

トンネル支保設計手法における2次元解析と3次元解析の比較検討

大成建設(株)土木本部土木設計部 正会員 ○市田 雄行、廣末 龍文、小原 伸高

1. はじめに

トンネル支保構造の設計は、標準的な手法、経験的な手法、解析的な手法に大別される。これらの手法のうち、解析的な手法では、2次元FEM解析が多用されている。本解析では、応力解放率を用いることで、トンネル

の3次元的な掘削過程を表現している。しかし、従来より、地山の非線形特性を考慮した場合には、2次元解析では、切羽進行の3次元効果を十分再現しきれないことが指摘されている。そこで、本稿では、応力解放率を用いた2次元解析と3次元解析を実施し、両者の結果を比較することで、この問題について考察したのでここに報告する。

2. 2次元および3次元解析

本稿では、弾塑性地山、等方等圧の初期応力状態を想定し、支保は吹付けコンクリートとし、切羽後方1mに設置するものとした。解析モデルを図1、解析条件を表1および2に示す。なお、2次元解析では、図2に示す方法にて地山条件ごとに応力解放率を設定した。解析結果のうち、支保内圧 $P(=N/r)$ に着目し、支保の荷重分担率 P/P_0 と地山強度比 G_n について整理した結果を、図3に示す。series2では2,3次元解析の結果は概ね一致しているものの、series1では2と比較して全体的に両者の整合性は低い(結果①)。さらにseries1では、地山強度比が低くなる程両者の乖離が大きくなる結果となった(結果②)。

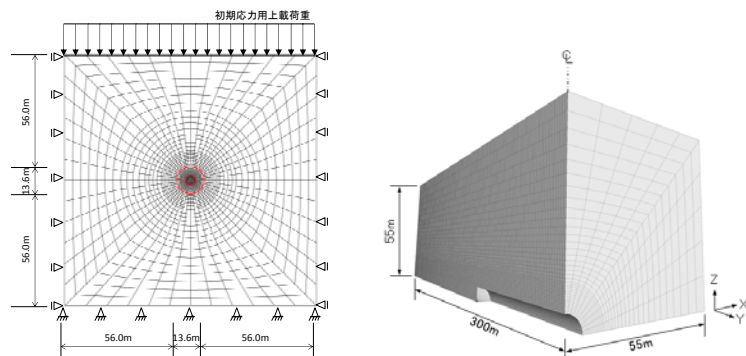


図1 解析モデル(左:2次元、右:3次元)

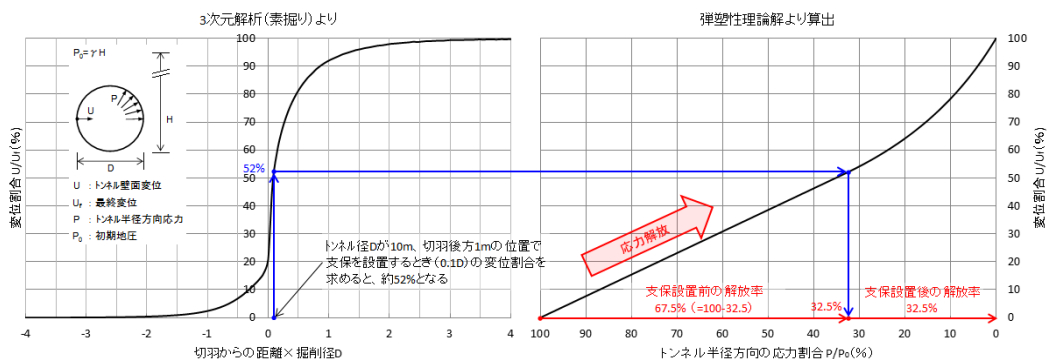


図2 応力解放率設定方法(例)

表1 解析条件①

トンネル半径r	6.8m	
初期応力P0	側圧係数1.0として、各要素に土被り相当の荷重を作用	
2次元解析 解析モデル	地山	平面要素(弾塑性)
	支保	棒要素(弾性)
3次元解析 解析モデル	地山	ソリッド要素(弾塑性)
	支保	シェル要素(弾性)

※地山の破壊基準は、モール・クーロンの降伏基準とする

表2 解析条件②(2、3次元解析共通)

series		series1	series2
地山	単位体積重量 γ MN/m ³	0.026	0.026
	変形係数E GPa	0.5	1.3
	ポアソン比 ν -	0.3	0.3
	粘着力c MN/m ²	1.0	1.8
	内部摩擦角 ϕ °	30	30
	一軸圧縮強度qu MPa	3.5	6.3
支保	弾性係数EI MPa	3,400	3,400
	吹付け厚t m	0.30	0.30
地山強度比 G_n		0.11~0.67	0.20~1.21

※一軸圧縮強度 $qu=2c \cdot \cos \phi / (1 - \sin \phi)$
地山強度比 $G_n=qu/\gamma H$

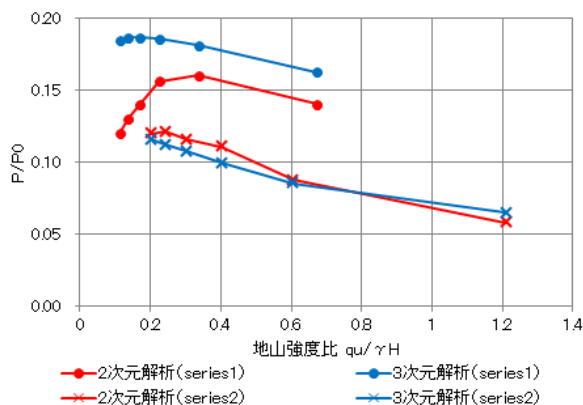


図3 解析結果(2次元と3次元の比較)

