

## 구조물 노후도를 반영한 외부긴장 보강 효과에 관한 실험적 연구

김상현<sup>1</sup>, 정우태<sup>2</sup>, 강제윤<sup>3</sup>, 박희범<sup>4</sup>, 박종섭<sup>2\*</sup>

# Experimental Study on the Strengthening Effect of External Prestressing Method Considering Deterioration

Sang-Hyun Kim<sup>1</sup>, Woo-Tai Jung<sup>2</sup>, Jae-Yoon Kang<sup>3</sup>, Hee-Beom Park<sup>4</sup>, Jong-Sup Park<sup>2\*</sup>

**Abstract:** Concrete structures gradually age due to deterioration of materials or excess loads and environmental factors, and their performance decreases, affecting the usability and safety of structures. Although external tension construction methods are widely used among the reinforcement methods of old bridges, it is insufficient to identify the effects and effects of reinforcement depending on the level of aging. Therefore, in this study, a four-point loading experiment was conducted on the subject with the non-reinforced and external tensioning method to confirm the reinforcement effect of the external tensioning method, assuming the aging of the structure as a reduction in the compressive strength and tensile reinforcement of concrete, to analyze the behavior of the reinforcement and confirm the reinforcement effect. As a result of the experiment, it was difficult to identify the amount of reinforcement in the extreme condition due to early elimination of the anchorage. Therefore, compliance with the regulations on anchor bolts is required when applying the external tension reinforcement method. Crack load and yield load increased depending on whether external tension was reinforced, but before the crack, the stiffness before and after reinforcement was similar, making it difficult to confirm the reinforcement effect.

**Keywords:** External Prestressing, Strengthening effect, Deterioration, Deterioration Bridge, Bridge Strengthening Method

## 1. 서 론

콘크리트 구조물은 재료의 열화나 초과된 하중 및 환경적 요인에 의해 점차 노후화 되며 그 성능이 감소하여 구조물의 사용성 및 안전성에 영향을 미치게 된다(Jung et al., 2017). 실제 노후된 교량 구조물이 붕괴된 사례가 보고되고 있으며(Kim et al., 2020) 구조물 유지관리의 중요성에 대한 인식 확산과 더불어 성능 복원 및 향상을 위한 다양한 보강 공법이 사용되고 있다(Park et al., 2007; Park et al., 2007; Jung et al., 2011).

노후 교량의 보강 공법 중 외부긴장 공법은 구조물 외측 인장부에 긴장재를 설치하고 직접 긴장력을 도입하여 기존 구조물의 내하력을 증가시키는 보강공법으로 인장부 균열을 폐합시켜 철근의 부식을 방지하고 처짐을 복원하는 등의 장점으로 널리 사용 중이다(Shim et al., 2004; Lee et al., 2007).

외부 긴장공법의 보강 효과를 검증하기 위해 오병환 등(2001)

과 이병주 등(2007)은 실교량에 추가적으로 외부 긴장력을 도입하고 성능 개선 효과를 비교하였다(Oh et al., 2001; Lee et al., 2007). 한만엽 등(1999)은 외부 긴장과 부착공법을 동시에 적용하는 거더 보강 공법을 개발하였다(Han and Park, 1999). 국외에서는 Naaman 등(2002)은 비부착된 외부강선의 극한응력을 평가하는 실험을 수행하였으며, Ozkul 등(2001)은 외부강선이 보강된 PSC I 거더의 보강효과와 긴장재의 형상에 관한 연구를 수행하였다(Naaman and Aldhairi, 1991(a); Naaman and Aldhairi, 1991(b); Naaman et al., 2002; Ozkul et al., 2008; Back et al., 2016).

