of SM, Vol.96,
No.SM5, pp1655-1681, 1970.
- 14) 日本鉄道建設公団：深い掘削土留工設計法, 1993.

(2012. 9. 3 受付)

AN APPLICATION OF CONSTITUTIVE LAWS CONSIDERING UNLOADING STRESS PATH OF FEM ANALYSIS FOR SHALLOW TUNNELS

Tatsuya ASANO, Tsuyoshi DOMON and Kazuo NISHIMURA

Recently the tunnel constructions by using NATM is increasing in urban area. Surface settlement due to shallow tunneling may cause damage to existing structures and environmental hazards especially in urban area. In such a case, surface settlement is predicted using 2D FEM generally. However, it is well known that results of analysis using FEM is different by analytical region size. There is also a problem that analysis using FEM cause excessive rebound displacement. We have already made clear that these problems can be solved by application of Duncan-Chang model in constitutive laws, but this model is little used on FEM analysis for tunnels. This study discusses the method of application of Duncan-Chang model and the effect obtained by applying this model.