학술논문

한국터널공학회논문집 2009년 12월
제11권 제4호, pp. 419-425

반개착식으로 굴착한 천층터널에서 Braced Rib Arch의 거동

안정환[1]*, 이상덕[2]

Behavior of Braced Rib Arch in Shallow Tunnel Excavated by Semi-Cut and Cover Method

Joung-Hwan An, Sang-Duk Lee

Abstract Recently, the number of shallow tunnel construction increases to improve the structural safety and environment-friendliness. In Semi-Cut and Cover Method, ground is excavated to the crown arch level and braced rib arch is set to backfill before the excavation of lower face. Semi-Cut and Cover Method is proposed to solve the problems occurred by the conventional Cut and Cover Method, such as unstability, high-cost and the large cutting slope to be reinforced. In this paper, the behaviors of Braced Rib Arch in shallow tunnel excavated by semi - cut and cover method was studied. Model tests in 1:10 Scale were performed in real construction sequences. The distance between supports of rib arch was 1.8 m and the lenth of spacer was 1.0 m. the size of test pit was 4.0 m (width)×3.3 m (lenth) 4.0 m (height) in dimension. Tests results show that backfill load acting on arch was smaller than that in the conventoinal Open-Cut Method.

Keywords: Semi-cut and cover method, shallow tunnel, braced rib arch

요 지 최근에 저토피 및 터널 갱구부에 반개착식 공법을 적용하여 구조적인 안전성과 자연친화성을 높인 사례가 증가하고 있다. 반개착식 공법은 저토피구간에서 원지반을 터널 천단아치에 해당하는 기초까지만 굴착하고 아치형 구조물을 설치하여 복토한 후에 터널하반을 굴착하여 기존 개착공법에서 발생되는 지반 과다절취에 따른 대절토 비탈면 발생과 굴착면 보강에 따른 고비용과 불안정성 증대 문제를 해결할 수 있는 공법이다. 본 논문에서는 저토피 구간에서 반개착식으로 굴착한 Braced Rib Arch의 거동에 대하여 연구하였다. 아치형구조물의 Rib Arch는 지간이 1.8 m인 아치형 강재를 간격재는 목재를 사용하였으며 1:10의 축척으로 4.0 m(폭)×3.3 m(높이)×4.0 m(연장)의 크기를 가진 대형토조에서 실험을 수행하였다. 모형실험결과 아치형 구조물에 작용하는 성토하중은 기존 개착터널에서 사용하는 하부구조물의 폭에 해당하는 상부토체의 크기보다 작은 것으로 나타났다.

주요어: 반개착식 공법, 저토피, 아치형 구조물

1. 서 론

최근 친환경적인 건설에 대한 관심의 증가와 심각하게 대두되는 도심지의 교통난을 해결하기 위하여 터널에 대한 수요가 늘어나고 있다. 이에 따라 터널의 갱구부와 얕은 터널의 구조적인 안정성에 대한 문제가 자주 발생되고 있으며 자연친화적인 개념의 도입이 요구된다.

갱구부와 저토피부는 구조적으로 취약할 뿐만 아니라, 터널을 개착식으로 건설할 경우는 과도한 지반절취로 인한 환경파괴, 시공성 저하, 공사비 과다, 사후 유지관리 및 비탈면안정성 등의 문제가 발생된다. 특히 최근에는 환경파괴를 최소화하기 위하여 갱구 설치시 토피를 최소 2~3 m 정도 확보하고 지형, 지질조건을 고려하여 갱구부 위치를 선정할 것을 요구하는 설계기준이 적용되고 있는 실정이다(이종구, 2004).

평탄한 지형에 토피 1D 이하의 얕은 터널을 굴착할 경우 개착공법을 적용하여 지표면에서 지반을 굴착한 후 터널 라이닝을 설치하고 되메우기하여 원상태로 복구하게 된다. 이때 굴착비탈면과 터널라이닝의 안정성 확보와 사토처리 문제 등이 발생된다. 갱구부와 저토피 구간은 일반적으로 터널의 지지원리인 아칭효과가 발휘되기 어렵고 굴착비탈면이 불안정한 구간이다. 또한 터널굴착이나 지표면 변화 등에 의한 비탈면 붕괴 가능성이 높아 보강공법을 사용해야 하므로 비용이 많이 들고 보강효과에 확신을 갖기 어려운 실정이다.

