

복층터널 연결 수직구용 철재브래킷 구조성능 연구

신영완^{1*} · 민병현² · 남정봉³ · 이상환⁴

¹정회원, 하경엔지니어링 사장

²비회원, 호서대학교 교수

³비회원, 하경엔지니어링 부장

⁴정회원, 하경엔지니어링 대리

A study on structural performance of steel brackets in vertical shaft connected to double-deck tunnel

Young-Wan Shin^{1*} · Byeong-Heon Min² · Jung-Bong Nam³ · Sang-Hwan Lee⁴

¹CEO, Hakyong Engineering Co., Ltd.

²Professor, Dept. of Civil Engineering, Hoseo University

³General Engineer, Hakyong Engineering Co., Ltd.

⁴Assistant Engineer, Hakyong Engineering Co., Ltd.

*Corresponding Author : Young-Wan Shin, geoeng@daum.net

Abstract

Since the double-deck tunnel is deeply constructed in the city, it is necessary to secure the installation space of air supply and exhaust, escape passage stairs, elevator, distribution facilities and connection tunnels in the vertical shaft for the double-deck tunnel. Also, in order to minimize the effect of construction on adjacent area, it is necessary to construct the concrete structures at high speed in vertical shaft after tunnel excavation. Therefore, the slabs and the stairs in vertical shaft are needed to be constructed using precast concrete, and the rapid construction techniques of bracket for supporting the inner precast structure are needed. The bracket installation methods include cast-in-place concrete, precast concrete and steel. In this study, the improvement of the steel brackets with good economical efficiency and good workability was carried out in consideration of the improvement of the construction speed. We have developed a new bracket that is optimized through bracket shape improvement, anchor bolt position adjustment and quantity optimization. As a result of the structural performance test, it was confirmed that the required load supporting capacity was secured. As a result of structural performance test for bar type anchor bolt and bent anchor anchor bolt, it was confirmed that the required load carrying capacity was secured and that the load bearing capacity of bent anchor bolt was large.

Keywords: Vertical shaft, Steel brackets, Embedded anchor bolt, Structural performance test, Support capacity

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
21(3)363-375(2019)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.3.363>

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received March 11, 2019

Revised April 15, 2019

Accepted April 23, 2019



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

www.kci.go.kr

초 록

복층터널은 도심지에서 대심도로 시공되는 특성이 있으므로 복층터널용 수직구는 급기 및 배기구, 대피통로 계단, 엘리베이터, 배전시설, 접속터널 등의 설치공간의 확보가 필요하다. 또한 복층터널용 수직구는 도심지에 시공되는 특성상 공사영향 최소화를 위하여 터널굴착 완료 후 수직구 내부 콘크리트 구조물의 급속시공이 필요하다. 따라서 수직구 내부 슬래브 및 계단용 콘크리트 시공의 프리캐스트화가 필요하며 이러한 수직구 내부 프리캐스트 구조물 지지를 위한 브래킷의 급속시공기술이 필요하다. 브래킷 형태 사례조사 결과 현장타설 방식, 프리캐스트 방식, 철재브래킷 방식 등이 있는데 본 연구에서는 시공속도 향상을 고려하여 경제성이 양호하고 시공성이 우수한 철재브래킷을 개선한 새로운 브래킷에 대하여, 직선형 매립 앵커볼트와 꺾임형 매립 앵커볼트에 대한 구조성능시험결과 소요하중 지지능력을 확보하는 것을 확인하였고 꺾임형 매립 앵커볼트의 하중지지능력이 보다 큰 것을 확인하였다.

주요어: 수직구, 철재브래킷, 매립 앵커볼트, 구조성능시험, 지지능력

1. 서론

복층터널은 도심지에서 대심도로 시공되는 특성이 있으므로 복층터널용 수직구는 급기 및 배기구, 대피통로 계단, 엘리베이터, 배전시설, 접속터널 등의 설치공간의 확보가 필요하다. 또한, 복층터널용 수직구는 도심지에 시공되는 특성상 공사영향 최소화를 위하여 터널굴착 완료 후 수직구 내부 콘크리트 구조물의 고속시공이 필요하다. 따라서 수직구 내부 슬래브 및 계단용 콘크리트의 프리캐스트화가 필요하며 이러한 수직구 내부 프리캐스트 구조물 지지를 위한 브래킷의 급속시공기술이 필요하다. 국내 기존 수직구 내부 콘크리트 구조물의 브래킷 설치목적은 내부 슬래브와 계단을 받쳐 주는 구조적 역할을 하기 위한 것이며, 일체형과 결합형, 분리형으로 분류할 수 있고, 시공방식에 따라서 현장타설 방식, 프리캐스트 방식과 철재브래킷 방식으로 분류할 수 있다.

수직구 프리캐스트 콘크리트 세그먼트 라이닝 일체형 브래킷은 공장제작 되어 품질이 좋으나 시공비가 고가이고 수직구 프리캐스트 세그먼트 조립 연결부에서 지하수 누수가 발생할 가능성이 있다. 수직구 철근조립식 현장타설 브래킷은 거푸집 설치, 철근조립, 콘크리트 타설, 그리고 거푸집 해체의 여러 단계가 필요함에 따라 상대적으로 장시간의 작업시간이 소요된다. 따라서 작업공정을 단순화시키면서 경제적인 최적화된 브래킷 구조로의 개선이 필요하다. 앵커고정식 철재 브래킷은 기존의 프리캐스트 콘크리트 세그먼트 브래킷과 현장타설 브래킷 보다 개선된 형태이나 케미컬 앵커볼트 적용을 위해 수직구 라이닝 타설 후 볼트홀 천공 시 라이닝 철근과 간섭됨에 따라 적절한 위치에 앵커볼트 설치가 곤란하고 이에 따라 천공시간이 과다 소요되는 문제가 발생하고 높낮이 조절이 어려운 문제점이 있다.

