Subloading t_{ij}モデルによる大断面非円形トンネルを 対象とした遠心模型実験の解析と軟岩地山挙動の検討

奥野 哲夫^{1*}・杉山 博一¹・中井 照夫²・Hassain Md. Shahin ²

¹清水建設株式会社 技術研究所(〒135-8530東京都江東区越中島三丁目4番17号) ²名古屋工業大学 都市社会工学科 社会工学専攻(〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町) *E-mail: okuno@shimz.co.jp

大断面非円形トンネル周辺で生じる力学的挙動を実験的に再現する目的で遠心模型実験を行う.実験で は、トンネル模型の円周に水で満たしたラバーバルーンを配置し、バルーンの体積および圧力を制御する ことでトンネル周辺のゆるみを再現しながら覆工に発生する断面力を計測する.この遠心模型実験での地 山挙動を検討するため、構成モデルとして軟岩から砂質土および粘土地盤までの力学挙動を説明できる subloading t_{ij}モデルを用いた弾塑性数値解析を実施し考察を行う.以上の遠心模型実験と数値解析の比較 から、大断面非円形トンネル周辺の挙動予測の妥当性を検討し,軟岩からなる地山に同様の大断面非円形 トンネルを構築する場合の地盤およびトンネルの挙動について検討する.

Key Words : surport pressure, displacement of tunnel, centrifuge model test, coctitutive equation

1. はじめに

都市部のトンネル掘削時の挙動を適切に評価するには, 土砂から軟岩までの地盤を対象に,トンネルと地盤の相 互作用を考慮したうえでトンネル覆工に作用する荷重評 価が課題となる.また,既設構造物も多く存在すること からそれらとの相互作用も考慮して周辺地山の挙動を精 度よく評価することが重要となる.しかし,現行の設計 では,トンネルへの作用土圧はTerzaghiの緩み土圧理論 をはじめとした経験的な手法や弾性解析による予測が主 となり,これらの相互作用を考慮できていない.

さらに近年では,大断面トンネルの掘削も行われるようになってきており,力学的安定性を保って経済的には 必要断面を確保しながら掘削断面積を小さくすることが 望まれる.相互作用を考慮しながら作用土圧を適切に評 価するには,概念的には地山特性曲線(Fenner-Pacher曲 線)に代表される支保圧と内空変位の関係から必要な支 保圧を求め,それに必要な断面形状と断面力が確保でき ることを覆工等の支保設計で照査する必要がある.

本論文では,以上の観点から大断面非円形トンネルを 対象に,遠心模型実験に基づきトンネル模型(鋼製リン グ)に作用する支保圧と変形等を計測する.また,地盤 挙動の評価手法として,軟岩から砂質土および粘土地盤 までの力学挙動を対象としたsubloading t_jモデル^{1,2}に基づ く弾塑性数値解析手法を用い,遠心模型実験で対象とし たトンネルの解析から地盤と覆工の相互作用について比 較・考察を行い,解析手法の適用性を検討する.また, 同様の断面形状でも地山が軟岩の場合を想定した解析を 実施し,その地山挙動について考察を行う.

2. 遠心模型実験

- (1) 模型実験の概要
- a) 実験用土槽³⁾

トンネルと地盤の相互作用を実験的に観察するため, 遠心模型実験を行った.図-1に遠心模型実験に用いた土 槽を示す.土槽は内寸で高さ755mm,幅800mm,奥行き 300mmの剛体土槽で,トンネル模型は土槽底板から 250mmの位置が中心となるように設置される.写真-1に トンネル模型を示す.

トンネル模型は二重構造となっており,内側にガイド の役割を持った鋼製リングを,外側には水を封入できる ラバーバルーンを巻いた構造となっている.

ラバーバルーン内の水は土槽外側側壁に取り付けたピ ストンを介して体積変化をさせることができ,このピス トンを制御することでトンネル体積を制御した.



図-1 遠心模型実験土槽の概要



写真-1 トンネル模型(左; C100, 右 B075)

すなわち,遠心模型実験では,地盤はバルーンを介し てバルーン内の水圧によって保持される状態となり,バ ルーンの体積を減少させることによって生じるバルーン 水圧の変化を再現することができる.これはちょうど, 地山特性曲線における支保圧と内空変位(実験ではトン ネル体積)との関係を再現していることになる.

b) 実験の方法と計測項目

後述する実験条件でトンネル模型,および地盤を作成 し,遠心載荷装置によって土槽に重力加速度の50倍 (50g)を作用させた.遠心加速度を上昇させる間,バ ルーン内の水は体積変化させないため,土被り圧に応じ た水圧が発生する.