하지만 외부 긴장재는 모재인 콘크리트와 비부착 상태이므로 변형을 적합조건이 성립하지 않아 정확한 거동을 예측하기 어렵고, 실교량의 보강 효과를 확인하는 경우는 강성 기여가 미미한 외부긴장 보강 공법의 특성 상 균열 이전에 보강 효과를 확인하기 어려운 한계가 있다. 또한 기존 연구에서는 모재인 콘크리트의 손상을 고려하지 않거나 균열 여부만을 고려하여 노후도에 따른 보강 효과 및 영향 규명은 미흡한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 구조물의 노후도를 콘크리트 압축강도 및 인장철근량의 감소로 가정하고 노후도에 따른 외부긴장 공법의 보강 효과를 확인하기 위해 무보강 및 외부긴장 공법을 적용한 실험체의 4점 재하실험을 수행하여 보강 여부에 따른 거동을 분석하고 보강 효과를 확인하였다.

<sup>1</sup>정회원, 한국건설기술연구원 복합신소재연구센터 박사후연구원

<sup>2</sup>정회원, 한국건설기술연구원 복합신소재연구센터 연구위원

<sup>3</sup>정회원, 한국건설기술연구원 차세대인프라연구센터 연구위원

<sup>4</sup>정회원, 한국건설기술연구원 복합신소재연구센터 수석연구원

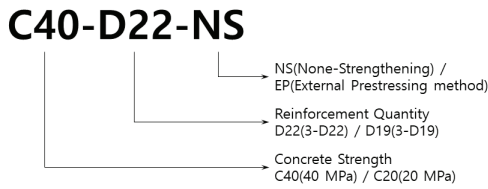
\*Corresponding author: jspark1@kict.re.kr

Korea Institute of Civil and Building Technology (KICT), Goyang, 10223, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2021년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2021년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

**Table 1** Experimental variables

No.	Name of Specimens	fck [MPa]	Rebars D(mm)-ea	Strengthening method
1	C40-D22-NS	40	22-3	none-strengthening
2	C40-D19-NS	40	19-3	none-strengthening
3	C20-D22-NS	20	22-3	none-strengthening
4	C20-D19-NS	20	19-3	none-strengthening
5	C40-D22-EP	40	22-3	External Prestressing
6	C40-D19-EP	40	19-3	External Prestressing
7	C20-D22-EP	20	22-3	External Prestressing
8	C20-D19-EP	20	19-3	External Prestressing



**Fig. 2** Designation of test specimens

## 2. 본 론

### 2.1 실험 방법 및 내용

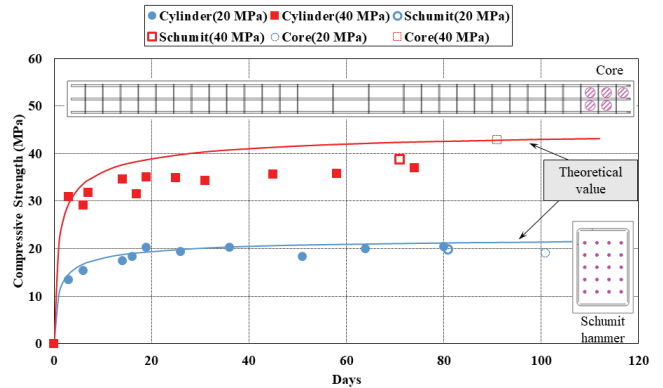
이 연구에서는 콘크리트 설계기준 압축강도, 인장철근량을 주요 변수로 하였다. 실험체는 Fig. 1과 같이 총길이 6.4 m, 지점간 길이 6.1 m이며, 폭 400 mm, 높이 600 mm의 직사각형 단면의 실험체 8개를 제작하여 실험을 수행하였다. 기준 실험체는 콘크리트 설계기준 압축강도 40 MPa, 인장철근을 3-D22로 배근하였으며, 인장과괴를 유도하기 위해 3-D22의 압축철근 및 가력 중 전단과괴 방지를 위해 D10 철근의 폐쇄형 스테럽을 배치하였다. 구조물의 노후도를 반영하기 위해 Table 1과

같이 콘크리트 압축강도를 20 MPa 및 인장철근 3-D19를 각각 반영한 경우를 변수로 하였으며 각각 무보강과 보강실험체의 재하실험을 통해 보강 효과를 확인하였다. 실험체 명은 Fig. 2와 같이 콘크리트 설계기준 압축강도, 인장철근량 및 보강 여부를 나타내었다. 실험에 사용된 콘크리트는 공시체, 슈미트해머 및 코어 강도를 통해 확인하였으며, 재령에 따른 콘크리트 압축강도 실험값을 Fig. 3에 제시하였다.

