

FEM解析の領域設定における構成則の影響

浅野 達也¹・土門 剛²・西村 和夫²

¹学会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0364 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 (〒192-0364 東京都八王子市南大沢1-1)

本研究では、FEM解析において解析領域の設定によって解析結果が異なるという問題を、領域設定と構成則の観点から検討する。解析結果が異なる要因は、主にトンネル掘削をシミュレートする際に発生する掘削相当外力による影響が大きい。これによってトンネル下部では上向きの外力が作用するため、解析上のリバウンドが生じる。さらに、下方領域を大きくとるほどトンネル下方での鉛直変位が増加し、地表面の変位にも影響を与える。そこで、土の構成則に着目し、除荷過程を考慮したDuncan-Changモデルを用いることでトンネル下方での変位を抑制し、解析領域による影響の抑制効果を明らかにした。そして、実際のトンネル現場の解析を行い、実測データと比較することでDuncan-Changモデルの有効性を検討した。

Key Words : FEM analysis, analytical region, ground surface settlements, unloading stress path

1. はじめに

近年では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本来は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。都市部で土被りが小さい施工ケースにおいては、周辺構造物に多大な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事前に調査する。数値解析の中でもFEM解析は、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地表面沈下量や地盤内鉛直応力の解析結果が異なるということが知られている。

解析領域の設定について様々な研究^{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比例して大きくなる問題やトンネル下方での解析上のリバウンドに関してはあまり考慮されていない。

そこで、本研究では土の構成則に着目し、解析領域の設定や構成則の種類が解析結果に与える影響について検討し、解析領域の設定による影響を抑制することを目的としている。

2. 解析手法

(1) 解析ケース

解析領域の設定によって解析結果がどのように異なるのか検討するために、Mohr-Coulombモデルを用いて下方領域、側方領域を変化させた解析を行った。

解析結果の地表面沈下量、地盤内鉛直応力、トンネル中心軸上変位、およびトンネル中心軸上主応力を用いて解析領域の設定による影響を検討した。

さらに、構成則によって解析領域の設定による影響の抑制を検討するために電中研式モデル、Duncan-Changモデルで除荷過程の考慮をしていないものと考慮したものをを用いて、Mohr-Coulombモデルと同様の解析を実施した。

(2) 解析モデル

解析モデルはトンネル形状を円形とし、素掘りトンネルとしている。境界条件は下方、側方ともにローラ支持である。解析モデルを図-1に示す。

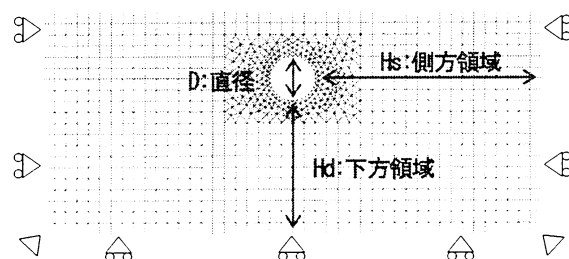


図-1 解析メッシュ図

表-1 Mohr-Coulomb 物性値

変形係数	ポアソン比	単位体積重量	粘着力	内部摩擦角
$E \text{ (kN/m}^2\text{)}$	ν	$\gamma_i \text{ (kN/m}^3\text{)}$	c	$\phi \text{ (deg)}$
35000	0.35	16	40	30