50gで状態が安定した後,バルーン内の水をピストン によって徐々に減少させ,それによって生じるバルーン 水圧の変化や,地表面沈下,および土圧を計測した.

c) 実験条件

遠心模型実験では簡易のため,乾燥状態の7号珪砂を 用いて空中落下法にて模型地盤を作成した.表-1に7号 珪砂の物理的性質,および模型地盤の条件を示す.

表-2にトンネル模型(鋼製リング)の条件を示す.ト ンネル模型は,模型サイズで幅20cmを基本とし,高さ が幅と同じ模型C100と,高さが幅の75%とした模型B075 の2種類を作成した.C100は円形,B075は楕円形のトン

表-1 模型地盤(7号珪砂)の条件

物理的性質	土粒子密度	g/cm ³	2.635
	最大密度	g/cm ³	1.539
	最小密度	g/cm ³	1.206
砂撒き時	乾燥密度	g/cm ³	1.3
(空中落下法)	間隙比	-	1.03
	相対密度	%	33

表-2 トンネル模型の条件

			lg場	遠心場(50g)
材質		S45C		
ヤング率		kN/m ²	2.1×10^8	
模型 C100	幅	m	0.2	10
寸法	高さ	m	0.2	10
模型 B075	幅	m	0.2	10
寸法	高さ	m	0.15	7.5
覆工厚さ(共通)		m	0.0046	0.23
断面2次モーメント		m ⁴ /m	8.1×10^{6}	1.0×10^{-3}

ネル模型である.

また,鋼製リングにはバルーンから水圧が作用し,それに応じて発生する断面力を得るため,天端から30度ごとにリングの内外周面にひずみゲージを貼付して計測した.

以上の実験条件に基づき,遠心模型実験は2ケースを 実施した.用いた模型名称に準じてそれぞれケース C100,B075と称する.なお,両ケースともトンネル被 りはトンネル幅10mの2倍とし,トンネル天端から20m の被りを設定した.

(2) 模型実験結果

a) バルーン水圧 (支保圧) と各種計測値

前述のように,遠心場でバルーンの体積(水)を減 少させるよう水圧を制御して得られたバルーンの体積減 少率と支保圧の関係を図-2に示す.この図には,後述す る数値解析結果も示している.以下,バルーン水圧は 全てトンネル高さ中央のスプリングライン位置の水圧で 表示する.

円形トンネルのC100の実験では,実験当初の誤操作 でバルーンの水の体積増加を生じた.その部分を除けば バルーン水圧(支保圧)の低下に伴う体積減少すなわち トンネル直径減少(内空変位の増加)を示している.特 に体積減少率とバルーン水圧の関係(図-2)は,実験結 果と解析結果がよく一致している.解析結果は,実験と 同じ支保圧の履歴を与えたものと,200kPaから支保圧を 低下させた2ケースを示しているが,200kPaから100kPa まで支保圧が低下することで共に2.5%程度の体積減少率 が生じる結果となっている.バルーンの体積減少はトン ネル内空変位を生じさせるため,同図は支保圧と内空変 位の関係と理解することができる.



図-3 バルーン水圧(支保圧)と地表面沈下の関係

また図-3は,バルーン水圧(支保圧)の低下による地 表面沈下量を示している.実験結果は,土槽中央地表面 の1点での計測値であるが,支保圧の減少に伴い沈下が 増加する.地表面沈下に関しても後述の数値解析結果を 比較して示しており,扁平なB075では初期支保圧を実 験と同一に設定すれば概ね解析結果と実験結果は一致し ている.しかし,円形のC100では解析結果が実験結果 に比べて大きな値を示しており,こ原因については検討 を要する.

b) 覆工の断面力

実験から計測された断面力分布を,バルーン水圧 (支保圧)の低下による体積減少率をパラメータとして 図-4に示す.バルーン水圧は位置水頭に対応して,深度 の違いから静水圧分だけ異なる水圧が作用するが,圧力 水頭の変化量に対応するバルーン水圧変化量は全周で一 定である.このため一様な水圧変化は,円形断面では曲 げモーメントよりも主に軸力の変化に影響を与えると考 えられる.円形のC100で水圧低下(体積減少)による 軸力の全体的低下は,このような挙動に対応すると考え られる.さらに,扁平なB075では,曲げモーメントの 絶対値が,天端(0°),底盤(180°),スプリングラ イン(90°)の3方向で大きく,体積減少が進むと低下 する.軸力は30°および90°方向が顕著に大きいが, 30°方向が大きい理由は検討を要する.しかし,30°お よび90°方向とも体積減少が進むにつれて低下している. これらは,内空変位をある程度許すことで,断面力の低 減が可能になることを意味する.