따라서 갱구부 및 저토피부 터널을 굴착할 때 기존 개착터널공법의 단점을 보완할 수 있으며, 공사비를 절감

[1]정회원, (주)동호 지반공학부 상무이사
[2]정회원, 아주대학교 환경건설교통공학부 교수
*교신저자: 안정환 (E-mail: jwan@dongho.co.kr)

하고 공기를 단축하면서 원지반 훼손을 최소화할 수 있는 자연친화적인 새로운 공법의 도입이 필요하다.

본 연구에서는 갱구부 및 저토피부에서의 새로운 반개착 공법을 제안하고 1/8 규모의 실대형모형실험을 실시하여 이 공법의 타당성을 규명하고자 한다.

2. BRAM

2.1 개요

터널을 시공할 때에는 터널과 인접구조물의 안정성은 물론 지질조건과 경제성 등을 고려하여 적합한 굴착공법을 선정해야 한다. 터널은 터널상부의 토피고가 어느 정도 보장되어야 지반 아치가 형성되어 안전하게 시공할 수 있다. 그런데 터널 갱구부나 계곡부 통과 구간 등에서는 토피가 낮아서 일반적인 NATM공법으로는 어려우므로 안전성이나 시공성 및 경제성 측면에서 유리한 개착방식 터널공법을 적용하는 경우가 많다.

종래에는 저토피 지역에서 개착식으로 터널을 시공할 때 충분한 크기로 지반을 굴착하고, 터널 전단면의 라이닝 콘크리트을 시공하였다.

그러나 완전 개착식으로 굴착하게 되면 절토작업이 큰 범위로 이루어져서 비탈면 규모가 커지고 엄청난 토공이 발생하여 사토처리문제가 발생할 뿐만 아니라 되메움 작업에 많은 시간과 비용이 수반된다. 또한 대절토 작업이나 가설벽체 설치에 따른 비탈면의 안정성 문제가 발생한다.

불가피하게 개착식으로 터널을 시공할 경우 종래의 개착공법을 적용함에 따라 발생되는 문제점을 해결할 수 있는 방안으로 반개착식 공법이 제안되어 적용되고 있다. 즉, 원지반을 터널 바닥부까지 굴착하지 않고 천단 아치에 해당하는 지점까지만 굴착하여 슬래브를 설치하고 되메움한 후 하반을 굴착하는 공법이다. 반개착식 공법을 적용하면 굴착단면이 크게 감소하여, 굴착비탈면의 안정과 보강공이 대폭 감소하여 공기를 단축시킬 수 있고 안정성에도 유리하다.

2.2 공법의 특징

BRAM(Braced Rib Arch Method)은 산악터널의 갱구부와 계곡부, 도심지터널의 지하철과 같은 천층터널에 시공되는 기존 개착공법의 문제점을 보완하기 위해 제시한 반개착 방식의 터널공법이다. 반개착식 공법은 국외에서 여러차례 시공한 경험이 있으며 슬래브는 대부분 현장타설 콘크리트를 사용하였다. 그러나 일체형 Arch Slab를 시공하는 경우에는 하부굴착시 임의 지점 침하에 의해 발생하는 부재력이 아치형 구조물의 단면 확대를 유발하는 단점이 있다(아주대학교, 1995). 따라서 본 BRAM 공법에서는 Arch Slab 구조물로 현장타설 콘크리트 대신 아치형 H형강과 간격재로 대체하여 하부굴착시 발생할 수 있는 진동의 영향에 유리하다. 또한, 임의 지점의 침하에 의한 국부적인 변위를 허용함으로서 하중전이를 유발해 부재에 작용하는 하중을 최소화하였다. 이 새로운 형식의 구조물을 사용한 반개착식 터널 굴착방법을 BRAM으로 명명하였다(그림 1).

2.3 시공방법

반개착식 BRAM 공법은 터널을 시공할 때 원지반을 터널 천단아치부까지 굴착하고, 조성된 지면 위에 아치형 구조물을 설치한다. 아치형 구조물의 구조골격은 터널의 설계단면으로 절곡한 H형강으로 형성하고 H형강의 사용규격과 종방향 배치간격은 토피고와 지반조건에 따라 조정한다. H형강의 배치간격에 적절한 기초를 시공하고 H형강을 일정 간격으로 시공한다. H형강은 터널의 크기와 시공성에 따라 적절한 이음부를 두어 시공이 가능하다. H형강 사이에는 현장조건을 고려하여 시공에 유리한 간격재를 사용한다. 아치형 구조물의 시공이 완료된 후에는 상부의 굴착공간을 되메움하면서 동시에 터널 하반을 굴착한다(이상덕, 1994).