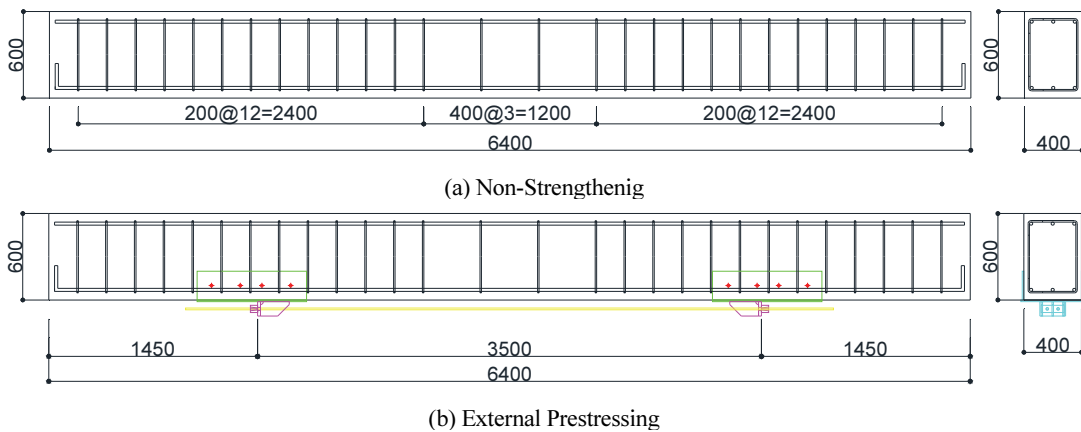
### 2.2 실험체 보강

실험체의 보강은 현행 보강 공법의 설계 및 시공 상의 문제점 확인을 위해 전문업체를 통해 진행하였다. 원활한 보강을 위해 실험체 하면이 위로 향하도록 뒤집어서 시공하였으며, 정착구 상세 형상은 Fig. 4에 제시하였다.

정착구는 M16 앵커볼트를 이용하여 시공하였으며, Fig. 5와 같이 하면 앵커볼트 천공, 하면 정착구 설치, 측면 앵커볼트 천공 및 측면의 정착구를 설치 후 정착구 하면과 측면을 용접하는 순서로 설치하였다. 하지만 사용된 M16 앵커볼트는 125 mm의 천공깊이 및 100 mm의 매립깊이가 필요하지만 내부 철근과의 간



**Fig. 3** Concrete Strength



**Fig. 1** Dimensions of specimens(Unit: mm)

섭으로 일부 앵커는 60 mm만 매립되었으며, 시공을 위해 설계에 고려되지 않은 측면 앵커볼트가 추가 설치되었다.

모든 실험체는 직경 12.7 mm의 외부 긴장재가 2가닥씩 설치되었으며, 40 MPa 실험체는 각각 100 kN, 20 MPa 실험체는 각각 50 kN의 긴장력을 도입하였다. 개별 강연선에는 변형률 게이지를 설치하여 긴장 시 도입된 긴장력을 확인하였다. 외부 긴장 공법은 비부착 긴장재를 활용하므로 프리스트레스트 콘크리트의 손실 중 마찰에 의한 손실이 없고, 웨지형 정착장치 활동 손실 및 후속 긴장재 긴장에 따른 콘크리트 수축에 의