본 연구에서는 시공속도 향상을 고려하여 경제성이 양호하고 시공성이 우수한 철재브래킷에 대한 개선기술에 대한 연구를 수행하였다. 브래킷 형태개선, 앵커볼트 배치위치 조정 및 수량조정을 통하여 개선된 새로운 브래킷을 개발한 후 구조성능 확인을 위하여 실규모 구조성능시험을 수행하였다.

2. 연구 동향

국내에서는 수직구 외에 복층터널 연구를 수행하면서 내부 슬래브 지지를 위한 브래킷에 대한 연구를 활발히 수행하고 있다. Kang et al. (2017)은 쉘드TBM의 중절책 브래킷에 쉘드책 하중이 작용할 경우 쉘드TBM의 스킨 플레이트에 모멘트가 발생하는 경향을 분석함으로써 브래킷 리브의 추가보강일 필요함을 연구하였다. Moon et al. (2017)은 수치해석을 통하여 쉘드TBM 터널의 슬래브 지지를 위해 설치되는 브래킷이 연결되는 세그먼트 라이닝에 휨모멘트가 최대로 작용함을 제시하였고 슬래브 하중변화의 영향을 다각도로 검토하여 설계가 필요함을 제안하였다. Lee et al. (2016)은 복층터널 내부슬래브를 브래킷을 이용하여 양단 분리구조로 하는 연결방식과 세그먼트라이닝과 양단 고정구조로 연결하는 방식에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다. Kim et al. (2016)은 복층터널을 구성하는 중간슬래브의 하중을 터널본체에 전달하는 브라켓 구조에 관한 정·동적 거동을 조사하였고, 시공속도 향상을 위해 중간슬래브를 프리캐스트 쉘드 터널라이닝 구조체에 연결하기 위한 현장 조립형 ‘SPC (Steel Precast Concrete) 브래킷’을 개발하였다.

3. 개선된 철재브래킷 개요

본 연구에서는 1일 2층 이상을 시공함으로써 기존 현장타설 브래킷을 이용하는 경우에 비해서 공사기간 단축을 목표로 수직구에 적용할 새로운 브래킷 설치 방식을 개발하였다. 브래킷은 수직구 내부 슬래브와 계단을 지지하는 구조적 역할을 한다. Fig. 1은 개발된 새로운 브래킷을 시제품 제작 전에 3차원 프린터로 제작한 모습을 보여주고 있다. 개발된 새로운 브래킷은 연결 조립식 방법으로 기존 현장타설 브래킷 또는 PC브래킷 설치 시 발생하는 문제점을 개선하였다. 기존의 케미컬 앵커볼트방식의 경우 수직구 라이닝 타설 후 천공 시 철근과 간섭됨에 따라 일정한 균일한 높이로 시공이 어렵고 설치시간도 과다 소요되는 문제점이 있어 앵커볼트를 수직구 라이닝 철근에 고정하여 매립형으로 설치하는 방식으로 개선하였다. 매립형 앵커볼트 철재브래킷은 라이닝 설치 후 천공하여 케미컬 앵커볼트로 브래킷을 고정하는 경우보다 철근간섭을 피함으로 해서 빠른 시공이 가능할 것으로 판단된다.



Fig. 1. Model of developed bracket made of 3D printer

또한, 브래킷 형상을 사다리꼴로 제작하여 최적화 하였고 브래킷의 볼트구멍을 타원형으로 제작하여 높이조절이 가능한 구조(Fig. 2)로 개발하였다. 상부철판을 지지하는 수직보강철판은 한 개 또는 두 개를 설치할 수 있다.

다만, 수직구 콘크리트 타설 전에 주철근에 앵커볼트를 연결하고 매립형 플레이트와 함께 설치하여야 하므로 정확한 높이조절이 필요하고 콘크리트 타설 시 양생하중에 의해 이동하지 않도록 확실한 고정이 필요하다.

