

일체식교량의 접속슬래브 연결철근 형상에 따른 연결부 구조거동에 대한 실험연구

유성근¹ · 김나연² · 김호섭³ · 김현기⁴ · 김영호⁵

(주)이산 기술연구소장¹, (주)이산 기술연구소 과장², (주)이산 기술연구소 대리³,
(주)에이스이엔씨 기술연구소장⁴, 세진특허법률사무소 부소장⁵

Experimental Study on the Structural Behavior of Typical Bar Connections of Approach Slab in the Integral Abutment Bridge

You, Sung-Kun¹ · Kim, Na-Yeon² · Kim, Ho-Seop³ · Kim, Hyun-Gi⁴ · Kim, Young-Ho⁵

¹ Director of Research Institute, ISAN Corporation, Gyeonggi-do, Korea

² Researcher, Research Institute, ISAN Corporation, Gyeonggi-do, Korea

³ Researcher, Research Institute, ISAN Corporation, Gyeonggi-do, Korea

⁴ Director of Research Institute, ACEENC inc., Gyeonggi-do, Korea

⁵ Vice Director of Sejin Patent & Law Office, Seoul, Korea

Abstract: An experimental study on the structural behavior of connection types between approach slab and integral abutment has been done for three typical bar connections. Typical hinge style reinforcing bar detail for its connection is preferred in order to accommodate rotation of the approach slab among engineers. However, the straight horizontal bars can be used as connection detail accommodate structural capacity. Total six specimens with three types of rebar detail are tested for direct tensile and bending load. The characteristic structural behaviors are carefully monitored and all the strain gauge data obtained are analyzed. It is shown that the structural performance of all the specimens well exceed its design allowance. Several design suggestions are given based on careful reviews on the experiment.

Key Words: Integral Abutment Bridge, Semi-Integral, Approach Slab, Hinge, Standard Connection

1. 머리말

일반 조인트교량(Joint Bridge)은 온도 및 습도 등 외부환경 변화에 의한 상부구조 신축을 처리하기 위해 신축이음장치와 교량받침과 같은 기계적 구조요소를 필수적으로 사용하게 된다. 이와 같은 기계적 요소는 공용 중 활하중 또는 2차 하중의 영향으로 파손이 빈번하여 교량의 내구성 저하로 유지관리 측면에서 심각한 문제로 지적되고 있다. 일체식교대 교량(Integral Abutment Bridge; 이하 일체식 교량)을 포함하는 무조인트 교량(Jointless

Bridge) 형식은 외부 환경 변화로 발생하는 유지관리 요소를 최소화하고, 관리 비용을 최소화하기 위한 목적으로 교량계 상부구조 건설시 기계적 이동 장치를 설치하지 않는 교량 형식을 총칭한다.

일체식 교량은 Fig. 1과 같이 상부구조인 거더 및 바닥판과 낮은 높이의 교대(소교대 또는 상부구조와 벽체교대)를 일체화 시공하여 상부구조의 온도신축으로 발생하는 수평 또는 회전 변위를 손쉽게 수용하는 교량 형식을 의미한다. 현재 국내에 건설되어 공용중인 대다수의 중소교량은 상시 외기 온도 변화에 의하여 발생하는 상부구조의 신축 변위를 상부구조 내에서 처리할 수 있도록 기계적인 신축이음장치와 받침을 설치하는 것이 일반적이다.

주요어: 일체식교량, 반일체식, 접속슬래브, 힌지, 표준 연결철근

Corresponding author: You, Sung-Kun
Director of Research Institute, ISAN Corporation, Gyeonggi-do, Korea
Tel: +82-31-389-0055, E-mail: skyou61@hanmail.net

Received November 19, 2014 / Revised December 18, 2014 / Accepted December 23, 2014

기계적 신축이음장치는 주행차량의 지속적 작용하중에 의해 주행소음, 변형, 충격 등을 발생시키며, 사용연한이 증가됨에 따라 이음부에 이물질이 누적되어 기계적 장치의 정상적 작동을 저해시켜서 조인트 교량의 대표적인 유지관리 요소가 된다. 또한, 동절기 제설제로 사용되는 염화칼슘이나 우수가 이음장치 부위가 유입경로 역할을 하여 직하에 위치하는 교량받침의 내구성 및 성능에 좋지 않은 영향을 미치게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 1930년대 이후 미국에서는 신축이음장치나 받침을 설치하지 않는 일체식 교량이 건설되기 시작하였다. 조사결과에 따르면 1990년대 중반까지 약 3,000개소가 공용중이었으며, 2004년에는 약 13,000개소로 일체식 교량이 계획·반영되었다. 이러한 추세는 유지관리 업무의 저감을 위하여 발생 원인을 적극적으로 사전에 배제함으로써 구조물의 내구성 증대 및 LCC 절감을 효과적으로 대응한 결과라 판단된다.

일체식 교량은 기본 개념상 교대부는 시공단계에 따라 기초교대와 벽체교대로 구분이 가능하다. 일반적으로 교대는 외기 온도변화에 따른 신축변위와 거더 단부 회전에 대해 유연성(Flexibility)을 보유할 수 있도록 일렬 H말뚝으로 지지되는 특성을 가지며, 일체식 교량의 주요 구성요소는 Fig. 1과 같다.

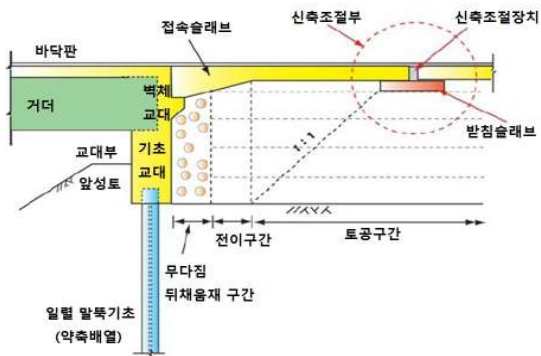


Fig. 1 Structural Components of Integral Abutment Bridge

일체식 교량의 중요한 특성은 상부구조가 교대와 일체로 시공되는 점으로써 온도 변화로 발생하는 상부구조의 신축변위를 처리하기 위하여 사용되는 교량받침을 제거하고 신축조절장치(Cyclic Control Joint)가 조인트 교량과 다르게 교대 구조체의 상부에 위치하지 않고 도로부의 접속슬래브 끝단에 간단한 형식으로 존재하게 된다.

국내의 경우 국외 시공사례 분석 및 국내 실용화 연구의 일환으로 한국도로공사에서는 대전-통영 고속도로 건설공사에 2001년 국내 최초로 기술을 실

용화하여 3경간 90m PSC beam 교량을 건설하였다. 이후 완공 교량에 대한 공용 중 계측과 분석을 실시하여 설계 및 시공에 대한 지속적인 설계 및 시공기준의 수립 작업을 수행하고 있다. 최근 생애주기비용(LCC)을 포함한 건설개념이 강조되면서 일체식 교량 형식을 적용한 교량의 기술개발과 실적이 활발히 진행 중이다.

일체식 교량의 구조 요소에 대한 다양한 실험과 검증이 국내외에서 이루어지고 있으나 국내 상부구조 형식의 다양성을 감안 시 접속슬래브의 거동에 대한 실제적 연구는 다른 구조 구성요소와 비교 시 미진한 실정이다. 따라서 접속슬래브의 사용 목적은 기존 조인트 교량과 동일하나 일체식 교량에서 접속슬래브의 구조 거동이 상이하므로, 본 연구는 일체식 교량에 관한 접속슬래브 연결부의 설계 및 시공을 중심으로 구조 실험을 실시하고 이를 분석하고자 한다.

