확률·신뢰도에 기초한 표면매립보강(NSM) 콘크리트 철도교의 휨보강비 산정

Suggestion of Flexural Strengthening Ratio of NSM Strengthened Concrete Railroad Bridge based on Probability and Reliability.

오홍섭*	심종성**	주민관***	이기홍****	박지수****
Oh, Hongseob	Sim, Jongsung	Ju, Minkwan	Lee, Kihong	Park, Jisoo

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the critical strengthening ratio of concrete railroad bridge strengthened with NSM using CFRP plate. The railroad bridge is usually under vibration and impact in service state. Therefore, it is important that the effective strengthening performance must be exhibited under the service loading is acted. To widely apply the NSM method for the concrete railroad bridge in field, it needs that reasonable strengthening parameter such as strengthening ratio has to be investigated and evaluated when the strengthening design is conducted. In this study, to suggest more reasonable strengthening ratio, material and geometrical uncertainty was considered and applied by Monte Carlo Simulation (MSC) technique. Lastly, the critical strengthening ratio of concrete railroad bridge strengthened with NSM using CFRP plate was evaluated by using the limit state function with the target reliability index.

요 약

FRP를 적용하는 대표적인 보강공법으로는 외부부착공법으로서, FRP Plate 또는 fiber sheet를 사용하여 노후화된 보강면에 FRP 보강재를 부착하는 형식이다. 하지만, 이러한 외부부착공법은 FRP 보강재의 인장특성을 충분히 발휘하지 못하는 단점이 있다. 따라서 외부부착공법의 단점을 보완하기 위해 표면매립공법, 즉, Near Surface Mounted(이하 NSM)공법이 제안되었다. 이는 FRP 보강재를 매립함으로써 부재와 보강재의 부착 성능을 증가시킴에 따라 효율적인 응력전달 및 조기 debonding을 사전에 방지할 수 있으며, 이로 인해 FRP 보강재의 인장특성이 효율적으로 발휘될 수 있다.

효율적인 NSM 보강을 위해서는, 구조물에 가해지는 하중, 구성재료, 구조물의 기하학적 형상 등이 갖는 불확실 특성을 반영하여, 보강 후 구조물의 신뢰도를 기준으로 한 보강성능 평가가 필요하다. 본 연구에서는 노후화된 철도교 실교량 모델을 선정하여 외부하중, 재료 및 기하학적 형상의 불확실성을 Monte Carlo Simulation확률기법을 적용하여 그 분포특성을 분석한 후, NSM 보강에 대한 한계상태 함수를 통해 목표신뢰도에 부합할 수 있는 휨보강비를 도출하고자 하였다. 해석결과 LS-25하중을 상회하는 내하력 증진효과를 확률분포로써 확인할 수 있었다. 따라서 확률신뢰성기법을 적용한 보강설계의 유효성을 확인할 수 있었으며, 추후 다양한 보강공법으로의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

*정회원, 진주산업대학교 토목공학과 교수
**정회원, 한양대학교 토목공학과 교수
***정회원, 한양대학교 토목공학과 박사수료
****정회원, 한양대학교 토목공학과 석사과정

1. 서론

FRP를 적용하는 대표적인 보강공법으로는 외부부착공법으로서, FRP Plate 또는 fiber sheet를 사용하여 보강면에 FRP 보강재를 부착하는 형식이다. 하지만, 외부부착공법은 FRP 보강재의 조기탈락현상, 인장특성을 충분히 발휘하지 못하는 점 등의 단점이 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해 표면매립공법, 즉, Near Surface Mounted(이하 NSM)공법이 제안되었다. NSM 공법은 FRP 보강재를 매립함으로써 부재와 보강재의 부착 성능을 증가시킴에 따라 효율적인 응력전달 및 조기 debonding을 사전에 방지할 수 있으며, 이로 인해 FRP 보강재의 인장특성이 효율적으로 발휘될 수 있다. NSM 공법은 기존 외부부착공법에 비해, 철도하중의 주행에 의한 동적증폭효과를 고려한 충격하중 적용 시, 보강재의 debonding 현상을 최소화 할 수 있는 보강공법으로 판단된다.