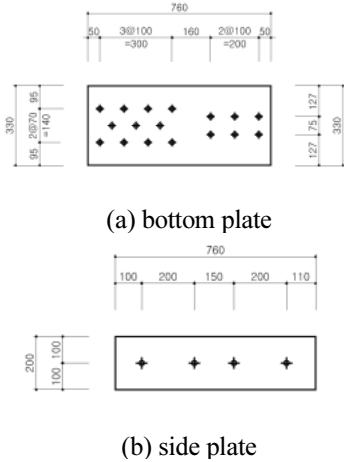


Fig. 4 Detail of anchor plate (Unit: mm)

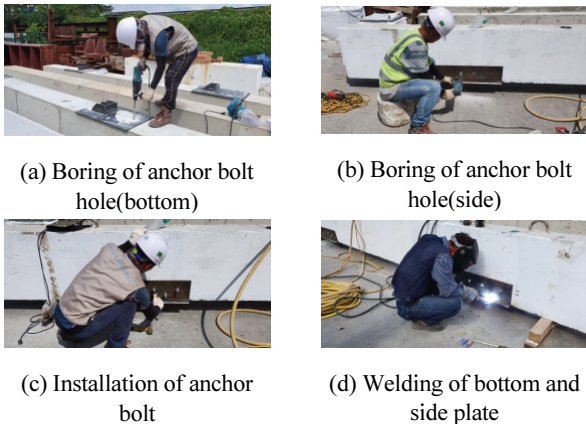


Fig. 5 Installation process of anchor

Table 2 External Prestressing Tendon Force

No.	Specimen	Design $P_e$ [kN]	Experimental $P_e$ [kN]	
			T1	T2
5	C40-D22-EP	83	82 (99%)	78 (94%)
6	C40-D19-EP	83	69 (83%)	69 (83%)
7	C20-D22-EP	33	32 (86%)	28 (83%)
8	C20-D19-EP	33	33 (100%)	35 (105%)

한 손실만 발생한다. 추가적으로 외부 긴장의 공법 특성 상 정착구 전체의 활동에 의한 긴장력 손실이 발생할 수 있으나, 긴장 시 정착구 변위를 계측한 결과 최대 0.02 mm로 설계기준에서 제시한 웨지형 정착장치 활동량인 3 ~ 6 mm에 비해 작아 고려하지 않았다. 외부 긴장재의 도입 긴장력은 Table 2에 제시한 바와 같이 설계값 대비 83 ~ 105%로 계측되었다.

### 2.3 계측 및 재하방법

보강 효과 확인을 위해 2,000 kN급 UTM을 사용하여 4점 재하 실험을 수행하였다. 안전한 실험을 위해 변위 제어방식을 통해 초기 30 mm까지 0.03 mm/sec의 속도로 재하하였고, 이후 0.1 mm/sec의 속도로 파괴 시점까지 재하하였다. 하중은 실험체 중앙에서 양쪽으로 500 mm 폭으로 순수 휨 구간의 길이가 1 m가 되도록 설정하였다. Fig. 6과 같이 철근 변형률게이지는 6 개 설치하였으며, 콘크리트 변형률게이지는 4개 및 중앙지점과 양쪽 1/4 지점에 실험체 처짐 측정을 위한 변위계를 설치하였다.

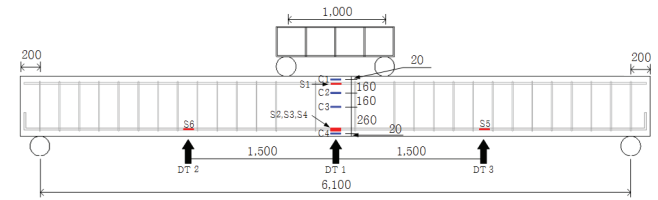


Fig. 6 4-point bending test and sensor location (Unit: mm)

