

철도판형교 무근콘크리트 교각의 전도 보강기법

Strengthening method against Overturn of Plain Concrete Gravity Pier for Open-Steel-Plate-Girder Railway Bridges

이준석* 최은수** 이인규*** 이주범****
Lee, Jun. S., Choi, Eunsoo, Rhee, Inkuy, Lee, Joo. B.

ABSTRACT

Open-Steel-Plate-Girder railway bridges, in general, have plain concrete gravity pier without piles at foundations. Such piers are vulnerable to be overturned against braking forces and ground shakings during an earthquake. Thus, this study suggests a strengthening method using earth anchors to improve the resistance of plain concrete gravity piers to the overturn of themselves. Also, a filed test was performed for the as-built and the strengthened pier and the test results were compared to assess the strengthening effect. The earth anchors increased the ultimated capacity for the pier's overturn. Finally, a FE analysis was conducted using nonlinear elements for soil to understand the distribution of the soil stresses for the as-built and the strengthened pier.

1. 서 론

한국철도에서 판형교는 전체 교량의 약 40%를 차지하는 중요 형식 중의 하나이다 (오세환 외, 2005). 이러한 판형교들은 1910년-1930년 사이에 대부분이 건설되었으며, 그림 1과 같이 도상이 없는 두 개의 강주형으로 구성되어 있다. 공용연수의 증가에 따라 리벳으로 연결된 강주형의 상부구조는 상당수가 용접형으로 교체되었다. 하부구조는 구체형으로 무근콘크리트로서 건설 당시의 것을 현재에도 사용하고 있다. 판형교의 구체형 무근콘크리트 교각은 기초에 말뚝이 없고 직접기초 형태로 건설되었다. 또한, 교각의 중앙부에 콘크리트를 연속으로 타설하지 않아 시공이음부가 존재한다 (그림 1 참조). 이러한 말뚝기초가 없는 구체형 무근콘크리트 교각은 지진 또는 제동하중에 의해서 전달되는 수평하중에 의해서 기초부에서 전도가 발생할 위험성 존재하며, 시공이음부가 취약하여 이 부분에서 균열의 발생과 전도의 위험성이 동시에 존재하고 있다.

판형교의 무근콘크리트 구체형 교각은 위에서 언급한 수평력에 대한 저항성을 확보하기 위해서 구체의 하부 일부를 표피 이하에 매립하고 있으며, 또한 구체의 중력으로 수평력에 의한 전도에 저항하고 있다. 그러나 건설 당시에 무근콘크리트 교각은 지진에 대한 설계기준이 전혀 없었기 때문에 이에 대한 고려가 전무하며, 또한 제동하중도 건설 당시에 비해 운행하는 차량속도의 증가로 증가하게 되었다. 특히, 하천에 존재하는 무근콘크리트 교각의 경우 세굴에 의해서 측면의 토피가 유실될 수 있으며, 수평력에 대한 저항성이 매우 약화되어 홍수에 의한 수평수압에 의해 무근콘크리트 교각의 유실이 종종 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 사례는 판형교의 무근콘크리트 교각이 수평력에 대한 저항성이 매우 취약하며, 전도의 위험성이 존재하고 있음을 직접적으로 증명해 주는 것이다.

판형교의 무근콘크리트 교각에서 발생할 수 있는 전도의 유형은 두 가지로, 하나는 1) 구체하부에서 수평하중 조합에 의한 편심거리가 구체의 하부 단면의 편심거리보다 큰 경우이고, 두 번째는 2) 시공이음부에서 균열이 발생하여 구체상부가 전되는 것이다. 첫 번째의 전도형태는 지반을 지점으로 구체가 마치 강체운동을 하는 것과 같이 전도를 하는 형태이고, 두 번째는 시공이음부의 균열로 구체 상부만이 전도가 발생하는 것이다. 두 번째의 전도는 시공이음부에서 균열이 발생하면 발생할 위험성이 크기 때문에 전도의 위험성을 평가하는 시공이음부의 균열발생 여부가 중요한 인자가 될 수 있다.

* 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부, 책임연구원, 정회원

** 홍익대학교, 토목공학과 조교수, 정회원 E-mail : eunsoochoi@hongik.ac.kr,

TEL : (02)320-3060 FAX : (02)322-1244

*** 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부, 선임연구원, 정회원

**** 인하대학교, 토목공학과, 박사과정, 정회원

그림 2에는 15개의 판형교의 전도에 대한 편심거리 및 시공이음부의 발생가능성을 수계산을 통해서 예비적으로 검토하였다. 그림 2(a)를 보면, 15개 교량 중 4개(27%)가 수평력 조합에 의한 편심거리가 기초부의 편심거리보다 크게 발생하여 전도의 위험성이 있는 것으로 판단되었고, 그림 2(b)에서는 8개(53%)의 교량에서 시공이음부의 균열발생 가능성이 있는 것으로 평가되었다. 따라서 판형교의 무근콘크리트 교각은 수평력에 의한 전도에 대한 보강이 필요하다고 판단된다.

본 논문에서는 먼저 판형교 무근콘크리트 교각의 전도에 대한 저항능력을 평가하기 위해서 수평력에 의한 전도시험을 수행하였으며, 전도에 대한 저항성을 증가시키기 위해서 어스앵커를 이용한 전도 보강 기법을 제시하였다. 제시된 기법은 현장의 교량에 시공되어 성능을 실험적으로 검증하였으며, 보강전후의 지반의 거동을 파악하기 위해 비선형 유한요소 해석을 실시하였다. 이러한 실험은 전라선의 폐선에 위치한 울천교에서 수행하였다.