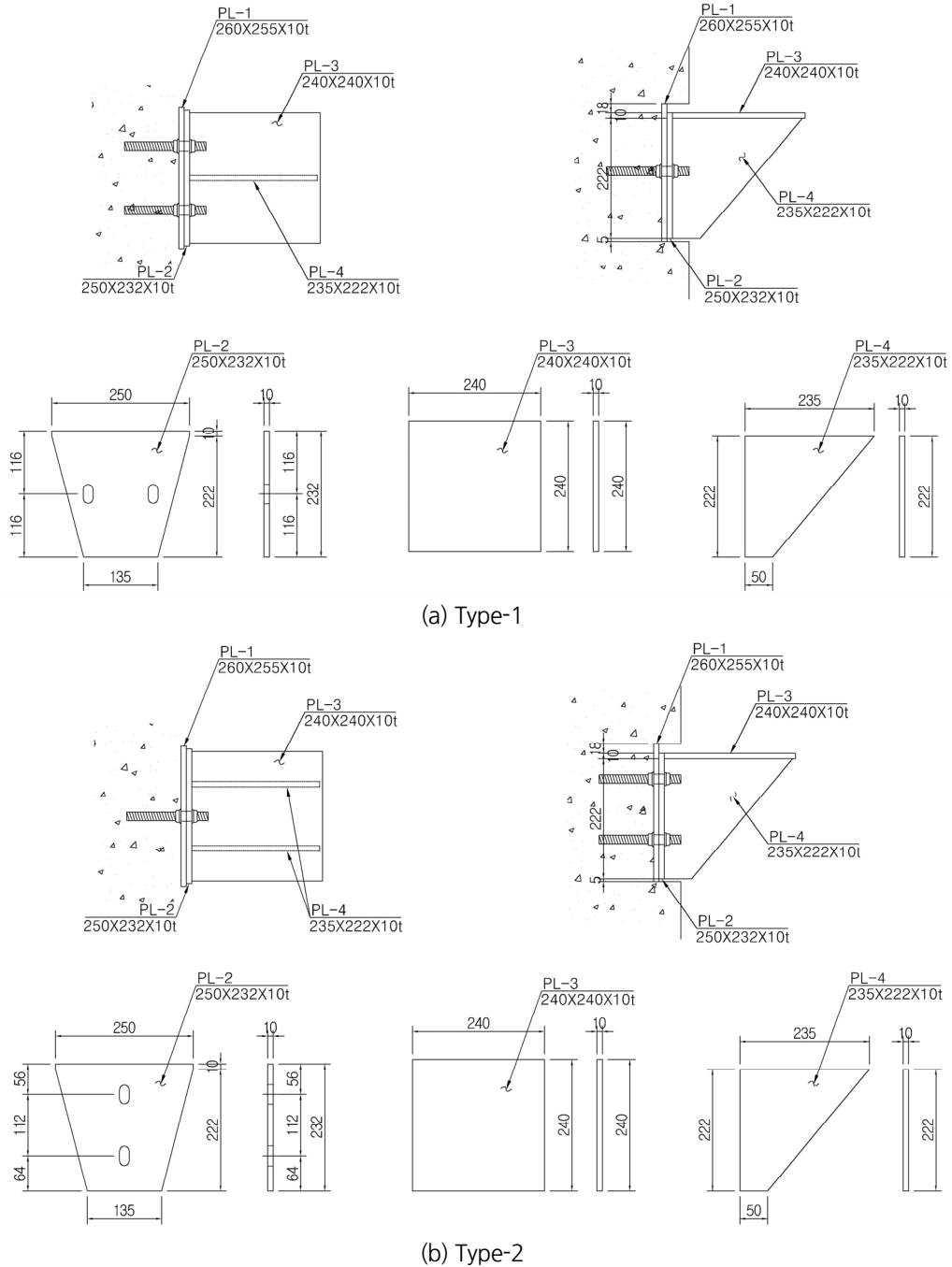


Fig. 2. Two types of embedded bar-type anchor bolt brackets

4. 수치해석을 통한 브래킷 안전성 검토

4.1 검토 조건

실규모 실험 전 개발된 철재브래킷의 구조성능 확인 및 앵커볼트의 최적위치 검토를 위해 두 가지 조건에 대하여 구조해석을 수행하였다. Fig. 2는 직선형 매립 앵커볼트 브래킷의 형상을 보여주고 있다. Type-1은 앵커볼트를 좌우로 배치하고 수직보강철판을 한 개 보강하는 형태이고, Type-2는 앵커볼트를 상하로 배치하고 수직보강철판을 두 개 보강하는 형태이다. 브래킷은 Plate 요소로 3차원 모델링 후, 수직구 라이닝에 설치되는 슬래브 및 계단구조의 하중과 브래킷 자중을 고려할 때 브래킷 한 개당 1.554 kN (등분포하중 27 kN/m²)을 재하하였다. 브래킷은 2개의 매립형 앵커볼트에 연결되어 지지되는 구조이므로 앵커설치지점은 고정지점으로 경계조건을 부여하였다. 콘크리트에 매립된 직선형 앵커볼트는 마찰력에 의해 지지되는 것으로 가정하고 앵커볼트 형상은 모사하지 않았다. 브래킷 상면에 작용하는 하중은 브래킷 상면이 슬래브 하면에 균등하게 접하도록 시공하는 것이 원칙이므로 등분포로 작용하였다. Table 1에는 브래킷 제작에 사용되는 철판의 제원을 나타내었다. 브래킷 제작에 사용된 철재의 재료 특성은 Table 2와 같고 해석프로그램은 Midas-Civil을 활용하였다.

Table 1. Dimensions of brackets

Items	PL-1	PL-2	PL-3	PL-4
Dimensions	260 × 255 × 10t	250 × 232 × 10t	240 × 240 × 10t	235 × 222 × 10t

Table 2. Material properties of brackets

Items	Unit weight (kN/m ³)	Elastic modulus (MPa)	Allowable bending stress (MPa)	Allowable shear stress (MPa)
Steel (SS400)	78.5	205,000	140	80

4.2 Type-1 브래킷 해석 결과

Fig. 3과 같이 개발된 브래킷 중 좌우에 앵커볼트 2개를 배치한 Type-1 해석결과 브래킷에 발생하는 휨응력 및 전단응력은 모두 허용응력 이내이므로 브래킷의 구조성능을 확보하는 것으로 검토되었다. 발생휨응력은 34.8 MPa로 허용휨응력 140 MPa보다 작게 발생하였고, 발생전단응력은 17.9 MPa로 허용전단응력 80 MPa보다 작게 발생하였다. Fig. 3(c)는 휨응력은 상부철판과 벽면에 접하는 철판 상부에서 크게 발생하는 것을 보여주고 있다. Fig. 3(d)는 전단응력은 브래킷 상부철판과 수직보강철판에서 크게 발생하는 것을 보여주고 있다.

