J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea, 29(5)
pp.397~403, October, 2016
https://doi.org/10.7734/COSEIK.2016.29.5.397

pISSN 1229-3059 eISSN 2287-2302
Computational Structural
Engineering Institute of Korea

프리플렉스 부재를 이용한 콘크리트 박스 구조물 내진보강에 관한 실험 및 해석적 평가

안 호 준[1] · 송 상 근[2] · 민 대 홍[3] · 안 상 미[1] · 공 정 식[1†]

[1]고려대학교 건축사회환경공학부, [2]동양건설산업(주), [3]다음이엔씨(주)

Experimental and Analytical Evaluation of the Seismic performance of a Concrete Box Structure Strengthened with Pre-flexed Members

Ho-June Ann[1], Sang-Geun Song[2] Dae-Hong Min[3] Sang-Mi An[1] and Jung-Sik Kong[1†]

[1]*School of Civil Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ., Seoul, 02841, Korea*
[2]*Dong Yang Engineering & Construction Group, Seoul, 06211, Korea*
[3]*Daum E&C CO.,LTD., Sungnam, 13207, Korea*

Abstract

During the rapid economic growth in Korea since the 1970s, many underground facilities were constructed such as under passes and railways. Seismic design has been mandated in 1988, but the structures built before 1988 were not reflected on the seismic design. Accordingly, these underground structures require effective seismic reinforcing methods to ensure safety when the earthquake happens. By these reasons, in this study, using the proposed pre-flexed members, RC box structure was analyzed for seismic reinforcement of the corner. This method is based on a principle that enlarging the resistance against the external force by installing the pre-flexed member to the box structure corner. To evaluate validity, a newly developed member with CornerSafe was compared with traditional type reinforcement using experiments and finite element analysis. In finite element mode, nonlinearity of steel was modeled based on J2 plasticity model and concrete was based on CEB FIP MODEL CODE 1990. Also, composite ratios of box and pre-flexed member were computed for design application. The reinforcement and box structure were analyzed under the bond condition completely attached by the tie, and the results of experiment and finite element analysis were same in the force-displacement curve.

Keywords : *seismic design, strengthening method, earthquake, preflexed member, composite ratio, underground structure*

1. 서 론

국내의 경우 지중에서는 상대적으로 지진력이 감소한다는 특징과 내진 설계기준이 주로 강진지역을 규정으로 적용하였기 때문에 지중구조물에 대하여 내진 설계를 실시한 사례가 많지 않다. 국내 내진설계기준의 재정, 개정 시기를 보면 국내의 경우 1992년 도로교설계기준에 내진설계가 처음으로 도입되었다. 따라서, 1992년 이전의 지중구조물들은 내진 설계가 반영되지 않았으며, 1992년 내진설계가 적용되었다 하더라도 설계기준이 개정되면서 현 내진 설계기준을 만족하지 못하고 있다(Min *et al.*, 2015; Chung *et al.*, 2010).

이와 같이 내진설계가 적용되지 않은 지중구조물이나 내진저항성능을 확보하지 못하고 있는 구조물들은 내진보강공법을 통해 내진성능을 보강하고 있다. 대표적인 내진보강공법으로는 콘크리트 외부를 증설하여 내진성능을 증대시키는

† Corresponding author:
Tel: +82-2-3290-3323; E-mail: jskong@korea.ac.kr
Received May 19 2016; Revised July 26 2016;
Accepted July 29 2016
©2016 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.

공법이다. 하지만 외부 증설공법은 터파기나 개착에 있어 환경에 대한 제약이 크고, 교통 통제나 가시설 설치 등으로 막대한 건설비용이 소모된다. 따라서, 효과적인 내진보강 방안이 필요한 실정이다.

본 논문에서는 이러한 단점을 개선하고자 기존 내진보강 공법보다 경제적이고 시공에 유리한 내진 보강방안을 제시하였다. 새롭게 개발된 공법(corner safe)은 기존의 브레이싱 증설공법과 강판접착공법을 발전시킨 공법이다. 이 공법은 박스구조물 우각부에 설치하여 외력의 반대방향으로 가압력을 도입하여 작용하중을 상쇄시키고 보강재와 콘크리트를 합성시켜 지진에 대한 저항능력을 증대시키는 공법이다. 또한 개발된 공법의 효과를 검증하기 위해 수로박스를 대상으로 보강재 종류별 실험 및 구조해석을 실시하였으며, 개발된 보강재와 박스구조물의 합성률에 대한 연구를 진행하였다. 이 결과값들을 비교하여 새로운 보강공법의 내진 성능평가를 하는데 목적을 두고 있다.

