

Ⅲ-B106

遠心模型実験による覆工応力発生機構の検討

清水建設 正会員 杉山 博一
後藤 茂

1. はじめに

シールドトンネルの覆工の設計時に行う慣用計算法やはりパネフレーム計算では、トンネルに作用する荷重は、土被りが浅い場合や地盤のせん断強度が低い場合には土被り圧に相当する土・水圧を鉛直方向荷重とし、天端とインバートで同じ値を入力することとしている。しかし、同じ土被りで大断面トンネルになることを想定した場合、鉛直方向の荷重は変わらない一方で、水平方向の荷重は大きくなるためインバート付近で水平方向の変形が卓越する結果が得られるが、必ずしも実際のメカニズムを表現しているとは考えられない。そこで、筆者らは大断面トンネルを想定した場合の合理的な荷重設定方法を検討するため、遠心模型実験手法により覆工応力の発生機構を検討した。

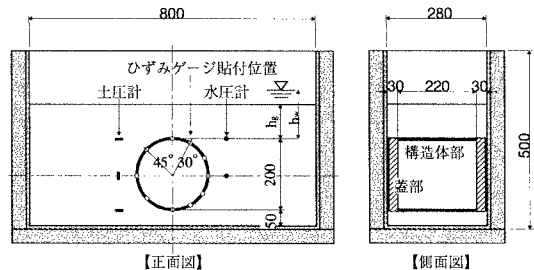


図-1. 遠心模型実験用土槽およびトンネル模型概要図

2. 実験概要

図-1に遠心載荷装置に搭載する土槽およびトンネル模型の概念図を示す。土槽の寸法は幅80cm、高さ50cm、奥行き28cmである。トンネル模型の概要を表-1に示す。トンネル模型（外径200mm）はアクリル製で、図-1右側に示したように構造体部分と蓋の部分から成っており、実験中のトンネル模型の変形を拘束しないようしてある。ただし、遠心実験中にトンネル内部に水が浸入しないようにするため、構造体と蓋の密着部外周にビニルテープを巻いて止水している。

模型地盤は空中落下法により8号珪砂を撒いて作成した。8号珪砂は70%が砂分、残りがシルト分であり、50%粒径が0.1mm、均等係数が約2の砂である。その他の物性試験結果を表-2に示す。

実験条件を表-3に示す。土被りは10cm (0.5D) とし、(A)地盤中に水がない状態、(B)水位が地表面のところにある状態、(C)水位が地表面から5cm上にある状態の3種類の実験を行った。実験では模型に50gの遠心加速度を作用させて、そのときの土圧、間隙水圧、および覆工体のひずみを計測した。ひずみゲージは天端を基点として時計回りに0,30,60,90,120,150,180,225,270,315度の位置の覆工体内外面に貼り付けた。

3. トンネル模型の校正実験

遠心模型実験を行うに先立って、トンネル模型に貼ったひずみゲージの計測精度について検討するため、校正実験を行った。校正実験は

表-1. トンネル模型の概要

項目	模型	遠心力場 (50g)
トンネル外径 (m)	0.200	10.0
内径 (m)	0.184	9.20
覆工厚さ (m)	0.008	0.40
アクリルの密度 (g/cm ³)	1.19	
剛性 (MPa)	2,500	
断面2次モーメント (m ⁴ /m)	4.2×10 ⁻⁸	5.3×10 ⁻⁵
引張破壊強度 (MPa)	65~70	
圧縮破壊強度 (MPa)	75~92	

表-2. 8号珪砂の物性試験結果

土質試験結果	
土粒子密度 (g/cm ³)	2.657
最大密度 (g/cm ³)	1.56
最小密度 (g/cm ³)	1.15
有効せん断抵抗角 ϕ' (deg)	40.0
砂まき（空中落下）後	
乾燥密度 (g/cm ³)	1.31
間隙比	1.03
相対密度 (%)	47
湿潤（飽和）密度 (g/cm ³)	1.82

表-3. 遠心模型実験の実験条件

実験名		A	B	C
土被り (h _g)	模型実寸 (cm)	10		
	50g場換算 (m)	5.0		
水位 (h _w)	模型実寸 (cm)	—	10	15
	50g場換算 (m)	—	5.0	7.5