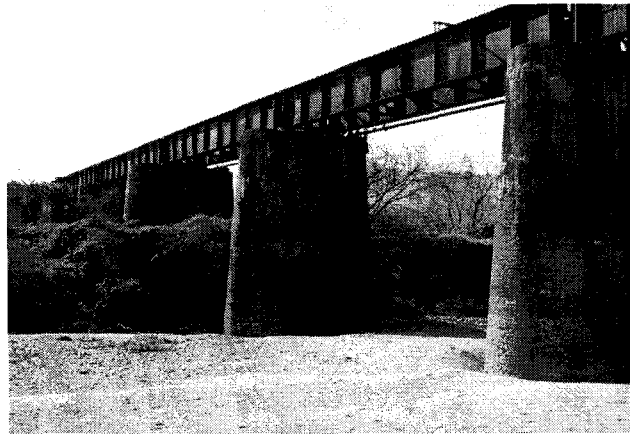


그림 1. 폐선이 된 울천교의 전경

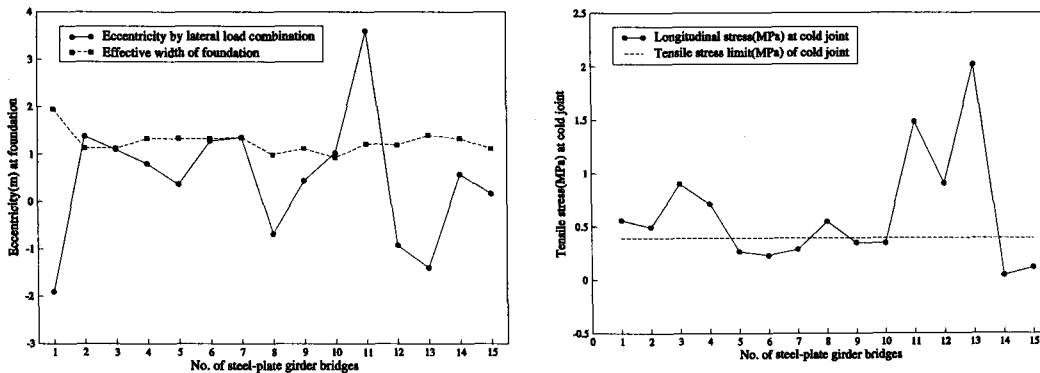
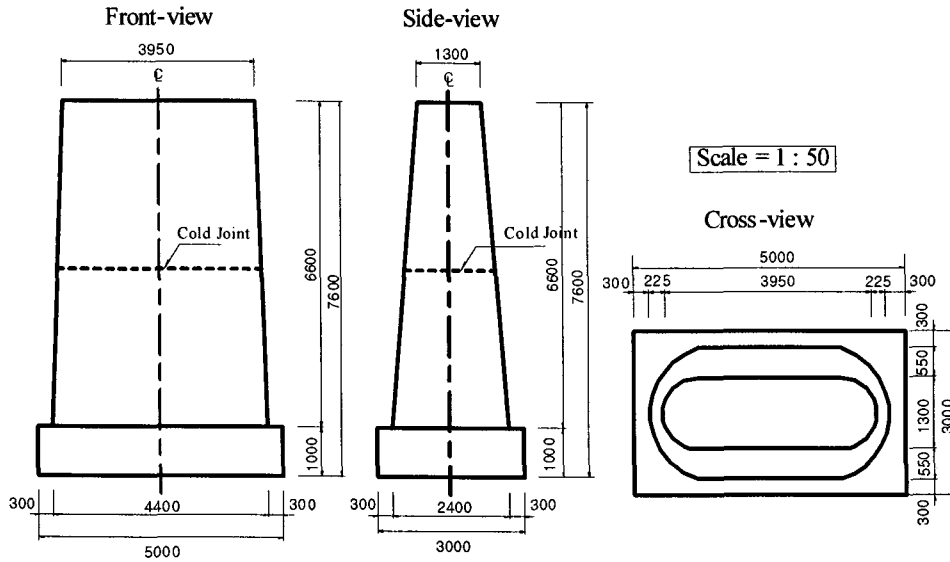


그림 2. 전도에 대한 안정성 평가 결과

2. 무근콘크리트 교각의 전도 실험

무근콘크리트 교각의 전도에 대한 성능평가 및 전도 보강기법의 성능평가를 위해, 전라선의 폐교인 울천교에서 수평력 재하 실험을 수행하였다. 실험 당시 울천교의 상부구조는 철거되어 하부구조만 현장에 남아 있는 상태였다. 울천교의 교각은 그림 3에 나타난 것과 같이 단면은 타원형이며 높이에 따라 테이퍼형으로 단면이 증가한다. 교각하부에는 사각형의 확대기초가 존재한다. 기초를 포함한 교각의 전체 높이는 7.6m 이며, 기초부의 높이는 1.0m이다. 따라서 교각의 순높이 6.6m이다. 시공이음은 기초상부에서 3.3m 높이 위치하고 있어, 교각의 정중양에 위치하고 있다. 타원단면은 교각하부에서 장축×단축의 길이가 4.4m×2.4m 이며, 시공이음부에서는 장축×단축의 길이가 3.9m×1.3m이다. 기초의 폭과 길이는 3.0m×5.0m이다.