2. 개선된 보강재의 원리(corner safe)

이 공법은 기존의 공법들과 다르게 우각부의 단면강성 증대와 가압력 도입 효과를 모두 가지고 있으며, 초기에 135°의 초기각도를 가진 보강재를 이용해 사전 변형을 일으킨 후 박스 구조물의 우각부에 변형된 강재를 설치하여 탄성 복원력에 의해 가압력이 작용하중을 상쇄시키는 원리이다. 보강재 설치 시에는 박스와의 부착 강도를 증대시키고, 미끄러짐 효과를 최소화 하고자 천공 후에 케미컬 앵커를 도입하여 밀착 시공하였다.

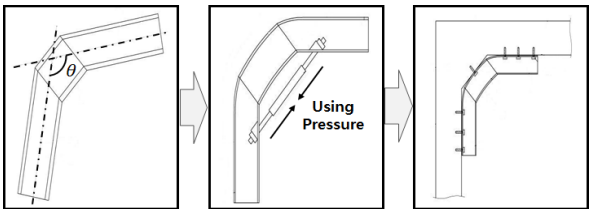


Fig. 1 Strengthening method using pre-flexed members (Min *et al.*, 2014)

3. 보강재에 대한 성능평가

이 장에서는 보강재에 대한 실물실험을 분석하였다. Case 1은 보강재가 설치되지 않은 무보강 상태의 박스구조물로 Case2~Case4 대비 보강효과를 검증하기 위해 선정 되었으며, Case 2는 가압력이 도입된 가압봉을 우각부에 설치하는 보강공법인 Sos 전단 보강재, Case 3는 얇은 강판을 부착하여 단면 증대의 보강 효과를 가진 강판접착공법으로 선정하였다. Case 4는 본 연구에서 제안한 Corner Safe로 프리플렉션이 도입된 보강재를 설치하여 하중 반대방향으로 가압력을 도입하여 외력을 저감시키고 보강재와 콘크리트와 합성시켜 저항력을 증대시키는 공법으로 총 4개의 Case 구조물로 나누어 실험을 수행하였다.

하중은 지진시 유사한 구조물의 거동을 모사하기 위해 Fig. 2의 개념도와 같이 반력벽에 부착된 Actuator를 이용하였고 Fig. 3의 실험 사진과 같이 Actuator의 집중하중을 분산시키기 위해 H-beam을 Actuator 앞부분에 부착하여 하중을 재하 하였다. 또한, Fig. 4와 같이 하중재하시 박스구조물에 전도와 활동을 방지하기 위해 구조물 크기에 맞는 고정장치를 제작하여 하부슬래브를 반력벽 바닥에 고정하였다.

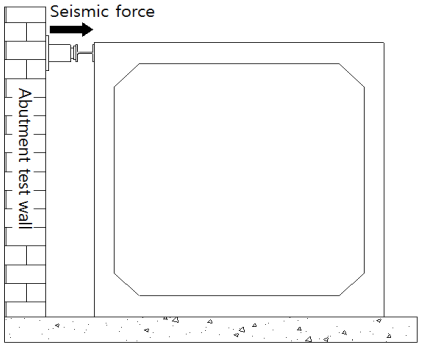


Fig. 2 Loading of concept drawings(Min *et al.*, 2015)

Fig. 3 Load distribution system(H-beam) and actuator

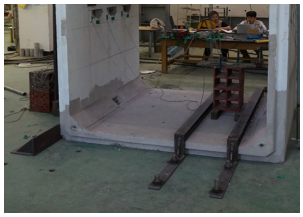


Fig. 4 Fix system

Fig. 5 Case 1

Fig. 6 Case 2

Fig. 7 Case 3

Fig. 8 Case 4

3.1 계측기 설치 계획

박스 구조물의 구조와 보강재의 특성을 고려하여 계측 위치를 선정하였다. 계측 위치는 총 30개의 변형률 계측 위치를 선택하였으며, 박스의 피복을 제거해 주 철근에 변형률 게이지를 부착하였다. 또한, Corner Safe 보강재의 합성률을 분석하기 위해 추가적인 변형률 게이지를 부착하였다.