### 3. 실험 결과

파괴 형상을 살펴보면 Fig. 7(a)와 같이 무보강 실험체는 인장철근 항복 후에 압축파괴로 진행되는 전형적인 휨파괴 형태를 나타냈다. 보강 실험체는 Fig. 7(b)와 같이 항복이후 정착구의 전도 및 주변 콘크리트 파괴에 따른 정착구 탈락에 의해 실험이 종료되었으며, 하중 제거 이후에도 모든 긴장력이 소실되어 처짐 회복이 되지 않았다. 정착구 탈락의 원인으로는 2.2절에서 언급한 바와 같이 일부 앵커볼트가 매립깊이를 확보하지 못하여 충분한 전단력을 확보하지 못한 것과 더불어 부재 파괴 시까지 정착부가 부담해야 하는 응력에 따라 앵커볼트의 수량을 설계해야 함에도 정착구의 크기 및 앵커볼트 수량 증가로 인해 도입긴장력까지만 설계되었기 때문이다. 또한, 후설치앵커의 경우 앵커 직경의 6배 이상의 중심간격 및 연단거리를 확보해야 함에도 불구하고(KCI, 2012), Fig. 4(a)와 같이 앵커볼트의 중심간격이 최소 70 mm로 중심간격 규정을 만족하지 못하였다. 추가적으로 Fig. 8(a)와 같이 측면 앵커볼트가 콘크리트 피복을 구속하여 정착구와 함께 탈락하는 현상을 확인하였으며, 이는 Fig. 8(b)와 같이 동일한 높이의



(a) None-strengthening specimen

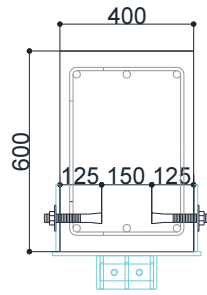


(b) Strengthening specimen

Fig. 7 Failure mode of anchor



(a) Anchor Failure



(b) Cross Section

Fig. 8 Anchor Failure and Anchor Bolt Installation (Unit: mm)

좌, 우측에서 삽입된 앵커볼트로 인해 콘크리트의 단면 축소에 따른 영향으로 판단되며 이는 일반적인 교량은 하부 플랜지가 두꺼운데 비해 실험체의 폭이 좁아서 발생하였다고 판단된다. 실험체의 균열, 항복, 극한하중을 Table. 3 및 하중-변위 관계를 Fig. 9에 제시하였다. 보강이 적용되지 않은 무보강 실험체의 하중-변위 관계를 Fig. 9(a)에 나타내었다. 콘크리트 설계기준압축강도가 작은 20 MPa 실험체의 균열하중이 40 MPa 실험체보다 작았으며, 인장 철근량이 적은 3-D19 실험체가 3-D22 실험체에 비해 항복강도가 작았다. 항복 이후에는 철근량에 따라 거동이 유사하였으며, 무보강 RC보의 강도

및 강성은 콘크리트 강도보다 인장철근량이 지배함을 확인할 수 있다.

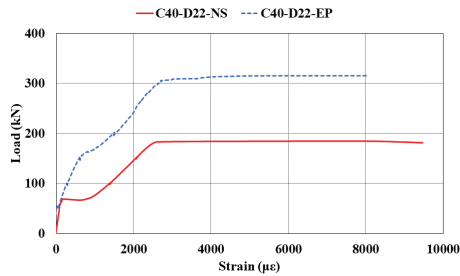
보강 실험체의 경우 무보강과 유사하게 콘크리트 설계기준 압축강도가 작은 20 MPa 실험체의 균열하중이 40 MPa 실험체보다 작았으며, 인장 철근량이 적은 3-D19 실험체가 3-D22 실험체에 비해 항복강도가 작았다. 하중과 경간 중앙 인장철근의 변형을 관계를 통해 Fig. 10과 같이 보강 전, 후 균열 및 항복 하중의 증가를 확인하였으나, 보강 실험체의 정착구 파괴로 인해 최대 보강 성능인 파괴하중을 확인하긴 어려웠으므로, 균열하중 및 항복하중만 분석하였다.

