

강연선과 아일랜드타입 전단키를 이용한 실드터널 체결기술 연구

A Study on Shield Tunnel Assembling System Using a Cable and Island-Type Shear Key

마 상 준¹ Ma, Sang-Joon

이 영 섭² Lee, Young-Sub

김 동 민³ Kim, Dong-Min

Abstract

In this study, a new segment assembling method using cable tensile force and island-type shear key was developed to improve the problems of bolt assembling method of shield tunnel. The bolting system and island-type shear key system were compared to analyze the mechanical behavior that occurs in the segment. The study results obtained from structural investigation and numerical analysis technique showed that the shear strength of island-type shear key is higher than that of the bolt system. With the increase of the tensile strength, it is expected that the stability of the segment will be secured.

요 지

본 연구에서는 볼트체결을 이용한 실드터널 세그먼트의 체결방식의 문제점을 보완하기 위해 새로운 세그먼트 체결 기술을 개발하였다. 개발된 체결방식과 볼트체결방식에 대하여 구조검토와 수치해석 기법을 통해 세그먼트에 발생하는 역학적 거동을 평가하였다. 아일랜드타입 전단키는 기존 세그먼트 체결방식의 고인장력 볼트보다 높은 전단강도를 확보하였으며, 강연선에 의한 인장강도의 증대로 세그먼트 전체의 안정성 증가를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Shield tunnel, Assembling system, Island-type shear key, Tensile strength, Shear strength

1. 서 론

실드 터널 공법에서 라이닝을 구성하는 세그먼트는 여러 개의 분할체로 구성되고, 각 세그먼트는 일체화된 구조물이 아니기 때문에 볼트체결을 통해 세그먼트와 세그먼트가 연결되어 하나의 일체화된 링을 형성한다 (Jeong et al., 2004). 각 세그먼트는 볼트 등의 재료를

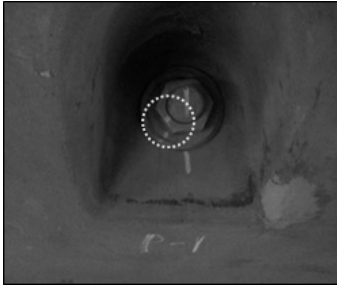
통해 연결시키는데, 시공조건 및 지반조건에 따라 세그먼트의 파손이나 링 연결부의 변형으로 시공성 및 안정성에 대한 신뢰도가 저하되는 사례가 발생되고 있다 (Chung et al., 2000). 볼트 형태의 체결 방식은 체결력 부족으로 풀림 현상과 볼트부를 통한 누수 발생 가능성이 있으며, 작은 오차에도 볼트 연결이 어려워지는 등의 단점을 갖고 있다(Jeong et al., 2004).

1 정희원, 한국건설기술연구원 연구위원 (Member, Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology)

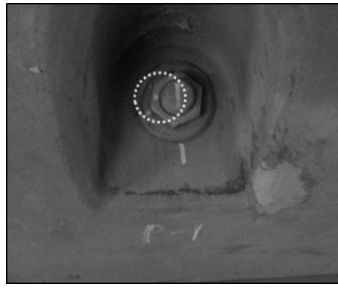
2 정희원, 한국건설기술연구원 전임연구원 (Member, Research Specialist, Korea Institute of Construction Technology, Tel: +82-31-910-0622, Fax: +82-31-910-0561, youngsublee@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 정희원, 한국건설기술연구원 전임연구원 (Member, Research Specialist, Korea Institute of Construction Technology)

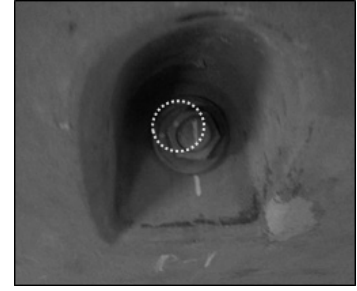
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.



(a) Excavation 40cm, rotation angle 70°



(b) Excavation 80cm, rotation angle 30°



(a) Excavation 120cm, rotation angle 10°

Fig. 1. Unlocking of assembling bolt

최근 기존의 볼트 형태의 세그먼트 체결 방식의 문제점을 개선하기 위해 강연선의 긴장력과 세그먼트 전단키를 이용한 쉴드터널 체결 방법에 대한 연구가 진행되고 있다(Ma et al., 2012). 새로운 체결방법에서는 기존 볼트 체결 방식에 비해 축 방향으로 더 높은 체결력을 얻을 수 있도록 강연선 긴장력을 이용하여 체결하였고, 전단키 세그먼트로 인해 볼트 부재에 비해 더 우수한 전단력을 보유할 수 있다.