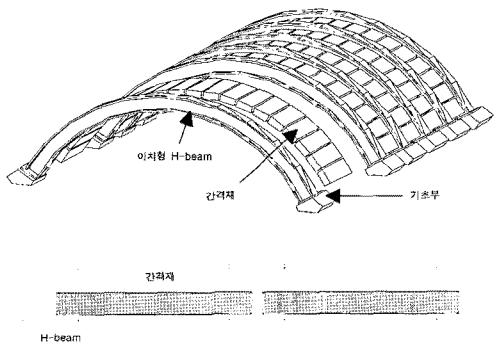


그림 1. 아치형 H-beam과 간격재

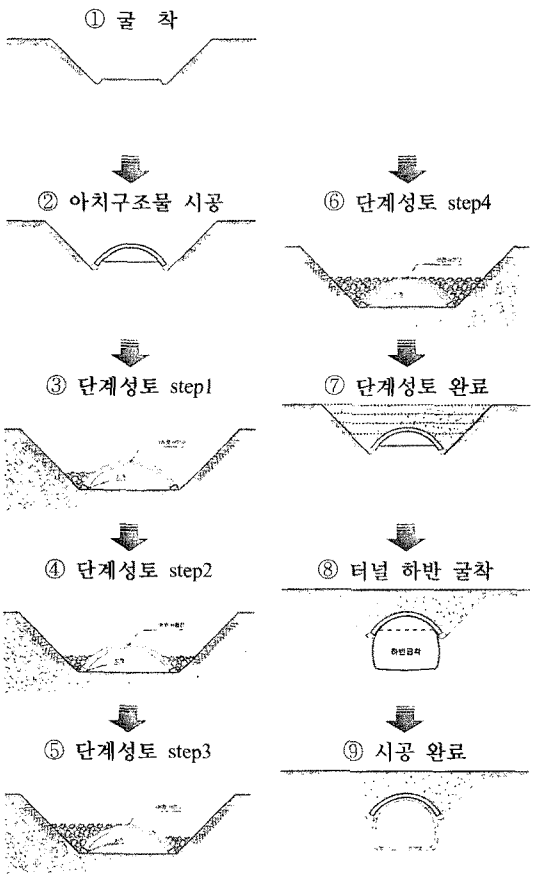


그림 2. Braced Rib Arch Method 시공순서

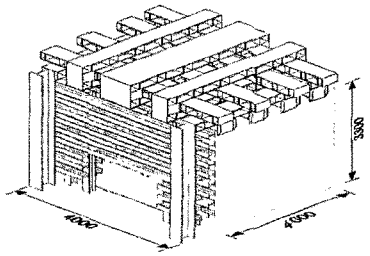


그림 3. 대형토조 모식도

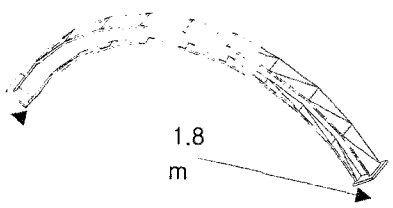


그림 4. 아치형 H형강

3. 실대형 모형실험

3.1 실험개요

본 연구에서는 아치형 H형강과 간격재를 사용한 아치형 구조물을 제작하여 실제 시공과정을 모사하여 실험을 수행하였으며, 되메움 과정에서 기초에 작용하는 하중을 측정하였다.

실험은 굴착경사, 성토고의 두 요인을 변화 시키며 수행하였다. 굴착경사는 저토피 토사구간에서는 경사굴착, 인접 구조물이 존재하는 지역에서는 가시설을 적용하여 수직굴착 하는 것으로 모델링하였다.

3.2 실험목적

아치형 구조물 시공후 상부 되메움시 구조물 기초에 작용하는 성토하중의 크기를 토피고별고 규명하고자하였다. 또한 하중의 작용방향을 파악하여 기초 보강시 파일등의 천공각도를 제시하고자 한다.