(a) 정면도 (b) 측면도 (c) 단면도

그림 3. 실험대상 교량의 무근콘크리트 교각 형상

2.1 전도보강 전·후의 수평력 재하 실험

교각의 전도실험을 위해서 교각 상부에 수평력을 재하하는 것이 필요하다. 이를 위해서 그림 4와 같이 실험 교각에 수평력을 재하하기 위해 근접교각을 지지점으로 활용하였다. 지지교각의 회전을 제어하기 위해서 콘크리트 기초를 형성하고 H형강으로 보강하였다. 1000 kN 용량의 유압잭을 지지교각 상부에 설치하고 타이바를 통해서 실험교각에 수평력을 재하하게 된다. 수평력 재하 방법은 하중재하에 의한 단조증가로 하였다. 이러한 수평력 재하방법은 교각 사이가 약 12m로 크지 않기 때문에 가능하며, 타이바는 포스트텐션 긴장재에 비해서 연신율이 작기 때문에 실험에 효과적으로 사용할 수 있다. 이러한 실험을 통해서 는 말뚝이 없는 구체형 무근콘크리트 교각의 전도에 대한 거동특성을 이해할 수 있으며, 전도에 대한 극한저항능력을 평가할 수 있다.

무보강 상태에서 실험을 마친 후, 전도에 대한 보강을 기초부에 실시하였다. 보강은 4개의 어스앵커를 기초를 관통하는 구멍을 뚫고 지표하 20m 하부까지 보링을 실시하여 암반에 고정하였다. 그림 5에 앵커의 설치 모습이 그려져 있으며, 어스앵커에 사용한 케이블은 그림 5(c)에 나타난 것과 같이 7개의 강선을 꼬아 만든 것으로 공칭직경은 28.5mm이며 단면적은 383.9mm²이다. 인장강도 및 항복강도는 각각 713 및 607kN이며, 평상시의 허용하중은 428kN이다. 이러한 전도 보강이 실시된 후에 보강전과 동일한 수평력 재하실험을 실시하였다. 그림 6에는 실험을 위한 준비, 앵커의 설치 및 실험과정이 나타나 있다.

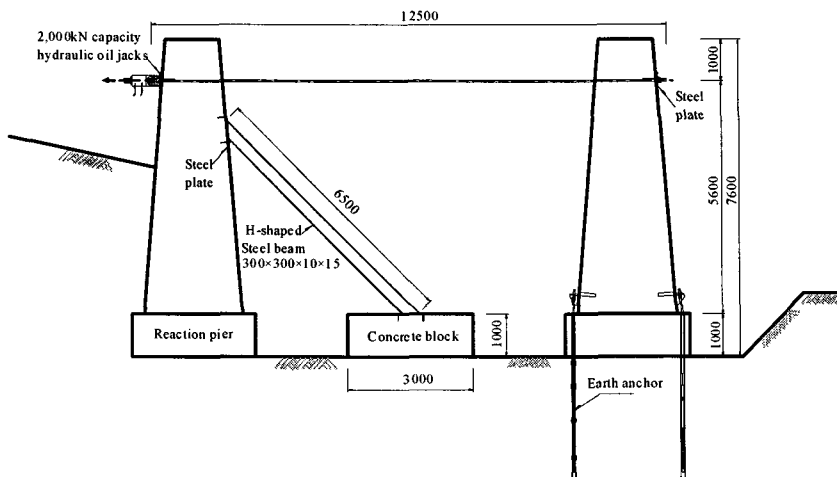
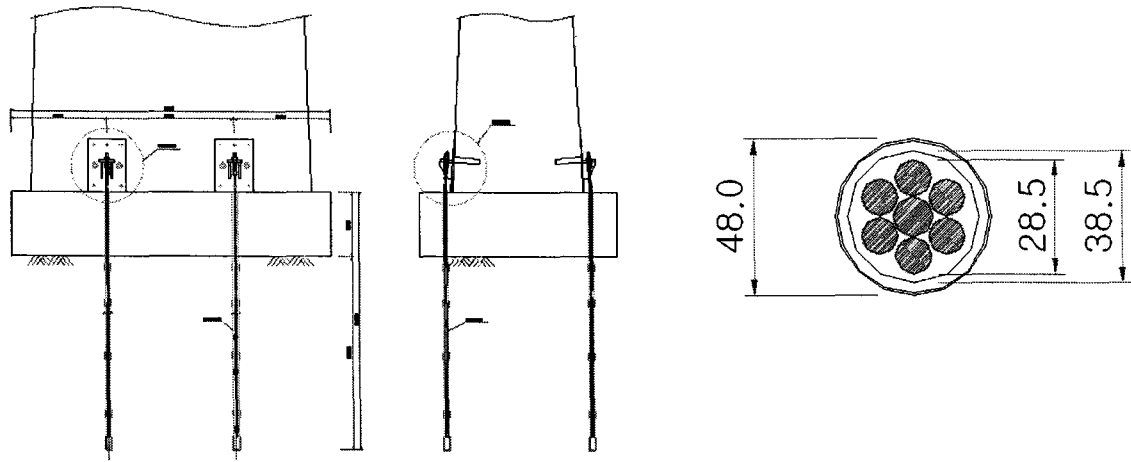