본 연구에서는 아일랜드 전단키와 강연선을 이용하여 세그먼트를 체결하는 새로운 체결방법에 대하여 구조적 성능을 고려하여 최적의 체결시스템 설계를 수행하였다. 또한 새로운 체결시스템의 구조적 성능증진을 검토를 위하여 기존 볼트 체결방식과의 전단, 인장하중에 대한 안정성과 체결력에 대하여 3차원 수치해석적 방법을 통하여 비교평가를 수행하였다.

2. 세그먼트 체결방식 분석

2.1 기존 체결 방식의 문제점

현재 대부분의 국내 쉴드터널은 곡볼트, 경사볼트, 볼트박스 등의 볼트 부재를 이용하여 체결되고 있다. 볼트 체결 방식은 상재하중, 수압, 세그먼트의 규격, TBM의 추력 등 다양한 조건을 고려하여 적정 토크치를 산정하며, 나사산끼리의 접합으로 인한 마찰이 체결을 유지하는 힘을 갖게 된다. 그러나 볼트 체결 방식은 진동이나 충격 등에 의해 접촉부의 마찰력보다 큰 외력이 가해지면, 나사산 접촉부의 공간 차이가 발생하여 볼트 풀림 현상이 발생 할 수 있다(Ma et al., 2013).

쉴드공법은 체결된 세그먼트 링을 TBM에 설치된 유압잭으로 이용하여 강한 힘으로 밀면서, 전방에 설치된 커터(cutter)에 의해 지반을 굴착하면서 전진하는 공법

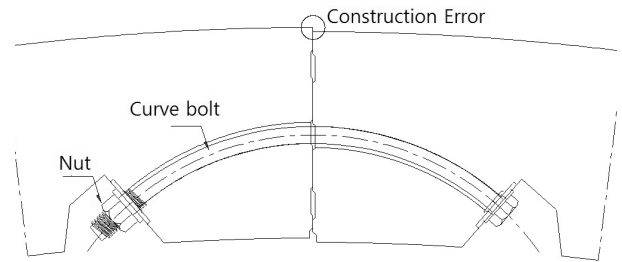


Fig. 2. Construction error of curve bolt assembling method

이다. 따라서, 굴착 대상의 강도가 커짐에 따라 유압잭의 추진력은 더 커지게 되고, 커터의 굴착 진동과 유압잭의 높은 추진력이 후방 세그먼트에 전달되면서 체결된 볼트가 풀리는 현상이 발생할 수 있다.

싱가폴의 ○○ 쉴드터널 시공현장에서 굴진 거리에 따른 체결된 볼트의 풀림정도를 측정한 결과 Fig. 1과 같이 굴진 거리가 커짐에 따라 너트에 표시된 부분이 회전하는 현상이 발생하였다. 현장의 조건은 곡볼트 체결방식이지만, 볼트박스 체결방식의 경우에는 너트와 볼트도 동시에 풀리기 때문에 나사산 접합에 의한 마찰력은 거의 기대할 수 없을 것으로 판단된다. 실제 쉴드터널 현장에서는 볼트의 풀림현상을 보완하기 위하여, 일정 거리 굴진 후 체결된 볼트의 재조임을 지속적으로 실시하고 있다(Ma et al., 2013).

볼트 체결 방식의 또 다른 문제점은 시공 시 작업자의 숙련도가 충분하지 않으면 볼트 직경과 세그먼트 및 볼트박스에 형성된 볼트 통과 공간과 유격이 발생한다는 것으로서, Fig. 2는 곡볼트 체결방식에서 세그먼트에 형성된 볼트 통과 공간과 실제 볼트 직경과의 차이를 나타낸 것이다. 볼트는 통과 공간의 양 끝에 치우쳐서 체결될 가능성이 충분히 있고, 이로 인해 터널 배면 혹은 내부에는 세그먼트 간의 시공 오차가 발생하게 되어 시공 오차가 누적될 경우에는 시공성에 큰 문제가 발생

될 수 있다.

Table 1은 곡볼트와 볼트박스의 유격을 나타낸 것이다. 이러한 유격은 볼트 체결방식에서 많이 발생하기 때문에 체결방식의 근본적인 변화를 통해서만이 해결 가능할 것으로 판단된다.

2.2 아일랜드타입 전단키와 강연선을 이용한 체결방법

구조물의 구조적 성능 향상을 위해 건설재료에 프리스트레스를 적용해 왔으며, 프리스트레스 공법은 인장 저항에 취약한 구조물의 문제점을 극복하기 위해 구조체에 긴장력을 도입하여 구조물에 작용하는 인장력에 대해 저항하는 역학적인 메커니즘을 가지고 폭넓게 사용되고 있다(Ha et al., 2004; Chung et al., 2000).