2. 일체식 교량의 접속슬래브

일체식 교량은 상부구조, 교대부, 말뚝을 일체화하고 접속슬래브는 연결철근을 사용하여 교대부와 결합하여 상부-하부구조 전체교량계의 온도신축을 교량과 도로부에 사이에 신축조절장치를 설치하여 수용하는 형식이다. Fig. 2는 아스팔트 포장 도로상에 위치하는 교량의 접속슬래브를 보여준다. 접속슬래브는 상대적으로 다짐도가 떨어지는 뒷채움부에서 공용 중 발생 가능한 자연 다짐 침하로부터 진입출부에 발생 가능한 단차를 예방하여 차량 충격하중으로부터 교량 구조물을 보호하여 유지관리의 효율성을 증대하고 사용자에게 쾌적한 주행환경을 제공하기 위하여 설치된다.

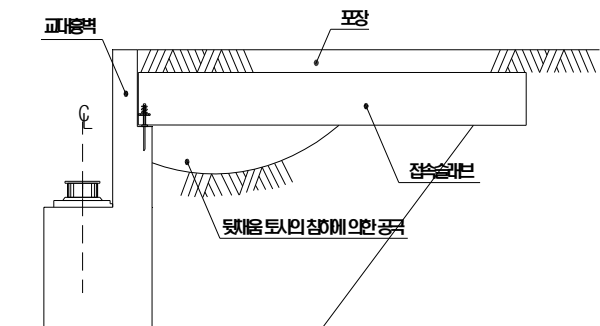


Fig. 2 Typical Approach Slab System in the Asphalt pavement

콘크리트 포장이 사용되는 경우는 Fig. 3과 같이 받침 및 완충슬래브를 배치하여 콘크리트 포장부에서 발생하는 온도신축 변위도 함께 처리 할 수 있는 설계방안을 적용하고 있다.

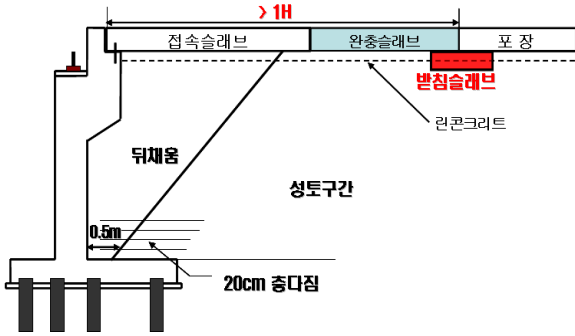


Fig. 3 Typical Approach Slab System in the Concrete Pavement

국내의 경우 접속슬래브는 대부분 일측 단부가 교대 흉벽에 도웰(Dowel)바로 연결되고 슬래브의 하단이 토사부에 의하여 전구간이 지지되는 슬래브로 실 거동하게 되며, 그 설치 길이는 최대 10m를 초과하지 않도록 규정하고 있다. 접속슬래브의 구조 설계 적용 기준은 Fig. 4와 같다.

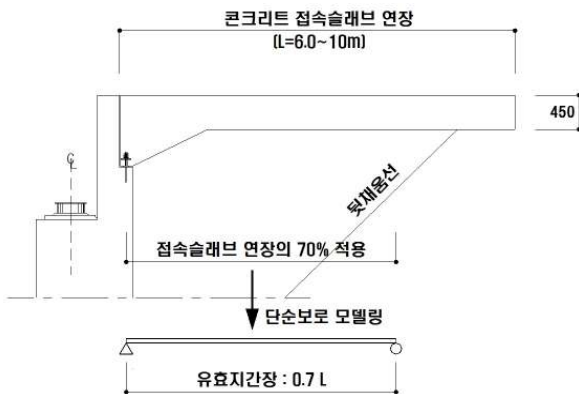


Fig. 4 Design Concept of Approach Slab

즉, 교대 뒷채움부의 지반침하를 고려하여 콘크리트 접속슬래브 연장의 70%를 가진 단순보로 가정하여 구조설계를 실시한다.

상기 구조의 설계와 시공 기준은 교량 상부구조가 조인트로 분리거동을 하는 경우에 해당된다. 일체(반일체)식 교량의 경우는 접속슬래브가 교량 상부구조와 교대와 연속적 연결 시공되어 외기온도 변화에 대하여 상부구조와 함께 변위(이동)를 하는 상이함을 가지게 된다. 그러므로 교대와 접속슬래브의 연결은 중요하며 이에 관련된 실제적인 설계 상세지침은 없으나 일체식 교량을 표준화하여 사용하는 미국의 경우 표준도 및 설계자의 합리적 판단에 의하여 연결부를 설계하고 있다. 대표적인 미국 각주의 표준도상 연결방법은 Fig. 5와 같다. 철근 연결 방법은 다양한 형식이 존재하고 일체 혹은 힌지 형식을 도입하고 있음을 확인할 수 있다.

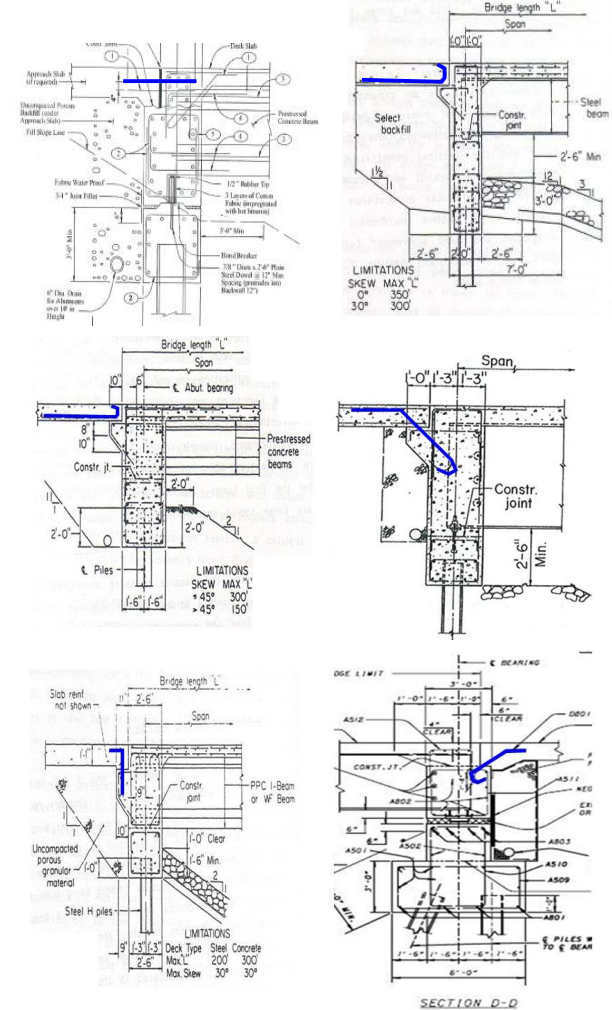


Fig. 5 Design Details of Rebar Connection of Approach Slab in Typical Integral and Semi-integral Bridge

3. 실험 계획 및 실험체

3.1 실험개요

일체식 교량의 접속슬래브 연결부 거동과아과 본 연구진이 수행한 “PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량개발” 연구로 개발된 PCB-Slab (Prestressed Concrete Box Slab) 교량 거더의 형상특성을 감안하고(이기택, 2013), 향후 일체 및 반일체식 교량 공법으로 적용성 확대 및 기술 접목 시 필요한 접속슬래브 연결 철근방안에 대한 구조 성능을 실험적으로 평가하기 위하여 고안된 3개의 연결철근 형상에 대한 실험을 계획하였다. 접속슬래브와 교대 연결 방안으로 힌지(Hinge)와 일체(Fix) 연결을 구현하는 방법을 고안하였고 각 구조거동을 확인할 수 있도록 실재하 실험 계획을 수립하였다.