효율적인 NSM 보강을 위해서는, 구조물에 가해지는 하중, 재료, 구조물의 기하학적 형상 등이 갖는 불확실 특성을 반영하여, 보강 후 구조물의 신뢰도를 기준으로 한 보강성능 평가가 필요하다. 본 연구에서는 노후화된 철도교 실교량 모델을 선정하여 외부하중, 재료 및 기하학적 형상의 불확실성을 MCS(Monte Carlo Simulation) 확률기법을 적용하여 그 분포특성을 분석한 후, NSM 보강에 대한 한계상태 함수를 통해 목표신뢰도에 부합할 수 있는 휨보강비를 도출하고자 한다.

2. 철도교 NSM보강 대상교량

본 연구에서는 적용된 철도교 실교량은 호남선 김제-신태인 역간에 위치한 H교량 하행선이며, 9m@4경간, 콘크리트 T-beam형식이며 1982년에 완공된 철근콘크리트 철도교 구조물이다. 대상 교량은 그림 1에 나타난 바와 같이 주형이 2개로 구성되어있으며 교량 폭이 5.4m인 단선교량이다.

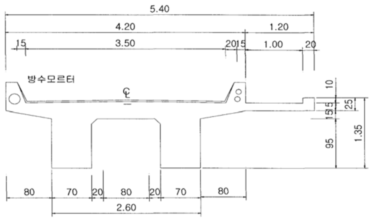


그림1. 철도교의 전경 및 단면도

3. 하중과 저항의 불확실성

3.1 하중의 불확실성

사하중은 구조물의 사용기간 동안 그 크기 및 위치가 거의 변하지 않으며 공칭값에 대한 평균값의 비는 1.0정도이고 분산계수는 0.06-0.15의 범위에 있는 것으로 보고되고 있다. 철도교 활하중의 경우, 현재 우리나라에서는 국유철도 건설규칙에서 LS하중을 표준열차하중으로 채택하고 있는데 설계등급에 따라 LS-18과 LS-22로 구분하여 사용하고 있다. 본 연구에서는 철도교 활하중의 불확실성 특성을 반영하기 위하여, 표 1에서 제시된 통계자료를 바탕으로 철도교 활하중의 불확실성 특성에 대한 확률분포를 도출하여 신뢰성 해석을 수행하였다.

3.2 저항의 불확실성

콘크리트는 압축강도의 변동성에 대한 불확실성을 나타낸 통계 자료를 이용하여 확률적 특성을 고려하여야 한다. 외국의 연구결과, 공칭강도 41.4 MPa의 콘크리트의 경우 0.10의 COV를 나타내는 것으로 보고되고 있으며 이는 대상 교량 거더 부분에 사용된 콘크리트의 강도(46.2MPa)와 유사한 특성치로서 Mirza의 연구결과에 따른 확률적 특성을 적용하였다.

표1. 하중의 확률적 특성

	Eccentric factor	COV
Dead load (site fabrication)	1.03	0.10
Dead load (manufactured)	1.00	0.25
Live load (including impact load)	1.10 ~ 1.20	0.18

공장제품으로 생산되는 철근은 통계적 분산이 비교적 적으며 품질관리가 용이하다. 본 연구에 사용한 철근은 표 2에 나타난 SD 40의 확률적 특성을 적용하였다.

FRP는 철근과 같은 분류체계가 확립되어 있지 않기 때문에 제품에 따른 각각의 특성을 파악하여야 한다. 본 연구에서는 ISO 527-5 실험방법을 통해 확률적 특성을 파악하였다. 인장강도와 탄성계수의 COV는 각각 0.031과 0.016을 사용하였다.

부재의 저항특성은 사용재료의 강도와 부재의 길이, 폭, 철근의 위치 등 부재에 대한 기하학적 성질이 필요하다. 본 연구에 사용된 단면의 보 폭과 공칭단면의 보 폭 사이의 편차는 평균 0.94mm, 표준편차 6mm의 값을 사용하였다.