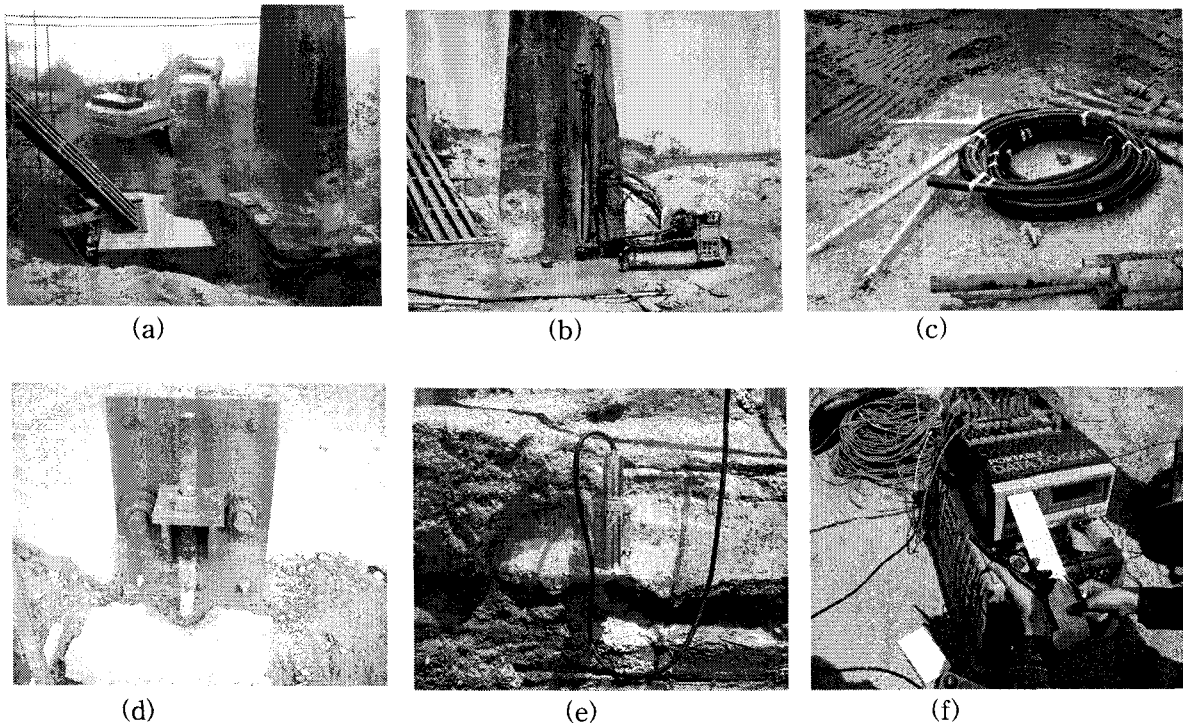
그림 4. 무근콘크리트 교각 전도실험을 위한 실험준비 형상



(a) 어스앵커 설치 모습

(b) 케이블의 단면

그림 5. 어스앵커의 설치 및 케이블 단면



(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

그림 6. 실험준비 전경 및 측정: (a) 반력벽 설치 전경, (b) 앵커설치를 위한 보링, (c) 인장력 재하를 위한 긴장재, (d) 교각 하부의 긴장재 앵커링, (e) 설치된 경사계, (f) 정적 재하 측정 모습

2.2 전도실험 결과

실험은 단조증가의 정적 재하실험으로 수행되었으며, 하중증가는 25kN(2.5 tonf)씩 증가시키면서 발생하는 응답을 측정하였다. 측정은 교각 상층하의 변위(6개), 기초의 네모서리 변위(4개), 및 시공이음의 변형률(2개)을 측정하였다.

그림 8은 200kN의 수평하중이 작용 시 어스앵커 설치 전후의 교각 및 기초 각 부위의 변위를 전체적으로 보여주고 있다. 그림을 보면 상부의 수평하중에 의해서 교각과 기초가 회전하면서 변위가 발생하고, 수평력이 작용하는 측면의 기초하부 지반이 회전의 지지점이 되는 것을 알 수 있다. 앵커의 설치에 의해서 교각 상층의 변위가 200kN의 수평하중에 의해서 16.4mm에서 11.0mm로 감소하여, 32.9%의 전체적인 강성도의 증가가 발생했다고 볼 수 있으며, 기초부의 인장측 변위는 3.31mm에서

0.40mm로 감소하여 앵커에 의해서 기초의 들림이 거의 제어되고 있다고 볼 수 있다. 반면, 압축측의 변위는 1.54mm에서 1.63mm로 약간 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 압축측의 앵커는 회전에 저항을 하지 못하기 때문에 지반에 미치는 영향이 크지 않기 때문이다.