일체식 교량에서는 외기 온도변화로 발생하는 상부거더 구조의 신축에 대하여 접속슬래브와 교대

연결부는 거더의 온도신축 변위에 따라서 접속슬래브와 함께 변위 발생이 가능한 상세 구조가 필요하다. 일체식 교량의 적용이 빈번한 국외지역의 설계 및 시공 문헌자료를 조사 분석한 결과, 크게 두 가지 구조 개념의 연결방안이 상용되고 있으며 연결부 상부 부모멘트 연결철근의 존재 유무에 따라서

- 힌지(Hinge) 거동
- 일체(Fix) 거동

를 선택 적용하고 있으나 설계자들은 힌지 반영을 선호하는 것으로 조사된다. 이를 고려하여 연구 개발된 PCB-Slab에 적용 가능한 연결을 단순성과 시공성을 반영하여 3가지 철근 연결형상을 고안하고 국내 설계기준을 반영하여 실험체를 제작하였다.

3.2 실험체 제작

접속슬래브의 실험체 설계는 콘크리트 포장에 적용되는 한국도로공사 설계 기준을 적용하였으며, 제작과 해석의 편의를 위하여 단위 폭(1m)으로 설계 및 제작하였다. 사용재료는 철근 H19(SD400)을 사용하였으며, 콘크리트 설계기준 강도는 PCB-Slab 거더와 접속슬래브에 각각 40 MPa, 27 MPa를 적용하였다.

실험체 형상은 하중의 가력을 위하여 인장실험체의 경우, 양단부에 PS 강봉으로 고정, 설치 할 수 있도록 실험 기관과 사전 협의하여 내용을 반영하였다.

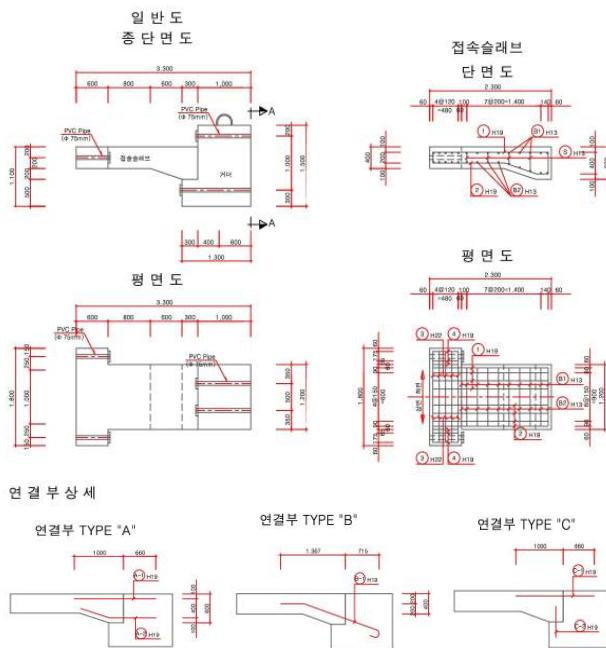


Fig. 6 Design Details of Three Types of Connection for Tensile Test

Fig. 6은 고안된 3가지 형상의 연결방법을 보여 준다. 연결철근의 형상은 기본적으로 부모멘트 연결철근을 도입한 일체(Fix)형 A와 C Type과 힌지 거동을 유도한 B Type으로 구분하였다.

A Type의 경우는 일체 거동으로 발생 가능한 연결부 부모멘트를 처리하기 위한 상부 연결철근과 하부의 경사 철근을 배근하였으며, 일체 거동의 C Type 경우는 상부는 A Type과 동일하고 하부는 시공성을 고려하여 지점부에 다수의 철근을 수직되게 설치하였다.

B Type의 경우 전형적 힌지 철근은 접속슬래브 단면 내에서 가능한 중립축 위치에 설치하고 이후 경사부는 가능한 실험체 하면에 위치토록 배근하여 힌지 거동을 구현하기 용이하게 설치하였다.

A와 C 실험체의 상부 부모멘트 연결철근의 경우 접속슬래브 방향으로 겹이음 길이를 반영하여 1000mm 매입과 PCB-Slab 거더로 D-19철근의 정착길이에 해당하는 660mm매입길이를 설계 반영하였다. 실험체의 길이는 약 2.3m를 적용하여 인장 가력지점으로부터 충분한 거리를 확보하여 가력하중이 가능한 단위 폭에 균일한 평균하중으로 연결부에 작용 할 수 있도록 계획하였다.

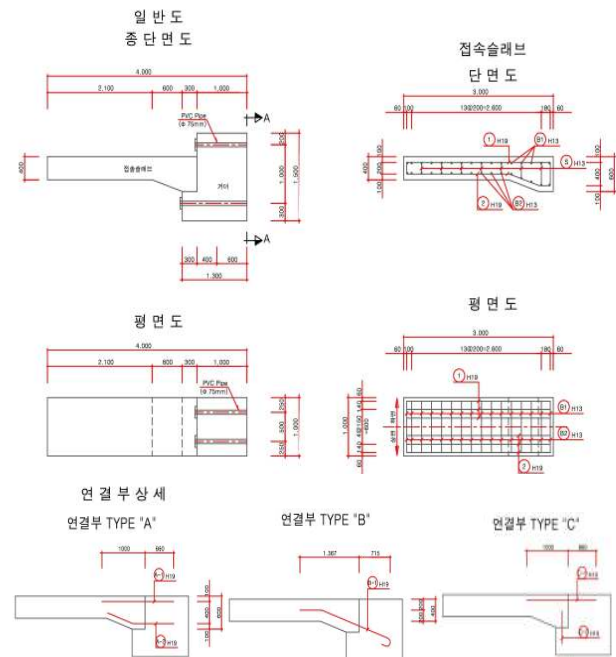


Fig. 7 Design Details of Three Types of Connection for Bending Test

Fig. 7은 휨 실험체를 보여주며 적용된 연결철근의 형상은 3가지로 인장 실험체와 동일하다.

접속슬래브의 휨 거동을 위하여 길이를 3m로 연

장하였으며, 연결철근의 배근형상은 동일하나 배근 수량의 경우 인장 실험체에서의 상부철근 9가닥 하부 5가닥 철근배근을 상부 7가닥, 하부 4가닥으로 감소하여 배근하였다.

배근수량 조정 사유는 휨 거동 시 각 연결철근의 구조적 역할을 보다 명확하게 관찰하기 위함이다.

총 6개의 인장과 휨 실험체는 경기도 여주시 소재의 콘크리트 구조실험체 전문제작업체에 의뢰하여 공장제작을 하였다.

사용된 콘크리트는 공시체를 제작하여 28일 압축 강도 시험을 실시한 결과, 각각 적용 설계기준 강도인 28 MPa, 40 MPa를 상회하는 결과를 확인하였다.



Fig. 8 The View of Form Works and Fabrication of Experimental Specimens

3.3 실험방법 및 계측계획

1) 접속슬래브 직접인장실험

접속슬래브의 인장 실험은 직접인장 가력을 위한 실험체 Setting을 위한 강봉 설치용 관통 홀을 설치하여 이를 이용하였다.

가력 하중의 범위를 파악하고자 사전 검토 결과는 Table 1과 같다.

인장하중은 실험체의 자중이 중요 실험 변수가 되기 때문에 실험체의 길이가 증대됨에 따른 자중을 고려 시 약 100 kN의 가력하중 범위가 실제적 작용하중으로 판단되었고 철근의 매입 부착강도 등을 감안 시 약 800 kN 수준의 가력상태에서 파괴가 예측되었다.