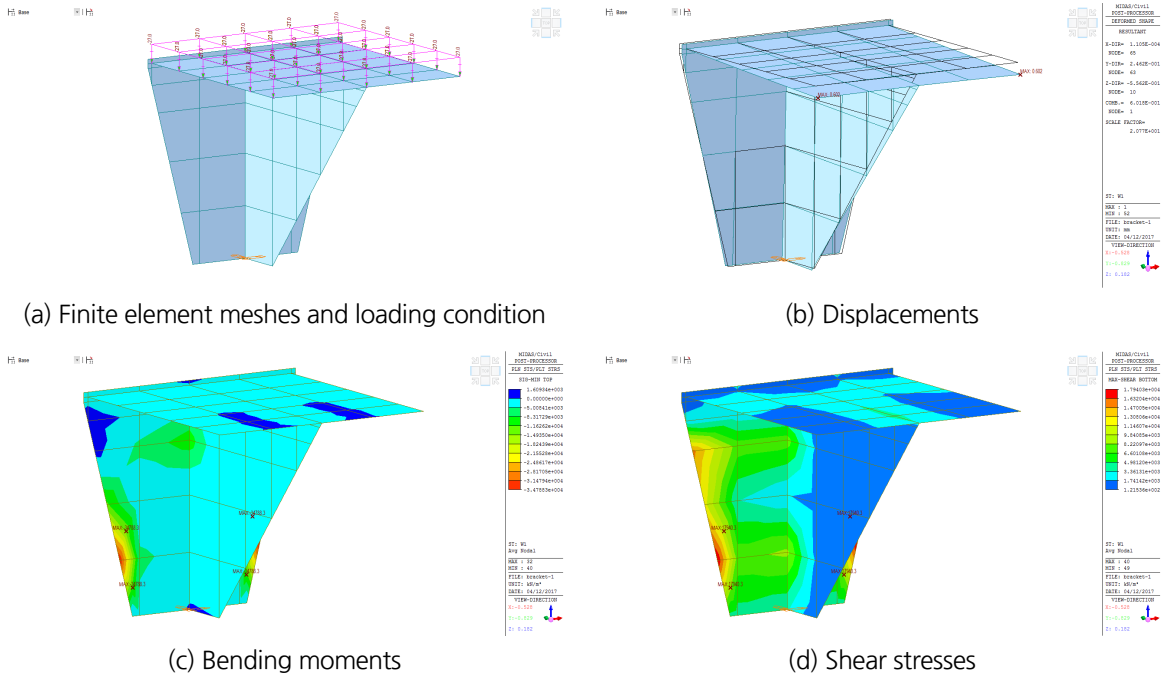


Fig. 3. Analysis results of Type-1

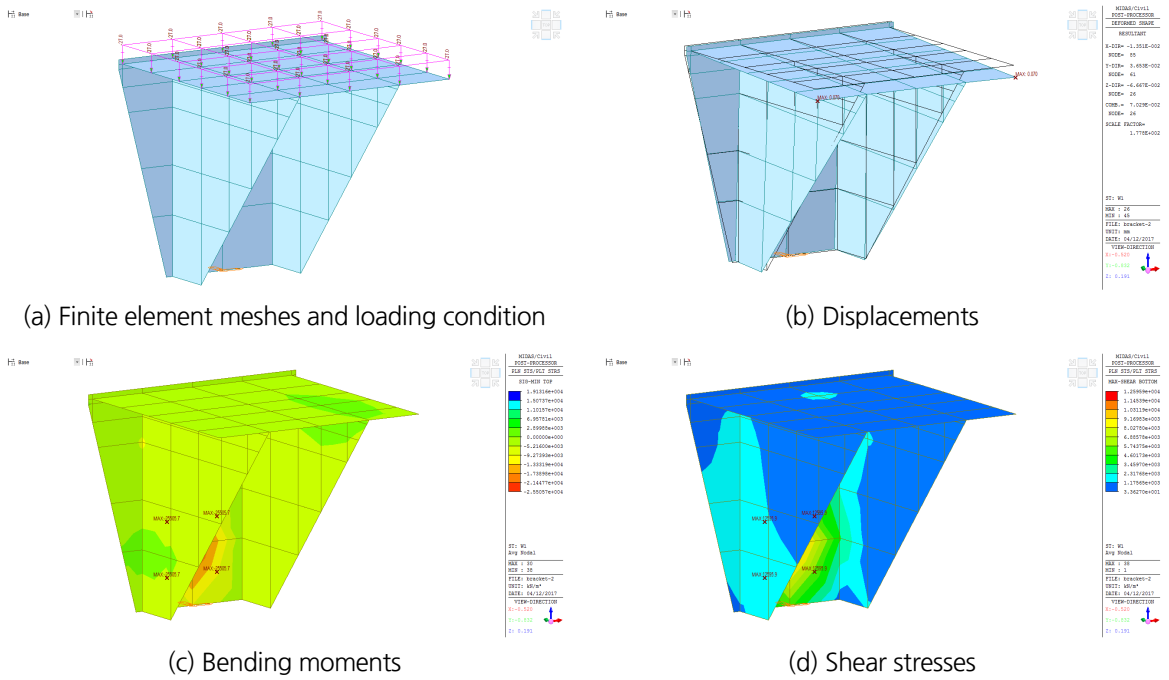


Fig. 4. Analysis results of Type-2

4.3 Type-2 브래킷 해석 결과

Fig. 4와 같이 개발된 브래킷 중 상하에 앵커볼트 2개를 배치한 Type-2 해석결과 브래킷에 발생하는 휨응력 및 전단응력은 모두 허용응력 이내이므로 브래킷의 구조성능을 확보하는 것으로 검토되었다. 발생휨응력은 25.5 MPa로 허용휨응력 140 MPa보다 작게 발생하였고, 발생전단응력은 12.6 MPa로 허용전단응력 80 MPa보다 작게 발생하였다. Fig. 4(c)는 휨응력이 Fig. 3(c)의 경우보다 작게 발생하는 것을 보여주고 있다. Fig. 4(d)는 전단응력이 Fig. 3(d)의 경우보다 작게 발생하고, 브래킷 상부철판과 수직보강철판에서 전단응력이 크게 발생하는 것을 보여주고 있다. 이는 Type-2가 Type-1에 비해 수직보강철판을 한 개 더 설치함에 따라 상부철판 지지효과가 증가하여 응력분담효과가 증가하였기 때문으로 판단된다.

5. 실규모시험을 통한 브래킷 성능 검증

Fig. 5는 구조성능시험을 위해 제작한 새로운 브래킷 시제품을 보여주고 있다. 실규모의 브래킷 성능시험에서는 브래킷 재료의 파괴하중과 앵커볼트의 인발강도 측정을 수행하였고 브래킷 1개당 1.554 kN (등분포하중 27 kN/m²) 이상 구조 성능을 확보하는지 확인하고자 하였다. 앵커볼트는 직선형을 콘크리트에 매립하여 설치하였다. 또한 새로운 형태의 브래킷에서 볼트를 좌우로 배치하는 것이 효과적인지 상하로 배치하는 것이 효과적인지를 실험을 통하여 도출하는 것을 목표로 하여 목표하중 이상의 파괴하중까지 하중을 가하였다.



