

神戸大学大学院 学生員 ○ 松本憲典 鹿島建設(株) 正会員 畠田篤志
 神戸大学工学部 正会員 芥川真一 広島工業大学 正会員 櫻井春輔

1. はじめに

トンネルの掘削の際、横断方向において覆工が円形に閉合していれば地山は理想的な応力状態に保たれる。馬蹄形覆工のトンネルにおいてもインバートを打設する事で、曲げ剛性のみで変形を抑制しようとする場合に比べ、より理想に近い状態(トンネル周辺地山の応力集中をなるべく発生させない状態)を作り出す事が出来る。一方、縦断方向に目を向ければ、そこでトンネル周辺地山の応力状態を乱さないと言う意味において理想に近い状態を作り出しているのがシールドトンネルである。しかし、NATMにおいては、その点はほぼ考慮されていないと言って良いだろう。NATMを用いる際、切羽全面を押さえつける事は当然、不可能であるが、掘削が可能な範囲で少しでもそれに近い状態を作り出す事が出来れば掘削の合理化に大きく貢献するであろう事は想像に難くない。ところが過去において、縦断方向における切羽の安定、地表面沈下の抑制に関して多くの研究がなされているとは言いがたい。そこで、本研究ではその点に着目し、「一時的な支保工を用いて切羽の一部を常に押し続けながら掘削する」と言う工法、-PE(Press & Excavate)工法-を提案し、その可能性を検討する。

具体的にはまず、アルミ棒積層体を用いた応力境界による縦断面トンネルモデル実験を行う。次に弾塑性有限要素解析を用いたモデル実験のシミュレーションを行い、本工法の効果、及び作用のメカニズムについて考察する。

2. 実験の概要

本研究における実験は荒谷ら¹⁾と同様の装置(応力境界による掘削のシミュレート)を用いて行った。これは、エアーバックの圧力を土被り圧から徐々に減圧しそれをもって掘削を模擬すると言うものである。なお、トンネル径は $D=15\text{cm}$ である。計測項目は次の3項目である。1)地表面変位-移動式レーザー変位計にて10点計測(図1参照)、2)切羽変位-切羽近傍に標点を設けて計測(図1参照)、3)崩壊圧-エアーバック圧を水頭に変換して計測。

なお、切羽が崩壊したかどうかの判断であるが、減圧時にエアーバック圧を一定に保つのが困難な時がある。これは地山の変形が収束せずに地山からエアーバックに作用する圧力が一定にならない為である。したがってこれを崩壊した状態とみなした。実験ケースは無支保、板状PE工設置(設置位置3種類)、楔状PE工設置(設置位置3種類)、の各ケースについて土被り0.5D、1D、2D、の計21ケースを行った。PE工の設置位置については、切羽中央部に設置したケースに加え、切羽の上1/4、下1/4にPE工を設置したケースも行った(表1参照)。実験装置の模式図を図1に示す。

3. 実験結果と考察

まず、過去に本研究室で行った「先受け補助工を設置したトンネルモデル実験」と本実験との結果を比較する(表2参照)。無支保のケースの崩壊圧に対し、先受け補助工を設置した場合は崩壊圧48%減、PE工を設置した場合は崩壊圧46%減となっている。崩壊時の圧力が低下したと言う事は切羽の安定性が向上した事に他ならない。このことより、切羽安定性に関して、PE工を設置する事で先受け補助工と同等の効果が期待できる事が推測される。

続いて、PE工の形態、設置位置が及ぼす影響について検討する(図2、3参照)。図2より、崩壊圧が最も低かったケース、つまり切羽安定性が最も高かったケースはCase2(板-中央押し)である事が分かる。また図3は同じ切羽支保圧:10(gf/cm²)における各ケースの地表面沈下形状の比較であるが、この図からもCase2(板-中央押し)が最も有効である事が分かった。