프리스트레스의 적용을 위하여 세그먼트 제작 시 축방향에 대하여 강연선이 통과할 수 있도록 제작하여 세그먼트 결합 시 각 세그먼트에 강연선을 통과시켜 체결 후 긴장력을 도입하면, 세그먼트 라이닝을 완전한 일체형으로 체결시켜 강연선의 우수한 인장력과 유압잭의 높은 압력으로 기존세그먼트 체결 장치와 비교하여 높은 체결력을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1. Construction error due to gap between bolt and installation hole diameter

Assembling method	Bolt & installation hole diameter	Gap
Curve bolt	- Installation hole diameter : $\varnothing 30$ mm - Bolt diameter : $\varnothing 24$ mm	6 mm
Bolt box	- Installation hole diameter : $\varnothing 29$ mm - Bolt diameter : $\varnothing 22$ mm	7 mm



(a) The front of the segment



(b) The back of the segments

Fig. 3. Shape of the island-type shear key

또한, 축방향의 전단키는 세그먼트 조립 후 세그먼트 터널 직각 및 수평방향의 하중에 대해 전단저항을 일으켜 세그먼트로의 응력 분배 기능을 발휘하며, 세그먼트에 형성되어 있는 암수의 전단키의 가이드 역할을 통해 축방향 조립의 시공오차 감소가 가능할 것이다.

3. 아일랜드타입 전단키와 강연선을 이용한 체결 시스템 설계

3.1 아일랜드타입 전단키 설계

세그먼트의 아일랜드타입 전단키는 Fig. 3에서와 같이 축 방향으로 진, 후방에 암수형태로 형성되어 있으며, 결합방식은 Fig. 4와 같이 세그먼트의 링이 형성된 후 다음 링의 전단키가 엇갈려서 결합하는 방식이다.

아일랜드타입 전단키의 쉴드터널 적용성을 검토하기 위하여 실제 볼트박스로 체결되도록 설계된 ○○○전

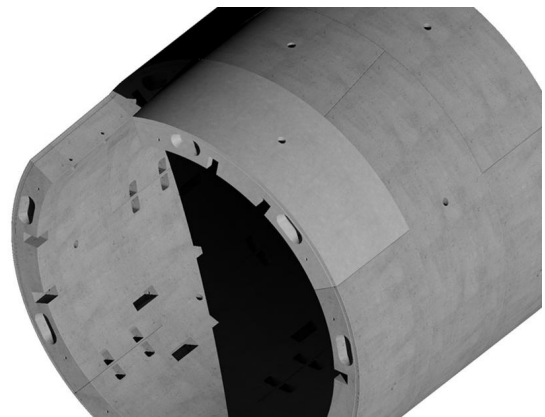
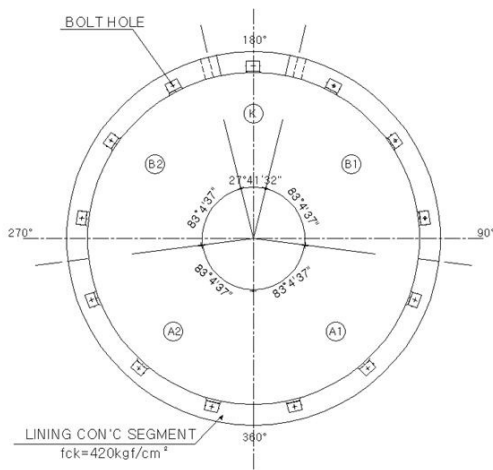
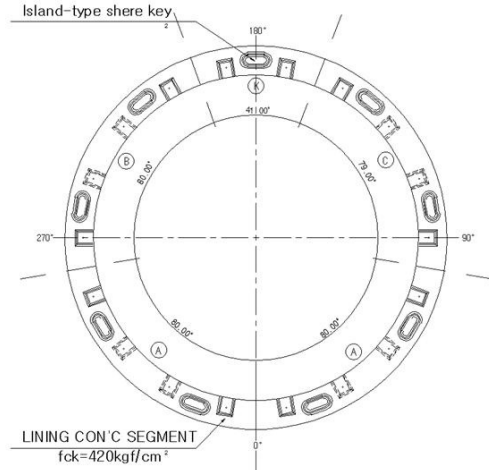


Fig. 4. Combining method of segment



(a) Bolt-box type



(b) Island-type shear key type

Fig. 5. Cross section for shear performance comparison

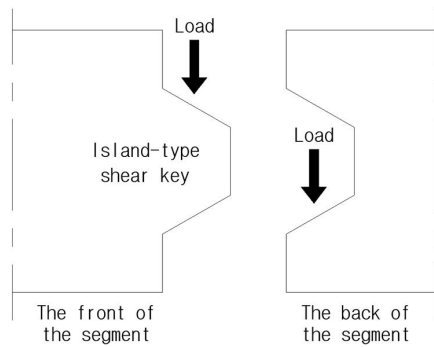


Fig. 6. Load on shear key

력구 쉘드터널 단면에 대하여 비교설계를 수행하였다. 쉘드터널의 연결재는 단면에서 등간격의 각도로 설계되어, 다음 연결되는 링의 회전에 관계없이 하나의 체결 위치만 일치하면 모든 위치에서 체결이 가능하다. 아일랜드타입 전단키도 강연선 통과부 등의 간섭범위를 고려하여 등간격 배치로 설계하였으며, 설계된 세그먼트와 기존 볼트박스 체결방식의 단면은 Fig. 5와 같다.