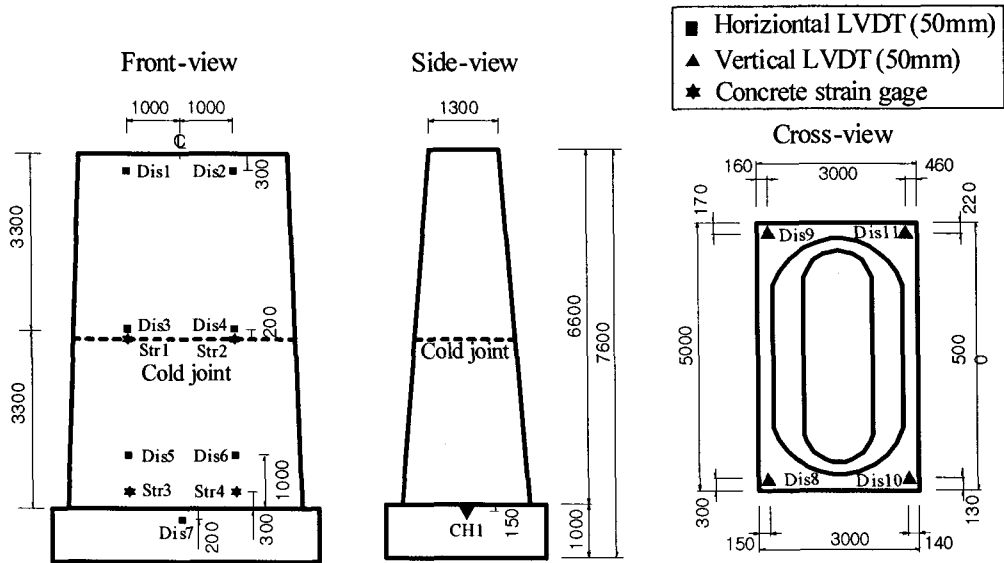


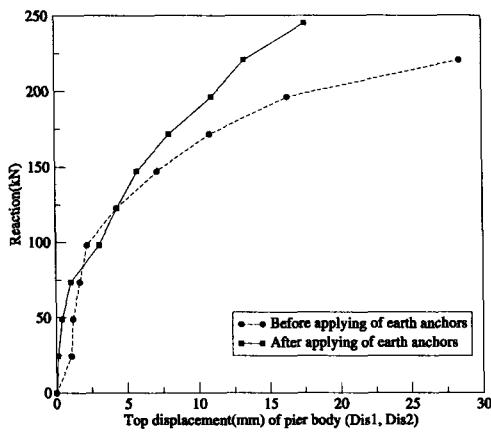
그림 7. 응답측정을 위한 센서의 종류 및 부착위치



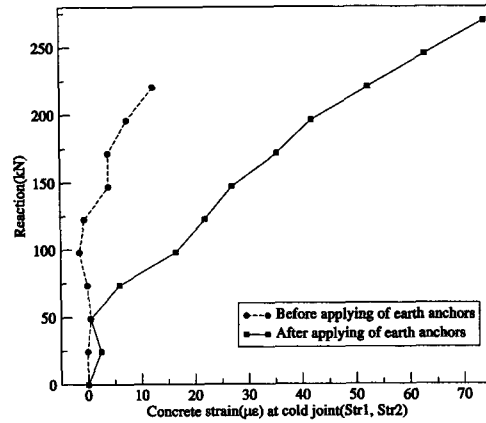
그림 8. 200kN의 수평하중에 의한 앵커 설치 전후의 교각 및 기초의 변위 변화

그림 9에는 하중 증가에 의해서 발생하는 응답의 종류에 따라 결과를 그래프로 정리하였다. 그림 9(a)를 보면 기존단계의 교각 및 기초는 약 100kN의 수평하중에 의해서 항복하는 현상을 보이고 있으며, 이는 인장측(들리는 측)의 토질이 저항력을 상실했기 때문으로 판단된다. 그 이후의 거동은 압축측의 지반을 지지점으로 교각 및 기초가 회전하는 강체운동의 성격이 크다. 따라서 그림 9(b)의 시공이음에서 변형율이 거의 발생하지 않고 있다. 수평하중에 의해서 교각 내에 휨이 발생한다면 시공이음부의 변형을 게이지에서 변형율이 측정될 것이다. 또한, 최대 수평하중을 200kN에서 멈추었는데, 이는 인장측의 기초하부에서 토질의 분리현상이 발생하여 기초가 더 이상의 저항을 할 수 없다고 판단하여 하중을 더 이상 증가시키지 않았다. 앵커를 설치한 이후에는, 그림 9(a)와 같이 하중재하 초기에는 휨-변위 곡선이 비보강 시와 유사하지만, 항복이후에는 앵커보강에 의해서 강성이 계속적으로 발현되는 것을 알 수 있다. 그러나 강성이 점차 감소하는 원인은 압축측 토질이 극한저항상태에 이르면서 나타나는 것으로 판단된다. 앵커를 이용하여 전도보강을 실시하면, 그림 9(b)에서 같이 시공이음부에

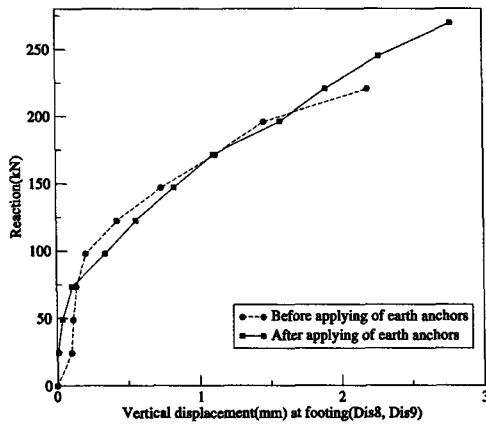
서 콘크리트의 변형율이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 전도보강에 의해서 기초 및 교각의 회전이 구속되면서 교각내에 휩이 발생하는 것이다. 수평하중을 약 250kN를 재하하였을 때 시공이음의 콘크리트 표면에서 변형율이 약 $75\mu\epsilon(x10^{-6})$ 이 발생하여, 거의 균열이 발생하는 단계에 까지 이르렀다. 시공이음의 균열 발생은 교각의 안정성 심각한 위험요소이므로 더 이상의 하중을 재하하지 못하고 실험을 중지하였다. 전도보강 전후의 거동을 비교하면, 보강 전에는 기초하부 토질의 저항력이 교각 및 기초의 안정성에 영향을 미치는 결정적 요소라면, 보강을 실시하면 교각 내에 존재하는 시공이음의 균열 발생이 교각/기초의 안정성에 영향을 주는 결정적 요소가 되는 것이다. 그림 9(c)와 (d)의 기초의 변위를 보면, 앵커에 의한 보강에 의해서 인장측에서 들림이 현격히 감소한 반면, 압축측의 처짐변위는 거의 변화가 없다. 즉, 인장측의 앵커가 교각 및 기초의 회전을 제어함을 알 수 있다.



