

III-44

遠心模型実験による非線形弾性解析手法の適用性の検討

鹿島 技術研究所 正会員 杉原靖彦 笹倉 剛
東京支店 正会員 菅原俊幸

1. はじめに

都市部における掘削工事においては、近接構造物に対する安全上の制約から周辺地盤への影響を極力抑制することが余儀なくされる。著者らは、トンネルを始めとする地盤掘削時の周辺地盤挙動を事前に精度良く予測できる数値解析手法の開発を目標として、2次元非線形弾性解析モデルの提案を行っている¹⁾。本論文は、砂質地盤におけるトンネル掘削を模擬した遠心模型実験を実施し、提案モデルの実規模応力地盤への適用性の検証を行ったものである。

2. 提案モデルの概要

提案モデルは従来の双曲線モデルの一つとして代表的なH-Dモデルを拡張し、砂地盤の非線形応力～ひずみ関係を拘束圧に依存しないユニークなX～Y関係に集約したモデルである。ここで、Xはせん断ひずみ γ を基準ひずみ γ_r ($=\tau_r / G_0$, τ_r :せん断強度, G_0 :初期せん断剛性)により正規化した値 ($X=\gamma / \gamma_r$)、またYはせん断応力 τ を τ_r で正規化した値 ($Y=\tau / \tau_r$)である。モデルの詳細については文献1)に譲るが、提案モデルは地盤の構造異方性及び初期応力状態を考慮でき、解析に必要な入力物性値は、物理諸定数の他に力学定数として初期せん断剛性 G_0 、せん断強度 τ_r 、並びに新規に導入した非線形性を表現するパラメータである n_v 、 n_L 、 α と非常に少ないことが特徴である。なお、 $n_v = n_L = 1.0$ とした場合本モデルは双曲線モデルに一致することになる。

3. 実験概要

遠心載荷装置の仕様を表-1に、実験装置の構造を図-1に示す。

トンネル模型は直径が5cmで半円状の上半部、下半部の2つ割りモデルで、モーター制御により上半部のみが鉛

直方向に降下する構造である。模型地盤は、気乾状態の豊浦標準砂を用い、自由落下法により $D_r=45\%$ 、土被り3D及び5Dの2種類を作成した。実験は、100Gの遠心場においてトンネル模型を鉛直方向に0.06mm/分の速度で収縮させ、トンネル模型に設置した土圧計（測定精度0.1kgf/cm²）によるトンネル覆工面への作用土圧、地表面

に設置したLVDT（測定精度0.1mm）による地表面沈下、並びに土槽前面の亚克力板に張り付けた格子付きメンブレンの撮影写真を用いた画像解析（解析精度0.1mm）による地中変位をそれぞれ計測した。なお、試料土と土槽の壁面摩擦低減のため、土槽内壁にシリコングリスを塗布し、さらにメンブレンを貼付した。

表-2に平面ひずみ圧縮試験結果などをもとに決定した模型地盤の物性値及び解析入力パラメータを示す。ここで、線形解析における弾性係数はトンネル土被り中央での初期弾性係数 E_0 を用い、提案モデルの非線形パラメータは最小自乗法により決定した。なお、解析ではトンネル上半外周部相当節点に鉛直下方への強制変位を与えることにより掘削をシミュレートした。

表-1 遠心載荷装置の仕様

項 目	仕様
最大 遠 心 加 速 度	200G
有 効 半 径	2.7m
最大 搭 載 質 量	1000kgf
プラットフォーム寸法 (幅)	800mm
	(奥行き) 1000mm
	(有効高さ) 800mm

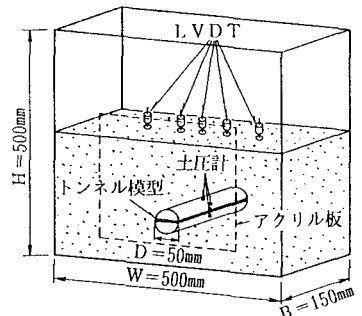


図-1 土層及びトンネル模型

表-2 豊浦標準砂物性値及び解析入力パラメータ

	線 形 解 析	双 曲 線 モ デ ル	提 案 モ デ ル
単位体積重量	γ_d (tf/m ³)	1.460	
間 隙 比	e	0.813	
粘 着 力	c (tf/m ²)	0	
内部摩擦角	ϕ (deg)	40	
ポアソン比	ν	0.3	
変 形 係 数	E_0 (tf/m ²)	18000 (24000)*	
非線形パラメータ**	n_L	1.0	0.2
	n_v	1.0	1.0
	α		0.11

* () 内は土被り5Dの場合

**初期せん断剛性は $G_0 = 900 \cdot (2.17 - e)^2 / (1 + e) \cdot \sigma_m^{0.4}$ により算定

4. 実験結果

(1) 変形挙動 土被り5Dにおけるトンネル変位 $\delta=50\text{mm}$ 、 200mm 時のトンネル軸上鉛直地中変位分布を図-2に、土被り3Dにおけるトンネル変位 $\delta=50\text{mm}$ 、 200mm 時のトンネル横断方向地表面沈下分布を図-3にそれぞれ解析結果と併せて示す。なお、図中のトンネル変位、地盤変位のいずれも1G場換算の値を用いた。これらの図から変形量の評価は実験結果に比べ、土被りによらず線形解析では過大に、また双曲線モデルでは過少になるのに対し、提

案モデルは地表からトンネル近傍にわたって精度良くシミュレートできることがわかる。とりわけ、シールド実施工において生じるテールボイド厚に相当し、地盤の破壊域が小さいと考えられるトンネル変位 50mm の場合、良く一致している。