Fig. 5. Prototype of developed bracket

콘크리트 벽체(1200*1500, 400T)에 브래킷 조립시공 후 강도시험을 수행하였으며 개발된 매립형 앵커볼트 브래킷과 대조군으로 천공 후 삽입하는 일반 케미컬앵커볼트 브래킷의 성능시험을 동시에 진행하였다. 일반형, Type-1 그리고 Type-2의 세 가지 브래킷에 대해 시험을 수행하였다. 각각의 브래킷은 앵커볼트 시공방식과 앵커볼트의 위치와 보강철판의 개수를 달리 하였다. Table 3은 실규모 시험조건을 나타내고 있다.

Table 3. Material properties of brackets

Anchor bolt and bracket types	Embedded anchor bolt diameter	Embedded anchor bolt shape	Location and number of embedded anchor bolt	No. of vertical steel plate
Type-1	16 mm	Bar type	Left & right	1
Type-2	16 mm	Bar type	Upper & lower	2

Fig. 6은 브래킷 구조성능 시험을 위한 시험체와 시험 사진을 보여주고 있다. Fig. 7은 세 가지 브래킷에 대한 실규모의 브래킷 성능시험 결과를 보여주고 있다. 일반형인 천공 후 케미컬 앵커볼트를 상·하·좌·우에 삽입 설치(4 EA)조건인 경우에는 233~256 kN의 하중에서 볼트 파단이 발생하였다. 매립형 앵커볼트 좌·우 설치(2 EA)조건인 경우에는 하중재하 125~175 kN에서 콘크리트 균열이 발생되며, 200~209 kN에서 볼트 파단이 발생하였다. 매립형 앵커볼트 상·하 설치(2 EA)조건인 경우에는 하중재하 120~160 kN에서 콘크리트 균열이 발생하였고 160~197 kN의 하중에서 볼트 파단이 발생하였다.



