

PSC I형 교량 바닥판의 철근노출 및 부식에 대한 구조적 안전성 분석

한만석¹, 박주현², 이종한³, 민지영^{4*}

Analysis of Structural Safety for Rebar Exposure and Corrosion in PSC I-Girder Bridge Slab

Manseok Han¹, Ju-Hyun Park², Jong-Han Lee³, Jiyoung Min^{4*}

Abstract: This paper evaluated the structural safety of an aging PSC I-girder bridge with rebar corrosion in the deck. The geometry and rebar of the bridge were designed based on an actual PSC I-girder bridge, and the numerical analysis was performed considering the crack of concrete and yielding of steel rebar. According to the evaluation criteria of Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, this study defined two criteria of rebar exposure and corrosion rates to construct a total of 32 corrosion scenarios. Rebar exposure was defined as the exposure of tensile rebars in the bridge deck due to the removal of cover concrete. The results of the analysis showed that the safety and rating factors of the bridge decreased with increasing rebar exposure and corrosion rates. For the rebar corrosion rate more than 50%, the safety grade of the bridge should be carefully evaluated for all the rebar exposure rate. When the rebar corrosion rate exceeds 57%, the bridge was evaluated as E grade regardless of rebar exposure rate. A correlation analysis for a 2% of rebar exposure rate found that the bridge was evaluated as A grade up to 55.8% corrosion rate, C grade up to 56.9%, D grade up to 58.5%, and E grade for corrosion rate greater than 58.5%. This study indicates the necessity of a quantitative evaluation of rebar corrosion for evaluating the structural safety of aging bridges.

Keywords: PSC I-girder bridge, deck, rebar exposure rate, rebar corrosion rate, safety factor, rating factor, safety evaluation

1. 서론

현황조사에 따른 데이터에 의하면 국내에 현존하는 총 교량은 35,902개이며 그 중에 PSC I형 교량은 8,132개로 22.6%를 차지하고 있다(MOLIT, 2020). 국내에 현존하는 교량은 대부분 1970년대에서 1980년대에 지어진 교량으로 공용연수가 30년에서 40년 이상 된 교량의 수가 많다. 한국 국토교통부 표준시방서(MOLIT, 2016)는 30년 이상 된 교량을 노후교량으로 정의하고 있는데 이는 공용연수 30년 이상 된 교량에 대해서 보수 및 보강에 대한 사례가 증가하였기 때문이다. PSC I형 교량 8,132개 중 공용연수가 30년이 넘는 교량은 총 665개로 8.2%를 차지하고 있으며, Park et al. (2020) 연구에 의하면 공용연수가 30년이 넘는 교량은 앞으로 2021년 779개, 2022년 896개로 계속해서 증가되어 유지보수 관리에 대한 관심이 많

아질 예정이다.

공용중인 교량에서는 노후화로 인해 콘크리트 균열, 열화, 표면 손상, 철근부식 등 안전성을 위협하는 다양한 현상이 발생한다. 이러한 현상 중 콘크리트 내부에 배근한 철근에서 부식이 발생하는 경우는 콘크리트 표면 손상으로 노출된 철근에서만 부식이 발생하는 것이 아니라 내부로도 부식이 진행된다. 한국시설안전공단의 정밀안전진단 세부지침(KISC, 2019)에 따르면 교량 시설물 종합평가는 상태평가와 안전성 평가로 이루어진다. 각 평가에서 철근부식을 다루는 상태평가 항목 중 콘크리트 바닥판에 대한 평가 기준은 철근부식 손상면적률 산정으로 이루어진다. 철근부식을 다루는 상태평가는 유일한 방법으로 정량적인 부식을 측정이 아니라 육안 조사에 따른 면적률로 등급을 산정한다. 즉, 상태평가에 의한 철근부식 평가는 철근이 노출되어 있는 부분에서는 철근부식이 진행되었다고 가정하고, 노출된 면적만을 기준으로 이루어지기 때문에 만약 철근이 노출된 면적이 작은 경우는 평가 등급이 높게 산정될 수 있다. 하지만 철근이 노출된 면적이 작지만 부식이 많이 진행된 경우는 육안으로 확인이 되지 않지만 내부적으로도 부식이 발생했을 가능성이 높고 교량의 안전성 면에서는 위험할 수 있다.