3.3 실험장치

모형토조는 실제 터널의 굴진을 모사하기 위해 4.0 m (폭)× 3.3 m(높이)×4.0 m(연장)의 크기를 가진 대규모 3차원 박스형태의 대형토조를 그림 3 및 4와 같이 제작하였다.

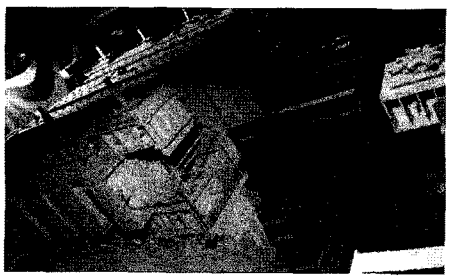


사진 1. 대형토조 전경

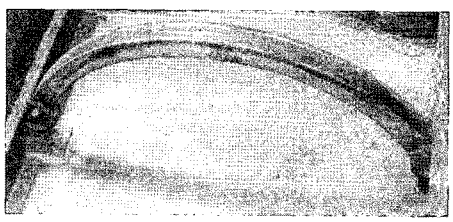


사진 2. 아치형 H형강 전경

아치형 H형강은 H-100×100×6×8로써 H형강을 절곡하여 제작하였다. H형강의 지간은 1.8 m이고 기초양단에는 변위조절과 작용하중 측정이 가능하도록 제작하였다.

3.4 모형지반

모형지반은 20 cm마다 진동다짐을 실시하여 상대밀도가 일정하도록 하였으며, 지반조성 중 현장단위중량 시험기를 이용하여 단위중량을 측정하였다(이상덕, 1997).

표 1. 모형지반의 물리적 시험 결과

물리적 특성	결 과
입도분포	D_{10} = 0.28, Cu = 2.68 Cc = 0.69
최대·최소 건조단위중량	γ_{dmax} = 16.86 kN/m^3, γ_{dmin} = 13.82 kN/m^3
건조단위중량	γ_d = 15.57 kN/m^3
함수비(%)	7.0~7.6
비 중	Gs = 2.63

표 2. 모형지반의 역학적 시험 결과

역학적 특성	결 과
상대밀도D_r[%]	74.8
내부마찰각ϕ[°]	38
점착력c [kN/m^2]	11

3.5 계측

지반반력은 하중의 작용방향을 파악하기 위하여 수직·수평 방향의 로드셀을 설치하여 수직·수평방향 분력의 측정하였다. 기초는 분력을 원활하게 측정하기 위하여 힌지조건으로 설치하였다. 차후 임의지점의 침하에 의한 영향을 파악하기 위하여 변위를 제어할 수 있게 제작하였다(그림 5, 6).

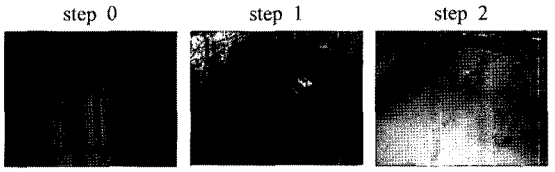
3.6 실험방법

본 연구는 실험의 정확성을 유지하고, 연구성과의 제고를 위하여 다음의 순서에 따라 수행하였다(사진 3). step 0은 터널 천단아치부에 해당하는 지반까지 굴착한 후 아치형 구조물을 설치한 상태이며, step 1은 층별 다짐을 실시하여 지반조성을 하는 단계이다. step 2는 성토를 완료하여 기초에 작용하는 하중을 측정하는 단계이다.

실험변수는 굴착경사와 성토고이며, 굴착경사는 저토피 토사구간에서는 경사굴착의 경우 인접 구조물이 존재하는 지역에서는 가시설을 적용하여 수직굴착 하는 것을 모사하였다.