두 체결방식에 따른 성능을 파악하기 위하여 Fig. 5의 단면에 대하여 관용해석법을 통해 비교를 수행하였다. 일반적으로 쉘드터널 세그먼트가 직접적인 전단력에 저항하는 경우는 없으나 지반의 절리 등으로 인하여 전체 단면에 대하여 연직방향의 힘이 작용할 경우를 가정하였으며, 가정단면에 설치된 전체 전단키 또는 볼트가 함께 저항하는 것으로 검토하였다. Fig. 6과 같이 전단키의 압, 수부분에 수직방향으로 작용하는 힘에 대하여 전단강도 검토를 수행하여, 불리한 결과에 대해 볼트박스로 체결시의 전단강도와 비교한 결과는 Table 2와 같다. 설

Table 2. The results of the evaluation of the shear strength

Division	Bolt type		Island type	
	Per	Total	Per	Total
Shearing strength (kN)	62.4	811.6	208.0	1872.3

계된 아일랜드타입 전단키의 전체 전단강도는 1872.3kN으로 811.6kN인 볼트타입의 전단강도에 비하여 약 2.3배 정도 우수한 것으로 검토되었다.

3.2 아일랜드타입 전단키와 강연선의 체결방식

아일랜드타입 전단키와 강연선을 이용한 체결 시스템은 축 방향의 세그먼트를 관통하는 강연선의 긴장력을 체결력으로 이용하여 세그먼트를 체결하는 방법으로서, 여기에 더하여 세그먼트에 형성된 암, 수형태의 아일랜드타입 전단키가 가이드(guide) 역할을 하여 체결 공정의 시공 오차를 줄이는 동시에 구조물의 전단저항을 보강하게 된다. 강연선의 공급과 긴장을 수행하는 추가 공정이 발생하지만, 볼트의 체결시간과 세그먼트 틸팅(tilting)작업 시간의 단축으로 인하여 시공속도는 향상될 것으로 기대된다.

Fig. 7은 강연선 체결방식의 세그먼트 형태를 나타낸 것이다. 세그먼트 제작 시 강관을 설치하여 강연선이 통과할 수 있는 공간을 만들고, 축 방향은 강연선 체결방식을, 둘레 방향은 기존 볼트 체결 방식을 적용하는 형태이다. 강연선의 통과위치는 긴장력 도입 시 편심에 의한 인장 발생을 고려하였으며, 일반타입의 세그먼트에는 4개, 키 타입 세그먼트에는 1개의 강연선이 통과되도

록 하였다.

Fig. 8의 (a)는 아일랜드타입 전단키와 강연선을 이용한 체결 시스템의 개념을 나타낸 것이다. Fig. 8에서와 같이 세그먼트의 축 방향은 강연선으로 조립되고, 둘레 방향은 기존 볼트 방식으로 조립된다. 강연선 체결 방식에서는 1열의 강연선은 총 4링에 걸쳐 세그먼트를 관통하게 되고, 1개의 세그먼트에는 4열의 강연선이 통과하게 된다. 그래서 Fig. 8처럼 전후 3링까지 총 7링에 걸쳐 강연선이 연결되어 있기 때문에, 어느 한 열의 강연선이 체결력을 소실하여도 그물망처럼 연결된 강연선 형태로 인해 구조물의 안전성은 유지할 수 있게 된다.

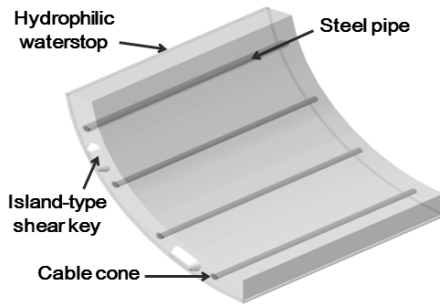


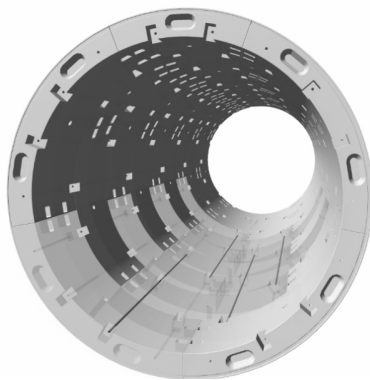
Fig. 7. Cable assembling segment form

또한, 각 세그먼트에 형성되어있는 아일랜드타입 전단키를 통해 터널 상단에 작용하는 수직하중에 대해 저항함으로써 조립 완료 후 Fig. 8의 (b)와 같은 1링의 세그먼트뿐 아니라 체결된 모든 세그먼트 터널의 응력 재분배 및 강성 증대 효과를 기대 할 수 있으며, 전단키를 통해 세그먼트 링간의 상대적 변위 제어가 가능하다.