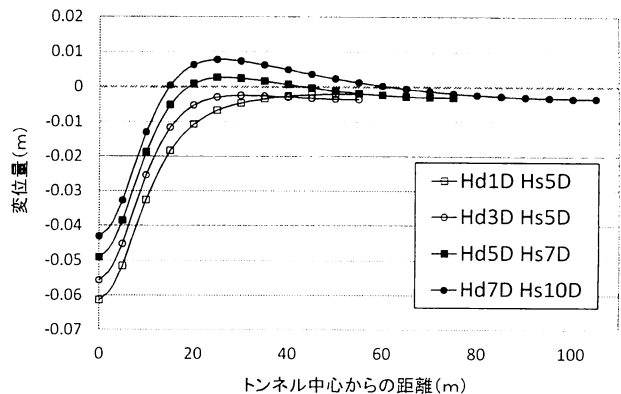
表-2 電中研式 物性値

変形係数	破壊時変形係数	初期ポアソン比	破壊時ポアソン比	単位体積重量	せん断強度	引張強度	緩み係数	非線形パラメータ	非線形特性指数	非線形特性指数
$E \text{ (kN/m}^2\text{)}$	$E_f \text{ (kN/m}^2\text{)}$	ν_0	ν_f	$\gamma_i \text{ (kN/m}^3\text{)}$	$\tau_R \text{ (kN/m}^2\text{)}$	$\sigma_t \text{ (kN/m}^2\text{)}$	k	a	$m(E)$	$n(\nu)$
35000	35	0.35	0.45	16	40	70	2	1	1	0.5

表-3 Duncan-Chang 物性値

初期載荷係数	ポアソン比	単位体積重量	粘着力	内部摩擦角	初期剛性を表すパラメータ	破壊比	最小接線係数	最小拘束圧	大気圧
K	ν	$\gamma_i \text{ (kN/m}^3\text{)}$	c	$\phi \text{ (deg)}$	n	R_f		$\sigma_{mn} \text{ (kN/m}^2\text{)}$	$P_a \text{ (kN/m}^2\text{)}$
1375	0.35	16	40	30	0.3	1	101.325	1.01325	101.325

Mohr-Coulombの物性値を「山岳トンネル設計施工標準・同解説¹⁰⁾」の地山等級S1を参考に設定した。電中研とDuncan-Changの物性値はMohr-Coulombの応力-ひずみ関係とできるだけ近似させるようにパラメータ設定を行った。各構成則の物性値を表-1、表-2、表-3に示す。電中研式モデルの破壊包絡線は、Mohr-Coulombモデルの破壊基準と一致させるように設定している。このため、引張強度が高い値となっている。また、Duncan-Changモデルの破壊基準も同様に一致させるため破壊比を1とした。除荷過程を考慮する場合、除荷時の変形係数が載荷時のその3倍になるように考慮している。

図-2 Mohr-Coulomb 地表面沈下量
(土被り 1.0D)

3. FEM解析における問題点

Mohr-Coulombモデルによる解析結果から、FEM解析における問題点を明らかにする。

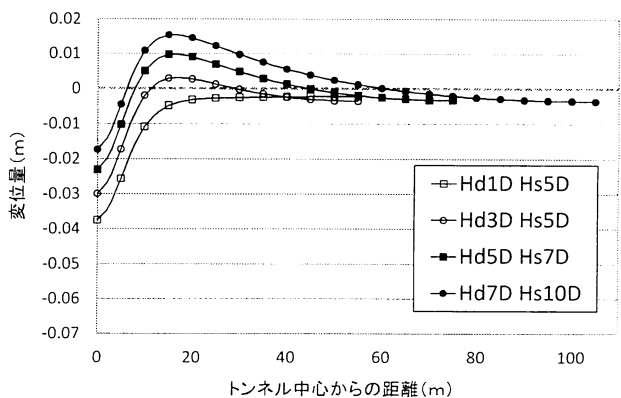
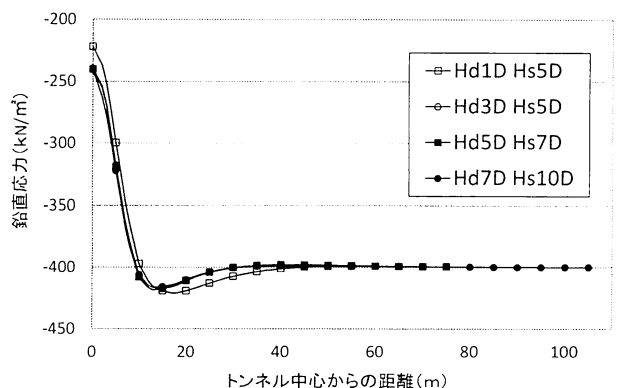
(1) 解析領域の設定による影響