철근부식에 대한 선행 연구에 의하면, Chen et al.(2019)은

¹학생회원, 인하대학교 스마트도시공학과 박사과정

²학생회원, 인하대학교 스마트도시공학과 석사과정

³정회원, 인하대학교 사회인프라공학과 부교수

⁴정회원, 한국건설기술연구원 노후인프라센터 수석연구원

*Corresponding author: amote83@kict.re.kr

Sustainable Infrastructure Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10233, Rep. of Korea

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

FEM(Finite element method) 소프트웨어를 사용하여 철근의 불균일한 부식 과정에 대한 연구를 진행하였다. Fig. 1은 철근 콘크리트 구조물에 염화물 및 산소를 가하여 철근 부식이 발생하는 과정에 대해 설명한 것이다. 모서리부분에 배근된 철근과 중앙에 배근된 철근의 부식 현상을 FEM 시뮬레이션을 통해 비교분석하였다. 또한, 철근부식이 발생할 경우 철근 강도 변화에 대해 연구한 사례도 있다. Fig. 2는 Kashani et al.(2013)가 제시한 그래프로 부식에 따른 철근의 강도 변화를 항복강도와 극한강도로 나누어서 제시하였다. 실제 실험데이터를 통한 회귀분석을 실시하였고 부식에 따른 강도변화를 제시하였다.

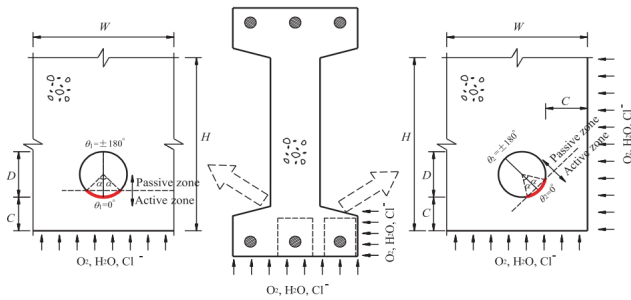


Fig. 1 Model for chloride infiltration into reinforced concrete section(Chen, 2019)

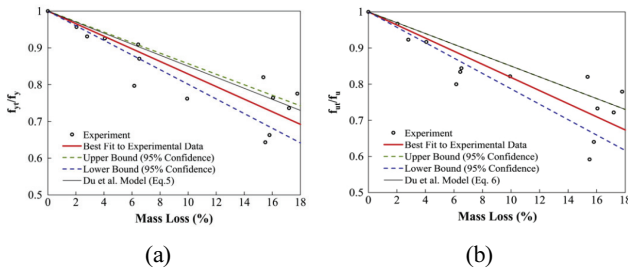


Fig. 2 Trend lines of test results for corroded rebars: (a) yield stress (b) ultimate stress(Kashani, 2013)

본 연구에서는 노후화로 인한 교량의 손상 사례 중 교량 바닥판 하부에서 철근 부식이 발생한 경우 구조적 안전성에 미치는 영향을 분석하였다. 국내의 PSC I형 교량 형태를 참고하여 철근 배근까지 상세 설계한 FEM기반 해석모델을 기반으로 철근부식 시뮬레이션을 실시하고 분석하였다. 철근부식 시뮬레이션은 철근이 노출된 면적과 철근이 부식된 정도를 기준 항목으로 정의하고 한국시설안전공단의 정밀안전진단 기준(KISC, 2019)을 참고하여 다양한 경우의 수를 고려하였다. 각각의 시뮬레이션 결과를 통해 교량의 구조적 안전성을 판단하고 향후 연구 방향을 제시하였다.