(a) Test body



(b) General type

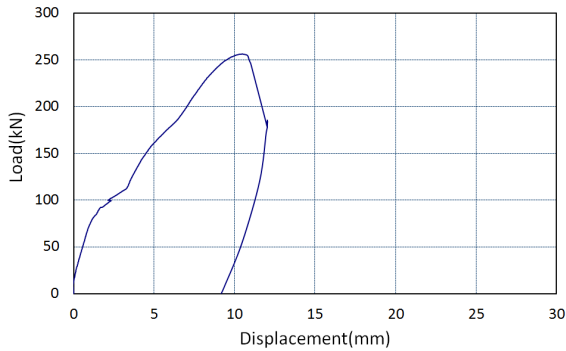


(c) Type-1

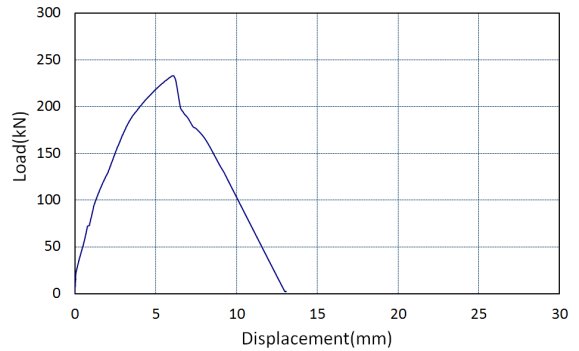


(d) Type-2

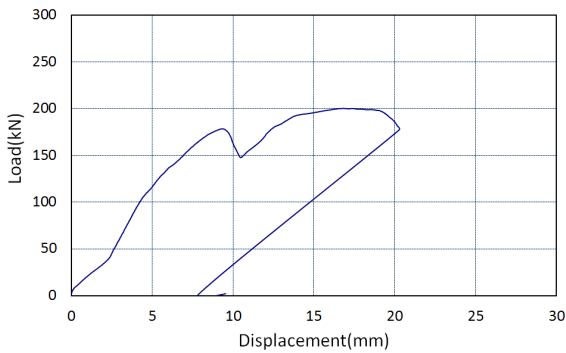
Fig. 6. Structural performance test body and test photograph of embedded bar-type anchor bolt type brackets



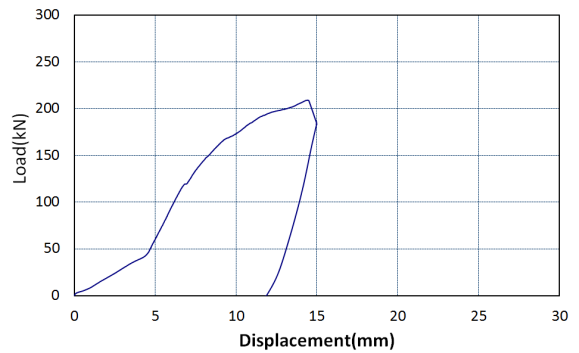
(a) General type (4 chemical anchor bolts) 1st test



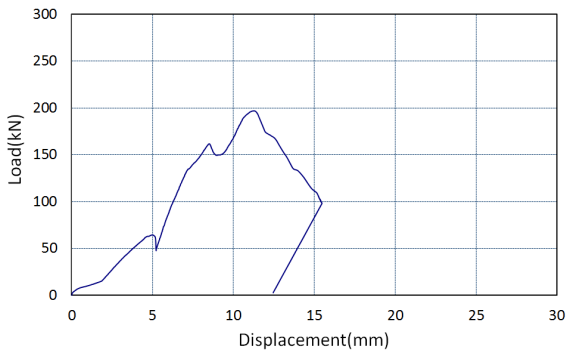
(b) General type (4 chemical anchor bolts) 2nd test



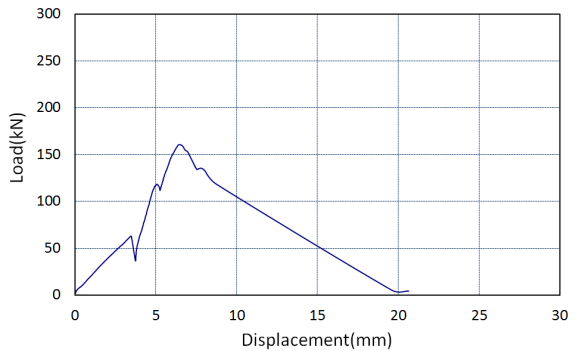
(c) Type-1 (two left and right embedded-type anchor bolts) 1st test



(d) Type-1 (two left and right embedded-type anchor bolts) 2nd test



(e) Type-2 (two top and bottom embedded-type anchor bolts) 1st test



(f) Type-2 (two top and bottom embedded-type anchor bolts) 2nd test

Fig. 7. Real scale bracket performance test results for embedded-type bar-shaped anchor bolt type brackets

실규모 구조성능 시험결과 세 가지 모두 목표하중을 지지할 수 있는 것으로 나타났다. 콘크리트에 천공 후 삽입하는 형식으로 케미컬 앵커볼트 4개를 설치하는 일반형의 경우는 볼트 개수가 4개로 가장 많기 때문에 볼트 파단 하중이 제일 큰 것으로 나타났다.

한편, 앵커볼트 좌우배치의 Type-1이 앵커볼트 상하배치의 Type-2보다 볼트 파단하중이 큰 것으로 나타났는데, 이는 앵커볼트 좌우배치의 경우는 동시에 두 개의 앵커볼트가 지지효과를 발휘하지만 앵커볼트 상하배치의 경우는 두 개의 앵커볼트가 동시에 하중을 지지하지 못하고 상부 앵커볼트 파단 후 하부 앵커볼트 파단이 발생하기 때문에 판단된다.

6. 실규모시험을 통한 형상개선 앵커볼트 브래킷의 성능 검증

위의 시험에서 직선형 앵커볼트를 콘크리트에 매립할 경우 브래킷에 하중 작용 시 앵커볼트의 인발가능성이 있는 것으로 판단되었다. 따라서 Fig. 8과 같이 매립형 앵커볼트를 철근에 꺾어 연결함으로써 정착효과를 증가시킬 수 있도록 앵커볼트 형상을 개선하였다.