キーワード FEM 3次元解析 応力解放率

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 TEL 03-5381-5296

結果①の要因としては、series2 のように地山と支保の剛性比 ($E \cdot r / E_I \cdot t$) が大きい場合では、支保の有無に関わらず、主として地山自身が荷重を負担することによるものと考えられる (考察①)。また、結果②の要因としては、図2の左図にて求めた変位割合が、図2の右図の曲線上の直線 (弾性状態) に位置する場合には、2次元と3次元解析の結果の誤差は小さく、一方で曲線 (塑性状態) に位置する場合には、両者に誤差が生じることが推察される (考察②)。

3. 地山と支保の相互作用

等方等圧の土圧が働く弾性地山内では、地山と支保の荷重分担は、両者の剛性に比例する。これは、Fenner-Pacher らによって理論的に評価されている。ここでは、前章と同様に図1に示すモデルにて3次元解析を実施しその分担率 P/P_0 を評価した。解析条件は、表3～5に示すとおりとし、地山は弾性体と弾塑性体にした場合を考え、弾塑性モデルでは、地山強度比の異なる2通りを設定した。また、表5に示すとおり地山の变形係数 E と支保部材である吹付けコンクリート厚 t の組合せにより、各 series で8通りの解析を実施した。解析結果として、「支保の荷重分担率 (P/P_0)」と「地山と支保の剛性比 ($E \cdot r / E_I \cdot t$)」の関係を、図4に示す。

図4は、支保が剛になる程、あるいは地山が軟らかくなる程、支保の荷重分担率が大きくなることを定量的に示している。剛性比が大きい領域では、値の大小に関わらず荷重分担率に大きな変化はない (結果③)。一方で、これと比較すると、剛性比が小さい領域では、各 series において、荷重分担率の変化の程度が大きい (結果④)。また、地山強度比が異なると、荷重分担率が増加する傾向が見られる (結果⑤)。

結果③の考察としては、地山剛性が高く支保剛性に関わらず、地山自身で初期地圧の大半を負担した結果によるものと考えられる (考察③)。この考えは、前章の結果①とも整合していると言える。一方で、剛性比が小さい範囲では、地山剛性に対して支保剛性が高く、支保が受ける荷重は支保剛性に応じて敏感に変化する領域であると判断される (考察④)。

4. 結論

2章にて実施した2次元解析 (series1 および 2) における地山と支保の剛性比は、それぞれ 3.3 および 8.7 であり、図4にて series1 は結果④、series2 は結果③の領域に位置する。これらの結果から判断すると、2次元と3次元解析の結果が一致しない条件として、地山と支保の剛性比が大きく影響するものと考えられる。また、剛性比が低く、かつ地山強度比が低い条件下では、2次元および3次元解析結果の乖離はさらに大きくなるものと推察される。したがって、地山の強度が低く、土被りが大きい地山条件下においては、本稿の方法により求めた応力解放率を用いた2次元解析では、地山と支保剛性のバランス次第で、切羽進行に伴う3次元効果を十分に再現できない可能性があると考えられる。

本稿では、弾塑性地山を想定した地山において、2次元解析と3次元解析結果を比較し考察を述べた。今後は、トンネルの3次元的な掘削過程をより精度良く表現できる応力解放率の設定方法について検討していきたい。

表3 解析条件③

解析モデル	地山	ソリッド要素 (弾性・弾塑性)
	支保	シェル要素 (弾性)
トンネル半径 r	5.0m	
初期応力 P_0	側圧係数1.0として、各要素に土被り400m相当の荷重を作用	

表4 解析条件④

series		series3	series4	series5
地山	力学モデル	弾性	弾塑性	
	単位体積重量 γ MN/m ³	0.025		
	変形係数E MPa	表5参照		
	ポアソン比 ν -	0.3		
	粘着力c kN/m ²	-	2887	289
	内部摩擦角 ϕ °	-	30	
支保	一軸圧縮強度 q_u MPa	-	10.0	1.0
	弾性係数 E_I MPa	3400		
	吹付け厚 t m	表5参照		
地山強度比 G_n		-	1.0	0.1

※一軸圧縮強度 $q_u = 2c \cdot \cos \phi / (1 - \sin \phi)$
地山強度比 $G_n = q_u / \gamma H$

表5 地山変形係数 E と吹付け厚 t の組合せ

case	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
地山 変形係数 E MPa	250	250	500	500	1,000	1,000	2,000	2,000
支保 吹付け厚 t m	0.30	0.20	0.30	0.20	0.30	0.20	0.20	0.15
$(E \times r) / (E_I \times t)$	1.2	1.8	2.5	3.7	4.9	7.4	14.7	19.6

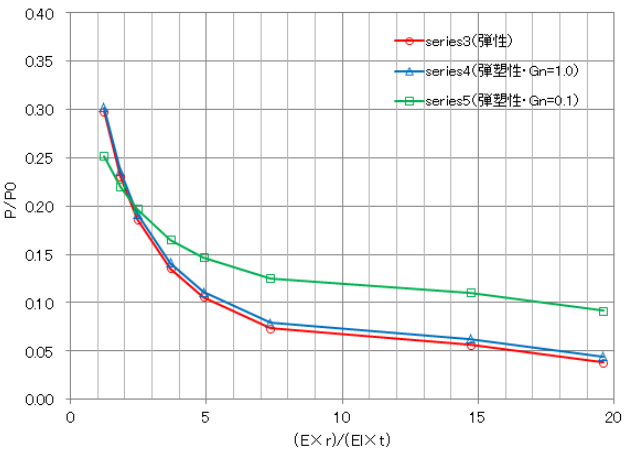


図4 地山と支保の相互作用