또한, 균열 이전 보강 전, 후의 강성 차이가 미미하여 외부 긴장 보강의 강성 증가 효과는 기대하기 어려웠으며, 실 교량의 보강의 경우 균열하중을 확인하기 어려우므로 균열 이전에 보강 효과를 확인하기는 어려울 것으로 판단된다. 균열하중, 항복하중 및 극한강도의 무보강 실험 결과 대비 보강 실험 결과의 비를 통해 보강 효과를 확인하면 Fig. 11과 같다.

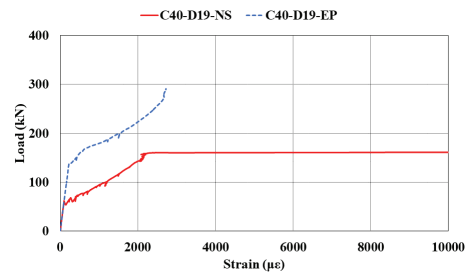
외부긴장 보강된 실험체의 경우, 무보강 실험체에 비해 평균적으로 균열하중은 215%, 항복하중은 161% 증가하였다. 보강량이 큰 40 MPa 실험체의 균열하중 증가 효과가 20 MPa 실험체보다 컸으며, 동일한 콘크리트 설계기준압축강도에서는 인장철근량이 작을 수록 보강효과가 큰 것으로 나타났다.

Table 3 Experimental Results

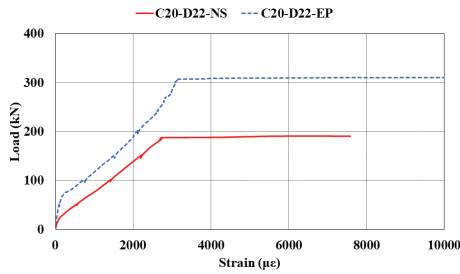
No.	Name of Specimens	Crack ( $P_{cr}$ , kN)		Yield ( $P_y$ , kN)		Failure ( $P_u$ , kN)	
		Design	Measured	Design	Measured	Design	Measured
1	C40-D22-NS	52.7	53.9	162.7	188.9	182.1	217.1
2	C40-D19-NS	52.7	57.5	116.4	143.1	127.3	163.5
3	C20-D22-NS	33.9	30.9	161.0	184.9	165.6	200.6
4	C20-D19-NS	33.9	31.2	115.7	134.4	118.9	155.4
5	C40-D22-EP	97.1	135.3	272.4	303.1	250.9	350.2
6	C40-D19-EP	103.7	128.9	235.2	270.0	205.7	291.4
7	C20-D22-EP	55.8	60.7	241.3	253.6	247.1	322.3
8	C20-D19-EP	58.9	58.9	200.0	214.3	200.2	244.9