4. モデル実験の数値シミュレーション

この解析はモールクーロンの破壊条件を用いた弾完全塑性解析であり、要素は四角形4節点アイソパラメトリック要素とした。また、アルミ棒積層体とアクリル板との境界にJOINT要素を挿入した。本解析で用いた各物性値は表3の通りである。なお、アルミ棒積層体の c 、 ϕ は過去の縦断面トンネルモデル実験に対する解析入力値を用い、ヤング率:Eは次に示す式²⁾からトンネル中心深さを用いて求めた。

$$E=500+10^2 \sigma_m \quad (\text{gf/cm}^2) \quad \text{ただし、}\sigma_m: \text{平均応力}$$

解析ステップは次の通りである。まず第一段階で地盤に重力をかけ、同時に切羽部分に初期圧(土被り圧)をかける。PE工設置ケースであれば、その左端にも初期圧をかける。第二段階では実験と同様、PE工の左端を固定しその後、切羽部分にかかっていた初期圧を徐々に減じている。その時、減圧段階を40に分割した。また、各減圧ステップで、解が収束しない時、繰り返し計算が20回を超えた時の二つの場合、崩壊が起こったとみなし解析をストップさせた。

まず、解析がモデル実験を正確にシミュレートできているかを確認する為、崩壊圧、切羽変位について実験結果と解析結果を比較する(図4、5参照)。図4は1Dにおける実験結果と解析結果の各ケースの崩壊圧である。図の通り、実験と解析の崩壊圧は各ケースにおいてほぼ一致している。図5は代表2ケース(無支保、板-中央押し)の切羽支保圧-切羽変位曲線である。この図からも実験結果、解析結果はほぼ一致している事が分かる。この二つの比較より、解析が実験を高い精度で再現できていると判断し、解析結果を用いてPE工の効果発揮メカニズムを更に詳しく検証する。

各ケースの崩壊圧力、同じ減圧ステップにおける地表面沈下曲線を比較した(図6、図7参照)。それぞれのグラフより、実験と同様Case2(板-中央押し)が最も高い効果を示している事が分かる。

そこで、最も効果の高かったCase2(板-中央押し)について効果発揮メカニズムを検証する。図8に1DにおけるCase1(無支保)とCase2の終局状態の塑性ひずみ図を示す。これによると、Case2(板-中央押し)は無支保のケースに比べ、塑性領域がかなり小さく抑えられており、あたかもトンネル径が小さくなったかのような挙動を示している。塑性領域が小さくなると言う事はエネルギー損失が小さくなると言う事であり、結果として、切羽安定性の向上、地表面沈下の抑制に効果を上げていると考えられる。

5. 結論

本研究から以下の事が分かった。モデル実験において PE 工法は先受け補助工法と同等の支保効果を期待し得る事が分かった。また、「板状の PE 工で切羽中央部を押したケース」が最も高い効果を発揮する事が分かった。弾塑性有限要素解析を用いモデル実験をシミュレートしたところ、実験と同様「板状の PE 工で切羽中央部を押したケース」が最も高い効果を発揮した。さらに考察を加えた結果、「PE 工により有効トンネル径を小さく出来る」→「エネルギー損失が小さくなる」と言うメカニズムで効果を発揮している事が推測された。

表1 PE工の形状及び設置位置

	PE工先端の形状	PE工設置位置
Case 2	板状	切羽中央
Case 3	板状	切羽上 1/4
Case 4	板状	切羽下 1/4
Case 5	くさび状	切羽中央
Case 6	くさび状	切羽上 1/4
Case 7	くさび状	切羽下 1/4

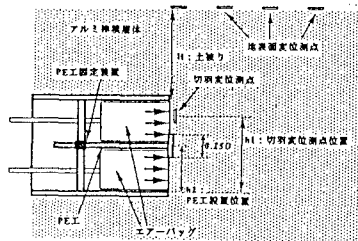


図1 PE工(板状)設置時の実験装置模式図

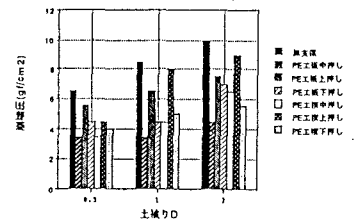


図2 各ケースの崩壊圧力(実験)