Table 1. Experimental Loading Setup for Direct Tensile Test

| 슬래브 연장(m) 브라켓상부제외 | V ₁ (m ³) | V ₂ (m ³) | V ₁ (m ³) [V ₁ +V ₂] | 접속슬래브 중량 (ton) | 가력 (ton) | |
|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|---|-------------------|-------------|-------|
| 2 | 0.56 | 0.3 | 0.86 | 2.15 | 2 | |
| 3 | 0.96 | 0.3 | 1.26 | 3.15 | 3 | |
| 4 | 1.36 | 0.3 | 1.66 | 4.15 | 4 | |
| 5 | 1.76 | 0.3 | 2.06 | 5.15 | 5 | |
| 6 | 2.16 | 0.3 | 2.46 | 6.15 | 6 | |
| 7 | 2.56 | 0.3 | 2.86 | 7.15 | 7 | |
| 8 | 2.96 | 0.3 | 3.26 | 8.15 | 8 | |
| 9 | 3.36 | 0.3 | 3.66 | 9.15 | 9 | |
| 10 | 3.76 | 0.3 | 4.06 | 10.15 | 10 | |
| · | | | | | 11 | |
| · | | | | | | |
| · | | | | | | |
| 인발파괴하중 (약식계산) | | | | | A Type | 39.36 |
| | | | | | B Type | 60.19 |
| | | | | | C Type | 83.11 |

2) 접속슬래브 휨 실험

인장실험과 다르게 휨 실험의 경우는 접속슬래브의 연결부 Type 별 힌지거동과 일체거동을 확인하고자 부모멘트 철근의 거동을 고려한 가력하중 위치와 범위를 사전 검토하였다. 실제 일체 연결 시 접속슬래브 거동은 Fig. 9의 세 번째와 같다고 판단되나 실험실에서 접속슬래브의 지반지지 조건을 구현 할 수 없었다. 본 실험의 목적은 일체 거동의 연결부에서 부모멘트 철근의 구조 거동이므로 연결부에 최대 부모멘트를 유발하는 하중재하에 해당하는 1안의 지점 선하중 가력방안을 휨 실험 방법으로 결정하였다.

휨 실험 방안에서 가력하중의 위치, 크기 및 이에 따른 실험체의 응력분포의 경향을 실험 수행 전에 파악하기 위하여 구조해석을 Fig. 10과 같이 Solid modeling하여 3차원 탄성 수치해석을 수행하였으며, 그 결과 계획된 가력방안은 접속슬래브 연결부에 휨 인장응력을 크게 발생시킴을 확인하였다.

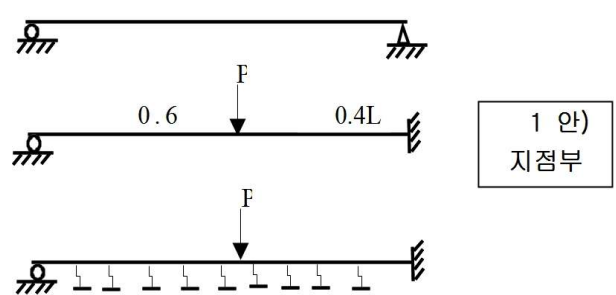


Fig. 9 Idealized Loading Plan for Bending Test

기본 가력하중으로 발생하는 모멘트에 의한 응력 값이 2.7 MPa (균열발생 응력 = 개략 접속슬래브 콘크리트 강도의 $f_{ck} = 27 \text{ Mpa}$ 의 1/10 수준)에 해당하는 응력 발생의 가력하중의 크기를 수치해석으로 사전 조사한 바, 최대 가력하중은 1,000 kN

수준으로 판단되어 실험가력에 참조하였다.

실험 실시 전 위와 같이 실험 기본 계획을 수립 하였으나 실험실에서의 실험체 고정을 위한 강봉 고정을 위한 바닥의 고정구 위치가 0.3m 간격으로 배치가 되어 정확하게 가력위치를 계획과 같이 수행하지 못하고 Fig. 11과 같은 가력조건하 실험을 진행하였다.

Table 2. Numerical Analysis for Bending Experiment

| 구 분 | 발생응력 (MPa) | | |
|-----------|------------|----------|----------|
| 재하응력P(kN) | 1050(75) | 1120(80) | 1190(85) |
| 발생응력정모멘트부 | 1.849 | 1.972 | 2.095 |
| 발생응력부모멘트부 | 2.524 | 2.692 | 2.860 |

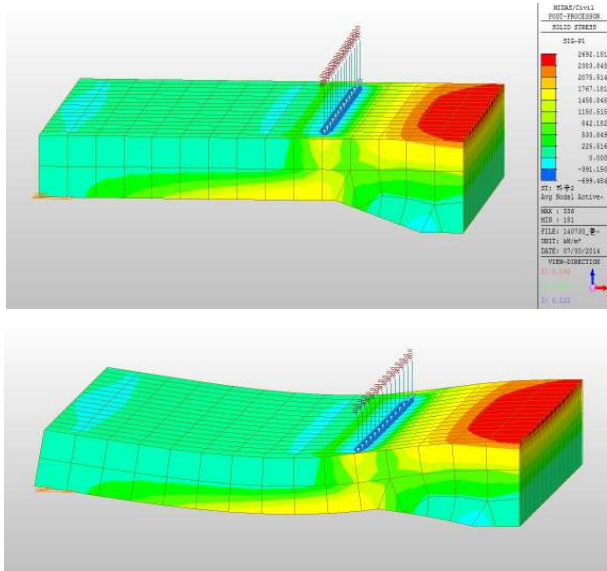


Fig. 10 3-D Numerical Analysis for Experimental Setup

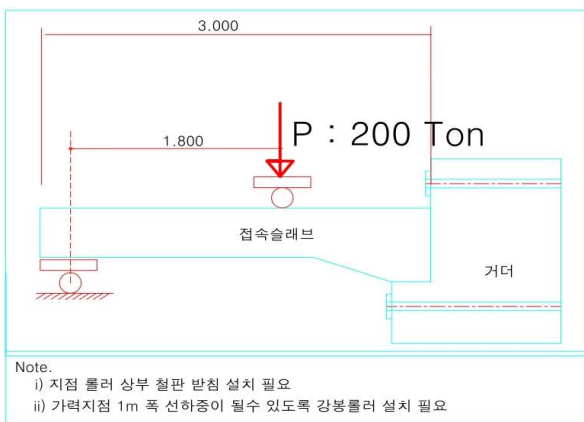


Fig. 11 Experimental Loading Setup for Bending Test

3.4 실험결과

게이지 및 LVDT(Linear Variable Differential Transformer) 설치 수량, 위치 및 명칭은 Fig. 12 와 같다. 실험체에 대한 인장 및 휨 가력 실험은 2014년 7월21일부터 8월5일까지 각 6개 실험체에 대한 인장 및 휨 실험을 실시하였다.

LVDT는 Fig. 12와 같이 거더측부터 LVDT-1, LVDT-2, LVDT-3 으로 정의하였으며, 각 실험체에 설치된 철근 Strain Gauge는 아래 기준으로 구분하였다.

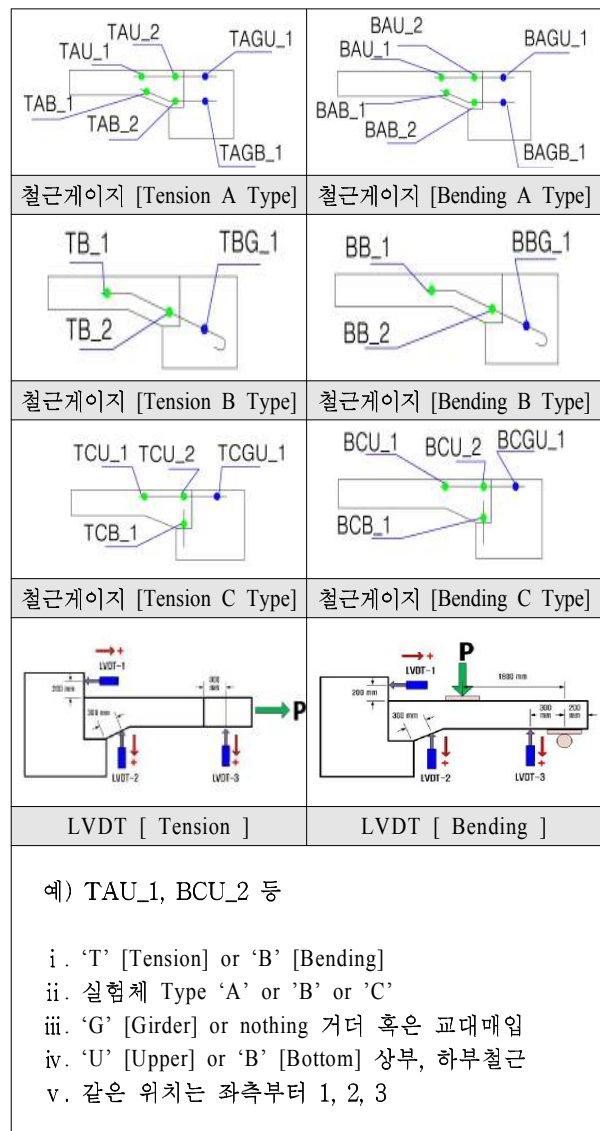


Fig. 12 Experimental Specimens and Gauge Plan for Direct Tensile and Bending Test