표2. 철근의 확률적 특성

	f_s/f_n	COV	Average strength (MPa)	Number of data
SD 30*	1.20	0.064	360.0	822
SD 35	1.13	0.038	395.5	80
SD 40	1.09	0.048	436.0	773
Grade 40**	1.13	0.116	317.0	–
Grade 60	1.12	0.098	472.5	–

* : KS D 3504 강도 및 허용 응력도의 규격

** : ASTM A 615 : Standard Specification for Deformed and Plain Carbon Steel Bars for Concrete Reinforcement-AASHTO No. M 31

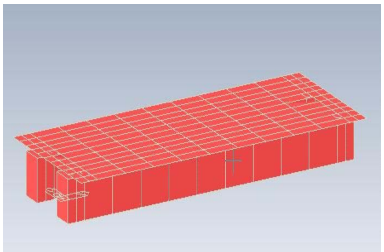
4. NSM 보강된 콘크리트 철도교의 신뢰성 해석

4.1 한계상태모델

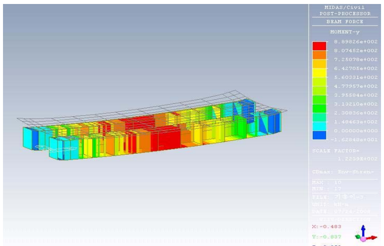
철도교의 한계상태 모델은 고속철도 교량에 작용하였던 등가내하력 평가법에 관한 연구로부터 등가내하력 평가법에 적용되는 구조부재의 특정파괴모드에 대한 한계상태모형을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g(\bullet) = R - (S_D + S_L) \tag{1}$$

R:구조저항, S_D, S_L:사하중 및 활하중에 의한 하중효과, $g(\bullet)$: 특정 파괴모드에 대한 한계상태를 나타내는 함수



(a) 대상교량 모델링



(b) 계수하중 재하 시 휨모멘트

그림2. 대상 교량의 모델링 및 해석결과

4.2 외부 계수하중 모멘트의 결정

본 연구에서는 대상 철도교량의 구조거동을 모사하고자, 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS Civil 2006 Ver.200을 사용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 복부 보는 솔리드로 모델링 하였으며, 상부 슬래브는 플레이트로 근사화하여 모델링하였다. 슬래브와 거더는 Rigid Link로 연결하였으며, 지점조건은 단순지지 Elastic Link로 적용하였다. 적용하중은 LS-22철도교 설계활하중을 재하하였다. 철도교 대상교량에 대한 유한요소 해석결과를 바탕으로 외부하중 효과를 확률분포로 평가하였다.

4.3 내부저항력 결정

철도교 대상교량의 복부 보를 대상으로 내부 저항력을 결정하였다. 기존 외부부착공법 해석식과 유사하게 철근 보강과 FRP Plate 보강에 대한 중첩법을 사용하였다. ACI440.2R-02에서 제시된 외부부착에 대한 휨모멘트 해석식을 NSM공법을 적용한 식으로 정리하여 다음 식(2)와 (3)으로 표현하였다.

$$\phi M_{n1} = 0.85 A_s \cdot f_y \left(d_1 - \frac{A_s \cdot f_y}{1.7 f_{ck} \cdot b}\right) \tag{2}$$

표3. 하중계수 및 해석결과

Load factor for Dead load (α_D)	Load factor for Live load (α_L)	By factored dead load ($\alpha_D M_D$)	By factored live load ($\alpha_L M_L$)
1.4	2.0	180.0 $kN \bullet m$	580.8 $kN \bullet m$

$$\phi M_{n2} = 0.85A_s \cdot f_y(d_1 - \frac{A_s \cdot f_y + A_{frp} \cdot f_{frp}}{1.7f_{ck} \cdot b}) + 0.85\psi_{frp} \cdot A_{frp} \cdot f_{frp}(d_2 - \frac{A_s \cdot f_y + A_{frp} \cdot f_{frp}}{1.7f_{ck} \cdot b}) \quad (3)$$

