도로 폭이 좁은 굴착공사에서 연결부가 적용되는 장시간 주형의 수치해석적 거동 평가

최 광 수¹·하 상 봉²·이 환 우^{3†}

¹부경대학교 토목공학과 박사과정, ²부경대학교 토목공학과 석사과정, ³부경대학교 토목공학과 교수

Numerical Analysis on the Structure Behavior of the Connected Long-span Beam during Excavation in Narrow Streets

Kwang-Sou Choi¹, Sang-Bong Ha² and Hwan-Woo Lee^{3†}

¹Graduate Student, Department of Civil Engineering, Pukyong National Univ., Busan, 48513, Korea

²Graduate Student, Department of Civil Engineering, Pukyong National Univ., Busan, 48513, Korea

³Professor, Department of Civil Engineering, Pukyong National Univ., Busan, 48513, Korea

Abstract

This study evaluates the structural behavior of connected long-span beams applied for excavation in urban areas with a narrow street. Generally, the reliability of the connection is reduced owing to the defect of the upper flange in the connection. An improved connection part was developed to complement the defects in the connected long-span beam. A finite element analysis based on a commercial program, ABAQUS, was employed to evaluate the behavior of the improved connection part. A numerical analysis model was proposed to analyze the high-strength bolt connection and the composite behavior of steel and concrete applied to the improved connection. The suitability of the proposed numerical analysis was verified by comparing the experimental and numerical analysis results of the references. Using the proposed numerical analysis method, the improved and general connections were analyzed and compared with each other. The stress distribution and elastic-plastic behavior of the long-span beam were analyzed numerically. The analysis confirmed that 25% of the compressive stress was improved, resulting in the improvement of structural safety and performance.

Keywords : connected long-span beam, high tension bolt, welding joint, composite structure, boundary nonlinearity

1. 서 론

기술의 발전에 따라 구조물의 경간이 점점 더 장대화되고 있다. 이에 따라 콘크리트 구조물에 비해 자중이 작고 단면성능이 우수한 강구조물의 적용사례가 많아지고 있다. 강구조물은 콘크리트를 사용한 일체식 구조와 달리 부재와 부재를 연결한 조립식 구조이므로 연결 방법이 구조물의 거동에 큰 영향을 미친다.

개착식 터널 공법을 적용하여 지하철도나 도시철도 등을 시공할 경우 차량 통행을 위해 주형과 데크-플레이트(복공판)를 사용한다. 폭이 좁은 굴착공사에서는 지하공간의 확보를 위하여 주형을 연결하여 설치하는 경우가 있다(Fig. 1). 주형은 다양한

연결 방법에 의해 장시간화 될 수 있지만 연결부에서 데크-플레이트의 설치 공간확보를 위하여 일반적으로 압축부에는 현장 용접을 적용하고 인장부에는 고장력 볼트 이음을 적용하고 있다.

용접 이음부의 잔류응력과 변형은 구조물의 초기결함으로 작용하여 압축강도에 민감한 영향을 준다(Seo, 2000). 본 연구에서는 장시간 주형의 압축부 현장 용접 이음부에서 발생할 수 있는 구조적 결함을 보완하고 단면성능을 높여서 안전성을 향상시킨 개선형 연결부를 개발하였다.

개발된 개선형 연결부의 탄소성적 거동과 콘크리트 및 강재의 합성거동을 해석할 수 있는 많은 선행연구들이 있다. Ham 등(2012)은 유한요소 해석프로그램을 이용하여 고장력 볼트 이

[†]Corresponding author:

Tel: +82-51-629-6073; E-mail: hwanwoo@pknu.ac.kr

Received April 10 2020; Revised May 10 2020;

Accepted May 11 2020

© 2020 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

음 모델을 수치해석 검증하였으며 검증된 모델을 플레이트-거더에 적용하여 고장력 볼트 이음의 강도에 따른 볼트 재료 특성의 영향에 대하여 연구하였다. Može와 Beg(2011)은 고장력 볼트로 연결된 강재의 인장실험을 통하여 연결부가 강도와 연성에 미치는 효과에 대하여 실험과 해석적으로 평가하였다. Kwon 등(2015)은 원형의 콘크리트 충전 강관(CFT: Concrete-Filled Steel Tube)의 재료 간 부착거동에 대한 수치해석 방법을 연구하였다. Vinayagam와 Sundararajan(2008)은 CFT강관의 압축 실험을 통해 다양한 하중 조합에 대한 합성거동을 확인하였다.