직접인장실험과 휨 실험에 대한 각각의 실험체별 가력 전경 및 실험 완료 후의 실험체의 파괴형태는 Fig. 13, 14와 같다.

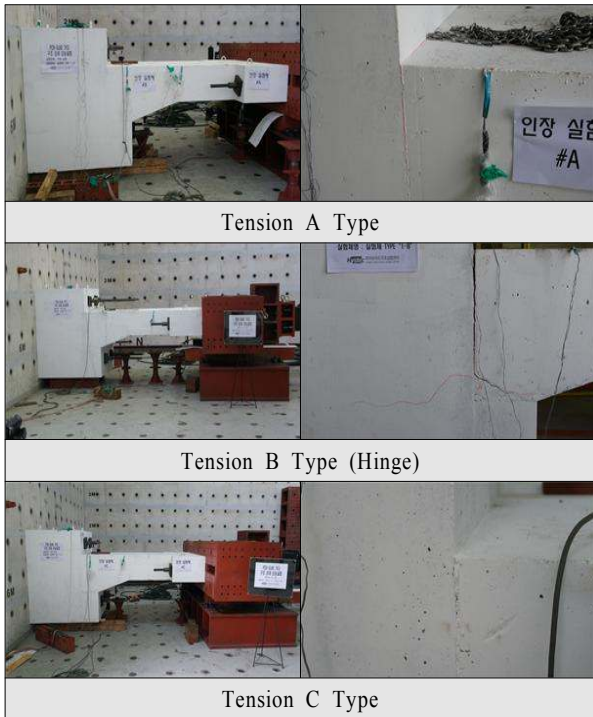


Fig. 13 Experimental Loading Setup for Direct Tensile Test

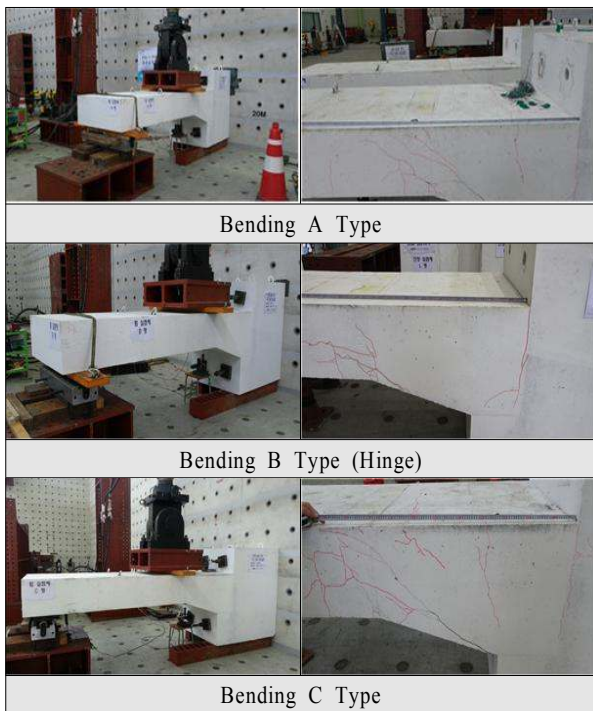


Fig. 14 Experimental Loading Setup for Bending Test

4. 계측결과 분석

- 1) 직접인장실험
- 3개 실험체 모두 최대 예측 가력하중(약 850

kN) 범위 내에서 연결철근의 항복을 관찰하지 못하고 실험을 종료하였다. 이는 인장 실험체에 배근된 연결철근의 수량 (9가닥)의 많기 때문에 충분한 하중을 가력하지 못한 사유로 판단된다. 단 실제적으로 접속슬래브의 최대 길이(10m)에 해당하는 자중에 의한 정지마찰력이 실제 작용 가능한 최대하중이기 때문에 마찰계수를 최대 1.5라 가정 시, 10m 접속슬래브의 자중에 해당하는 하중이 약 100 kN 이므로 실험체 최대 가력하중 850 kN은 파괴거동을 고찰하지는 못하였으나 인장거동 특성을 고찰하기 위한 충분한 하중으로 판단된다 (Brent, 2013)

각 연결형식에 대한 하중 변위곡선을 상단 LVDT와 Actuator의 발생변위를 기준으로 그래프를 작성하면 Fig. 15와 Fig. 16과 같다.

실험체별 연결부가 힌지와 일체 조건에 따라 상단에 설치한 LVDT 값에 대한 그래프인 Fig. 15로써 확인하게 확인 구분이 가능하다. 즉 B Type은 명확한 힌지거동을 보여주며 일체 연결의 경우는 힌지거동과 비교 시 상대적으로 완벽한 일체 거동을 보여주고 있다.

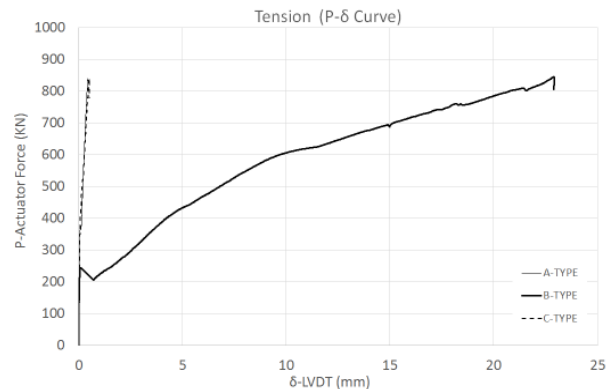


Fig. 15 Measured LVDT Values at the Upper Connection point for Three Connection Types

힌지로 설계된 B Type의 경우 A, C 와는 Fig. 16에서와 같이 하중 증가량에 비해 상대적으로 많은 변위량을 갖는 거동 차이를 보이고 있으며, 가력하중 250 kN 근처에서 접속슬래브와 교대 연결부의 신규 접합면이 분리되는 현상이 나타났으며, 계속적으로 일정한 기울기로 선형 거동을 나타냈다. 이 같은 힌지거동은 우선적으로는 인장가력 실험체가 자체가 형상적으로 힌치부가 존재하여 가력하중에 대한 편심 모멘트가 자연적으로 발생하는 점과 접합 연결부의 상부에 보강철근 없는 힌지철근 배근의 영향으로 판단된다. 일체 연결을 구현한 A, C Type의 경우 초기 하중 (약 200 kN)까지는 A Type의 강결 거동이 상대적으로 약한 것을 보였으

나 이후 하중부터 최종 가력하중까지는 A와 C Type 실험체는 동일한 구조거동을 나타냈다.