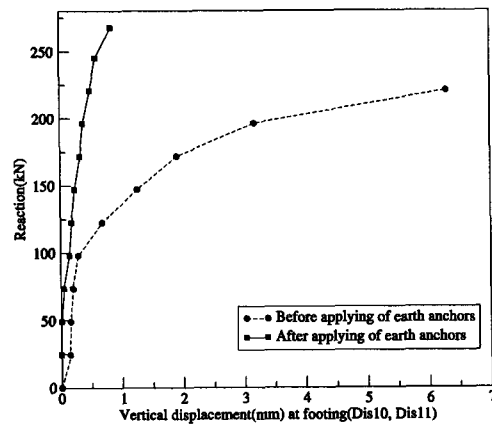
(a)



(b)



(c)



(d)

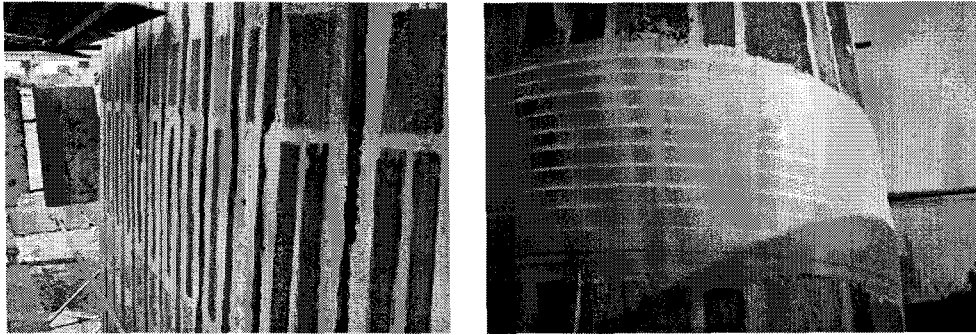
그림 9. 측정된 변위 및 변형율: (a) 교각 상층의 변위, (b) 시공이음의 변형율, (c) 기초 압축부의 처짐 변위(↓), (d) 기초 인장측의 들림변위(↑)

시공이음을 가지는 무근콘크리트 교각 및 기초의 전도를 방지하기 위해서 앵커로 기초부에 보강을 실시하면 상대적으로 취약한 시공이음부에 응력이 집중하는 것을 알 수 있었다. 따라서 시공이음의 균열발생은 교각의 전도에 대한 또 다른 위험성을 제공하므로 이에 대한 보강이 필요하게 된다.

2.3 교각의 휨보강 및 실험결과

시공이음부의 휨보강은 먼저 GFRP와 강판의 합성재료인 스트립을 수직으로 배치하고(그림 10(a) 참조), 이를 GFRP 스트립으로 수평방향으로 감싸 보강하였다(그림 10(b) 참조). 이러한 보강은 무근콘크리트 교각에 철근을 배근하는 것과 같은 효과를 낼 수 있으며, 수직스트립의 탈락을 방지하기 위하여 수평스트립으로 보강하였다. 이렇게 시공이음부를 보강하여 균열의 발생을 방지한 상태에서 수평하중을 재하하면 교각 상층부의 변위는 그림 11과 같이 나타난다. 그림에서 전도보강과 휨보강을 실

시한 경우 기존 교각에 비해 극하저항능력이 약 2배 이상 증가하는 것을 알 수 있다. 추가적으로 휨보강을 실시하면, 전도보강만 실시하는 경우보다 강성 및 강도가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 전도보강+휨보강 시의 교각 상층부의 변위는 수평력 300kN 이후에 강성도 저하가 크게 발생하는데, 이는 기초 압축측의 지반이 극하저항에 다다르고, 인장측의 긴장재가 인장되면서 발생하는 현상으로 판단된다. 그림 12에는 기초하부의 압축 및 인장측의 변위를 보여주는데, 휨보강에 의해서는 압축과 인장측에서 변위가 모두 크게 증가하는 것이 위의 설명을 증명해주고 있다. 따라서 이러한 경우 전도에 영향을 주는 결정적 요소는 지반의 극한저항 또는 긴장재의 저항력이 된다.



(a) 수직스트립의 부착

(b) 수평스트립의 보강

그림 10. 시공이음부의 휨보강

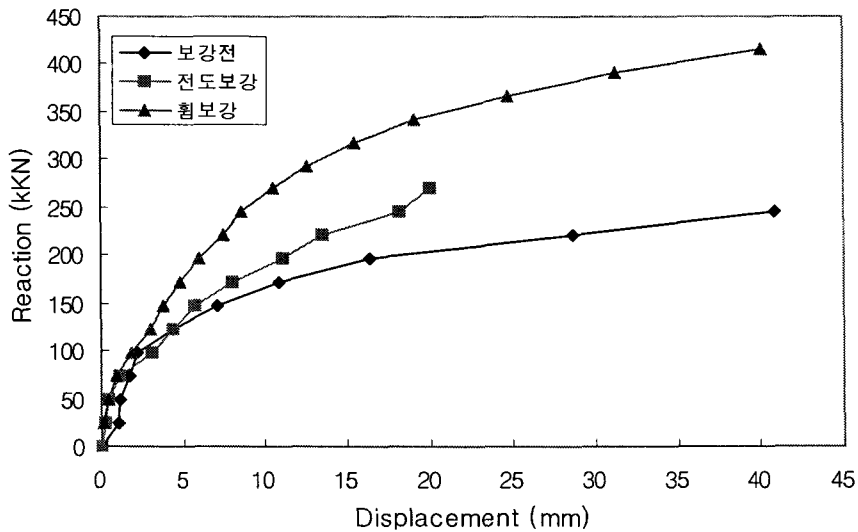
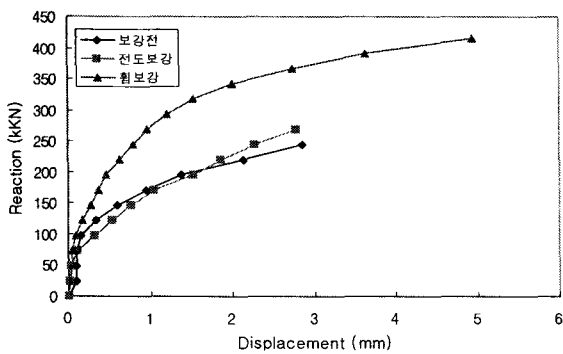
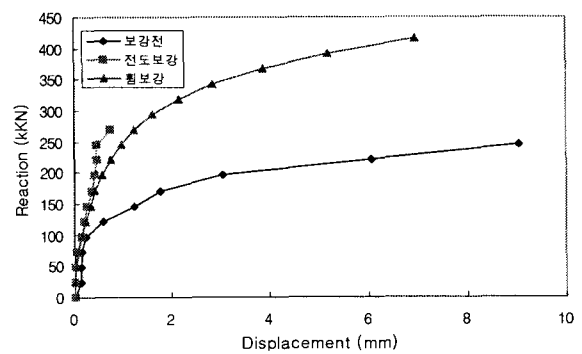