표 3. 실험 종류

실험명	굴착경사	성토고
CASE1	굴착경사 60°	1.5D
CASE2	굴착경사 90°	



아치형 구조물 설치 단계 성토 성토 완료

사진 3. 실험수행 과정

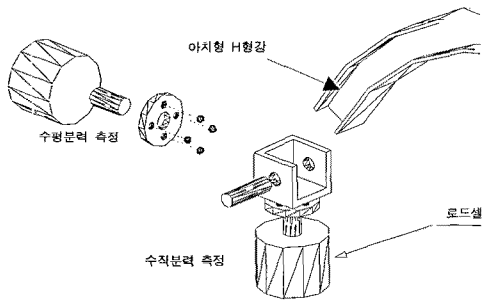


그림 5. 모형실험 수행 과정

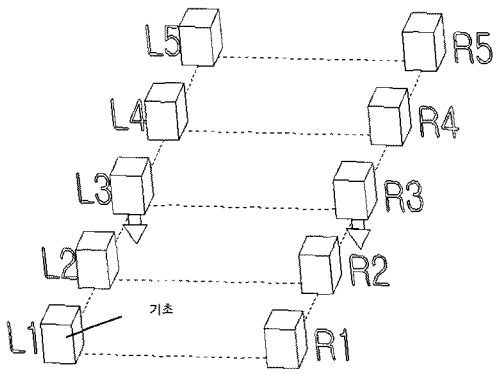


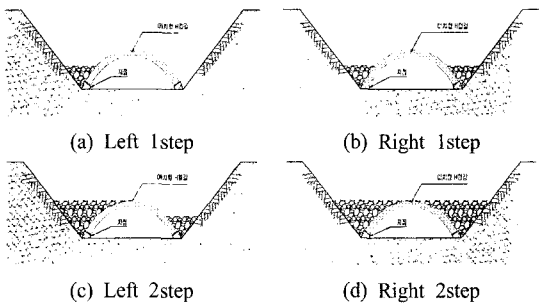
그림 6. 기초 반력 계측위치

4. 실험결과

4.1 비대칭 성토

천단하부의 되메움 과정에서는 그림 6과 같은 방법으로 좌측부를 먼저 성토한 후 다짐을 시행해 성토하중이 한 기초부로 편중되는 경우에 발생할 문제에 대하여 알아보았다.

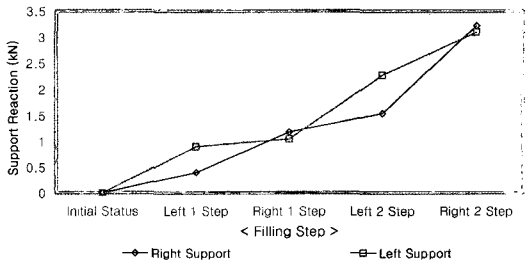
천단하부 성토과정에서는 H형강의 좌 우측 지반이 비대칭하게 성토되어 성토하중이 한 기초부로 편중되는 것을 검토한 결과 성토를 먼저 실행한 좌측부에서의 지반반력이 우측부보다 Left 1step에서는 약 2배, Left 2step에서는 약 1.5배 정도 큰 것으로 나타났다. 그러나 우측부를 성토하여 성토고를 일정하게 유지하면(Right 1step, Right 2step) H형강의 양 기초의 반력차가 약 5% 이내로 나타났다. 따라서 비대칭성토에 의해 한 기초부로 편중되는 작용하중의 크기는 매우 작은 것으로 나타났다(그림 8).



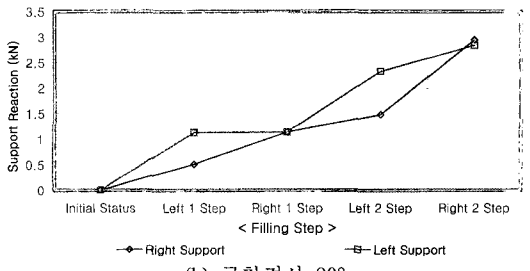
(a) Left 1step (b) Right 1step

(c) Left 2step (d) Right 2step

그림 7. 기초 반력 계측위치



(a) 굴착경사 60°



(b) 굴착경사 90°

그림 8. 비대칭 성토에 따른 기초반력

4.2 성토고 증가에 따른 기초하중 양상

본 절에서는 성토고 변화에 따라 지반반력의 변화양상을 규명하고 설계단계에서 필요한 성토고에 따른 하중크기를 제시하였다.

천단상부까지 비대칭 성토를 완료한 후 0.1 L(L : 아치형 구조물의 지간), 20 cm씩 단계별 성토를 시행하였다. 되메움 과정에서는 성토에 따른 일반적인 거동과 굴착경사에 따른 차이점을 비교하였다.

지반반력은 성토고가 높아짐에 따라, 굴착경사가 90°, 60°의 순서로 낮아짐에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 굴착경사가 가파를수록 성토고에 따른 아치형 구조물에 작용하는 하중의 증가량이 커지는 것으로 나타났다(그림 9(a)). 그러나 성토고에 따른 성토하중의 증가량(ΔP)은 감소하는 경향을 보였고 굴착경사 60°, 90°의 순서로 성토하중 증가량(ΔP)이 감소하는 폭이 커지며 일정 성토고 이상에서는 일정한 값을 유지할 것으로 예상되었다(그림 9(b)).