본 연구에서는 개선형 연결부의 거동 평가를 위해 유한요소 해석 기반의 상용프로그램(ABAQUS)을 이용하였다. 우선적으로 개선형 연결부 수치해석에 대한 적합성 여부를 검증하기 위하여 선행연구의 실험 결과 및 수치해석을 비교하였다. 그리고 개선형 연결부를 적용한 장지간 주형의 단면성능 개선 효과 및 안전성을 확인하였다.

2. 장지간 주형 연결부

2.1 일반형 연결부

교통량이 많은 시가지에서는 굴착공사를 할 때 우회 도로의 확보가 어려워 일부 구간의 차량 통행을 허용시킨다. 일반적으로 중간말뚝을 설치하고 주형과 데크-플레이트를 1/2구간씩 순차적으로 시공하여 차량을 통행시키는 방법을 적용한다. 도로 폭이 좁은 경우에는 중간말뚝으로 인해 지하공간이 협소

Fig. 1 Beam installation steps(Lee *et al.*, 2014)

Fig. 2 Interference at the connection

해져 건설기계의 운용이 제한된다. 본 연구의 대상 주형은 우회도로 확보가 불가능한 좁은 도로 폭에서 임시 중간말뚝을 사용하는 굴착공법이 적용되는 경우이다. 이 굴착공법에서는 먼저, Fig. 1(a)와 같이 임시 중간말뚝을 설치하여 1차 주형과 데크-플레이트를 설치한다. 이후 Fig. 1(b)와 같이 2차 주형 설치 후 1차 주형과 연결한다. 연결된 주형에 데크-플레이트를 설치하고 임시 중간말뚝을 제거한다.

주형의 연결부에 고장력 볼트만을 적용하여 연결부를 시공하는 경우에 Fig. 2와 같이 상부 플랜지 연결부에서 볼트 및 보강 플레이트의 돌출로 데크-플레이트와의 간섭이 발생할 수 있다. 이에 따라 주형 연결부에서 데크-플레이트의 시공성 향상과 간섭의 최소화를 위해 일반적으로 상부 플랜지에 용접 이음을 적용하고 하부 플랜지와 복부에는 고장력 볼트 이음을 병용하는 일반형 연결부를 적용한다.

2.2 개선형 연결부

Fig. 3은 개선형 연결부의 개념도이다. 개선형 연결부는 일반형 연결부의 상부 플랜지 하부에 무수축 콘크리트를 타설한 것이다(Lee *et al.*, 2014). 개선형 연결부에서 압축강도가 크고 피로하중에 대한 저항성이 큰 콘크리트의 특성을 활용하여 연결부에 작용하는 압축응력을 저감시킬 수 있다. 그리고 콘크리트가 압축응력을 분담하므로 압축부 상부 플랜지의 단차와 같은 시공 불량에 따른 응력전달의 불확실성을 감소시킬 수 있다. 또한 차량 하중 및 주변 시설에서부터 발생하는 피로하중을 분담하여 용접 이음부의 피로파괴 발생 가능성을 저하시킬 수 있다.

3. 마찰 접촉해석 이론

개선형 연결부의 고장력 볼트 이음과 강재와 콘크리트의 합성거동에 대한 해석을 위하여 솔리드 요소를 사용하여 모델링하였다. 연결부 해석 시 절점을 공유하지 않은 솔리드 요소가 접촉하는 경우 마찰 거동을 구현하기 위하여는 접촉해석이 필요하다. 접촉문제에서 나타나는 비선형성은 경계 비선형 해석을 포함한다. 경계 비선형 문제를 해결하기 위하여 접촉면의

Fig. 3 Improved connection

성질과 기계적 접촉 특성을 규정하고 최초 접촉 상태를 부여하여 접촉면을 정의한다. 접촉면은 마스터 표면(master surface)과 슬레이브 표면(slave surface)으로 정의되며 Fig. 4와 같이 접촉면의 상호작용을 위하여 노드를 설정한다. 접촉면의 초기 침투를 제거하여 최초 접촉 상태를 정의하고 표면 특성은 강성도, 마찰계수 접촉영역 감지 계수 등에 기초하여 규정한다(Lee *et al.*, 2004).