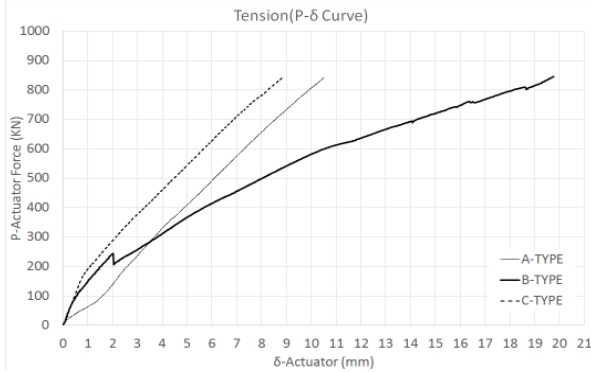


Fig. 16 Displacement of Actuator for Three Connection Types

일체 연결 실험체 A와 C type 에서 각 연결철근의 하중-변형도 곡선은 Fig. 17과 Fig. 18과 같다. 기본적으로는 상부 부모멘트 철근이 많은 하중을 분담하였으며, A Type의 경우 하단의 경사 철근이 상대적으로 효율적 저항을 하지 않음을 보여주고 있다. 이는 A Type의 하중재하 초기 성능이 상대적으로 C Type보다 저하의 원인으로 사료된다.

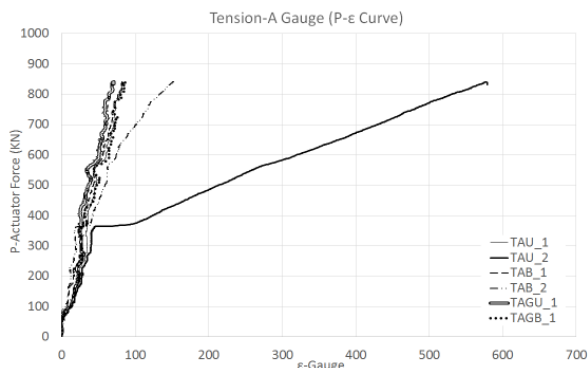


Fig. 17 Measured Strain Gauge Values of Connection Bar in the A-Type Experiment

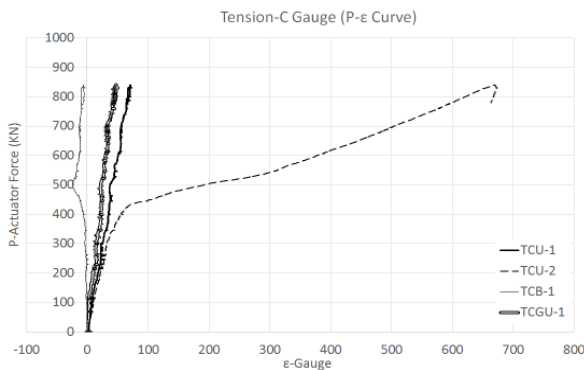


Fig. 18 Measured Strain Gauge Values of Connection Bar in the C-Type Experiment

실험체 A와 C type 는 약 400 kN의 작용하중에서 신구 콘크리트 부착부에서의 분리가 발생하고 이후 연결부에 설치한 철근이 하중을 분담하는 경향이 동일하게 보여준다.

힌지 연결철근 B Type의 경우, 예측된 힌지 구조거동을 충실하게 수행하는 것을 보여주었으며, 약 250 kN 에서 분리 거동을 나타냈으며 균열은 상부에서 하부로 발전하여 발생하였다. 연결부의 상단에 발생한 균열이 가력하중이 증가함에 따라서 힌지철근까지 발전하기 전까지는 완만한 거동을 보이거나 균열이 힌지철근에 도달하는 시점(약 600 kN)에서 철근의 변형도가 급격하게 상승하는 전형적 힌지 연결철근의 인장 변형 특성을 보여주고 있다. 이때 힌지철근 거더 매입부의 갈고리부에도 상당 수준의 변형률이 발생함이 관찰되었다.

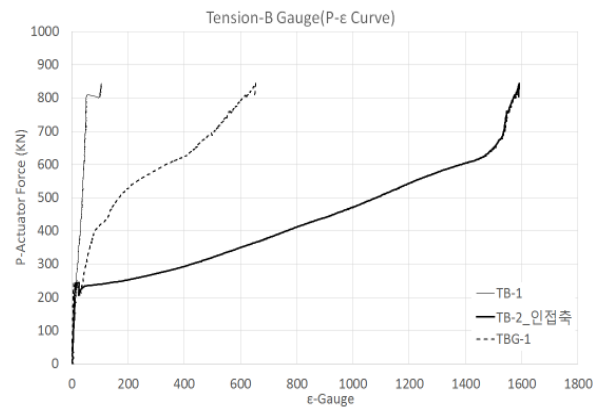


Fig. 19 Measured Strain Gauge Values of Connection Bar in the B-Type Experiment

A, C Type의 실험체는 일체 강결거동이, B Type은 힌지거동 확인하였으며, 연결철근 3가지 type 모두 설계에 제시하는 사용 하중에 대해 충분한 구조 성능을 발휘하는 것으로 나타났다. 안전율을 감안하는 경우 약 200 kN의 하중까지는 모든 실험체에서 안정적인 접속슬래브와 상부구조의 일체거동을 수행한다고 판단된다. 추가로 신구 콘크리트의 접합부는 실험 결과, 상당한 부착 저항력을 보이고 있어서 현장에서 신구접합부 처리는 상당한 수준의 품질관리가 필요한 것으로 생각된다. 특히 연결부에서 균열발생을 허용하는 힌지 개념을 사용하는 경우 사용되는 철근으로 예폭시 코팅이 된 것을 사용함이 연결부의 수명을 보장 하는 효과적인 방법으로 사료된다.

결과적으로 인장하중의 작용하는 일체 연결의 경우 시공성을 감안 시 C Type이 보다 효과적인 연결방법으로 보여 진다. 단 이는 휨 하중과 동시에 고려가 필요한 사항이므로 휨 거동 특성을 동시에

반영한 해석이 필요하다.

2) 휨 실험

휨 실험체의 가력을 실시한 결과, B Type(힌치)은 구조 거동 특성상 지속적인 회전변위 발생으로 가력하중에 의한 극한 파괴거동을 관찰 할 수 없었다. A와 C Type (일체 연결)의 경우 하중에 의한 극한 파괴가 실험 계획 시 예측한 부모멘트에 의한 상부 휨 균열이 아니라 Fig. 19와 Fig.20과 같이 힌치부의 하단에서 발생한 사인장 균열로 파괴가 관찰되어 이에 대한 원인 파악을 위한 별도의 구조 해석을 실시하였다.

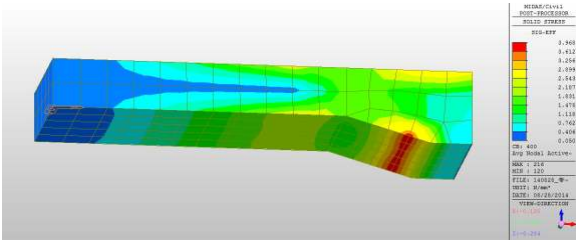


Fig. 20 Structural Failure by Diagonal Shear in Fix Connection Types Specimens

일체연결 방법을 구현한 실험체 A와 C의 휨 실험체의 균열 전개는 Fig. 20과 같이 접속슬래브 교대 연결부에서 접합면 분리로 균열 발생하였으며, 가력부 직하단 및 부모멘트부의 균열이 발생 진행되었고 힌치부 하단의 경사균열 발생 후 급속한 사인장 균열의 발생 순서로 실험체의 파괴가 진행되었다.



Fig. 21 Crack Pattern of Fix Connection Types

실험체와 동일한 조건으로 수치모델링을 하여 가력하중 400 kN 상태의 탄성해석에 의한 응력분포를 확인한 결과, 파괴 주인장응력이 Fig. 19에서와 같이 힌치 하단부에 발생함이 확인되었다. 즉, 콘크리트 인장강도는 $f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}} = 3.273 \text{ Mpa}$ 이며 탄성해석 결과를 감안하여 비례에 의하여 균열 발생 하중을 추정 시 약 330 kN 수준에서 균열 발생이 가능한 것으로 판단되었다.