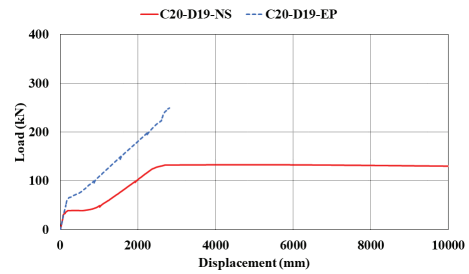
(a) C40-D22



(b) C40-D19

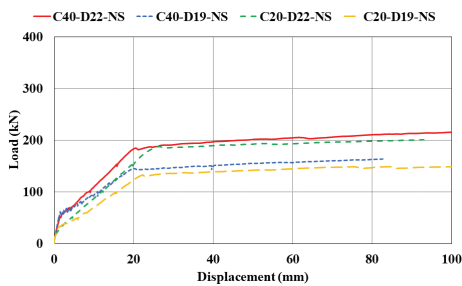


(c) C20-D22

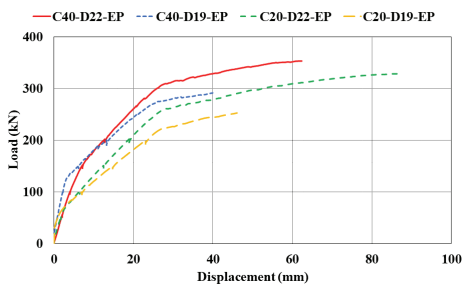


(d) C20-D19

Fig. 10 Load-Strain Curve



(a) Non-strengthening



(b) Strengthening

Fig. 9 Test Result

또한, 동일한 콘크리트 강도에서 균열하중은 철근량이 많을수록 보강효과가 컸으나, 항복하중은 철근량이 작을수록 보강 효과가 크게 나타났으므로, 보강효과는 초기에 콘크리트 강도의 영향을 받고 이후 철근량이 작을수록 보강 효과가 큰 것으로 판단된다.

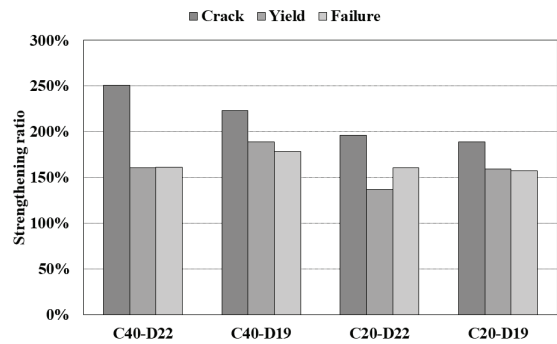


Fig. 11 Strengthening effect

## 4. 결론

이 연구에서는 콘크리트 설계기준압축강도 및 인장철근량의 감소를 구조물의 노후도로 가정하고 이에 따른 외부긴장 보강 효과를 실험적으로 검증하였으며, 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

- 1) 외부긴장 보강 공법의 정착구 설치 시 앵커볼트의 중심 간격, 연단거리 규정의 미준수 및 설계규정에서 제시한 충분한 매립깊이를 확보하지 못해 보강 실험체는 설계 하중 이하에서 정착구 파괴가 발생하였으며 이에 따라 외부긴장 보강 공법의 적용 시 설계 및 시공 단계에서 앵커볼트에 관한 적절한 관리, 감독이 필요하다.
- 2) 무보강 실험체의 하중-변위 관계 확인 결과 콘크리트 설계

기준압축강도가 작은 20 MPa 실험체의 균열하중이 40 MPa 실험체보다 작았으며, 인장철근량이 적은 3-D19 실험체가 3-D22 실험체에 비해 항복강도가 작아 무보강 RC 보의 강도 및 강성은 콘크리트 강도보다 인장철근량의 영향이 큼을 확인하였다.