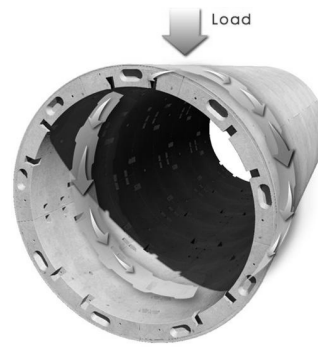
4. 3차원 수치해석을 통한 체결성능 검토

4.1 수직하중에 대한 전단성능

지하 구조물이 직접적으로 외력을 받게 되는 경우는 드물지만, 완성된 지하 구조물에 파쇄대에서의 갑작스러운 수압작용 및 지상의 대형 구조물 등으로 인한 실드 터널 일부구간에 집중하중이 작용할 경우 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 이에 대한 전단성능의 비교를 위하여, 볼트박스과 경사볼트 체결방식에 대하여 Fig. 9와 같이 연결부인 볼트를 BEAM 요소로 모델링하여 각 세그먼트에 연결하였다. 전단키와 강연선을 이용한 체결 방식은 세그먼트의 전단키가 맞물리는 부분에 대하여 Fig. 10과 같이 갱구측과 막장측을 서로 연결될 수 있도록

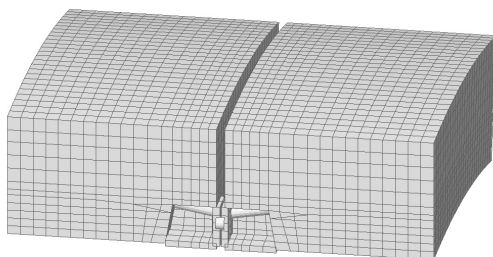


(a) Assemble four times by cable

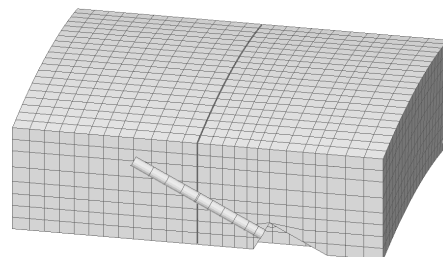


(b) Stress redistribution through the shear key

Fig. 8. Fastening system using the island-type shear key and cable

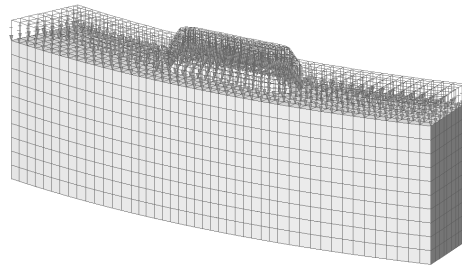


(a) Bolt-box type

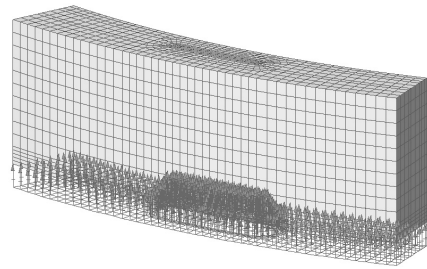


(b) Inclined bolt type

Fig. 9. Modeling for consideration of shear performance of bolting system



(a) Entrance of tunnel side



(b) Tunnel Face side

Fig. 10. Modeling for consideration of shear performance of share-key system

록 요소 형상을 모델링하였고, 프리스트레스 강연선의 영향을 고려하기 위해 긴장력을 등분포하중으로 환산한 압축력을 도입하였다. 하중의 재하방식은 Fig. 11과 같이 한쪽 세그먼트에만 하중을 점차적으로 증가시켜

각 연결부재에서 발생하는 전단응력에 대한 검토를 수행하였다.

강연선과 전단키를 이용한 체결방식에서의 검토 결과는 Fig. 12와 같이 최대압축응력은 전단키에서 발생하나 최대인장응력이 전단키 주변의 부재에서 발생하는 것으로 검토되어 압축파괴보다는 인장파괴의 지배를 받을 것으로 판단되었다. 따라서 인장파괴에 대한 검토를 수행하기 위하여 점차적인 하중증가에 따라 발생하는 인장응력에 대하여 H13 철근으로 배근할 경우 필요한 철근량을 검토하였다. 철근 1가닥이 담당하는 범위는 연직 및 수평간격을 고려하여 125mm×140mm로 검토하였으며, 이때 모델링 내에서 배근이 가능한 최대 사용량은 126.7mm²이다. 아일랜드타입 전단키와 강연선을 이용한 체결 시스템에서는 필요 철근량이 사용 철근