2. PSC I형 교량 바닥판 평가 개념 및 이론

2.1 교량의 바닥판 상태평가

현재 국내 교량에 대한 진단은 한국시설안전공단의 정밀안전진단의 상태평가 및 안전성평가(KISC, 2019)에 의해 실시된다. 교량을 바닥판, 거더, 교대, 교각 등 부재별로 나누고, 육안조사에 의해 등급을 산정하는 상태평가와 차량 재하시험에 의한 내하율, 안전율 측정으로 등급을 산정하는 안전성평가가 이루어진다. 교량의 최종 등급은 상태평가와 안전성평가 중 낮은 등급으로 산정된다.

본 연구에서 다루는 철근부식은 상태평가 시 정량적 평가가 아닌 육안에 따른 평가가 이루어지고 있다. 한국시설안전공단의 정밀안전진단 기준에서는 상태평가 항목 중에 콘크리트 바닥판 평가 기준이 있고, 열화 및 손상에 따라 c등급부터 철근부식 손상면적률 기준이 포함된다. 철근부식 손상면적률은 다음과 같이 철근노출면적률로 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{철근노출면적률}(\%) &= \frac{\text{철근노출면적}}{\text{조사단위면적}} \times 100 \\ &= \frac{\text{철근노출길이}(L) \times 0.25}{A(m) \times B(m)} \times 100 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, A 와 B 는 조사단위면적의 가로와 세로길이이다. 철근노출 길이 당 0.25m의 폭을 차지하는 것으로 가정하여 Eq. (1)이 적용된다. 콘크리트 바닥판에 대한 상태평가 기준에 따르면 c등급은 철근노출면적률이 2% 미만인 경우이고, d등급은 철근노출면적률이 2% 이상인 경우에 해당된다. e등급은 부식으로 인한 철근의 단면감소가 심하여 바닥판의 안전성이 저하되는 경우(KISC, 2019)에 해당된다. 이러한 상태평가는 육안에 의해서만 실시되며 철근이 부식된 정도는 파악하지 못하고, 철근노출면적률만 측정하기 때문에 손상면적률이 적은 반면 철근이 부식된 정도가 높을 경우는 교량의 안전성에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 상태평가 항목인 철근노출면적률과 철근이 부식된 정도를 기준으로 놓고 구조적 안전성을 분석하였다.

2.2 교량의 구조적 안전성평가

국내 교량에 대한 안전성평가 방식은 설계기준 차량 재하시험의 계측데이터를 이용하여 고정하중 및 활하중과 교량의 재료특성에 의한 저항하중을 비교하는 것이다. 한국시설안전공단에서 제안하는 안전성평가(KISC, 2019)에는 콘크리트교의 경우 강도설계법으로 설계되는 점을 감안하여 안전성검토도 일관성을 유지하도록 권장하고 있으며, 본 연구의 경우도

PSC I형 교량에 대해 안전성평가 방식을 설계강도법으로 적용하였다. 설계강도법에 의한 안전을 계산식은 다음과 같다.

$$\text{안전율}(SF) = \frac{\text{설계강도}}{\text{소요강도}} = \frac{\phi M_n}{M_u} \quad (2)$$

여기서, ϕM_n 은 극한 저항모멘트로 부재 재료특성에 의한 모멘트이고 ϕ 는 구조물 형식에 따라 1 또는 0.85를 사용한다. 본 연구에서는 휨부재로 ϕ 는 0.85를 적용하였다. M_u 는 설계하중에 의한 휨모멘트로 고정하중과 활하중에 의한 휨모멘트에 설계하중계수를 적용한 값이다. 안전율 수치에 따라 안전성평가 등급이 산정되며 한국시설안전공단에 따른 구조물 안전성평가 기준(KISC, 2019)은 Table 1과 같다. Table 1에서 B등급과 C등급은 안전율이 0.9에서 1 사이의 값으로 동일하지만, 재하시험에 의한 내하율의 결과에 따라 등급이 결정된다.