일반적으로 상용프로그램에서는 마찰 접촉부의 접촉력을 산정하는 대표적인 방법으로 Penalty-Method를 적용하고 있다. Penalty-Method는 Fig. 5와 같이 둘 이상의 물체가 침투하는 경우 비침투 상태로 복원시키기 위한 복원력을 계산하는 방법이다.

임의의 물체 A에 속하고 물체 B를 관통하는 노드 $\vec{x}$ 가 주어질 때 관통 깊이는 B의 표면에서 가장 가까운 노드까지의 거리가 된다. 침투 깊이 $\delta(\vec{x})$ 에 따라 Penalty-Method에 적용되는 에너지 식은 식 (1)과 같다(Tang *et al.*, 2012). 복원력은 식 (2)와 같이 Penalty 에너지의 기울기로 계산될 수 있다.

$$E(\vec{x}) = \frac{1}{2}k\delta(\vec{x})^2 \quad (1)$$

$$\vec{F}(\vec{x}) = -\nabla E(\vec{x}) = k\delta(\vec{x})\vec{n} \quad (2)$$

이때 k 는 요소의 표면 강성 계수이다. 침투 깊이가 정의되면 침투 깊이의 경사도는 침투된 물체의 표면에서 가장 가까운 지점에서 단위 표면 법선 $\vec{n}$ 과 같다. 따라서 복원력은 침투 깊

Fig. 4 Contact node condition(SIMULIA, 2020)

Fig. 5 Penalty-method(Yew *et al.*, 2006)

이와 표면 강성 계수를 이용하여 계산된다. 산정된 복원력을 적용하여 마찰 접촉면에서 유한요소해석이 가능해지며 경계 비선형 문제를 해결할 수 있다.

4. 연결부 해석 방법

4.1 연결부 재료 모델

개선형 연결부의 비선형 거동을 확인하기 위하여 재료의 응력-변형률 곡선을 도입하였다. 무수축 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 식 (3)을 사용하였다(Collins and Mitchell, 1990). 압축강도 f'_c 와 압축강도 변형률 ϵ'_c 을 적용하여 변형률 ϵ_{cf} 를 변수로 압축응력 f_c 을 계산할 수 있다.

$$\frac{f_c}{f'_c} = 2 \frac{\epsilon_{cf}}{\epsilon'_c} - \left(\frac{\epsilon_{cf}}{\epsilon'_c} \right)^2 \quad (3)$$

고장력 볼트 및 주형 등 강재는 단순화된 형태의 응력-변형률 곡선을 적용하였다. 변형 경화가 발생하는 구간은 항복 변형률의 10배로 정의하고 경화구간의 기울기를 탄성구간의 2.4%로 반영하였다(Kim *et al.*, 2008).

4.2 연결부 해석 모델

해석모델은 ABAQUS의 8절점 솔리드(solid) 요소(C3D8R)를 적용하였다. 마찰 접촉면 해석에 Surface-to-Surface 모델을 사용하였으며 상대적으로 적은 접촉 요소가 필요하여 계산 속도가 빠르다는 장점이 있다. Fig. 6은 연결부에 적용되는 마찰

Fig. 6 Surface-to-surface model applied surface

접촉면을 나타내고 있으며 모델링 시 해석조건에 맞게 마찰 접촉면의 마스터 표면과 슬레이브 표면의 설정이 필요하다.

고장력 볼트의 축력은 설계기준에서 제안된 설계 볼트 축력 (MOLIT, 2018)을 적용하였다. 설계 볼트 축력이 재하되는 동안 볼트의 움직임을 제한하기 위하여 볼트 머리를 구속하였다. 볼트 머리에 적용되었던 구속조건은 볼트 축력의 도입 후 하중 재하 시 제거된다(Ham *et al.*, 2012).