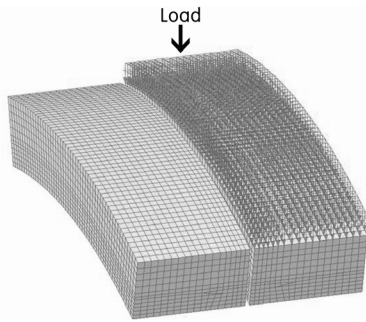
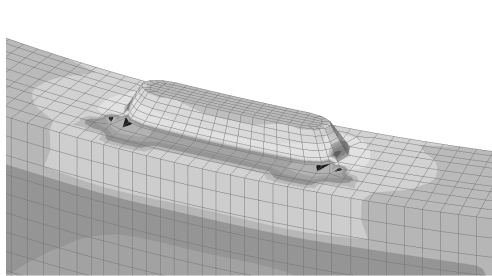
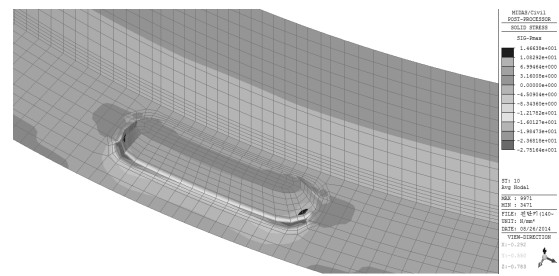


Fig. 11. Applied load

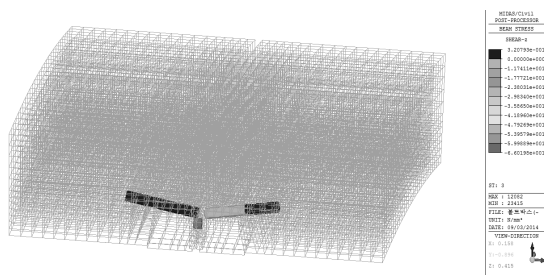


(a) Entrance of tunnel side

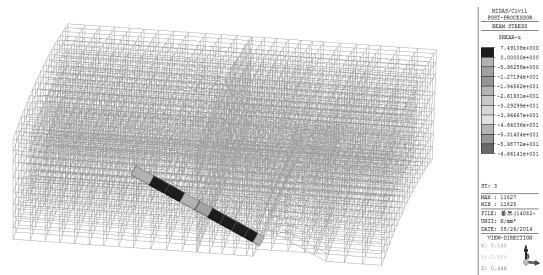


(b) Tunnel face side

Fig. 12. Colored stress contour of island-type shear key system



(a) Bolt-box type



(b) Inclined bolt type

Fig. 13. Colored stress contour of bolting system

량 이상이 될 경우의 하중이 전단저항력이 될 것이다.

볼트체결방식에서는 점차적인 하중증가 시 Fig. 13과 같이 볼트박스타입과 경사볼트타입 모두 볼트에서 발생하는 전단응력이 사용된 앵커볼트(SS400)의 허용전단응력 60MPa 이상이 될 경우의 하중이 전단저항력이 될 것이다.

강연선과 전단키를 이용한 체결방식 검토결과, 터널 갱구부측 세그먼트의 돌출된 전단키에서는 120kN의 하중재하 시 전단키에서 발생한 압축응력은 7.1MPa, 터널 막장측의 세그먼트에서는 200kN의 하중재하 시 전단키와 맞물리는 부분에서 발생한 최대 압축응력은 27.5MPa로 허용 압축응력인 45MPa에는 크게 미치지 못하였다. 하지만 Fig. 14에서와 같이 인장응력에 의한 파괴에 대한 검토결과 갱구부측의 세그먼트에서는 120kN의 하중재하 시 인장파괴에 저항하기 위해서는 철근의 사용량이 126.7mm², 터널 막장측의 세그먼트에서는 200kN의 하중재하 시 인장파괴에 저항하기 위해서는 철근의 사용량이 138.4mm²가 필요하여 최대 배근이 가능한 126.6mm²을 초과하였다. 갱구측에서 먼저 파괴가 발생하는 것으로 검토되었으며, 강연선과 전단키를 이용한 체결방식의 최대 허용하중은 119.1kN으로 검토되었다.

볼트박스 타입의 하중증가에 따른 경향은 Fig. 15의 (a)와 같고, 31.8kN의 하중이 작용할 때 허용 전단응력

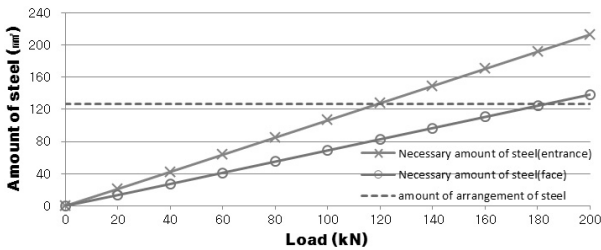


Fig. 14. Island-type shear key type of shear performance

인 60MPa에 달하는 것으로 검토되었다. 경사볼트 타입의 하중증가에 따른 경향은 Fig. 15의 (b)와 같고, 45.0kN의 하중이 작용할 때 허용 전단응력인 60MPa에 달하는 것으로 검토되었다.