3. 遠心模型実験の数値解析

(1) 遠心模型実験の解析モデル

遠心模型実験の状況を評価するため,地盤をsubloading fyモデル^{1),2}によりモデル化し,50gの遠心場に対応する 地盤領域寸法を2次元FEMにより解析した.解析に用い た地盤物性値を表-3に示す.7号硅砂は乾燥状態で,遠 心模型実験に用いた7号硅砂の等方圧縮試験や三軸せん 断試験から求めた値等である.

バルーン部分は2相混合体(液相と固相)でモデル化



(a) 曲げモーメント分布





表-3 解析に用いた subloading t_{ij} モテルのハラメータ			
λ		0.0358	Cam clay model と同じ
к		0.00632	パラメータ
N=e _{NC} at p q=0kPa	=98kPa, &	1.02	
$R_{cs} = (\sigma_1 / \sigma_3)_{CS(Comp.)}$		3.84	
V.	2	0.2	
þ	}	2.0	降伏面の形状 (β=1 の時 original Cam clay と同一)
а	a_{AF}	30	密度と拘束圧の影響
	a _{IC}	500	

し,主体(液相)は間隙を飽和した非圧縮の水とし,固 相は剛性が無視できる程度に小さい弾性体とした.これ に間隙水圧を境界条件として与えることでバルーン水圧 の作用と体積変化を模擬した.また,トンネル模型(鋼 製リング)は,トンネル壁面にビーム要素を設定し,対 応する軸剛性と曲げ剛性を与えてモデル化した.

(2) 解析結果

解析により得られた結果を図-5~7に示す.いずれも バルーン水圧(支保圧)を初期圧200kPaから減少させ, 最も低下した段階(約95kPa)の解析結果であり,図-5 は鉛直変位の分布,図-6は鉛直応力の分布,図-7は偏差 ひずみの分布を示す.

これらの図から,バルーン水圧が減少した際のトンネ ル覆工外面のゆるみ(体積減少)による地盤挙動の特徴 は、トンネル高さ中央位置(スプリングライン)の覆工 外側直上周辺に鉛直変位が集中するとともに, せん断ひ ずみも同位置に集中していることがわかる.全体的には トンネル上半から地表面に向けて放射状に下方変位の大 きな領域が発生し,スプリングライン外側直上辺りに向 けて,鉛直応力が減少している.

以上の傾向は,バルーン水圧(支保圧)が同一であれ ば,トンネルが非円形(楕円形)よりも円形の方が顕著 である.ここで発生させたような支保圧が確保できれば, 同一のトンネル幅に対して、トンネル形状は円形より非 円形(高さが低く扁平)の方が地盤変形を抑制できる可 能性がある.この点は図-3の地表面沈下に関する円形と 非円形の解析結果の比較とも整合的である.非円形断面 は覆工曲率の関係から,覆工上半角度が水平に近づくこ とで地盤内応力分布の安定性が増すためと考えられる. 図-4からも明らかなように,一般に同一の支保圧を確保 するには,扁平なトンネル断面の方が覆工内の応力集中 が高まり覆工設計が厳しくなるが,逆に同一の支保圧が 確保できれば扁平トンネルの方が地盤挙動には有利にな る可能性がある.

また前述の図-3において,解析から得られた地盤沈下 が実験結果よりも大きな値となった点は,実験開始時の 誤操作 (バルーン水圧の増加)などの影響も含め,実験 の再現性等の検証も行い,原因を検討する必要がある.

4. 軟岩トンネルの解析検討

(1) 解析モデル

以上の遠心模型実験とその数値解析による評価を参考 に,軟岩からなる地盤を想定して,数値解析により地盤 挙動を考察する.トンネル幾何形状は,先の遠心模型実 験と同一とし,地盤物性のみ泥岩からなるものとして subloading t_i モデルのパラメータは,表-4の値を設定した. このうち, Cam clayと同一のパラメータは泥岩の三軸試 験から得られたものである.また,乾燥密度pd=1.45, 湿潤密度pt=1.90,初期間隙比em=0.85,先行圧密荷重は 約3.6MPa程度である.その他のパラメータは粘土を参考 に想定し,地山は排水状態の解析を実施した.