解析領域の違いが解析結果にどのような影響を与えるのかを変位と応力の観点から示す。

地表面沈下量の結果を図-2に示す。解析領域は下方領域をHd、側方領域をHsとし、トンネル径1Dを基準として設定している。解析領域が増加するにしたがって変位量が隆起側に増加している。また、土被りを0.5Dに変化させた場合の結果を図-3に示す。土被りを小さくした場合、変位量が隆起に転じる解析領域が異なる。一般に、トンネル掘削において地表面で隆起が観測されることはあまりないため、解析領域を小さくとり、隆起が生じないような領域で検討が行われる。したがって、実務においては解析結果に応じて解析領域を決定せざるを得ない。

トンネル下部から5m位置での地盤内鉛直応力の結果を図-4に示す。Hd1D Hs5Dでは他の解析領域と鉛直応力が異なっており、応力がトンネル周辺に残留していると考えられる。これは下方領域の大きさに対して側方領域が小さい場合にも生じる。

地盤内鉛直応力の結果だけを見ると、解析領域はHd3D Hs5D以上とる必要があるといえる。

図-3 Mohr-Coulomb 地表面沈下量
(土被り 0.5D)図-4 Mohr-Coulomb 地盤内鉛直応力
(土被り 1.0D)

(2) 解析上のリバウンド

FEM解析において問題となるのは解析領域の設定による影響だけではない。

トンネル中心軸上の地中変位の結果を図-5に示す。トンネル下部で隆起(変位量プラス)が生じている。しかし、実際にトンネル下部で観測される隆起量は小さく、過大な解析結果が生じている。つまり、解析上のリバウンドが発生している。

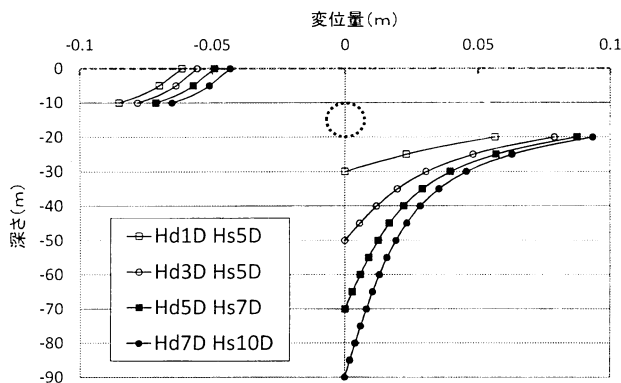


図-5 Mohr-Coulomb トンネル中心軸上の
地中変位 (土被り 1.0D)

(3) 問題点の要因

Mohr-Coulombモデルの結果から解析領域の設定によって結果が異なる要因について検討する。

図-6は施工段階ごとのトンネル掘削面に作用する力(掘削相当外力), および周辺の応力状態を示している。この掘削相当外力は図-6のようにトンネル下部で上向きの力が作用することで隆起(解析上のリバウンド)が発生する。そして、下方領域が大きくなると図-5のようにトンネル下部の鉛直変位量も増加していく。これが地表面に対しても影響を与えることで、解析領域の増加(ことも

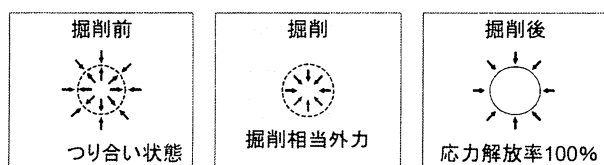


図-6 FEM 解析の掘削段階における応力状態

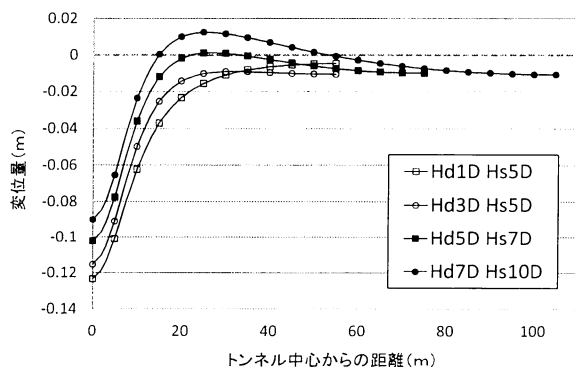


図-7 電中研式 地表面沈下量
(土被り 1.0D)