4.3 연결부 해석 검증 예(1)

4.3.1 볼트 지압이음 강도 평가실험

Park 등(2014)이 연구한 볼트 지압 이음 강도 평가와의 비교를 통하여 본 연구의 마찰 접촉부 수치해석에 대한 적합성 여부를 확인하였다. 비교분석에 적용된 실험체인 DD-2의 형상은 Fig. 7과 같다. 모재와 이음판은 SS400 강재를 사용하였다. 강재의 연결은 고장력 볼트 M22-F10T로 하였으며 볼트의 도입 축력은 230kN을 적용하였다.

4.3.2 검증해석 결과

4.1절에서 제안된 재료 모델과 4.2절의 해석 모델을 적용하여 마찰 접촉부 해석 및 볼트 축력을 도입하였다. 마찰 접촉부의 마찰계수는 Park 등(2014)이 제시한 0.38을 적용하였다.

Fig. 7 DD-2 specimen details(unit: mm)

Fig. 8 Numerical analysis verification(1)

Fig. 8에서 점선은 실험 결과이고 실선은 수치해석 결과이다. 실험체의 파괴는 모재와 이음판 사이에서 미끄럼을 시작으로 볼트와 모재 사이가 지압 이음 상태에 도달한 후 모재의 탄성 거동을 거쳐 소성 거동으로 진행된다.

실험은 173kN에서 최초 미끄럼 발생 이후 변위 5mm까지 2~3회의 미끄럼이 발생되었다. 실험에서 미끄럼 발생부의 거동 형태는 강재의 표면 상태와 연결 특성 등에 영향을 받는 것으로 판단된다. 본 연구의 수치해석은 실제의 연결 특성을 정확히 반영할 수 없어 175kN에서 미끄럼이 1회만 발생하였다. 이때 본 연구와 미끄럼 실험 하중의 차이는 약 1% 정도이다. 비교 논문의 수치해석 결과도 174kN으로서 본 연구의 결과와 거의 일치한다.

실험 결과에서 모재의 지압파괴는 30mm 인장 시 발생하였으며 최대하중은 311kN이었다. 본 연구의 수치해석 결과는 최대하중이 339kN으로 실험 결과와는 약 8%의 오차이다. 재료 실험을 통해 얻어진 실제의 응력-변형률 곡선을 반영하여 비교 논문의 수치해석 결과는 최대하중이 316kN이었다. 검증 예제 실험의 최초 미끄럼 하중과 볼트 연결부의 마찰 접촉면 거동을 비교적 적절하게 모사할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안한 재료와 해석 모델은 고장력 볼트 연결부 해석에 적합한 것으로 판단된다.

4.4 연결부 해석 검증 예(2)

4.4.1 콘크리트 충전 강재 기둥 압축시험

개선형 연결부에 적용할 콘크리트와 강재의 합성거동에 관한 수치해석의 적합성을 확인하기 위하여 Yeom(2001)이 수행한 실험 연구와 비교하였다. CFT 기둥 실험체는 Fig. 9에 나타난 정사각형 강관 내에 콘크리트가 충전된 합성기둥이다. 실험체에는 변위 제어를 통해 하중을 가력하였다.

4.4.2 검증해석 결과

콘크리트와 강관의 접촉면은 Surface-to-Surface 모델을 적용하였다. 콘크리트와 강관의 마찰계수는 Peter와 Atle(1990)의

Fig. 9 CFT specimen details(unit: mm)

Fig. 10 Numerical analysis verification(2)

연구결과에서 제시한 0.47을 사용하였다. Fig. 10의 실험 결과(점선)에서 알 수 있듯이 변형률 0.0039에서 최대하중은 1845 kN이다. 비교 논문의 수치해석 결과는 최대하중이 1904kN이었고 본 연구의 수치해석 결과는 2117kN으로 다소 크게 나타났다.

이는 본 연구와 비교 논문에서 적용한 해석모델 요소와 초기조건의 차이에서 비롯된 것으로 판단된다. 비교 논문에서는 강관을 쉘 요소로 사용하고 콘크리트는 솔리드 요소를 사용하였으며 접촉면은 갭 요소를 적용하였다. 또한 초기조건으로 강관의 좌굴모드를 설정하기 위하여 초기 처짐과 초기 응력을 본 연구와 달리 부여하였다.