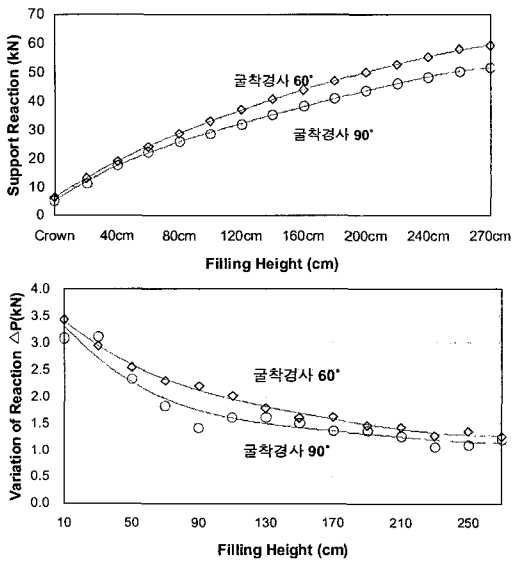


그림 9. 성토하중 증가에 따른 지반반력

4.3 환산 토피고

아치형 구조물과 기초부를 설계하기 위해서는 구조물에 작용하는 성토하중의 크기를 규명해야 한다. 기존 개착터널에서는 라이닝 폭만큼의 성토량이 하중으로 작용하는 것으로 가정하고 설계를 수행하였다. 그러나 이것은 정확한 수치가 아니며 기존의 반개착식 터널에 대한 자료는 국내에 전무하다고 하여도 과언이 아니다(나상민 외3, 2005). 이러한 성토하중을 제시하기 위하여 실대형실험을 통한 환산토피고와 기존의 얕은 터널에 적용된 이완토피고 산정식을 비교·검토하였다.

실험은 실제 시공과정과 유사한 방법으로 수행하였고, 임의 성토고에서 아치형 구조물에 작용하는 하중을 측정하여 토체의 크기로 환산하였으며, 이것을 환산토피고라는 개념을 적용하여 나타냈다(표 3). (환산토피고: 아치형 구조물에 작용하는 성토하중을 토체 부피로 환산하고 그 부피의 폭은 아치형 H형강의 지간으로, 종방향 길이는 H형강의 배치간격으로 계산했을 때의 높이)

실험 결과 되메움 과정에서 아치형 구조물에 작용하는 하중은 성토고가 증가함에 따라 선형적으로 증가하지 않고 증가량이 점점 감소하는 비선형적인 경향을 보였다.

환산토피고(무차원수: H/L)는 성토고가 증가함에 따라 환산토피고의 증가량이 감소하는 것으로 나타나 일정 성토고 이상에서는 터널 굴진방향의 횡방향아칭에 의해 H형강에 작용하는 하중 증가가 나타나지 않고 수렴해 일정한 환산토피고를 나타낼 것으로 예상된다. 또한, 그림 10에 표기된 기존 개착터널의 수치는 구조물의 양단 폭에 해당하는 되메움토를 모두 하중으로 적용한 값으로 기존 개착터널에 적용되는 값이다. 실험결과 아치형 구조물에 작용하는 성토하중은 성토고에 관계없이 기존 개착터널 적용치보다 작은 값으로 나타나 기존의 방법을 사용할 경우 과다 설계가 될 것으로 판단된다.

표 4. 환산토피고

$$W = L \cdot d \cdot h \cdot \gamma$$

$$\rightarrow \quad h = \frac{W}{L \cdot d \cdot \gamma}$$

W: 하나의 H형강에 작용하는 수직하중
L : 아치형 H형강의 지간
d : 아치형 H형강의 종방향 배치간격
h : 환산토피고
γ : 지반의 단위중량