ない隆起が生じるようになる(図-2, 図-3)。

また、領域が小さい場合にはトンネル掘削によって解放される応力がトンネル遠方まで再配分されず、トンネル周辺に集中する。これにより地盤内鉛直応力に違いが生じるが、図-4を見ても明らかなように、ある程度領域を確保することで解消される。ただし、土被りによって応力の広がりには違いがあるため、土被り応じて側方領域を考慮する必要がある。

(4) まとめ

FEM解析において解析領域が解析結果に影響を与える要因として、①解析領域の増加(とくに、下方領域)にともない算出される変位の増加、②狭小な解析領域による応力の残留、という2つが挙げられる。

②はある程度の解析領域を確保することで影響はなくなる。しかし、①は解析領域の設定で抑制されることは少ない。そこで、構成則によって抑制することを第4章で検討する。

4. 他の構成則の解析結果

(1) 電中研式モデル(Dmin法)の解析結果

地表面沈下量の結果を図-7に示す。電中研式モデルは非線形性を考慮したモデルであるため、トンネル周辺で変形係数が小さくなり、Mohr-Coulombモデルの結果と比べて変位量が増加している。また、地盤内鉛直応力の結果はMohr-coulomb モデルの結果と同様にHd1Dでのみ影響がみられた。

非線形性のみを考慮したモデルでは解析領域の設定による影響は抑制できないことがわかる。

(2) Duncan-Changモデル(除荷過程非考慮)の解析結果

地表面沈下量の結果を図-8に示す。解析領域の設定による影響は少なく、ほぼ沈下量が一致している。

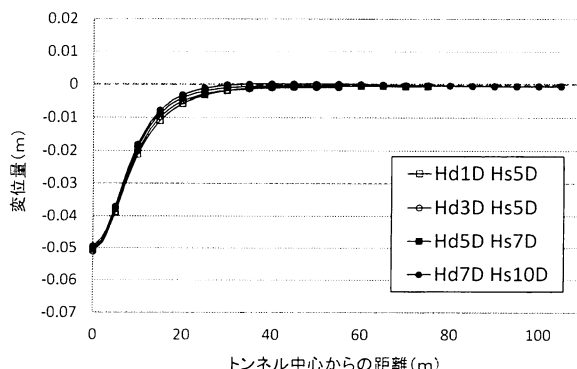


図-8 Duncan (除荷無) 地表面沈下量
(土被り 1.0D)

Duncan-Changモデルでは拘束圧依存による剛性変化があるため、深さ方向に対して土圧の増加とともに剛性も大きくなる。これより、下方領域が増加しても変形係数の大きい領域が増加するため、トンネル下部での変位が抑制され、解析領域の大きさに左右されず沈下量が一致したものと考えられる。

(3) 除荷過程を考慮したDuncan-Changモデルの解析結果

図-9に地表面沈下量の結果を示す。Duncan-Changモデルで除荷過程を考慮した場合は地表面沈下量は領域に影響を受けない。除荷過程を考慮していない場合よりも値が一致していることがわかる。

Hd3D Hs5D(土被り1D)としたときの各構成則におけるトンネル中心軸上の地中変位の結果を図-10に示す。Mohr-CoulombモデルとDuncan-Changモデルではトンネル上部での変位量が近い値であるのに対して、トンネル下部では大きく異なる。Duncan-Changモデルは解析上のリバウンドが抑制されている。さらに、除荷過程を考慮したことで拘束圧依存による剛性変化だけでなく、除荷領域において変形係数の増加があるため、トンネル下部での変位が除荷過程を考慮していない場合よりも抑制されている。

以上のことから、Duncan-Changモデルで除荷過程を考

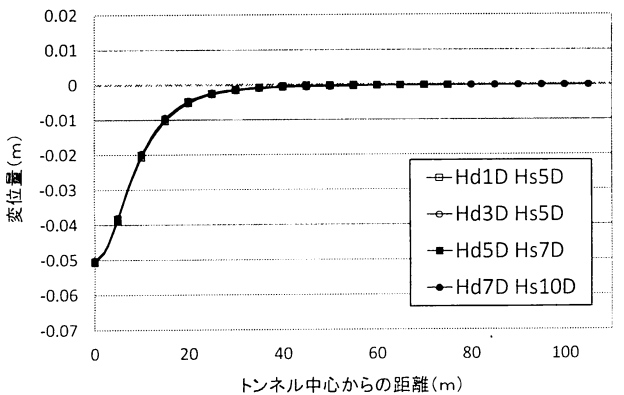


図-9 Duncan (除荷有) 地表面沈下量
(土被り 1.0D)