세그먼트에서의 면적을 고려하였을 때 아일랜드타입 전단키 하나는 볼트 2개에 해당하므로, 볼트박스 2개의 전단저항력은 63.6kN, 경사볼트 2개의 전단저항력은 90.0kN이다. 아일랜드타입 전단키는 경사볼트 타입보다 32%, 볼트박스 타입보다 87% 더 큰 전단 성능을 가진 것으로 분석되었다.

4.2 인장하중에 대한 체결성능

강연선을 이용한 체결방식에서는 프리스트레싱 강연선에 의한 압축력 도입을 고려하여 Fig. 16과 같이 압축력의 방향과 반대방향으로 하중을 재하하여 작용하중을 점차적으로 증가시키며 부재의 변위 거동 추이를 통해 인장저항성능 검토를 수행하였다. 볼트 체결방식은 볼트의 인장에 대한 저항능력을 검토하기 위해 연결부인 앵커볼트에 부재 축 방향력이 가해지도록 하여 볼트에 발생하는 인장응력과 볼트 및 볼트박스 주위 콘크리

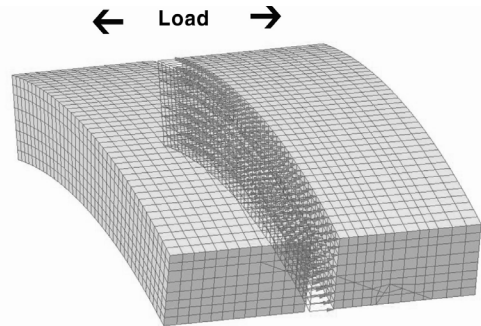


Fig. 16. Modeling for consideration of tensile force

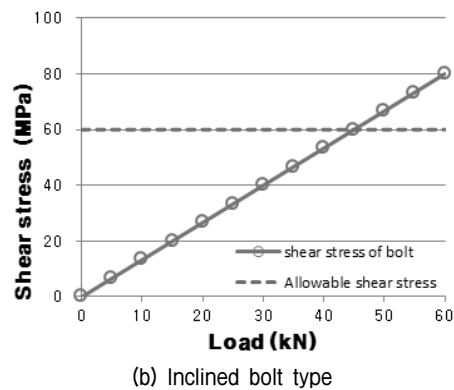
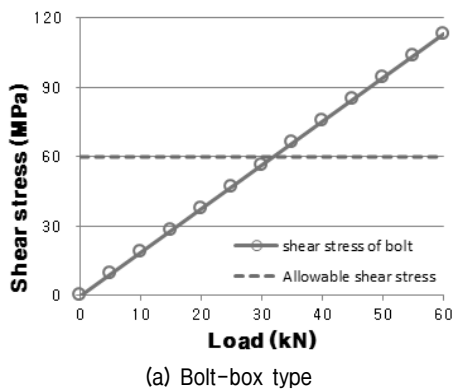
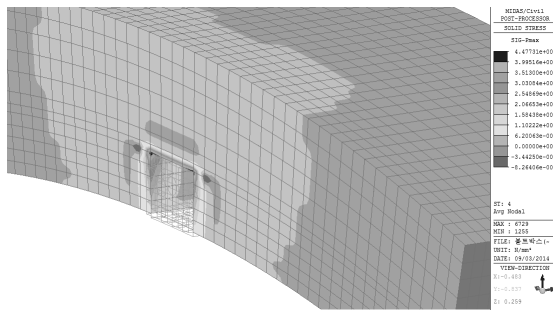
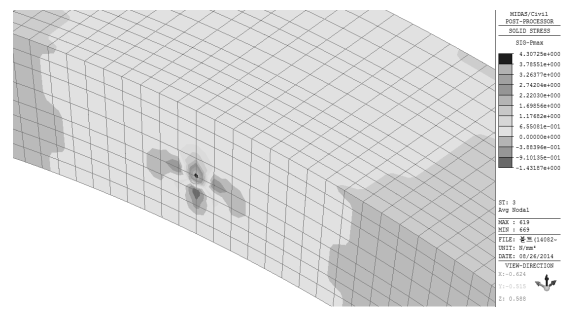


Fig. 15. Review of shear performance



(a) Bolt-box type



(b) Inclined bolt type

Fig. 17. Colored stress contour of bolting system

Table 3. The results of the evaluation of tensile strength

Type	Island-type system	Inclined bot system	Bot-box system
Alloeeable load (kN)	240.0	14.7	18.9

트에 발생하는 응력형상으로 부재의 인장저항성능을 검토하였다.