최대하중 이후 실험체는 스트레인 소프트닝이 나타난다. 실험은 변형률 0.01(1531kN)까지 수행되었다. 비교 논문과 본 연구의 수치해석에서도 스트레인 소프트닝을 적절하게 모사하고 있으며 변형률 0.01에서 각각 1697kN, 1587kN을 확인하였다. 본 연구의 수치해석 결과는 비교 논문의 수치해석 결과와 약 6% 차이가 나타났으며 실험 결과와 약 3% 차이로 유사한 것으로 나타났다.

CFT 기둥 실험체는 강관과 콘크리트의 합성작용으로 인해 콘크리트 기둥과 비교하여 연성이 증가하는 효과가 나타난다. 본 연구에서 적용한 콘크리트 특성값에 의하여 공시체 최대 압축강도에서의 변형률 ϵ'_c 은 0.00193이다(Collins and Mitchell, 1990). CFT 기둥 실험체의 최대하중 변형률 ϵ' 은 0.0039로 연성 증가효과를 확인할 수 있다. 본 연구의 수치해석 결과는 0.004로 실험 결과의 ϵ' 과 거의 일치하는 것으로 합성효과도 적절하게 구현할 수 있는 것을 확인하였다.

5. 개선형 연결부 평가

5.1 해석 예

개선형 연결부의 거동을 평가하기 위한 해석 예는 2차로 도로 폭의 굴착을 가정하여 적용하기 위한 길이 5m의 H-형강

Fig. 11 General connection details(unit: mm)

Fig. 12 Improved connection details(unit: mm)

(900×300×16×28) 2개가 연결된 총 지간 10m의 단순보 형식 주형이다. 연결부는 최대 휨 응력이 발생하는 위험 단면에 대하여 분석하기 위해 주형의 중앙부에 설치되는 것으로 가정하였다.

Fig. 11은 고장력 볼트와 용접으로 이음된 일반형 연결부의 상세도이다. 개선형 연결부는 일반형 연결부의 압축부를 L-형강과 무수축 콘크리트로 보강한 것이며 설치 길이는 지간의 1/5에 해당하는 2m이다. 상세도는 Fig. 12와 같다. 주형에 사용된 형강과 보강 플레이트는 SS400 강재를 사용하며 고장력 볼트는 M22-F10T를 적용한다. 개선형 연결부의 상부 플랜지에 설치된 L-형강(120×120×8)의 내부는 압축강도 60MPa의 무수축 콘크리트를 적용한다. 해석 예에 사용된 강재의 재료 특성은 해석 검증 예(1)에 사용된 재료와 동일하다.

5.2 해석모델

Fig. 13은 일반형 연결부와 개선형 연결부의 해석 모델링 형상이다. 고장력 볼트 연결부의 거동과 콘크리트와 강재의 합성거동은 4장에서 제안된 해석방법을 적용하였다. 용접 이음부의 구현을 위하여 타이(tie) 경계조건을 적용하였다.

Surface-to-Surface 모델에 적용되는 강재 간의 마찰계수는 교량 설계기준에서 제시된 0.4를 적용하고 콘크리트와 강재 간의 마찰계수는 0.47을 적용하였다(MOLIT, 2016). 고장력 볼트는 설계 볼트 축력 203kN을 도입하여 해석을 수행하였다. 콘크리트의 탄소성적 거동을 구현하기 위하여 식 (3)을 이용하여 계산된 응력-변형률 곡선을 사용하였다.

Fig. 13 Connection geometry

5.3 해석 결과

일반형 연결부와 개선형 연결부의 중앙단면(A-A)의 상면과 하면에서 변위와 연성재료에 적합한 폰-미세스 응력을 적용하였다. 해석에 적용된 하중 조건은 고정하중으로 주형의 자중과 데크-플레이트, 작업하중을 고려하여 6.72kN/m를 상부 플랜지 상면에 재하하였다. 활하중은 중앙부에서 최대 휨모멘트를 유발하는 위치에 표준 차량하중(KL-510)을 2개 차로에 재하하였다. 후륜하중 96kN에 충격계수와 바퀴 집지면적을 고려하여 적용하였다.