表2 各モデル実験の崩壊圧(0.5D)

	崩壊圧 (g/cm ²)	崩壊圧/無 支保崩壊圧 ×100 (%)
無支保	6.5	100
先受け補助工設置	3.4	52 (48%減)
PE工設置 (板-中央押し)	3.5	54 (46%減)

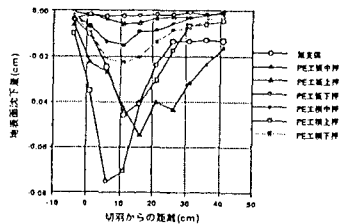


図3 各ケースの地表面沈下曲線(実験)

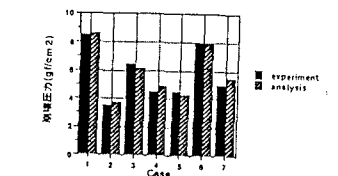
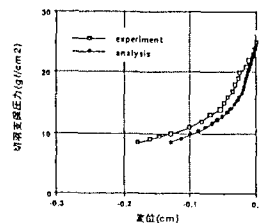


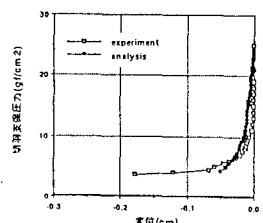
図4 各ケースの崩壊圧力(実験、解析)

表3 解析に用いた物性値

	アルミ 棒積層 体	アクリル板	JOINT 要素
ヤング率 E(g/cm ²)	0.5D 3770 1D 5405 2D 8675	3.25×10 ⁷	
ポアソン比ν	0.333	0.36	
内部摩擦角φ(°)	28.8	45	19.38
粘着力c(g/cm ²)	0.5	10 ⁵	2.3362
単位体積重量γ (g/cm ³)	2.18	1.185	2.0



(a) 無支保 (Case 1)



(b) PE工(板状)を切羽中央部に設置 (Case 2)

図5 切羽支保圧力-切羽変位曲線の比較

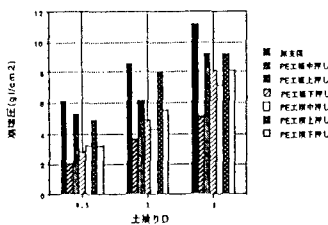


図6 各ケースの崩壊圧力(解析)

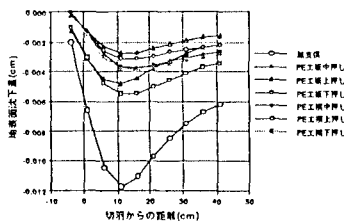
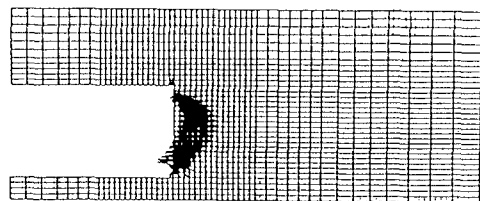
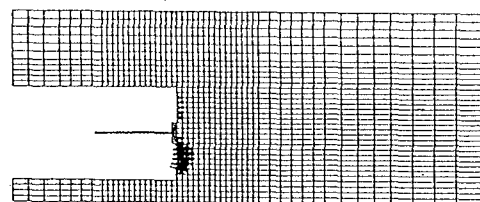


図7 各ケースの地表面沈下曲線(解析)



(a) 無支保のケース (Case 1)



(b) 板状のPE工を切羽中央部に設置したケース (Case 2)

図8 終局状態の塑性ひずみ図 (1D)

参考文献

- 1) 荒谷祐介: 先受け補助工を用いたトンネルの力学挙動に関する研究、神戸大学大学院自然科学研究科、1995
- 2) 足立紀尚、田村武、八嶋厚: 砂質地山トンネルの挙動と解析に関する研究、土木学会論文集、Vol.358、pp129~136、1985