변위계(LVDT)는 상대변위와 최대변위를 측정할 목적으로 상부 슬래브, 하부슬래브, 벽체 중앙에 각각 3개씩를 설치하였다.

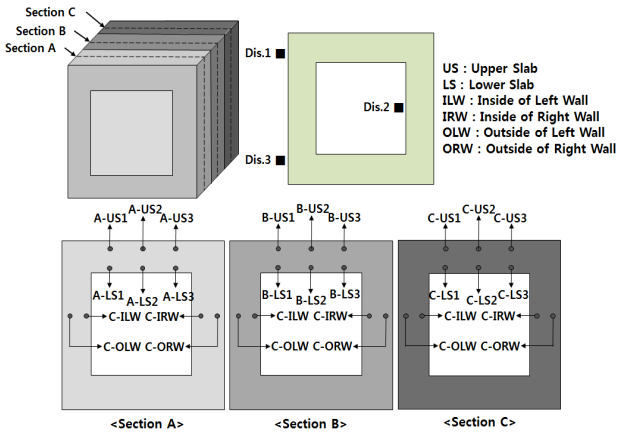


Fig. 9 Measurement plan drawing

3.2 변형률 계측 결과

본 실험에서 각 30개의 변형률 게이지와 LVDT를 설치하고 120kN까지 지속적으로 하중을 지속적으로 재하하여 계측 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터는 하중작용 시 박스 구조물의 주 철근 변형률을 Fig 10~13에 나타내었다. 재현주기 500년, 내진등급 2등급, 지반종류(Sd), 기준 토피고 1~3m 일 때, 응답변위법(Kim *et al.*, 2009)에 의해 계산된 설계 지진하중이 80kN이하에서 작용하는 것으로 분석되었다. 하지만, 실물 실험에서는 보강재에 의한 성능향상 분석을

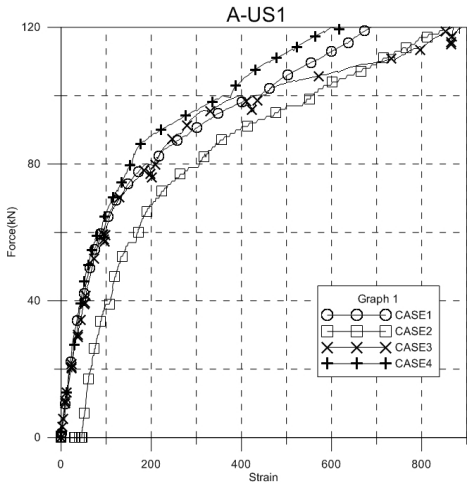


Fig. 10 Load-strain curve(A-US1)

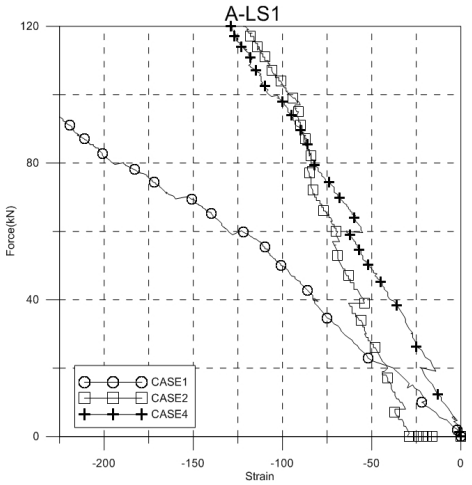


Fig. 11 Load-strain curve(A-LS1)

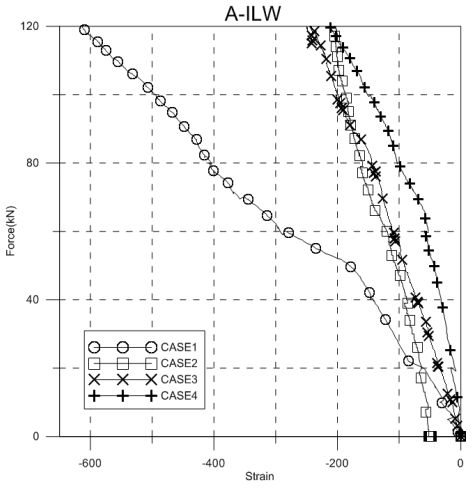


Fig. 12 Load-strain curve(A-ILW)