각 실험체의 하중 변위곡선을 Actuator와 상단 LVDT의 변위 기준으로 그래프로 표현한 결과는 Fig. 21과 Fig. 22와 같다. 3종류의 실험체는 연결철근의 형상에 따라서 일체 거동(Type A, C)과 힌치거동(Type B)을 분명하게 차이를 보이고 있으며, 일체 연결 실험체의 경우 두 실험체가 거의 동일한 휨 거동을 보여주고 있다.

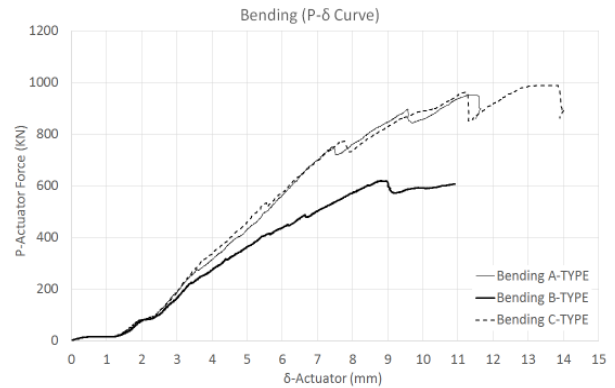


Fig. 22 Displacement of Actuator in the Three Connection Types for Bending Test

접속슬래브 연결부 최상단의 LVDT 계측 값에 의한 하중 변위곡선도 인장실험의 결과와 다르게 Actuator 변위곡선과 유사한 결과를 보이고 있다.

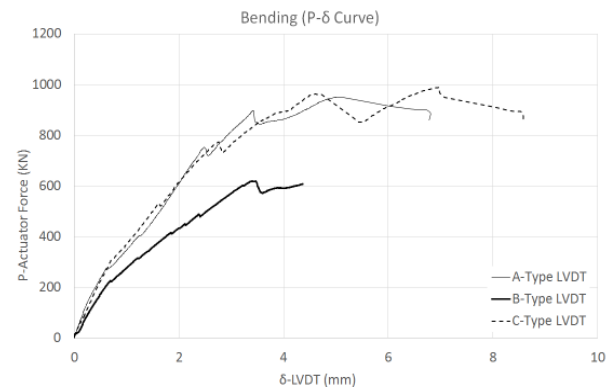


Fig. 23 Displacement Measured by Upper LVDT in the Three Connection Types for Bending Test

Fig. 24에서와 같이 A Type 휨 실험체의 경우 가력하중 약 280 kN에서 접속슬래브와 교대 연결부에서 분리가 발생하고, 이후 상부와 하부철근으로 하중이 전달되는 양상을 나타냈다. 약 400 kN 에서 상부와 하부의 인장 균열이 발생되어 철근의 저항이 유지되었으며 경사 하부철근의 게이지 값은 지속적인 압축 값을 보임을 계측으로 확인 하였다. 하중 증가에 따라 730 kN 근처에서 현치 지점부에서 사인장 균열이 발생하면서 실험체는 비선형 구조 거동을 나타내었다.

휨 실험체 B Type의 경우 약 230 kN에서 접속 슬래브와 교대 연결부의 분리가 시작되었으며 약 310 kN 하중에서 균열이 발생과 함께 현치철근이 하중을 분담하기 시작하였다. 가력 하중 490 kN 이상에서는 현치철근으로 점진적 하중 분담의 증가를 보이며 연결부의 회전변위 발생으로 인한 최종 가력종료까지 현치 철근의 변형도는 탄성 범위 내에서 거동하였다.

휨 실험체 C Type의 경우 약 300 kN 하중에서 접합부의 분리가 발생하였으며, 약 500 kN 근처에서 휨 균열이 발생하여 연결 철근이 하중을 분담 저항하였으며, 약 750 kN 에서 현치 지점부에서 사인장 파괴 균열이 나타났다. 전반적으로 C Type 은 A Type과 동일한 구조 거동을 보였다.

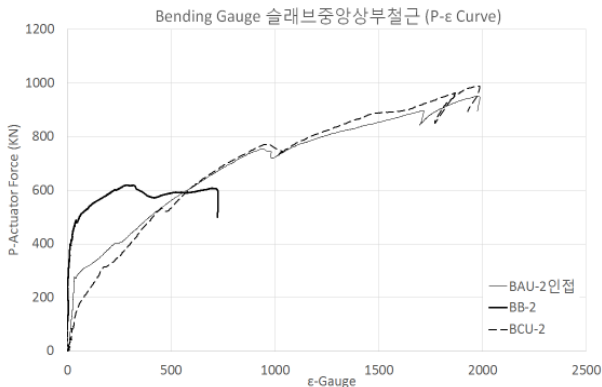


Fig. 24 Measured Strain Gauge Values for Upper Bar in the Three Connection Types

Fig. 24 는 각 실험체의 최상단 중앙부에 배근된 철근에 설치한 게이지의 변형률 값을 보여주며 일체연결 실험체 (A, C Type)의 상부 연결철근의 하중-변위 곡선은 유사한 거동을 보이며, 변형도의 값이 2000을 상회함으로써 상부 철근은 항복하중에 도달하였음을 확인 하였다. 현치철근(B Type)의 중앙부의 변형률 값은 하중 증가에 따라 접속슬래브와 교대 상부 접합부의 분리에 이후 지속적인 회전 변위가 발생함에 따라서 항복 거동의 유무에

상관없이 거동을 확인하는 적절한 가력하중 상태에서 실험을 중단하였다. 이는 현치철근의 배근위치가 슬래브와 교대 접합부의 휨 모멘트를 저항하는 상부에 위치하지 않고 하부에 위치하므로 일체 연결 실험체의 상부철근의 변형도와 차이가 크고 값도 낮게 나타났다.

각 연결철근의 교대 매입부내(갈고리형상 포함)에 철근에 설치한 게이지의 변형률은 Fig. 25와 같다. 교대 매입부 상부철근은 C Type의 경우 가력하중에 대하여 전형적인 인장 저항을 보였으나, A Type의 경우는 하단 경사 철근이 하중을 분담하여 상부 철근의 역할이 한정적 구조 거동을 나타냈다. 이는 현치 지점부가 받침부와 같은 역할을 하면서 가력하중에 대하여 추가 저항을 하게 되어 경사철근이 인장 저항을 하기 때문으로 판단된다.

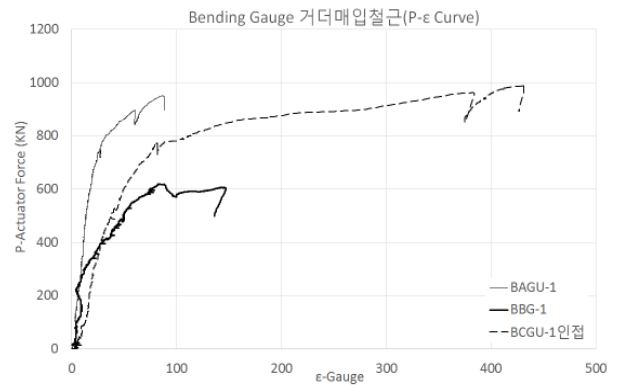


Fig. 25 Measured Strain Gauge Values for Embedded Bar in the Girder of Three Connection Types

휨 실험 결과, 직접인장실험과 동일하게 일체 type 과 현치 type 별 연결 철근에 따른 구조거동은 많은 차이를 보였으며, 유사한 거동을 보이는 일체 연결 type의 경우 상대적으로 C Type이 철근의 설치 방법에 따른 시공성과 구조 거동이 명확하여 A type 에 비해 상대적으로 우수한 것으로 판단된다.