중앙 단면 상면에서 압축응력은 Fig. 14와 같은 분포를 보인다. 개선형 연결부는 일반형 연결부에 비해 평균 23.38MPa이 감소하였다. Fig. 15는 중앙 단면의 하면에서 발생한 인장응력의 분포이다. 평균 2.00MPa이 감소하였으며 최외측 볼트 홀부근에서 단면 손실로 인하여 응력이 저하되는 형태의 분포가 나타났다. L-형강과 무수축 콘크리트의 효과로 인장응력과 처짐의 개선되었다. 특히 용접 이음부의 결함이 나타나는 압축부의 응력은 평균 25% 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 16은 개선형 연결부가 적용된 장지간 주형의 비선형 거동에 대한 그래프이다. 해석 시 복부 좌굴의 방지를 위하여 변위 제어방식을 사용하였다. 변위 제어는 가시설물 설계기준(MOLIT, 2017)에 따른 시간의 1/400(25mm)의 2배인 50mm까지 해석하였다. 개선형 연결부는 허용 처짐 이후 하부 보강 플레이트에 응력이 집중되어 항복응력에 도달하였다. 하부 보강 플레이트의 항복 이후는 하중-변위 곡선의 기울기가 감소하는

Fig. 14 Compression stress comparison

Fig. 15 Tensile stress comparison

Fig. 16 Nonlinear action of improved connection

비선형적인 거동이 잘 묘사되었다.

해석에 적용된 주형은 가설구조물이지만 계수 하중에 대한 거동상태의 확인을 위하여 하중저항계수설계법(LRFD: Load Resistance Factored Design)의 하중계수를 적용하였다(AASHTO, 2017). 계수하중 상태에서 개선형 연결부는 탄성 거동의 응력수준이 나타나고 허용 처짐을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

개선형 연결부의 무수축 콘크리트가 응력을 부담하여 용접 이음부에 작용하는 응력 수준이 감소하였다. 용접 이음부에서 나타날 수 있는 결함으로 인한 피로 균열이 억제되어 연결부의 불확실성에 대한 개선 효과를 발휘할 수 있을 것으로 판단된다. 개선형 연결부의 효과로 연결부의 신뢰도가 향상되고 주형의 응력과 처짐의 감소로 안전성이 개선된 것을 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 장지간 주형에 주로 사용되는 일반형 연결부의 문제점을 개선하기 위한 개선형 연결부를 제안하였고 그 거동을 수치해석을 통해 확인하였다.

- 1) 개선형 연결부의 수치해석을 위한 해석방법을 제안하였다. Surface-to-Surface 모델을 이용한 해석 방법 검증을 위하여 비교 논문의 실험 및 수치해석 결과와 비교하였다. 그 결과 제안된 재료모델과 해석모델은 고장력 볼트 연결부의 해석 및 강재와 콘크리트의 합성거동을 적절하게 모사할 수 있는 것을 확인하였다.
- 2) 일반형 연결부와 개선형 연결부의 비교를 통하여 무수축 콘크리트의 응력분담 효과를 확인하였다. 압축부 용접 이음에서 압축응력의 감소가 탁월하게 나타났으며 일반형 연결부의 용접부에 나타날 수 있는 결함을 보강하여 구조적으로 개선할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 개선형 연결부의 도입으로 인장응력과 처짐도 감소되어 장시간 주형의 구조적 성능과 안전성이 향상되었다. 따라서 개선형 연결부는 도로 폭이 좁은 구간의 굴착공사에 적용하는데 효과적일 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음.