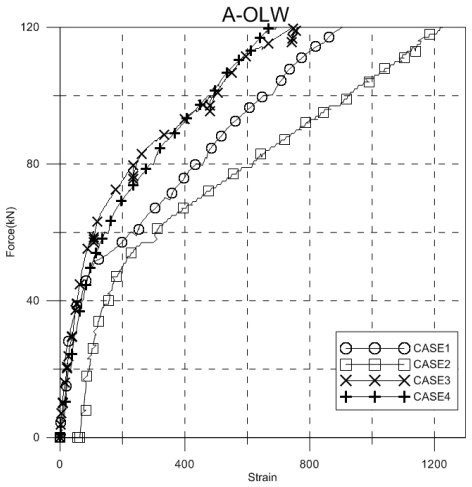


Fig. 13 Load-strain curve(A-OLW)

위하여 120kN까지 하중을 재하하였다. 측정된 30개의 결과 중 변형률이 제일 크게 발생한 위치의 결과를 분석하여 나타내었으며, 보강효과의 순위를 산정한 결과 120kN 기준으로 Corner Safe 공법이 무보강에 비해 변형률이 평균 47% 감소한 것으로 확인되었다.

3.3 변위 계측 결과

하중-변위 그래프는 LVDT의 변위 데이터와 엑츄레이터의 변위 데이터 값을 분석하여 얻을 수 있었다. 비선형 취성 거동에 대한 시험의 안전성 확보를 위하여 변위 제어로 시험하였으며 로드셀을 이용하여 작용하중 크기를 산정하였다. 엑츄레이터에서 유압변화로 인한 변위 대비 작용하중 값의 신뢰도를 보완하기 위하여 LVDT에서의 하중-변위값을 추가 측정하였다. 변위에 대한 그래프를 분석한 결과 120kN에서 Corner Safe 공법에 타 공법에 비해 변위 저항능력이 11.8% 크게 나타난 것을 확인하였다.

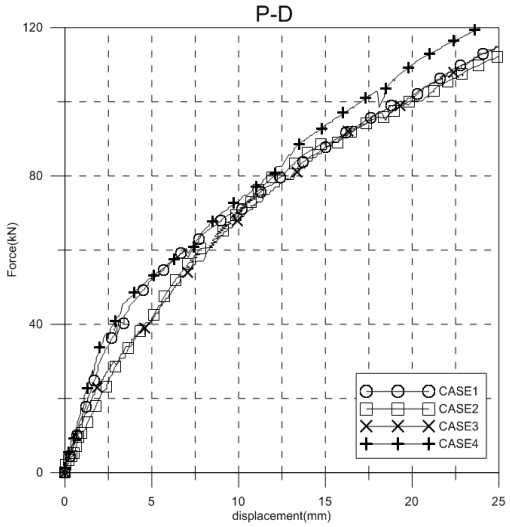


Fig. 14 Load-displacement curve

4. 구조 해석

본 연구에서는 실험으로 보강재의 내진성능을 분석하였다. 하지만, 실험만으로는 보강재의 성능을 검증하기에 어려움이 있으므로 프로그램 해석 결과을 통해 타당성을 검증하였다. 구조해석은 Abaqus 6.13-4를 통해 수행하였고, 3.1절의 계측 위치에서 변위 및 변형률을 비교하여 신뢰도를 검증하였다. 해석으로 Coner Safe 보강재가 부착된 Case 4를 검증하고자 Case 1(무보강)도 해석을 수행하였으며, 추후 변화하는 하중에 대비하여 타당성있는 해석모델을 구축하고자 구조 해석을 진행하였다.

4.1 구조물 모델링

대상 구조물은 Abaqus를 이용하여 모델링하였다. 박스 구조물과 보강재는 Solid요소를 사용했으며, Abaqus에서 제공하는 Truss를 모델링하여 Embeded 조건과 Rebar Layer로 Embeded 조건 중 철근에 대한 변형이 확인 가능한 Truss를 Embeded 시키는 기능을 선택하였다. 솔리드와 트러스와 embed 조건을 적용시켜 철근 콘크리트 부재를 묘사하였으며, 보강재를 설치할 때 연결조건은 Tie로 구조물과 보강재가 완전 부착상태로 가정하여 해석을 수행하였다. 박스와 보강재의 완전합성으로 도출된 해석 결과로 박스와 보강재의 합성강도에 대한 비 합성강도의 비로 나타내어 합성률을 제시하고자 했다.