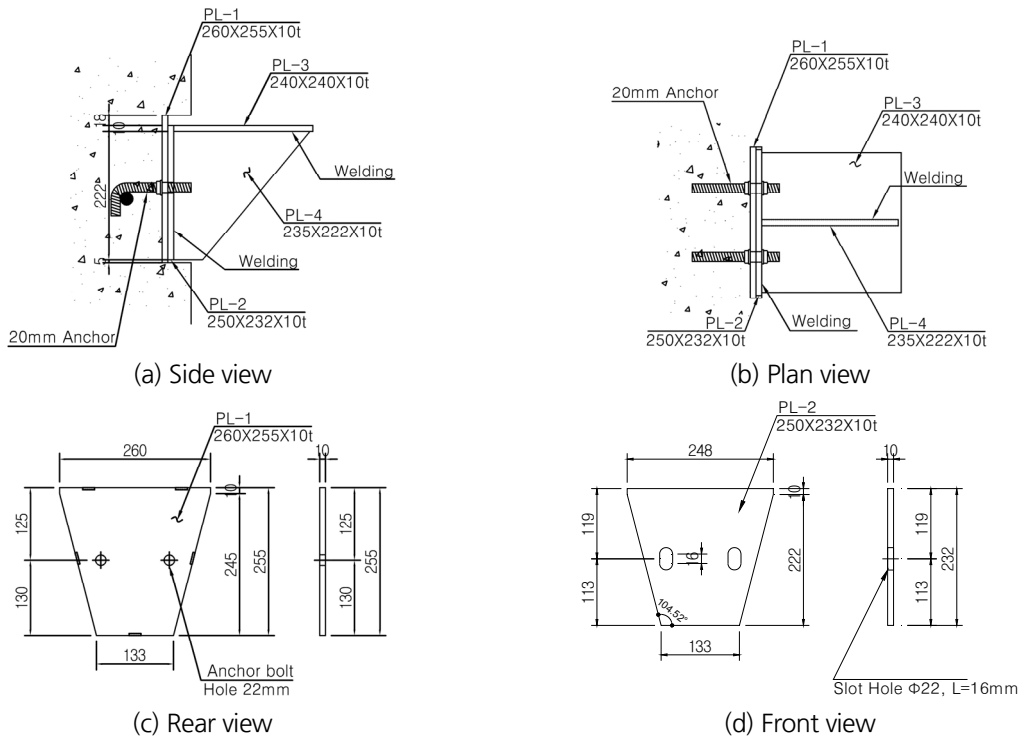


Fig. 8. Shape of embedded bent anchor bolt type bracket

앵커볼트 형상을 꺾임형으로 개선한 브래킷에 대하여 Fig. 9(a)와 같이 실규모 시험체를 제작하였다. 직경 20mm의 앵커볼트를 적용하였고 4개의 브래킷에 대한 구조성능시험을 진행하였으며 Fig. 9(b)는 구조성능 시험 후 콘크리트 균열 사진이다.



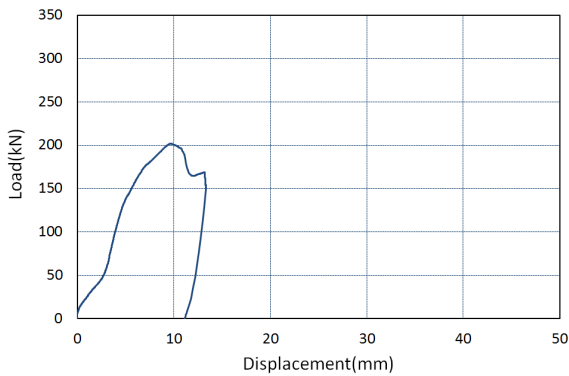
(a) Structural performance test body



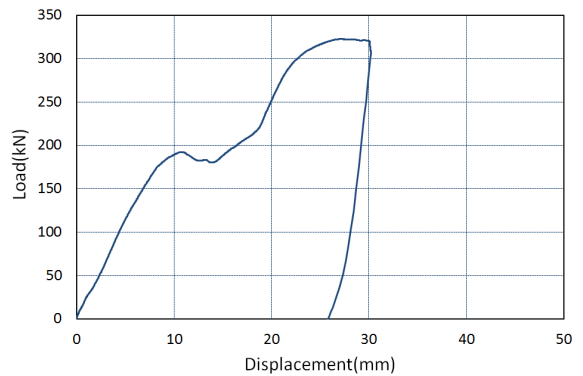
(b) Test photograph

Fig. 9. Structural performance test body and test photograph of embedded bent anchor bolt type brackets

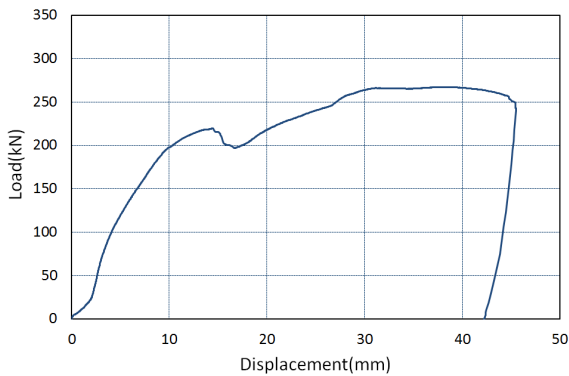
Fig. 10은 꺾임형 매립 앵커볼트 브래킷 구조성능시험 결과를 보여주고 있다. Fig. 10(a)는 브래킷 시험하중 값 150~200 kN에서 콘크리트 균열이 발생하였으며 볼트 파단이 발생하지 않아 실험을 종료한 결과이다. Fig. 10(b)는 브래킷 시험하중 값 185~195 kN에서 콘크리트 균열이 발생하였으며 300~315 kN에서 볼트 파단이 발생하였다.



