

トンネルの FEM 解析における Duncan-Chang モデルの適用

首都大学東京大学院 学会員 ○浅野達也

大林組 山中博登

首都大学東京大学院 正会員 土門 剛

首都大学東京大学院 正会員 西村和夫

1. 研究目的と背景

二次元 FEM 解析では解析領域の設定によって算出される変位の結果が異なるという問題が知られている。また、実際の変位と比べて、トンネルインバート部では過大な隆起が算出されてしまう解析上のリバウンドの問題があることも知られている。既往の研究¹⁾では、拘束圧依存性と載荷・除荷で異なる応力経路が考慮できる Duncan-Chang モデルを適用することで、これらの問題が抑制されることを明らかにした。そこで、本研究ではこの Duncan-Chang モデルを実トンネルに適用し、実測変位と比較することでその有用性について検討を行った。

2. 研究手法

NATM で施工されている A トンネルの標準断面と駅部大断面を対象とした。Duncan-Chang モデルの有用性を検討するために、実測変位との比較だけではなく、一般的に用いられている Mohr-Coulomb モデルの解析結果との比較も行った。実測変位は地中内変位と地表面沈下のデータを用いて検討した。

Duncan-Chang モデルの初期弾性係数 E_0 は (1) 式により求められる。

$$E_0 = K \cdot P_a (\sigma_3 / P_a)^n \quad (1) \quad E_{ur} = K_{ur} \cdot P_a (\sigma_3 / P_a)^n \quad (2)$$

K : 初期載荷係数, P_a : 大気圧, σ_3 : 拘束応力 K_{ur} : 除荷係数

対象トンネルではひずみ依存性を考慮するため、繰り返し載荷を行った孔内載荷試験を実施している (図 1)。トンネル掘削によって生じるひずみは 0.01%~0.1% であると仮定し、この範囲で除荷・再載荷が行われたときの弾性係数 E_1 を Duncan-Chang モデルの除荷時の弾性係数 E_{ur} ((2) 式) として設定した。一方、拘束圧による剛性変化を決定するパラメータ n は孔内載荷試験の結果だけでは決定できない。そこで、既往研究の結果をもとに設定を行い、パラメータ n を変化させることでその影響についても検討した。

3. 解析結果

3.1 標準断面

標準断面ではベンチカット工法が用いられている。解析モデル、変位の計測位置を図 2 に示す。各構成則の物性値については表 1 に示す。図 3 に L2 の地中変位の結果を示す。Mohr-Coulomb モデルの結果は、実測変位よりも値が小さく、過小評価となっている。しかし、Duncan-Chang モデルでは実測変位に近い値を示し、挙動も近いことが分かる。さらに、トンネル下部に着目すると、解析上のリバウンドが抑制されていることが分かる。

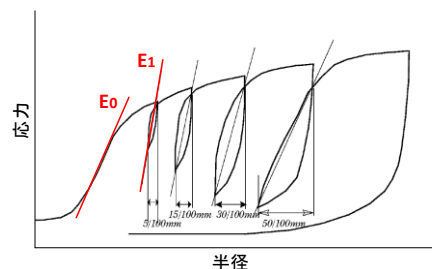


図 1 孔内載荷試験の模式図

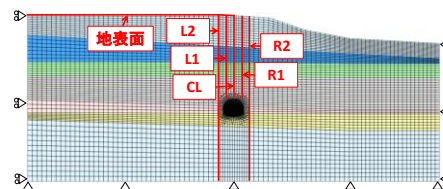


図 2 解析モデル (標準断面)

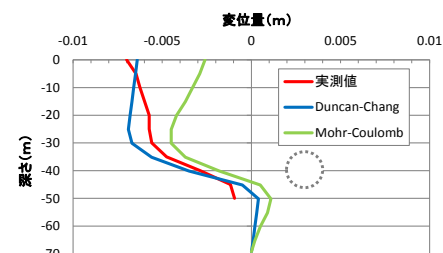


図 3 L2 地中変位 (標準断面)