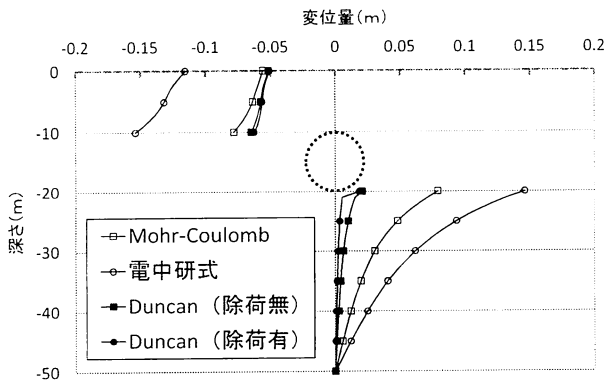


図-10 各構成則のトンネル中心軸上の
地中変位 (土被り 1.0D)

慮した場合、解析領域の設定による影響を抑制できることが明らかになった。さらに、解析上のリバウンドも抑制され、実現象に沿う結果が得られた。

5. 実測値との比較

実地盤データのモデル化を行い、実測変位と比較することでDuncan-Changモデルの有効性を検討する。

(1) 検証対象について

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を対象とした。標準断面の掘削断面積は約60 m²であり、掘削方法はミニベンチカット方式を採用している。

(2) 解析条件

解析モデルを図-11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4Dであることを考慮して、Hd3D Hs10Dとした。境界条件は3辺ローラ支持としている。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、解析結果も同様の位置で検討した。

Mohr-Coulombモデルの物性値を表-4に示す。電中研式モデルの物性値は「山岳トンネル設計施工標準・同解説¹⁰⁾」に書かれている各パラメータの算出方法をもとに設定した。Duncan-Changモデルの物性値は各地層の上端での水平応力を拘束圧とし、変形係数を設定した。初期剛

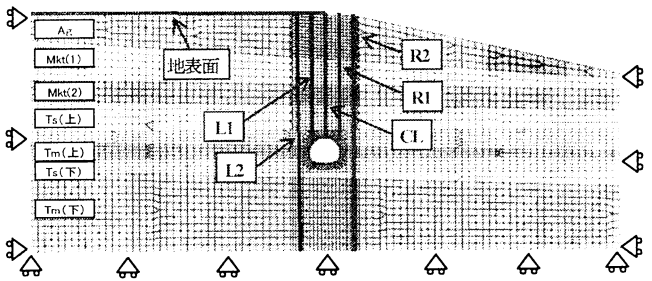


図-11 解析モデル (Aトンネル標準断面)

表-4 Mohr-Coulomb 物性値

地層	変形係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν	単位体積重量 γ_s (kN/m ³)	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (deg)
A _g	6480	0.35	19	45	35
Mkt(1)	35000	0.3	19	510	36
Mkt(2)	168000	0.3	19	510	36
Ts(上)	540000	0.3	18	880	26
Tm(上)	756000	0.3	17.5	1100	23
Ts(下)	394000	0.3	18	880	26
Tm(下)	744000	0.3	17.5	1100	23

表-5 電中研式 物性値

地層	変形係数 E (kN/m ²)	破壊時変形係数 E_r (kN/m ²)	初期ポアソン比 ν_0	破壊時ポアソン比 ν_r	単位体積重量 γ_i (kN/m ³)	せん断強度 τ_R (kN/m ²)	引張強度 σ_t (kN/m ²)	緩み係数 k	非線形パラメータ a	非線形特性指数 $m(E)$	非線形特性指数 $n(\nu)$
Ag	6480	65	0.35	0.45	19	23	9	2	1.5	1	0.5
Mkt(1)	35000	350	0.3	0.45	19	255	102	2	2	1	0.5
Mkt(2)	168000	1680	0.3	0.45	19	255	102	4	2	1	0.5
Ts(上)	540000	5400	0.3	0.45	18	440	176	4	2	1	0.5
Tm(上)	756000	7560	0.3	0.45	17.5	550	220	6	2	1	0.5
Ts(下)	394000	3940	0.3	0.45	18	440	176	4	2	1	0.5
Tm(下)	744000	7440	0.3	0.45	17.5	550	220	6	2	1	0.5