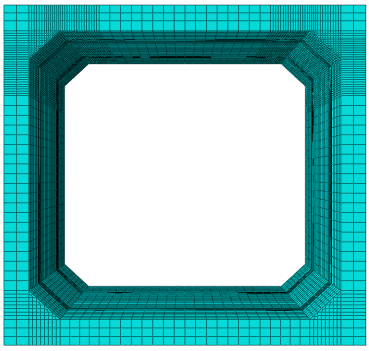


Fig. 15 Box structure modeling

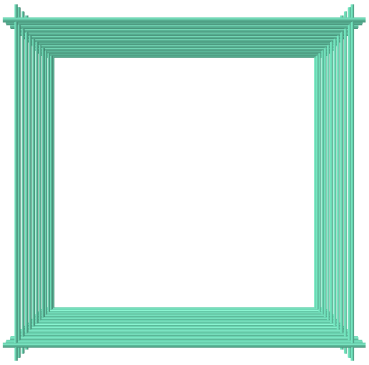


Fig. 16 Main reinforcement modeling

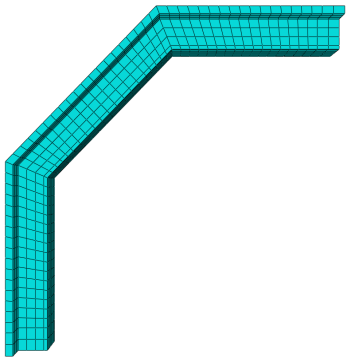


Fig. 17 Corner Safe Modeling

4.2 재료의 물성치

모델링에 사용된 콘크리트의 탄성계수는 27GPa, 푸아송비는 0.18, 부재의 단위질량은 2.5×10^{-9}N/mm/g을 적용하였으며 철근의 탄성계수는 200GPa, 푸아송비는 0.3, 단위질량은 7.85×10^{-9}N/mm/g을 적용하였다. 120kN까지 구조물의 비선형 거동을 확인하기 위해 검증된 재료모델인 CEB-FIP MODEL CODE 1990을 사용하였다. 또한, 콘크리트 비선형 압축, 인장모델을 적용하였으며, 철근과 보강재는 간단하면서도 완전 소성거동 및 변형경화를 모사할 수 있는 J2 Plasticity Model을 사용하였다.

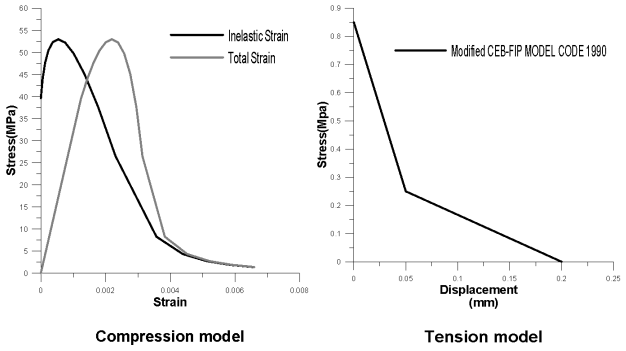


Fig. 18 Concrete compression, tension nonlinear model

Table 5 Concrete nonlinear material properties

CEB-FIP 1990		
Concrete plasticity	Dilation Angle(°)	30
	Eccenticity(-)	0.1
	fb0/fc0(-)	1.16
	Stress intensity factor K(-)	0.667
	Viscosity(-)	0.001