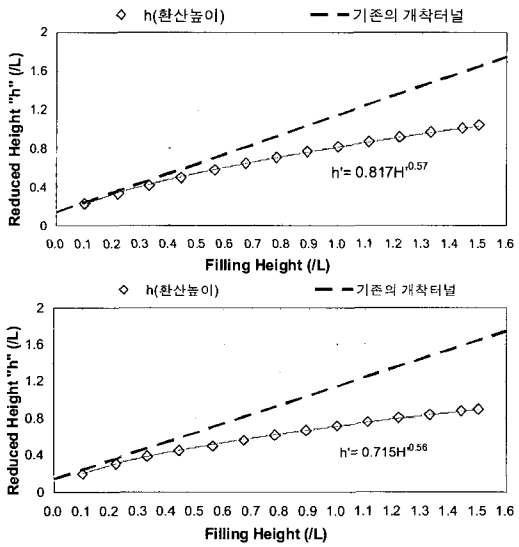


그림 10. 성토고에 따른 환산토피고

4.4 기초하중의 작용방향

아치형 부재에 이론적으로 축력만이 작용하면 지점에 작용하는 하중의 작용방향은 일정할 것이다. 그러나 부재의 변형에 의해 지점반력의 작용방향은 다소 변화한다.

그림 11은 성토고에 따른 지점반력의 작용방향을 나타낸 것이다. 지점반력의 작용방향은 연직방향과 이루는 각도를 계산하여 도시하였다. 천단심도까지 성토한 경우 지점반력의 작용방향은 아치형부재에 작용하는 축력의 방향에 비해 다소 작은 굴착경사 60°는 21°, 굴착경사 90°는 12°로 나타났다. 그러나 성토고가 높아져 성토고 0.7 L이상의 지반에서는 부재의 축력의 작용방향과 비슷한 방향으로 작용하였으며, 굴착경사 60°와 90°는 유사한 값을 나타냈다.

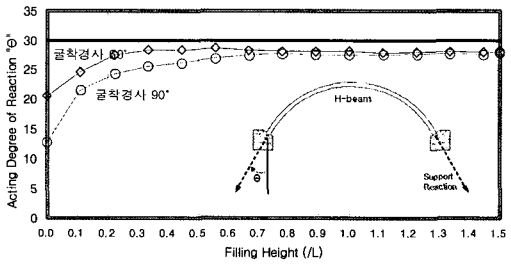


그림 11. 기초하중의 작용방향

5. 결 론

본 연구에서는 반개착 터널굴착 공법인 BRAM[Braced Rib Arch Method]에서 상부의 되메움에 따른 아치형 구조물(Braced rib arch)에 작용하는 하중에 대하여 분석하였으며 다음의 결론을 도출하였다.

1. 천단하부의 비대칭 성토에 의한 양 단 기초부의 하중 차이는 5% 이내로 하중 편중 현상에 의한 문제 발생 가능성은 적을 것으로 사료된다.
2. 성토고가 높아짐에 따라 아치형 구조물에 작용하는 하중이 증가하였고 작용하중의 증가량은 성토고가 높아짐에 따라 점점 감소하여 1.5 L 이상의 높은 성토고에서는 일정 하중에 수렴할 것으로 판단된다.
3. 구조물에 작용하는 하중의 크기는 굴착경사가 급해질수록 감소하며 기존의 개착터널 설계에 적용한 성토하중(구조물의 양단 폭에 해당하는 상부 성토하중)보다 실험치가 작은 값으로 나타나 되메움 높이 전체를 성토하중으로 고려하는 것은 과다설계로 사료된다.
4. 기초에 작용하는 하중 방향은 아치구조물의 축방향보다 수직에 가까운 방향으로 나타났다.

참고문헌

1. 이상덕, 최수일, 구자갑 (1994), "안정된 지하구조물의 설계 및 시공", 도서출판 새론, pp. 420-425.
2. 아주대학교 토목기술연구소 (1995), "프리캐스트 콘크리트 아치 구조체의 역학적 거동 연구", pp. 135-139.
3. 이상덕 (1997), "기본 토질시험", 도서출판 새론, pp. 23-25.
4. 이종구, 조성민, 정현식, 김명모 (2004), "장지간 지중강판구조물의 최소토피고 평가 및 토피지반 보강에 대한 수치해석", 한국지반공학회 논문집, 제20권, 5호, pp. 67-78.
5. 나상민, 이성진, 김상희, 이상덕 (2005), "저토피 구간 통과를 위한 반개착 공법의 실험적 연구" 제6차 터널 기계화 시공기술 심포지엄 논문집, pp. 161-168.

접수일(2009.9.10), 수정일(1차: 2009.9.30, 2차: 2009.10.13), 게재확정일(2009.10.14)