그림 11. 시공이음부 휨보강에 의한 교각 상층부의 변위 변화



(a) 압축측 기초 처짐변위



(b) 인장측 기초 들림변위

그림 12. 휨보강 추가에 의한 기초의 변위 변화

3. 유한요소 해석 및 결과

유한요소 해석은 토질과 시공이음의 비선형 모델을 이용하여 무근콘크리트 교각 및 기초의 전도에 대한 거동을 해석적으로 규명하고, 이를 이용하여 실험의 타당성을 제시하고자 실시되었다. 유한요소 해석은 ABACUS를 이용하여 수행하였다. 해석모델은 2차원으로 교각은 plain strain solid(CPE4R) 요소를 사용하여 모델링하였고 선형거동을 한다. 시공이음은 비선형 요소로 모델링되었으며, 압축과 인장 시의 거동은 그림 13에 나타난 것과 같다. 압축 및 인장의 강도는 18.0 및 0.2MPa이며, 탄성계수는 20GPa, 포아송 비는 0.2로 가정하였다.

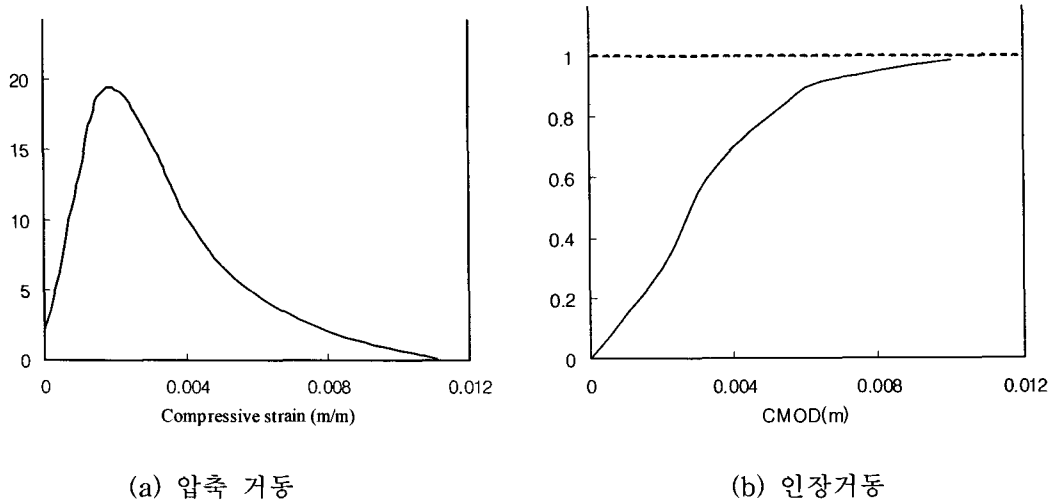


그림 13. 시공이음 균열모델의 거동

지반의 모델은 2차원의 plain strain solid(CPE4R) 요소를 사용하였으며, 크기는 그림 14에 나타난 것과 같이 깊이 30m 넓이 40m이다. 지반의 비선형 거동을 위해서 수정된 Drucker-Prager 소성이 사용되었다. 지반의 탄성계수는 186.0MPa이며 포아송 비는 0.36이다. 긴장재는 2차원의 트러스 요소로 모델링하였으며, 인장에만 저항하고 압축에는 저항하지 않는 요소를 사용하였으며, 긴장재는 294kN의 기긴장력을 받고 있다.

유한요소 해석에서는 앵커가 없는 경우와 앵커를 설치한 경우에 대해서 수행되었으며, 그림 14에는 각 경우의 교각 상층부에서 발생하는 변위의 해석적 결과를 실험결과와 비교하여 나타내었다. 유한요소 해석에 의한 힘-변위 곡선이 앵커 설치 전후에 모두 실험결과와 거의 완벽하게 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 해석모델은 현장의 실험조건을 거의 완전하게 모델링했다고 판단할 수 있다.