모델링의 검증은 보강재가 설치되지 않은 Case 1과 본 연구에서 제시한 Corner Safe 보강재가 부착된 Case 4를

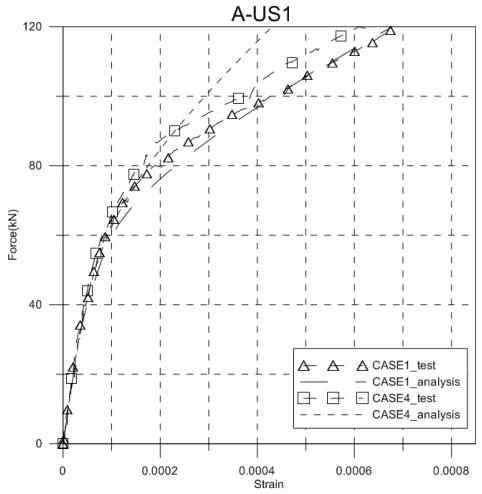


Fig. 19 Load-strain curve(analysis)

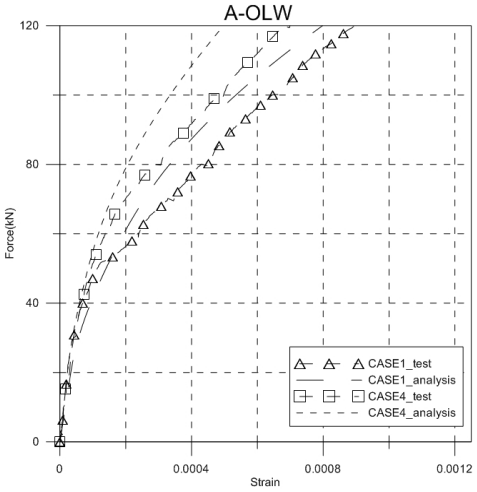


Fig. 20 Load-strain curve(analysis)

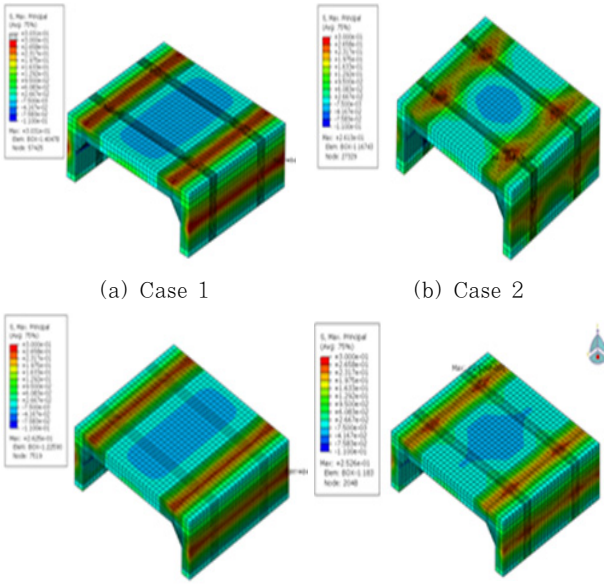
통해 타당성을 검증하였다. 3.2절에서 제시한 데이터 중 변형률이 크게 측정된 A-US1과 A-OLW 값에 대한 데이터를 Fig. 19~20에 나타내었다. 하중과 변형률과의 관계가 선형에서 비선형으로 바뀌는 40kN을 기준으로, 평균 Case 1은 10%이내의 오차율, Case 4는 13%이내의 오차율을 확인하였다. 오차의 원인은 구조물을 고정시키는 고정 장치의 변형 콘크리트의 피복제거량, 게이치 부착위치 등으로 감안하였다.

4.3 해석 결과

구조해석을 통해 토압이 작용하는 박스구조물에 대해 파괴응력과 전단응력을 산출하였으며, 각각의 데이터는 실험결과 값의 최대 재하하중 120kN을 기준으로 비교 분석하였다. Fig. 21은 보강재가 부착된 박스 구조물 상부의 케이스별 응력분포도를 나타내고 있다. 강판접착공법이 부착된 구조물(CASE 3)은 파괴응력이 0.419MPa, 최대전단응력 0.426MPa으로 무보강(Case 1)에 비해 각각 24%, 11.3% 감소, SOS보강재가 부착된 구조물(Case 3)은 파괴응력이 0.443MPa, 최대전단응력 0.419MPa으로 무보강에 비해 각각 20.9%, 10.3%감소, Corner Safe 보강재가 부착된 구조물(Case 4)의 경우 파괴응력 0.394MPa, 최대전단응력 0.313MPa으로 무보강에 비해 각각 29.6%, 33% 감소하였으며 Corner Safe 공법에 가장 우수한 보강성능이 있는 것을 검증하였다.