表-6 Duncan-Chang 物性値

地層	初期載荷係数 K	ポアソン比 ν	単位体積重量 γ_i (kN/m ³)	粘着力 c	内部摩擦角 ϕ (deg)	初期剛性を表すパラメータ n	破壊比 R_f	最小接線係数	最小拘束圧 $\sigma_{\min}$ (kN/m ²)	大気圧 P_a (kN/m ²)
Ag	250	0.35	19	45	35	0.3	1	101.325	1.01325	101.325
Mkt(1)	360	0.3	19	510	36	0.3	1	101.325	1.01325	101.325
Mkt(2)	1500	0.3	19	510	36	0.3	1	101.325	1.01325	101.325
Ts(上)	4500	0.3	18	880	26	0.3	1	101.325	1.01325	101.325
Tm(上)	5700	0.3	17.5	1100	23	0.3	1	101.325	1.01325	101.325
Ts(下)	2800	0.3	18	880	26	0.3	1	101.325	1.01325	101.325
Tm(下)	5150	0.3	17.5	1100	23	0.3	1	101.325	1.01325	101.325

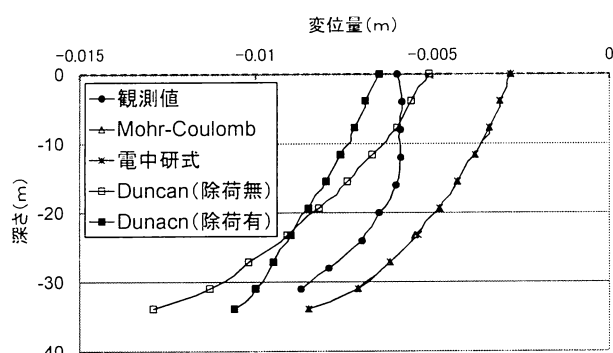


図-12 CL 地中変位

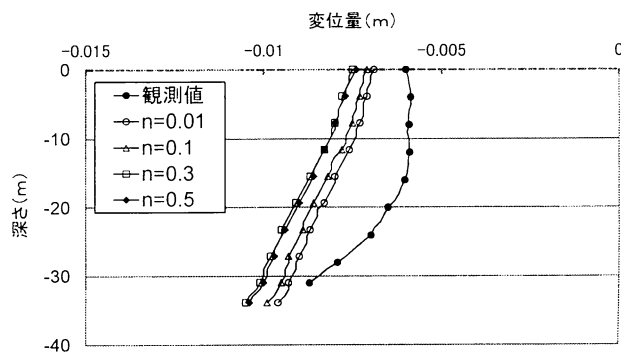


図-14 n による CL 地中変位の比較

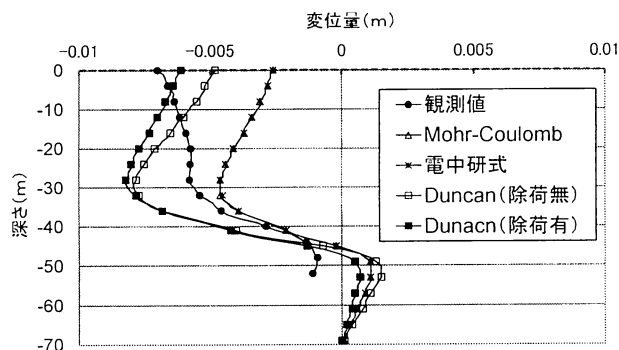


図-13 L2 地中変位

性を表すパラメータ n は 4 章と同様に 0.3 とし、除荷過程は除荷時の変形係数を載荷時の 3 倍として考慮した。それぞれの物性値を表-5、表-6 に示す。

(3) 解析結果

a) 構成則による比較

図-12、図-13 に各構成則で求めた CL、L2 での地中変位を示す。Mohr-Coulomb、電中研式モデルは観測値よりも値が小さく、沈下量が過小評価となるため危険側の結果となっている。しかし、Duncan-Chang モデルでは変位が実測値に近く、安全側の結果が得られている。また、除荷過程の考慮の有無によって結果が異なる。この違いはトンネル下部だけでなく、トンネル上部でも生じてい