表 1 物性値 (標準断面)

Mohr-Coulomb model						Duncan-Chang model											
	E(kN/m ²)	v (kN/m ³)	v	φ (deg)	c(kN/m ²)		E(kN/m ²)	v (kN/m ³)	v	φ (deg)	c(kN/m ²)	Pa(kN/m ²)	σ min(kN/m ²)	Rf	n	K	Kur
Ag	6480	19	0.35	35	45	19	Ag	6480	0.35	35	45	101.325	1.01325	1	0.3	260	32*K
Mkt1	35000		0.3	36	510		Mkt1	35000	0.3	36	510					360	22*K
Mkt2	168000						Mkt2	168000								1500	7*K
Ts上	540000	18				26	880	Ts上				540000	18	26	880	4500	4*K
Tm上	756000	17.5				23	1100	Tm上				756000	17.5	23	1100	5700	5*K
Ts下	394000	18				26	880	Ts下				394000	18	26	880	2800	8*K
Tm下	744000	17.5	23	1100	Tm下	744000	17.5	23	1100	5150	6*K						

キーワード FEM 解析/領域設定/リバウンド/unloading stress path/拘束圧依存性

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL: 042-677-2785 FAX: 042-677-2772

表 2 物性値 (駅部大断面)

Mohr-Coulomb model						Duncan-Chang model											
	E(kN/m ²)	ν (kN/m ³)	ν	φ (deg)	c(kN/m ²)		E(kN/m ²)	ν (kN/m ³)	ν	φ (deg)	c(kN/m ²)	P _a (kN/m ²)	σ _{min} (kN/m ²)	R _r	n	K	K _{ur}
Ag _上	15000	19	0.35	35	45	Ag _上	15000	19	0.35	35	45	101.325	1.01325	1	0.3	360	44*K
Ag _下	50000					Ag _下	50000									450	
Tm _上	60000	17.5	23	1100	Tm _上	60000	17.5	23	1100	500	9*K						
Ts _上	330000	18	26	880	Ts _上	330000	18	26	880	1200	4*K						
Tm _{下1}	150000	17.5	23	1100	Tm _{下1}	150000	17.5	23	1100	2500	8*K						
Ts _{下1}	280000	18	26	880	Ts _{下1}	280000	18	26	880	2030	7*K						
Tm _{下2}	150000	17.5	23	1100	Tm _{下2}	150000	17.5	23	1100	2340	8*K						
Ts _{下2}	280000	18	26	880	Ts _{下2}	280000	18	26	880	1970	7*K						

パラメータ n を変化させたときの L2 の地中変位の結果を図 4 に示す。 n の値を 0.1~1.5 の範囲で変化させているが、挙動に大きな違いは生じていない。

3.2 駅部大断面

駅部大断面では中壁分割工法が用いられている。解析モデル、変位の計測位置を図 5 に示す。各構成則の物性については表 2 に示す。図 6 に L2 の地中変位の結果を示す。図 6 より、各構成則ともに実測変位と挙動が大きく異なっていることが分かる。掘削段階において、実際の中壁の変位計測結果では、変位量が小さい。これより、载荷試験の結果をもとに想定していたよりも実際には地盤が良く、弾性係数が高いと推察される。

そこで、弾性係数を 2 倍、3 倍にして再度解析を実施した (図 7)。弾性係数を 2 倍にした Mohr-Coulomb モデルの結果が実測変位と近い値を示しているものの、解析上のリバウンドは抑制されていない。Duncan-Chang モデルでは解析上のリバウンドが抑制されているが、上層部の挙動に大きな違いが生じている。これは上層部では除荷時の弾性係数が大きく設定されていることからその影響が大きいと考えられる。そこで、上層部において除荷時の応力経路を考慮しない場合の解析を行った (図 8)。図 8 より、上 2 層で除荷時の応力経路を考慮しない場合の結果が実測変位に近い挙動を示した。