Table 8 Shear stress, the maximum stress reduction effect

	case 1	case 2	case 3	case 4
shear stress (stress reduction ratio)	0.560	0.426 (24%)	0.443 (20.9%)	0.394 (29.6%)
maximum stress (stress reduction ratio)	0.467	0.414 (11.3%)	0.419 (10.3%)	0.313 (33%)



(a) Case 1 (b) Case 2

(c) Case 3 (d) Case 4

Fig. 21 Stress distribution depending on cases

5. 보강재 합성거동

Corner Safe 보강재는 전단 연결재를 이용하여 우각부에 설치되고 설치된 보강재는 합성률이 커질수록 전단, 휨에 대한 저항력이 증대된다. 박스구조물 뿐만 아니라 합성거동을 하는 구조물에 대한 합성률 산정은 설계반영을 위해 다양한 연구가 진행되고 있으며 본 연구에서는 박스구조물과 보강재의 합성정도를 분석하였다. 합성정도 분석은 실험과 해석에서의 저항모멘트 비를 산정하여 실험결과와 비교·검토하였다.

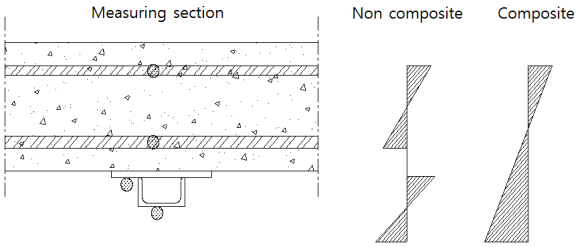


Fig. 22 Concrete and Corner Safe composite non-composite conceptual diagram

5.1 합성률 산정

$$\text{합성률}(\%) = \frac{M_r(\text{실험-비 합성거동})}{M_r(\text{해석-합성거동})} \times 100 \quad (1)$$

식 (1)과 같이 합성률(Song, 2015)에 대한 정의를 내렸으며, Fig. 23에 하중별 보강재의 합성률을 나타내었다. 저항모멘트의 비율로 합성률을 계산할 수 있었으며, 하중이

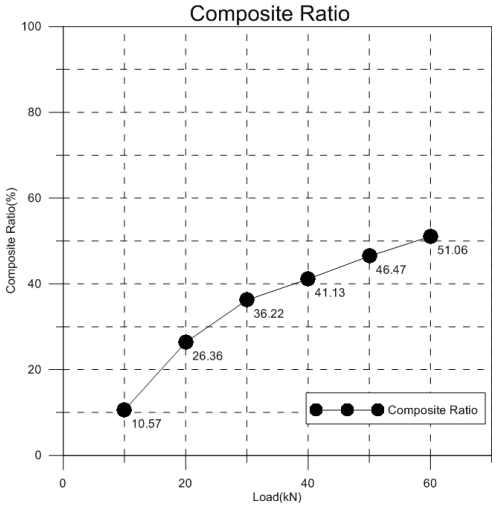


Fig. 23 Load-composite ratio

증가함에 따라 합성률이 증가함을 확인하였다. 10kN에서의 합성률은 10.57%를 나타냈으며, 60kN에서의 합성률은 51.06%로 나타났다. 50kN과 60kN에서 구조물의 비선형성이 나타나므로 60kN까지로 제한하였다. 초기의 합성률은 10%로 낮은 수치를 보이고 있으며, 다음과 같은 이유로 부분합성 거동이 되었다고 판단된다.

(1) 보강재와 박스구조물의 제작오차
(2) 보강재와 박스 부착 과정에서 케미컬 앵커 도입시 약액의 흘러나옴으로 인한 공극발생
(3) 비 합성 거동 시 강성저하에 따른 단면 내력 저하와 균열 유발
(4) 앵커 천공 시 구멍이 넓어짐에 따른 보강재와 박스의 불완전한 부착

6. 결 론

본 논문에서는 개선된 내진보강효과를 가진 새로운 보강공법(corner safe)을 제안하였다. 이 공법의 효과를 검증하기 위해 기존에 사용되고 있는 대표공법들에 대해여 종류별 실물실험 및 구조해석을 수행하였으며, 실험 및 데이터 비교분석을 통해 보강효과에 관한 연구를 수행하였다.