る。トンネル下部の変位をみると、Duncan-Chang モデルで除荷過程を考慮した場合のみ解析上のリバウンドが抑制されている。

Mohr-Coulomb モデルと電中研式モデルの結果が同じであることから、これらの構成則はトンネル掘削によって生じる応力レベルが弾性領域のみであったと考える。これに対し、Duncan-Chang モデルでは拘束圧依存による剛性変化が生じるため、トンネル周辺での変形係数が小さくなる。これにより Mohr-Coulomb、電中研式モデルよりも変位が大きくなった。

また、トンネル上部で除荷過程の考慮の有無によって変位が異なることから、トンネル上部でも除荷過程による剛性の違いが生じている。この結果、挙動が実測値に近づいていることから、実際の地山においても拘束圧依存性による剛性変化と除荷過程による変形係数の違いが生じていると考えられる。

b) 物性値の設定

これまで n の値を 0.3 として解析を行っていた。そこで、この値を 0.01~0.5 と変化させ、その影響を検討する。その結果を図-14 に示す。図-14 では除荷係数を 3 倍ではなく、5 倍として考慮している。対象が多層地盤モデルであるため、拘束圧に差がなく剛性変化が少ないことから変位に与える影響が小さい。また、 n の値が小さけれ

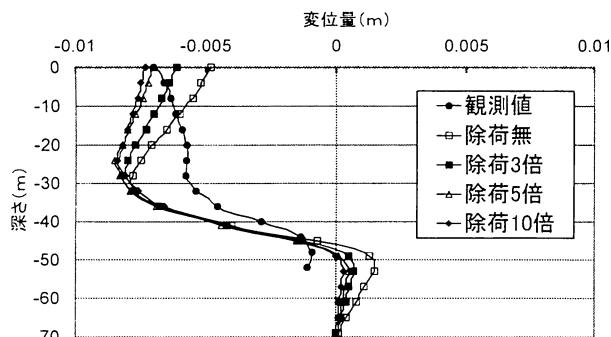


図-15 除荷係数によるCL地中変位の比較

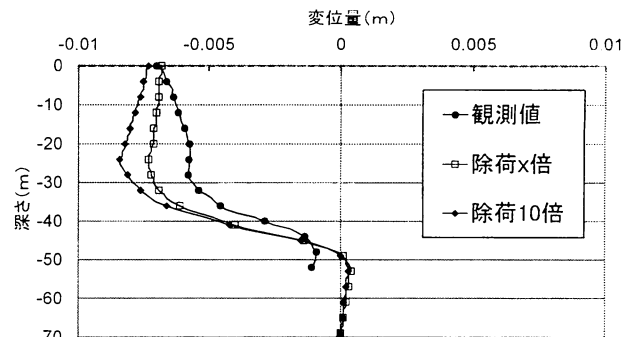


図-17 地層ごとの除荷係数を設定した
L2地中変位

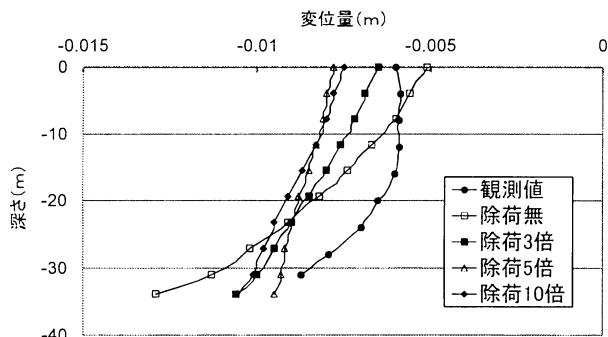


図-16 除荷係数によるL2地中変位の比較

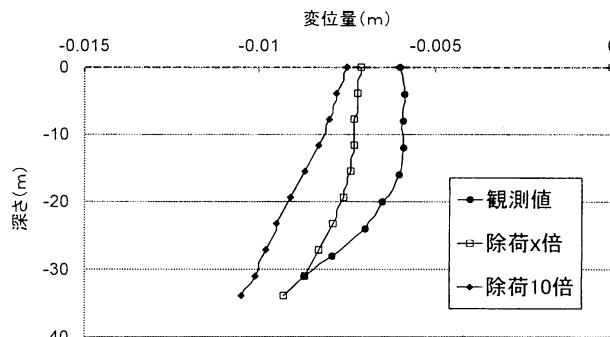


図-18 地層ごとの除荷係数を設定した
CL地中変位

表-7 除荷係数の設定値

地層	除荷時の変形係数
Ag	15 E
Mkt(1)	15 E
Mkt(2)	5 E
Ts(上)	3 E
Tm(上)	5 E
Ts(下)	5 E
Tm(下)	6 E