キーワード：シールドトンネル、遠心模型実験、覆工応力、軸力、曲げモーメント、珪砂

〒135-8530 江東区越中島3-4-17 清水建設(株)技術研究所 TEL: 03-3820-5514 FAX: 03-3820-5955

水の入った圧力容器内にトンネル模型を入れた後、圧縮空気を10kPaずつ増加しながら100kPaまで載荷し、そのときのトンネル模型に発生するひずみを計測した。

実験中のトンネル模型は外部より等圧を受けている状態であることから、厚肉円筒理論²⁾より覆工体に発生する応力を求めることができる。図-2は各側圧で得られた覆工体内側の各ひずみ値と、厚肉円筒理論から求められる応力値を表-1のアクリルの弾性係数2500MPaで除した値（ひずみ）を比較したものである。この図より全てのひずみゲージで理論値に近い値を示しており、実験中に得られたひずみから発生応力を計算することの妥当性を確認した。

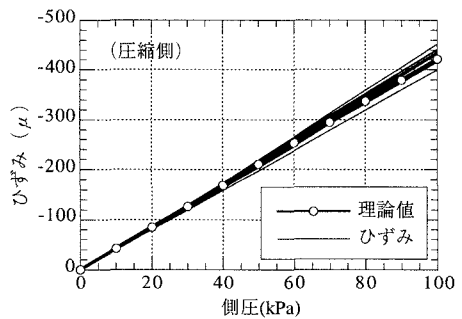


図-2. 側圧とひずみの関係

表-4. 遠心模型実験における初期地盤応力
(単位: kPa)

位置	応力方向		A	B	C
天端	鉛直方向	有効土圧 pe1	61	39	39
		間隙水圧 pw1	0	34	57
		全土圧	61	73	96
	水平方向	有効土圧 qe1	22	14	14
		間隙水圧 qw1	0	34	57
		全土圧	22	48	71
ハート	鉛直方向	有効土圧 pe2	183	116	116
		間隙水圧 pw2	0	128	151
		全土圧	183	244	267
	水平方向	有効土圧 qe2	65	41	41
		間隙水圧 qw2	0	128	151
		全土圧	65	169	192

4. 遠心模型実験結果および考察

表-4は各実験条件での初期地盤応力を示したものである。なお、表に示した値は地盤の密度と地盤高さ、遠心加速度より求めた計算値であるが、実験中に計測した土圧、間隙水圧とはほぼ同じであった。図-3および図-4は遠心加速度50gの時に計測されたひずみから計算した軸力および曲げモーメントの分布図である。なお、トンネルに作用する力は左右対称と考えて、315度(-45度)と225度(-135度)の位置にあるひずみゲージの計測結果をそれぞれ45度と135度の位置のデータとしている。

通常行われている解析では、軸力は90度の位置で最大となる結果を示すことが多いが、図-3の軸力分布図に示すように、実験ではほぼ135度の位置で最も大きくなる傾向を示した。一方、解析から得られる曲げモーメントは、天端部で最大となることが多いが、図-4の曲げモーメント分布図に示すように、実験ではインバートで最大値を示し、天端での値より数倍大きくなる結果が得られた。

5. まとめ

大断面トンネルを想定したトンネル模型に50gの遠心加速度を作用させる遠心模型実験を行い、覆工に発生する応力より軸力、曲げモーメントを検討した。その結果、通常行われる解析結果の傾向と多少異なっていることを確認した。今回の実験結果は覆工体がアクリルであり、通常のコンクリート覆工に比べて弾性係数が小さいことから柔な構造であることや、実験の再現性等に検討の余地があるため、今後は覆工模型の改良を行い、再現性を確認しながら覆工応力の発生機構を明らかにしていく予定である。

参考文献

- 1) トンネル標準示方書〔シールド工法編〕・同解説、土木学会
- 2) 例えば、川本、朝倉土木工学講座23巻 岩盤力学、朝倉書店、1975

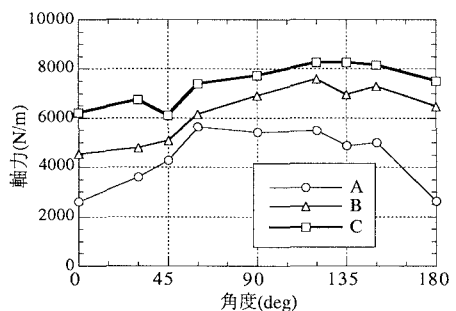


図-3. 軸力の分布図

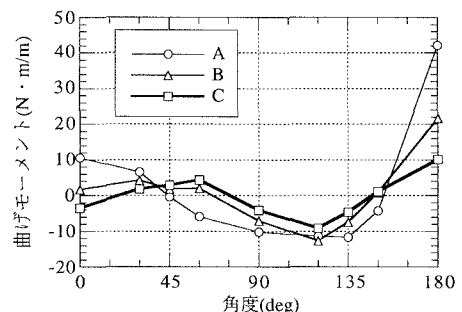


図-4. 曲げモーメントの分布図