실물 실험에서는 구조물의 변형률과 변위를 계측하여 보강효과를 분석하였다. 그 결과, 120kN에서 Corner Safe 공법(Case 4)이 무보강(Case 1)에 비해 변형률 평균 57%감소, 최대변위 11.8%감소한 것을 확인하였다.

실물실험에서의 신뢰성 검증을 위해 구조해석을 수행하였다. 그 결과, 40kN에서 Case 1은 10%이내의 오차율, Case 4는 13%이내의 오차율을 확인하였다. 또한, 검증된 모델링에

토압이 작용 시 무보강에 비해 Corner Safe 공법의 최대응력, 최대 전단응력이 29.6%, 33% 감소한 것을 확인하였다.

Corner Safe보강재가 박스구조물에 시공되었을 때 합성정도를 측정하기 위해 계측단면을 선정하여 실험 및 해석 데이터를 분석하였다. 하중 10kN에서는 합성률 10.57%를 나타내며, 60kN에서는 51.06%의 합성률을 확인하였다. 시공에서 공극을 최소화 한다면 더 높은 합성효과가 있을 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 지중박스구조물에 프리플렉션 부재를 이용한 공법을 제안하였다. 또한, 내진에 대한 안전성이 필요한 지중구조물의 내하력 증진에 도움이 되며, 우각부 보강에 적합한 공법이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설기술A01)에 의해 수행되었습니다.

References

Chung, J.S., Moon, I.G., Kim, J.G., M., Lee, J.H., Min, D.H. (2015) The Earthquake Resistant Reinforcement Method of the Existing Urban Railway, *The Korean Society for Railway Spring Conference,* pp.32~33.

Kim, D.G., Lee, B.R., (2009) Seismic Deformation Method for Earthquake Analyses of Underground Strctures, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 22(5), pp.356~366.

Min, D.H., Cha, C.J., Yoon, Y.S., Kim, D.G., Kim, D. (2014) Development of Corner Joint Strengthening Method for RC Underground Box Structures using Pressure Members, *Full Conference Korea Inst. Struct. Maintenace & Inspection*, pp.227~228.

Min, D.H., Kong, J.S., Chung, J.S., Yoon, Y.S., Kim, D.G., (2015) Strengthening Method using Pre-flexed Members for the Corner of Reinforced Concrete Box Structures under Ground.

Song, S.G, (2015) *A study on Strengthening Method for the Corner of Box Structures using Pre-flexed Members*, Master of Science, Korea University. pp.1~14, pp.28~46.

Song, S.G., Ann, H.J., Lee, J.H., An, S.M., Kong, J.S. (2015) Coner Joint Strengthening Test of RC underground Box Structures using Pressure Members, *Korea Inst. Struct. Maintenance & Inspection*, 19(2), pp.273~274.

요 지

1970년대 이후 한국의 빠른 경제성장 동안에 수로나 철도 등 많은 지중구조물들이 건설되었다. 1988년에 내진설계가 의무화되었으나, 1988년 이전의 지중 구조물들은 내진설계가 반영되지 않았다. 따라서, 이러한 지중 구조물들은 지진이 일어났을 때 안전성을 확보하기 위해 효과적인 내진 보강방법이 필요하다. 그러한 이유로, 본 연구에서는 새롭게 개발된 보강재를 이용한 RC 박스 지중 구조물 우각부 보강공법의 내진성능에 대하여 분석하였다. 이 공법은 박스구조물 우각부에 Pre-flexed member를 설치하여 외력에 저항력을 증대시키는 원리이다. 타당성을 검증하기 위해서 새로이 개발된 보강재와 기존의 보강재를 실험과 유한요소해석으로 비교하였다. 유한요소모델에서 강재의 비선형 모델은 J2 Plasticity Model을 기초로 하고 콘크리트는 CEB-FIP MODEL CODE 1990로 모델링되었다. 또한, 설계반영을 위한 박스 구조물과 보강재와의 합성률을 산정하였다. 보강재와 박스구조물은 Tie에 의해 완전 부착된 상태의 연결조건 하에서 해석이 수행되었으며, 하중-변위곡선에서 실험과 유한요소해석의 결과가 서로 일치하였다.

핵심용어 : 내진 설계, 보강 공법, 지진, 프리플렉스 부재, 합성률, 지중 구조물