ば剛性変化も小さくなるため、トンネル周辺での変位が抑制されたと考えられる。この結果より他の解析ケースで使用する n も0.3とした。ただし、実際には地層ごとに n が異なることが考えられる。

また、除荷過程の変形係数を載荷時の3倍として除荷係数を設定し解析を行っているが、実際にはさらに大きいことも考えられる。そこで、除荷係数を5倍、10倍と変化させて解析を行った。CL、L2の地中変位の解析結果を図-15、図-16に示す。除荷係数を10倍としたものが実測値にもっとも近い挙動を示している。

そして、実際には地層によって除荷係数が異なることが考えられる。そこで、孔内載荷試験の結果をもとに地層ごとの除荷係数を設定した。土はひずみ依存性があることから、トンネル掘削によって発生するひずみが0.1%~1%の範囲内であると、孔内載荷試験においてそのひずみ範囲で除荷が行われた時の変形係数を地層ごとに採用した。各地層ごとの除荷係数を表-7のように設定した。これにより得られたL2、CLの地中変位の解析結果を図-17、図-18に示す。地層ごとに異なる除荷係数を

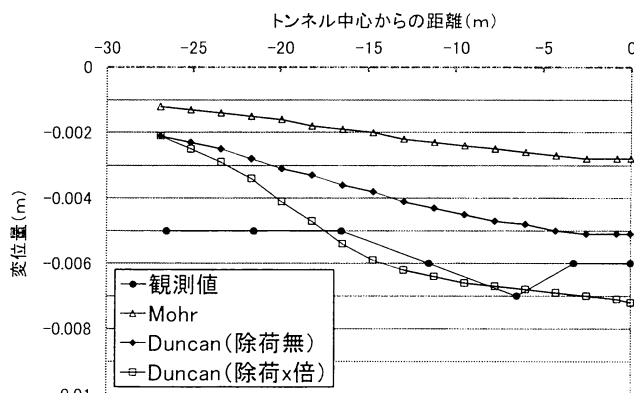


図-19 構成則による地表面沈下量の比較

設定したものが除荷 x 倍である。除荷係数をすべて10倍と設定したものと比べても、さらに実測値と近い結果となった。

図-19は地表面沈下量の結果を示している。Mohr-coulombモデルやDuncan-Changで除荷過程を考慮していないモデルでは沈下量が小さく、過小であるのに対して、除荷 x 倍が観測値とよく一致している。

以上のことから、Duncan-Changモデルで除荷過程を考慮した場合、除荷係数によって差が生じるものの、他の構成則と比べて解析結果は有効であるといえる。

6. 結論

FEM解析において解析領域の設定によって解析結果が異なるという問題は以下のことによって抑制されることが分かった。

- ① 狭小な解析領域で問題となる応力の残留は下方領域を3D程度とし、土被りに応じた側方領域を設定することで抑制される。
- ② 解析領域の増加にともなう変位の増加、解析上のリバウンドはDuncan-Changモデルで除荷過程を考慮することで抑制される。

また、実地盤を解析した結果、Duncan-Changモデルでは除荷過程を考慮することでMohr-Coulombモデルや電中研式モデルと異なり、安全側の結果を示した。そして、除荷係数の設定によって実測値と近い挙動が得られた。

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) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，2006.

The influence of constitutive laws and analytical region size 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. In such a case, the predication of ground displacements by numerical analysis is important. The numerical analysis using FEM is often used. However, it is well know that results of analysis using FEM is different by analytical region size. This study discusses the cause of the influence on the result by analytical region size, and reduction effect of that by considering unloading stress path in constitutive laws.