검토결과 강연선의 긴장력을 이용한 체결방식에서는 강연선에 의해 도입된 긴장력을 환산한 압축력보다 작은 인장력에서는 변위가 발생하지 않았다. 그러나 압축력 이상의 인장력이 가해질 경우 변위가 발생하였으며, 강선 체결 시스템의 인장저항성능은 강연선의 유효 긴장력 120kN과 같은 것으로 나타났다.

볼트체결방식의 경우 경사볼트와 볼트박스타입 모두 볼트의 허용인장응력에 크게 미치지 못하는 응력 발생에도 Fig. 17과 같이 볼트박스 및 볼트 주변 콘크리트의 인장파괴가 지배하는 것으로 검토되었다. 볼트박스의 경우 인장저항력은 18.9kN, 경사볼트의 인장저항력은 14.7kN으로 검토되었다.

Table 3은 체결방식에 따른 허용력을 정리한 것이며, 강연선 체결방식의 경우 모델링된 범위에 강연선 2가닥이 적용되므로 유효 긴장력은 총 240kN이며, 하나의 강연선은 2개의 볼트를 담당하게 되므로 볼트박스 37.8kN, 경사볼트 29.4kN의 인장성능을 가진 것으로 검토되었다.

5. 결론

본 논문에서는 기존 볼트체결 방식의 문제점에 대해 조사를 하였고, 이론식을 통해 전단키를 설계하고, 3차원 수치해석 검토를 통하여 아일랜드타입 전단키와 강연선의 긴장력을 이용한 체결 시스템과 비교를 통해 체결성능을 검토하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기존 볼트박스를 이용한 체결로 설계된 전력구 실드 터널에 아일랜드타입 전단키와 강연선체결 시스템 적용 시에 대한 전단강도 검토결과 터널 전체의 전단강도는 약 2.3배 정도 우수한 것으로 검토되었다.
- (2) 아일랜드타입 전단키와 강연선을 이용한 체결 시스템은 터널에 작용하는 수직하중에 대하여 전단키에서의 압축응력보다는 주변부의 인장파괴의 지배를 받는 것으로 검토되었다.
- (3) 하중증가에 따른 체결방식별 전단성능 검토 결과, 아일랜드타입 전단키와 강연선을 이용한 체결방식은 전단저항력이 120kN으로서 63.6kN인 볼트박스 타입보다 87%, 90.0kN인 경사볼트타입보다 32% 더 큰 전단성능을 가진 것으로 분석되었다.
- (4) 터널 축방향으로의 인장력 발생 시 체결성능 검토 결과, 강연선을 이용한 체결방식은 강연선의 긴장력 이상의 외력이 가해져야만 변위가 발생하며, 볼트 체결방식은 볼트의 인장성능이 발휘되기 전에 콘크리트의 인장성능에 의해 파괴가 발생하는 것으로 검토되었다.
- (5) 하중증가에 따른 체결방식별 인장성능 검토 결과, 강연선을 이용한 체결방식은 인장저항력이 240kN으로서 37.8kN인 볼트박스타입보다 약 6배, 29.4kN인 경사볼트타입보다 약 8배 더 큰 인장성능을 가진 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술

평가원에서 전담한 2011년도 건설기술혁신사업(과제명 : 강선 체결 조립방식을 이용한 세그먼트 터널 라이닝 기술 개발)에 의한 것임을 밝히며 지면을 통해 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Chung, J.S., Oh, S.J., Boo, S.D., and Koo, H.S. (2000), "A Study on Prestressing Order of Tendons for Girder Bridges", *Proc. of 2000 conf. on Korean Society of Civil Engineers.*, pp.51-54.
2. Chung, H.S., Kim, J.S., and Kim, D.Y. (2000), "Stability of the Connections of Trapezoidal Segments Lining in Shield Tunnelling", *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, Vol.20, No.1-C, pp.13-20.
3. Ha, S.S., Cho, K.R., Kim, S.H., Moon, J.H., and Lee, L.H. (2004), "An Experimental Study on the Structural Behavior of the PC Beam-Column Exterior Joint with Strand", *Journal of Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol.20, No.10, pp. 119-126.
4. Jeong, G.H., Yu, C.D., Cho, S.H., Hwang, B.S., Han, K.T., Kim, T.H., and Jung, D.W. (2004), "A Trend Study of Shield Tunnel on Japan & Korea", *Proc. of KTA 2004 Symposium*, Seoul, Korea, pp.175-196.
5. Ma, S.J., Gil, H.J., and Kim, D.M. (2012), "A Study on Prestressing Method for Shield tunnel Assembly Using Strands", *Proc of 2012 Conf. on Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, pp.1338-1345.
6. Ma, S.J., Gil, H.J., and Kim, D.M. (2013), "A Study on the Improvement of Connection Method for Segment in Tunnel Lining System Using Prestressed Steel Cable by Real-scale Test", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.6, pp.33-51.

Received : December 5th, 2014

Revised : February 2nd, 2015

Accepted : March 25th, 2015