M_{n1}= 철근콘크리트 보의 철근 항복 시 내력모멘트, M_{n2}=보강된 철근콘크리트 보의 극한모멘트, A_s=인장철근의 단면적(mm^2), f_y=철근의 항복강도(MPa), d_1=보단면(인장철근)의 유효깊이(mm), d_2=보단면(CFRP보강재)의 유효깊이(mm), A_{frp}=보강된 CFRP 플레이트의 단면적(mm^2), f_{frp}= CFRP보강재의 파괴강도(MPa), ψ_{frp}=FRP재료 강도감소계수(=0.85), ϕ=강도감소계수(=0.85)

보의 내부저항력에 대한 확률특성은, 재료 및 구조적 불확실성을 반영하여, MCS (Monte Carlo Simulation)기법을 이용하여 한계상태함수에서 정의된 구조저항 분포특성을 평가하였다.

5. 신뢰성 해석에 기초한 NSM 보강공법의 휨보강비 산정

한계상태함수에서 신뢰도가 확보될 수 있는 Safety Margin은 AASHTO에서 규정하고 있는 목표신뢰도 지수(β_T) 3.5로 고려하였다. 그림 3은 보강비 증가에 의한 구조저항의 분포변화를 확률밀도함수(PDF)로 나타내었다. 그림 3에서 Q1과 Q2는 각각 LS-22과 LS-25활하중을 적용한 경우의 외부계수모멘트 확률분포를 표현한 것이다. R은 철도교 대상교량의 복부 보를 CFRP로 보강하지 않은 철도교의 저항모멘트 분포를 나타내는 지표이며, C1부터 C5까지는 CFRP의 보강비를 0.00057부터 0.00097까지 단계별로 증가시켰을 때 복부 보 단면의 저항모멘트 분포를 나타내는 지표이다. LS-22 하중에 의한 외력과 동일한 내력을 갖도록 가정한 R을 기준으로 내력모멘트 분포를 분석해 본 결과, β_T=3.5에 부합하는 보강비(0.00077)를 도출할 수 있었으며, 이는 LS-22 수준의 철도교의 내하력을 LS-25 수준 이상으로 향상시켜 교량의 충분한 안전도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

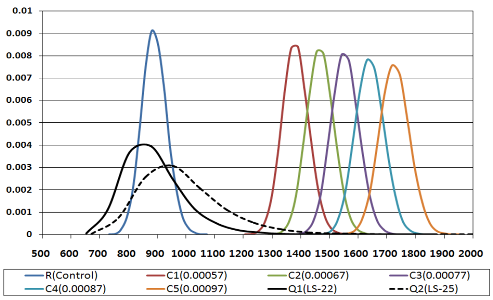


그림3. 저항모멘트와 하중모멘트의 빈도분석결과

6. 결론

본 연구에서는 확률 및 신뢰도 기법을 사용하여 CFRP Plate로 NSM보강된 콘크리트 철도교의 보강비를 산출하였다. 목표신뢰도지수는 AASHTO에서 규정하는 3.5의 값을 적용하였으며, 해석결과 LS-25하중을 상회하는 내하력 증진효과를 확률분포로써 확인할 수 있었다. 따라서 확률신뢰성기법을 적용한 보강설계의 유효성을 확인할 수 있었으며, 추후 다양한 보강공법으로의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2005년도 건설교통부 보수 보강된 콘크리트 교량의 성능평가/개선 기술개발 및 원격관리 시스템 구축사업(C105B1030001-05B0303-000)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 오병환, 고재군, 백신원, 이형준, 한승환, “철근콘크리트 구조물의 합리적인 신뢰성해석연구”, 대한토목학회 논문집 제13권, 2호, 1993, pp.121-133
2. J.A.O. Barros, A.S. Fortes, “Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits”, *Cement and Concrete Composites*, Volume 27, Issue 4, 2005, pp.471-480
3. S. A. Mirza, “Monte carlo simulation of dispersions in composite steel-concrete column strength intercation”, *Engineering Structures*, Vol. 20, Nos. 1-2, 1997, pp.97-104