5. 맺음말

본 연구진의 고안한 PCB-Slab 거더는 단부 단면형상이 일체(반일체) 교량으로의 적용이 용이하여 향후 공법적용을 위하여 일체식 교량의 중요 구성요소인 교대와 접속슬래브 연결 형상으로 고안된 3개 연결방법에 대하여 각 직접인장과 휨 구조 성능 실험을 수행하였다. 본 교량 공법이 일반화된 미국의 경우 PCI 설계기준은 일체식 교량의 접속슬래브 연결에 대하여 다수의 설계 기술자들은 접속슬

래브와 교대 연결방안으로 공용 중 발생 가능한 회전변위를 수용할 수 있는 힌지형식을 선호하고 있음을 기재하고 있다. 다른 예로 VDOT (Virginia Department of Transportation)에서는 접속슬래브 연결철근의 형상을 Fig. 26과 같이 일체형상에서 힌지형식으로 변경하였으며 그 사유는 강성차이로 발생하는 슬래브의 부등침하로 (a)형식의 경우 접속슬래브 연결철근의 끝단 위치에서 발생하는 횡방향 휨 균열을 개선하기 위하였다.

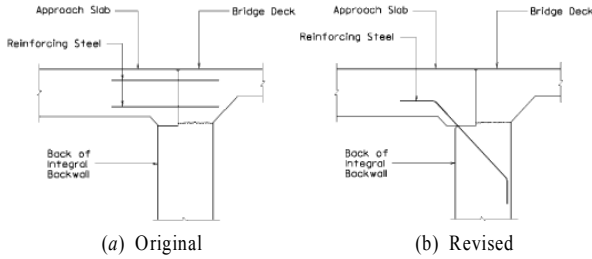


Fig. 26 Approach Slab Connection Detail of VDOT Standard

그러나 힌지의 경우는 접속슬래브의 신축 및 회전변위 발생시 Fig. 27의 (a) 같이 접속슬래브의 연결부에 균열을 허용하게 되므로 일체식 교량 온도신축 거동 시 (b, c) 균열부에 각종 잡물이 유입 (d)되므로 계절적인 온도신축 변위는 균열 폭의 확대 및 접속슬래브의 압력증대가 발생하게 되므로 완벽한 처리방안으로 간주하기는 어려운 현실이다.

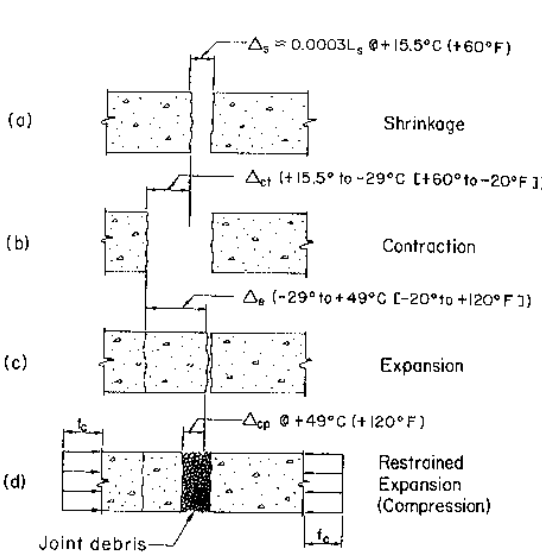


Fig. 27 Pressure Increase by Debris accumulated at the Crack in the Approach Connection

그러므로 일체식 교량의 접속슬래브와 교대의 연결방법의 설계개념으로 두 가지 구조 거동을 고려한 설계가 가능하며 각 방안의 적용에 따른 장단점은 아래와 같다.

- 힌지(Hinge)
 - 단순보 설계 개념 적용
 - 뒷채움부의 다짐 불량에 의한 공극 및 구조적 강성차이로 인한 침하로 단차발생시 구조적 문제점을 교대 구조물과 격리
 - 연결부 상부 균열 발생 인정
 - 균열부의 잡물질 유입으로 지속적으로 균열폭 확대로 유지관리의 과정 중 지속적 문제 발생
- 일체(Fix)
 - 연속개념의 설계개념 필요
 - 연결부 상부 균열의 사전방지 가능
 - 연결부 손상 시 교대 구조물에 구조적 영향 발생

위와 같은 구조 역할 개념과 각 방안의 시공성을 감안하여 고안된 3가지 연결 철근 형상에 대한 구조성능에 대한 실험을 수행하였으며 실험 결과를 분석한 바 일체식 교량의 접속슬래브 연결방법의 필요한 기술적 고려사항을 아래와 같이 제시하였다.

- 1) 실험체에 적용된 연결철근의 형상과 수량에 대하여 각 연결방법은 충분한 구조 성능을 보유한 결과를 보였다. 추후 실험 결과 분석에 따른 각 방안의 적절 배근 수량산정을 위한 설계방안이 필요하다.
- 2) 각 연결방법이 구조성능 측면에서 안정성을 보이기 때문에 연결부의 힌지거동과 일체 거동의 선택은 설계자의 선호에 따라서 결정이 가능하다. 일체거동의 경우 부모멘트 철근의 배치가 어렵지 않고 시공성도 용이하고 명확한 구조거동을 보장하기 때문에 C-Type의 연결철근 형상의 사용이 가능하다. 이때 설계자는 일체식 교량의 접속슬래브의 역할을 충분히 반영하여 세부사항에 대한 다양한 검토를 실시하도록 한다.
- 3) 연결철근은 그 수량이 적고 장기간에 걸쳐 반복적 하중이 작용함과 연결부가 균열에 노출되는 환경에 있게 되므로 유지관리의 편의성을 감안하여 에폭시코팅 철근의 사용이 권장된다. 이때 적절한 철근 매입깊이에 적절한 설계가 필요하다.
- 4) 힌지철근 사용 시 경사부 철근은 가능한 접

속슬래브와 교대연결부의 하단부에 위치토록 하여 힌지거동 발생이후에도 탄성거동을 할 수 있도록 한다. 또한 교대 매입부의 갈고리 형상이 필요시 설계기준을 준수하는 충분한 매입길이를 반영하도록 한다.

- 5) 접합부의 부착력도 구조적 역할을 일부 수행하는 것으로 판단되므로 접속슬래브와 교대연결부의 신규 콘크리트 타설시 시방서 규정을 준수하여 이물질의 청소와 접합면 사전처리가 필요하다.

감사의 글

본 연구과제는 국토교통부 기술사업화 연구과제로 선정 수행된 “PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량개발”의 최종 연구내용의 일부로써 연구 지원하에 개발된 PCB-Slab 교량의 적용성 확대와 보급성을 증대하기 위한 일안으로 일체식교량으로의 적용을 위하여 접속슬래브의 연결방법에 대한 구조 성능실험을 수행하였기에 감사드립니다.

References

- Bridge Design Manual (2011), 3rd Edition, Nov. PCI.
- Brent, M. Phares, Adam S. Faris, Lowell Greiman (2013), Integral Bridge Abutment to Approach Slab Connection, Journal of Bridge Engineering, Vol. 18, 2013 Feb., pp.179-181.
- Design Manual for Integral Bridges(2009), Korea Expressway Corporation.
- Eo, G. T., Jung, E. Y., Kim, N. Y., Kim, C. H., and Chang, S. Y., (2013), “A Feasibility Study of the Effective use of Prefabricated Concrete Voids Slab Preventing Hoop Tension Crack,” The Magazine of the Korean Society for Advanced Composite Structures, Vol. 5, No.4, pp.11-20.
- Integral Abutment and Jointless Bridges (2005), Constructed Facilities Center, College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, The 2005-FHWA Conference.
- Park, J. M., You, S. K., Yhim, S. S., and Yoon, S. J. (2003), “Integral vs. Semi-integral Abutment Bridge,” The Magazine of Korean Society of Steel Construction, Vol. 15, No. 1, 2003, pp. 76-80.