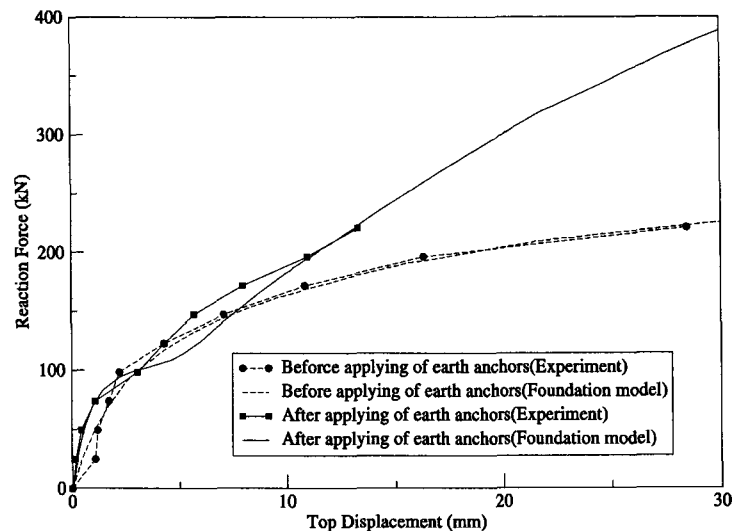
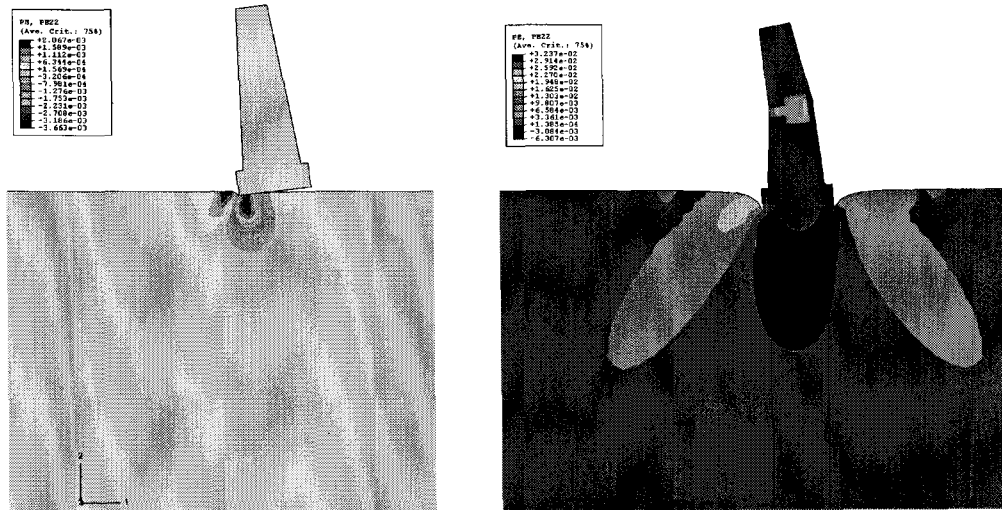


그림 14. 교각 상층부의 해석적 및 실험적 변위

그림 15에는 해석에 의해서 발생하는 변형을 컨투어를 나타내었다. 그림 15(a)에서 보면, 앵커의 설치 전에는 지반을 지지점으로 교각 및 기초가 거의 강체운동을 하고 있음을 알 수 있다. 즉, 교각의 내부에는 변형율이 거의 발생하지 않고 있다. 앵커를 설치한 후에는 교각에 휨이 발생하고 있으며, 시공이음에서 인장 변형율이 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 해석결과는 실험에서 유추한 가정들을 증명해 주고 있다.



(a) 앵커 설치 전 (b) 앵커 설치 후
그림 15. 해석에 의해서 발생하는 소성 변형을 컨투어

4. 결 론

본 연구에서는 철도 판형교의 무근콘크리트 교각 및 기초의 전도에 대한 거동을 실험적으로 평가하였으며, 전도에 대한 저항성능을 개선하기 위한 보강기법을 제시하였고, 제시된 기법을 현장에서 실험 시공하여 실험적으로 성능을 검증하였다. 또한 유한요소해석을 통해서 무근콘크리트 교각 및 기초의 거동을 해석적으로 규명하고 이를 실험적 거동과 비교 설명하였다. 또한, 전도 보강을 실시하는 경우 무근콘크리트 내부의 시공이음에서 균열이 발생할 가능성이 매우 크며, 이는 전도의 위험요소가 되는 것을 실험 및 해석을 통해서 규명하였다.

판형교의 무근콘크리트 교각 및 기초는 지진에 의해 발생하는 수평하중에 의한 전도에 매우 취약하며 이를 보강해야할 필요성을 실험을 통해서 알 수 있었다. 보강기법으로는 앵커를 사용하여 암반에 지지하므로 전도에 대한 저항성을 향상시키는 기법을 제시하여 실험을 통해서 성능을 증명하였다. 그러나 기초부에 전도보강을 실시하는 경우, 교각 내에 존재하는 시공이음에서 균열이 발생할 가능성이 있으므로 교각 시공이음부에 휨보강을 실시해야함을 알 수 있었다. 휨보강을 실시하면, 기초부의 앵커가 전도보강의 효과를 충분히 발현할 수 있게 된다. 따라서, 무근콘크리트 교각 및 기초의 전도 보강은 기초부의 보강과 시공이음의 보강이 동시에 되어야 안정성을 확보할 수 있다.

홍수 또는 유수에 의한 무근콘크리트 교각의 유실을 방지하기 위해서 기초부에 시트파일(sheet pile)을 이용하여 세굴방지 및 유실방지 보강을 실시하는 사례가 있으며, 이러한 경우 기초부의 강성증가로 홍수에 의한 수평하중에 의해서 시공이음에 응력이 집중할 수 있기 때문에 기초부의 보강과 더불어 시공이음부도 휨보강이 병행되어야 한다.

참고문헌

1. 오세환, 최은수, 정희영 (2005), “철도교용 고무패드의 강성 추정기법”, 한국강구조학회 논문집, 제17권 3호, pp.307.316.