3.3 標準断面の再検討

駅部大断面では上層部の除荷時の応力経路を考慮しない場合、実測変位に近い結果が得られたことから、標準断面においても同様の解析を行った (図 9)。4 層目の除荷時の応力経路を考慮しない場合が実測変位に近い挙動を示している。これにより、トンネル上部での除荷時の弾性係数は载荷時と同等程度であることが考えられる。また、標準断面の実測変位は地表面に近づくほど変位が増加しており、その変形挙動を再現することはできていない。

4. まとめ

実トンネルの実測変位と比較を行った結果、Mohr-Coulomb モデルでは抑制できない解析上のリバウンドが Duncan-Chang モデルでは抑制されており、実測変位と近い挙動を示していることから有用であるといえる。しかし、除荷時の応力経路を考慮した場合とトンネル上層で考慮しない場合では変位挙動に違いが生じており、どのように設定するのか見極めが必要となる。

また、Duncan-Chang モデルの除荷時の弾性係数を繰り返し载荷を行った孔内载荷試験の結果をもとに設定したが、拘束圧による剛性変化を示すパラメータ n についてはさらに検討する必要がある。

【参考文献】

- 1) 浅野達也，土門剛，西村和夫：トンネルの FEM 解析における領域設定と構成則の影響，第 66 回年次学術講演会講演概要集，III-087，2011

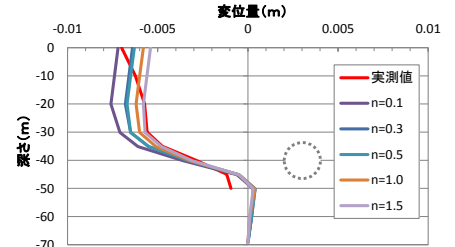
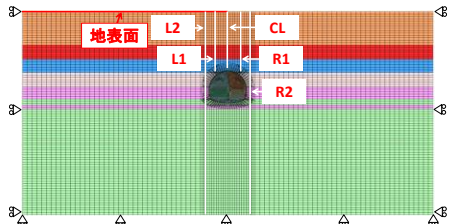
図 4 n の変化 (標準断面)

図 5 解析モデル (駅部大断面)

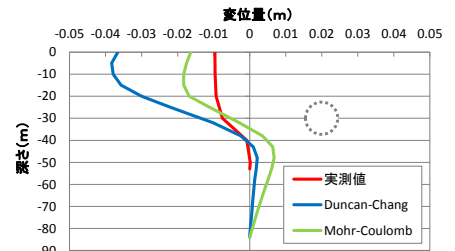


図 6 L2 地中変位 (駅部大断面)

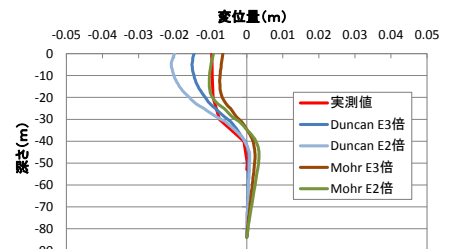


図 7 E の変化 (駅部大断面)

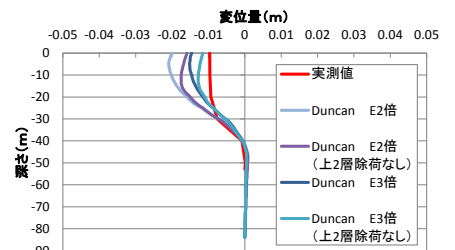


図 8 上層部 除荷無 (駅部大断面)

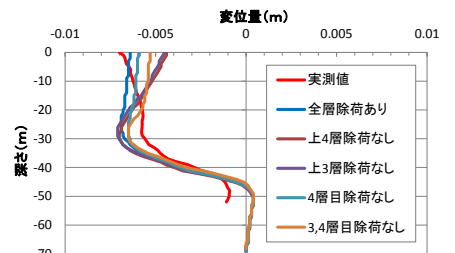


図 9 上層部 除荷の変化 (標準断面)