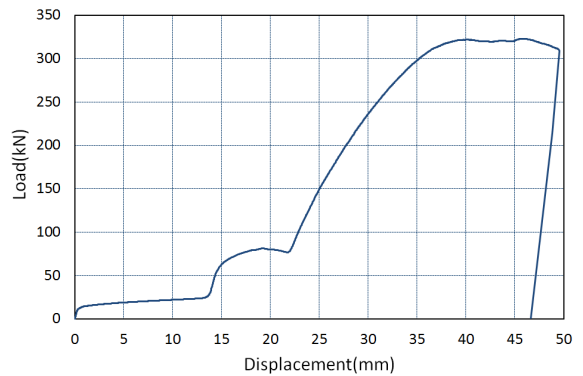
(a) 1st test



(b) 2nd test



(c) 3rd test



(d) 4th test

Fig. 10. Structural performance test results for embedded bent anchor bolt type brackets

Fig. 10(c)는 브래킷 시험하중 값 210~220 kN에서 콘크리트 균열이 발생하였으며, 265~275 kN에서 볼트 파단이 발생하였다. Fig. 10(d)는 브래킷 시험하중 값 70~80 kN에서 콘크리트 균열이 발생하였으며 310~325 kN에서 볼트 파단이 발생하였다. 직선형 매립 앵커볼트를 적용한 Fig. 7의 시험결과에 비해 꺾임형 매립 앵커볼트를 적용한 Fig. 10의 시험결과가 보다 큰 하중지지효과가 있는 것을 확인하였다. Fig. 10(a)의 경우 볼트파단이 발생하기 전에 브래킷 파괴가 발생하여 시험을 종료하였고, Fig. 10(b)~10(d)의 경우는 267~323 kN정도의 비슷한 파괴하중이 나타났다. 따라서 매립된 꺾임형 앵커볼트가 매립된 직선형 앵커볼트에 비해 파괴하중이 큰 것으로 나타났다(Table 4). 시험결과에서 파괴 시의 변위값이 많은 차이를 보이는 데 이는 콘크리트의 균열이 먼저 발생함에 따라 콘크리트의 변형에 의존하여 파괴 시의 변위값에 차이가 발생한 것으로 판단된다.

Table 4. Results of structural performance tests

Bracket types	Anchor bolt shape	Location and number of embedded anchor bolt	No. of anchor bolts	No. of vertical steel plate	Failure loads
General type	Bar type	Chemical types	4	1	233~256 kN
Type-1		Left & right	2	1	200~209 kN
Type-2		Upper & lower	2	2	160~197 kN
Type-1	Bent type	Left & right	2	1	267~323 kN

7. 결론

본 연구에서는 복층터널 연결 수직구 라이닝 설치 후 PC 슬래브 및 계단구조물 지지를 위한 새로운 매립형 브래킷을 개발하였으며 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서는 매립형 앵커볼트를 적용하는 사다리꼴 철재브래킷을 개발하였다. 개발된 철재브래킷은 천공 후 삽입하는 앵커볼트에 비해 철근간섭 가능성이 없으므로 시공속도가 빠르고, 타원형 볼트구멍을 설치함으로써 상하높이조절을 통하여 모든 브래킷의 균일위치 시공이 가능할 것으로 판단된다. 다만, 수직구 콘크리트 타설 전에 주철근에 앵커볼트의 꺾임부를 걸고 매립형 플레이트와 함께 설치하여야 하므로 정확한 높이조절이 필요하고 콘크리트 타설 시 양생하중에 의해 이동하지 않도록 확실한 고정이 필요하다.
2. 매립형 앵커볼트 브래킷에 대한 실규모 구조성능시험 결과 앵커볼트는 좌우 2개 설치조건이 상하 2개 설치조건에 비해 앵커볼트 파단하중이 증가함을 확인하였으며, 이는 앵커볼트 좌우배치의 경우는 동시에 두 개의 앵커볼트가 지지효과를 발휘하지만 앵커볼트 상하배치의 경우는 두 개의 앵커볼트가 동시에 하중을 지지하지 못하고 상부 앵커볼트 파단 후 하부 앵커볼트 파단이 발생하기 때문이다.
3. 매립형 앵커볼트 브래킷에 대한 실규모 구조성능시험 결과 직선형 매립 앵커볼트의 볼트 파단하중 200~209 kN에 비해 꺾임형 매립 앵커볼트의 볼트 파단하중은 267~323 kN으로 증가함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(14SCIP-B088624-01)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Kang, S.H., Kim, D.H., Kim H.T., Song, S.W. (2017), “Study on the structure of the articulation jack and skin plate of the sharp curve section shield TBM in numerical analysis”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 19, No. 3, pp. 421-435.
2. Kim, B.Y., Lee, D.S., Kim, T.K., Kim, Y.J. (2016), “A experimental study on the structural performance of precast bracket under precast road deck slab of double deck tunnel”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 4, pp. 647-657.
3. Lee, H.S., Moon, H.K. (2016), “Numerical study on the connection type of inner-slab in double deck tunnel”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 18, No. 5, pp. 441-451.
4. Moon, H.K., Song, I.C., Kim, J.W., Lee, H.Y. (2017), “A study on the maintenance methods of the multi-purpose double-deck tunnel”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 19, No. 1, pp. 83-93.