図-7 偏差ひずみの解析結果

(2) 解析結果

支保圧と体積変化(内空変位)の関係等は上記と同様 に評価でき,地山特性曲線から内空変位の許容範囲の内 で合理的な支保圧を求めるうえで参考になるものと考え られる.

ここでは解析結果のうち,偏差ひずみの分布のみ図-8 に示す.これは支保圧が150kPa~200kPa程度の場合であ

り, 泥岩からなる地山は偏差ひずみが十分小さな値で分 布しているが,非円形な場合の方が右45度方向に偏差ひ ずみが集中している.

5. おわりに

本論文では, 遠心模型実験とsubloading t_i モデルによる 弾塑性数値解析により,大断面非円形トンネルを対象に

表-4	泥岩に関する	subloading $t_{ij} = \overline{\tau}$	ジルのパラメー タ	,
-----	--------	---------------------------------------	------------------	---

λ	,	0.190	Cam clay model と同じ
к		0.00525	パラメータ
<i>N=e_{NC}</i> at <i>p</i> <i>q=</i> 0kPa	=98kPa, &	0.85	
$R_{\alpha} = (\sigma_1 / \sigma_2)$	3)CS(Comp.)	4.156	
V	2	0.2	
			降伏面の形状 (β=1
β		1.5	の時 original Cam clay
			と同一)
~	a_{AF}	500	密度と拘束圧の影響
a	a_{IC}	500	

覆工と地山の相互作用を考慮した評価を行った.以下に, 結論をまとめる.

まず,遠心模型実験においてバルーン水圧と体積減少 を計測し,これを支保圧と内空変位の関係と捉え, subloading t_{ij}モデルによる数値解析結果と比較検討を行 い,両者はよく一致した結果が得られた.また,支保圧 と地表面沈下の関係についても実験と解析を比較検討し, 扁平トンネルの地表面沈下は概ね解析で再現できた.た だし,円形トンネルに関しては実験と解析で差異が生じ



(a) C100 (円形トンネル)

図-8 泥岩地山の偏差ひずみの解析結果

NUMERICAL ANALYSIS ON CENTRIFUGE MODEL TEST FOR NON-CIRCULAR LARGE TUNNEL AND BEHAVIOR OF SOFT ROCK MASS BASED ON SUBLOADING TIJ MODEL

Tetsuo OKUNO, Hirokazu SUGIYAMA, Teruo NAKAI and Hassain Md. SHAHIN

The mechanical behaviour of soil and soft rock mass around a large non-circular tunnel is studied. Centrifuge model tests are performed and numerical analyses based on the subloading t_{ij} model are carried out to evaluate the relationship between support pressure and displacement of the tunnel as interaction. Compared the results of the numerical analyses with those of the centrifuge model tests, the relationship between support pressure and displacement is validated and the features of mechanical field are recognized.

た.この点については実験時の誤操作等もあるので,引 き続き検討を要する.最後に,泥岩からなる地山を想定 し,同様の幾何形状の下で力学的挙動を解析した.

今後, Subloading t_{ij} モデルの軟岩への適用性を詳細に検 証するとともに,パラメータの設定に関して引続き検討 を行う必要がある.さらに異なる扁平率のトンネル断面 に対しても上記の確認を行い,非円形トンネルに関する 覆工と地山の相互作用を考慮した合理的設計の検討を進 める予定である.

参考文献

- Nakai, T. and Hinokio, M. : A Simple Elastoplastic Model for normally and over consolidated soil with unified material parameters, Soils & Foundations, 44(2), pp.53-70, 2004.
- 2) 菊本統,ホサインシャヒン,中井照夫,永田政司,戸田和 秀:トンネル掘削の近接杭基礎構造物への影響,第54回地 盤工学シンポジウム 平成21年度論文集,pp.355-362,CD-ROM,地盤工学会,2009.
- 3) 杉山博一,後藤茂,西村和夫: ECL トンネルのプレス 圧力による周辺地盤の受動破壊メカニズム,土木学会 論文集,No.757/ -66号,pp.89-99,2004.



(b) B075(非円形トンネル)