References

- AASHTO** (2017) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, *American Association of State Highway and Transportation Officials*.
- Collins, M., Mitchell, D.** (1990) Prestressed Concrete Structures, Edited by Mary, L, *Prentice Hall*, p.64.
- Ham, J.S., Hwang, W.S., Yang, S.D., Chung, J.S.** (2012) An Analytical Study for the Strength of the High Tension Bolted Joints in Plate Girder, *J. Korean Soc. Steel Constr.*, 24(4), pp.469~478.
- Kim, S.B., Choi, J.K., Heo, I.S.** (2008) Ultimate Behavior of High-Tension Bolted Joints considering Plate Thickness and Bolt Size, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 24(5), pp.515~524.
- Kwon, Y.S., Kwak, H.K., Hwang, J.Y., Kim, J.K., Kim, J.M.** (2015) An Improved Bond Slip Model of CFT Columns for Nonlinear Finite Element Analysis, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 28(2), pp.213~220.
- Lee, H.W., Park, E.T., Song, Y.Y., Kim, G.Y., Park, Y.J.** (2014) Design Adequacy of Foundation and Connections of Mould Neam of Busan Metropolitan Railway Sasang ~ Hadan Line 1 Construction, Pukyong National University Industry-University Cooperation Foundation, p.104.
- Lee, C.W., Shin, J.C., Bang, M.S.** (2004) The Study on High Tension Bolted Splice by Elasto-Plastic Analysis with Sliding and Experimental Testing, *J. Korean Soc. Civil Eng. A*, 24(3A), pp.439~444.
- Može, P., Beg, D.** (2011) Investigation of High Strength Steel Connections with Several Bolts in Double Shear, *J. Constr. Steel Res.*, 57, pp.333~347.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT)** (2016) Design Criteria for Bridges and other Facilities, *Ministry of Land, Infrastructure and Transport*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT)** (2017) Code for Design of steel structures, *Ministry of Land, Infrastructure and Transport*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT)** (2018) Design Criteria for Temporary Bridges and Surfaces of Roads, *Ministry of Land, Infrastructure and Transport*.
- Peter, B., Atle, G.** (1990) Coefficient of Friction for Steel on Concrete at High Normal Stress, *J Mater. Civil Eng.*, 2(1), pp.46~49.
- Park, Y.M., Lee, K.J., Kim, D.H., Ju, H.J.** (2014) Tensile Strength of Plate with Bolt Hole and Bearing Strength of Bolted Connection by Oxygen Torch Cut, *J. Korean Soc. Steel Constr.*, 26(6), pp.617~626.
- Seo, S.I.** (2000) A Study on the Simplified Method to Calculate the Compressive Strength of Welded Structures, *J. Weld. & Join.*, 18(4), pp.87~95.
- Simulia** (2020) Discretization of Contact Pair Surfaces, Accessed March 1, https://help.3ds.com/2018/english/dssimulia_established/simacaeitnrefmap/simaitn-c-contactpairform.htm?contextscope=all.
- Tang, M., Manocha, D., Otaduy, M., Tong, R.** (2012) Continuous Penalty Forces, *ACM Trans. Graph.*, 31(4), Article 107(9 pages).
- Vinayagam, P., Sundararajan, R.** (2008) Nonlinear Response of Concrete Filled Steel Tubular Composite Columns under Axial Loading, *i-manager's J. Future Eng. & Technol.*, 4(1), pp.52~62.
- Yeom, S.H.** (2001) *Analysis of Concrete-Filled Steel Column under Axial Loading*, Master's Thesis, Inha University.
- Yew, M.C., Chow, C.S., Yang, W.K., Chiang, K.N.** (2006) The Solder on Rubber (SOR) interconnection Design and Its Reliability Assessment Based on Shear Strength Test and Finite Element Analysis, *Microelectron. Reliab.*, 46, pp.1874~1879.

요 지

본 연구의 대상은 도로 폭이 좁은 시가지에서 굴착공사 시 적용되는 장지간 주형의 연결부이다. 일반적으로 적용되고 있는 연결부에서 상부 플랜지의 단차와 피로균열 등의 문제로 연결부의 신뢰도가 저하된다. 연결부의 결함을 보완하고 안전성을 향상시킨 개선형 연결부를 개발하였다. 유한요소 기반의 상용프로그램(ABAQUS)를 이용하여 개선형 연결부의 거동을 평가하였다. 먼저, 개선형 연결부에 적용되는 고장력 볼트 연결 및 강재와 콘크리트의 합성거동을 구현하기 위한 수치해석 방법을 제안하였다. 비교논문의 실험결과와 수치해석 결과의 비교를 통하여 개선형 연결부를 해석하는데 있어 수치해석 방법의 적합성을 검증하였다. 본 연구에서 제안하는 수치해석 방법을 적용하여 개선형 연결부와 일반형 연결부가 적용된 장지간 주형을 해석하였다. 장지간 주형의 탄소성 거동과 연결부의 응력분포를 수치 해석적으로 비교분석하였다. 개선형 연결부의 도입으로 25%의 압축응력이 감소되며 구조적 성능 개선 효과 및 안전성을 확인하였다.

핵심용어 : 장지간 연결 주형, 고장력 볼트, 용접 이음, 접촉해석, 합성구조, 경계 비선형