(2) 作用土圧 トンネル変位とクラウン部への作用土圧の関係を解析結果と併せて図-4に示す。これより、提案モデルはトンネルの収縮に伴い生じる緩み土圧を精度良くシミュレートできるのに対し、線形解析ではゆるみ土圧の表現が不可能であり、また双曲線モデルではトンネル変位の増加に伴う土圧の減少速度に過大傾向があることがわかる。

ここで、実験結果より得られたゆるみ土圧との比較のため、図-5に示すようにトンネル上半部底面を仮想降下床面と考え、降下床への作用土圧をほぼ評価できるとする村山らの実験における1次領域のみからの土圧²⁾(図-5斜線部分)に着目して、トンネルクラウン部への作用土圧の試算を行った。その結果、降下床全面に対する平均土圧は 1.6tf/m^2 、また最大値になると考えられるトンネルクラウン部での土圧は 2.6tf/m^2 と算定されたのに対して、実験値は土被り3Dの時 2.7tf/m^2 、土被り5Dの時 1.7tf/m^2 とほぼ一致することから、本実験によるゆるみ土圧はほぼ妥当な値であると考えられる。ただし、全周にわたってテールボイドが生じる実際のシールド工事での地盤挙動については、別途検討が必要である。

5. おわりに

遠心模型実験による提案解析手法の実規模応力地盤への適用性、並びに村山のゆるみ土圧式による実験結果の妥当性の確認を行った。今後は、構成モデルの改良を含め粘性土地盤への適用を図る予定である。

参考文献 1) 菅原、林、永井、田原：砂地盤の非線形性を考慮したトンネル掘削挙動解析手法の開発、鹿島技術研究所年報、No. 40、pp191～196、1992.10 2) 村山、松岡：砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、No. 187、pp95～108、1971.3

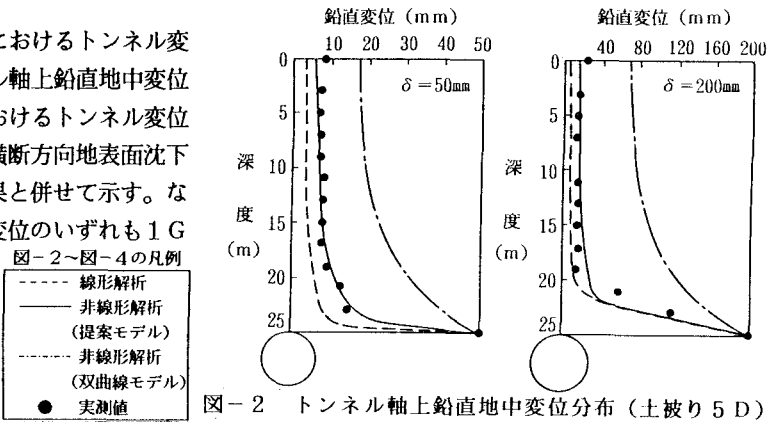


図-2 トンネル軸上鉛直地中変位分布(土被り5D)

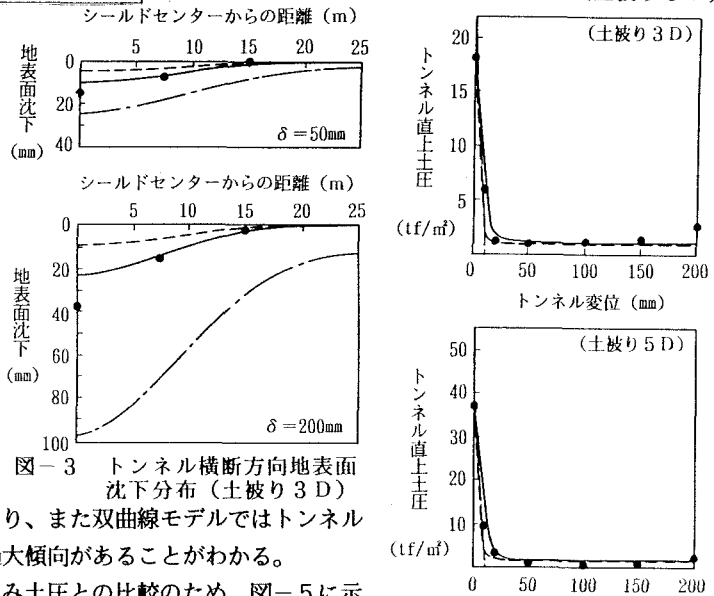


図-3 トンネル横断方向地表面沈下分布(土被り3D)

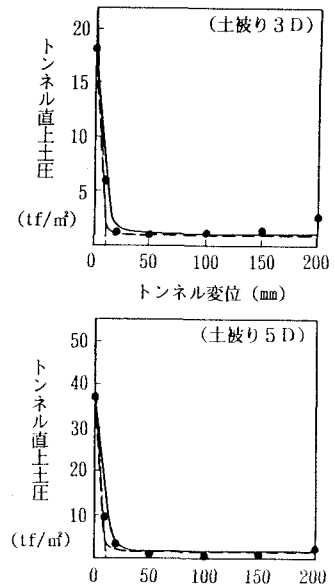


図-4 トンネル変位と作用土圧の関係

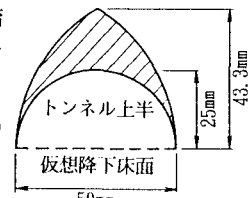


図-5 緩み土圧計算モデル