3) 외부긴장 보강 여부에 따라 평균적으로 균열하중은 215%, 항복하중은 161%의 보강 효과를 확인하였으나, 균열 이전에는 보강 전, 후의 강성이 유사하여 보강효과를 확인하기 어려웠다. 노후도에 따라서는 균열하중은 콘크리트 강도가 클수록 항복하중은 철근량이 작을수록 보강효과가 큰 것으로 나타났다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술연구개발사업의 연구비지원(17SCIP-B128496-01)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Jung, W. T., Park, J. S., Kang, J. Y., and Keum, M. S. (2017), Flexural Behavior of Concrete Beam Stenghened by Near-Surface Mounted CFRP Reinforcement Using Equivalent Section Model, *Advanced in Materials Science and Engineering*, Hindawi, 2017(9180624).
- Kim, S. H., Park, S. Y., and Jeon, S. J. (2020), Long-Term Characteristics of Prestressing Force in Post-Tensioned Structures Measured Using Smart Strands, *Applied Sciences*, MDPI, 10(12).
- Park, S. Y., Yang, C. Y., and Kim, C. H. (2007), Ultimate Flexural Strength of Reinforced Concrete Beams Strengthened Using CFRP Tendon, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Korea Society of Civil Engineers, 27(5A), 671-679.
- Park, S. Y., Kim, C. H., and Hong, S. Y. (2007), Ultimate Stress of Prestressing CFRP Tendons in PSC Beams Strengthened By External CFRP Prestressing, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, 19(6), 735-744.
- Jung, W. T., Park, Y. H., Park, J. S., and Kim, C. Y. (2011), Strengthening Effect of Reinforced Concrete Beams Strengthened with NSM CFRP Reinforcements and Various Reinforcement Details, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, 23(6), 781-790.
- Shim, N. H. and Park, Y. S. (2004), Experimental Study on the Strengthening Method of RC Beam Applied External Prestressing Using Strand or CFRP, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Korea Institute for Structural maintenance and Inspection, 8(3), 207-215.
- Lee, B. J., Park, J. G., Kim, M. Y., Shin, H. M., and Park, C. H. (2007), Experimental Study on Flexural Behavior of PSC I Girder and the Effect of External Prestressing, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, 19(6), 755-762.
- Oh, B. H., Kim, K. S., Lew, Y., and Yoo, D. W. (2001), Ultimate Behavior and Load Distribution Characteristics of Prestressed Concrete Girder Bridges, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Korea Society of Civil Engineers, 21(5A), 761-771.
- Han, M. Y., and Park, S. K. (1999), A Strengthening method of PSC Girder Using External Prestressing and Glass Fiber Reinforcement, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, 19(1-3), 387-395.
- Naaman, A. E., and Aldhairi, F. M. (1991a), Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning tendon: Part 1-Evaluation of the State of the Art, *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute, 88(5), 641-651.
- Naaman, A. E. and Aldhairi, F. M. (1991b), Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning tendon: Part 2-Proposed Methodology, *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute, 88(5), 683-690.
- Naaman, A. E., Burns, N., French, C., Gamble, W. L., and Mattock, A. H. (2002), Stresses in Unbonded Prestressing Tendons at Ultimate: Recommendation, *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute, 99(4), 518-529.
- Ozkul, O., Nassif, H., Tanchan, P., and Harajli, M. H. (2008), Rational Approach for Predicting Stress in Beams with Unbonded Tendons, *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute, 105(3), 338-347.
- Back, S. C., Song, J. H., Kim, H. B., and Kim, S. S. (2016), Reinforcement Effects Using V Type External Strands on PSC I Girder Bridges, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Korea Institute for Structural maintenance and Inspection, 20(3), 049-057.
- Korea Concrete Institute. (2012), Structural Concrete Design Code, Korea Concrete Institute, Seoul, 259-283.

Received : 10/19/2020

Revised : 12/24/2020

Accepted : 12/26/2020

**요 지:** 콘크리트 구조물은 재료의 열화나 초과된 하중 및 환경적 요인에 의해 점차 노후화되며 그 성능이 감소하여 구조물의 사용성 및 안전성에 영향을 미치게 된다. 노후 교량의 보강 공법 중 외부긴장 공법이 널리 사용 중이지만, 노후도에 따른 보강 효과 및 영향 규명은 미흡한 실정이다. 따라서 이 연구에서는 구조물의 노후도를 콘크리트 압축강도 및 인장철근량의 감소로 가정하고 노후도에 따른 외부긴장 공법의 보강 효과를 확인하기 위해 무보강 및 외부긴장 공법을 적용한 실험체의 4점 재하실험을 수행하여 보강 여부에 따른 거동을 분석하고 보강 효과를 확인하였다. 실험 결과 정착구의 조기 탈락에 따른 극한 상태의 보강량을 확인하기 어려웠으며, 이에 따라 외부긴장 보강 공법의 적용 시 앵커 볼트에 관한 규정 준수가 필요하다. 외부긴장 보강 여부에 따라 균열하중 및 항복하중이 증가하였으나, 균열 이전에는 보강 전, 후의 강성이 유사하여 보강 효과를 확인하기 어려웠다.

**핵심용어:** 외부긴장, 보강효과, 노후도, 노후교량, 교량 보강공법