Table 1 Safety evaluation criteria for bridge structures(KISC, 2019)

Grade	Safety evaluation criteria
A	SF > 1.0
B	0.9 ≤ SF < 1.0, when the load-carrying capacity is evaluated greater than the design load
C	0.9 ≤ SF < 1.0,
D	0.75 ≤ SF < 0.9
E	SF < 0.75

본 연구에서는 내하율을 안전율과 동일하게 강도설계법으로 산정하였고 계산식은 다음과 같다.

$$\text{내하율}(RF) = \frac{\phi M_n - \gamma_d M_d}{\gamma_l M_l (1+i)} \quad (3)$$

여기서, γ_d 와 γ_l 은 각각 고정하중과 활하중 계수로 DB-24 하중에 따른 한국도로교설계기준(MOLIT, 2010)에 따라 1.3과 2.15이고, M_d 는 고정하중모멘트, M_l 은 활하중모멘트이며, i 는 충격계수를 의미한다.

2.3 활하중 최대휨모멘트 산정

2.2절에서 언급한 강도설계법에 의한 안전율과 내하율에는 활하중에 의한 휨모멘트(M_l)가 포함된다. 신뢰도 있는 안전율과 내하율 수치를 산정하기 위해서는 활하중에 의한 휨모멘트가 최대일 경우를 고려해야 한다. 본 연구에서 선정한 대표 PSC I형 교량은 DB-24 설계하중(MOLIT, 2010)으로 설계되

었고, Fig. 3은 최대휨모멘트가 발생하는 DB-24하중의 위치(KCI, 2010)를 표현한 것이다.

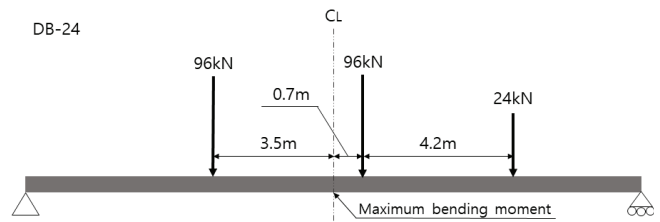


Fig. 3 Location of DB-24 load for the maximum bending moment(KCI, 2010)

3. PSC I형 교량 모델링 및 철근부식 설계

3.1 PSC I형 교량 수치 모델링

본 연구의 대상 PSC I형 교량은 국내에 현존하는 실제 교량의 형식을 참고하여 크기를 선정하고, 철근 배근까지 상세 설계하였다. PSC I형 교량은 4주형 단경간으로 경간장 30 m, 교량 폭 12.6 m, 바닥판 높이 0.27m, 거더 높이 2 m이며, 4주형 거더를 연결하는 가로보가 지점부 및 중앙부로 총 3군데 위치해 있다. 바닥판 철근의 경우는 상단 압축철근의 경우 피복두께 80 mm, 하단 인장철근은 피복두께 40 mm를 고려하여 배근하였다. 철근 간 간격은 125 mm와 250 mm를 혼합하였으며, 압축철근과 인장철근은 각각 83개이다. Fig. 4는 본 연구에서 사용한 PSC I형 교량 수치모델이며, Fig. 5는 수치모델의 단면도로 각 부재별 수치와 철근 배근 현황을 보여준다.

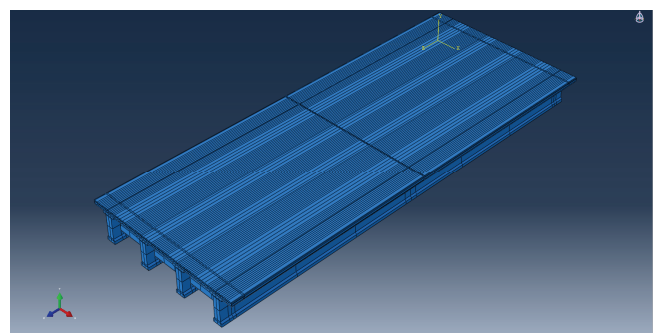


Fig. 4 Numerical analysis model of PSC I-girder bridge

재료특성의 경우 거더와 가로보는 철근과 콘크리트가 합성된 값으로 사용하였고, 바닥판은 철근부식을 고려하기 위해 콘크리트와 철근을 따로 정의하였다. Table 2는 수치모델에 적용한 재료의 제원이다. 실제 거동을 모사하기 위해 콘크리트의 파괴와 철근의 항복을 고려하여 소성모델로 설계하였다. 콘크리트의 경우는 콘크리트구조기준(MOLIT, 2012)을

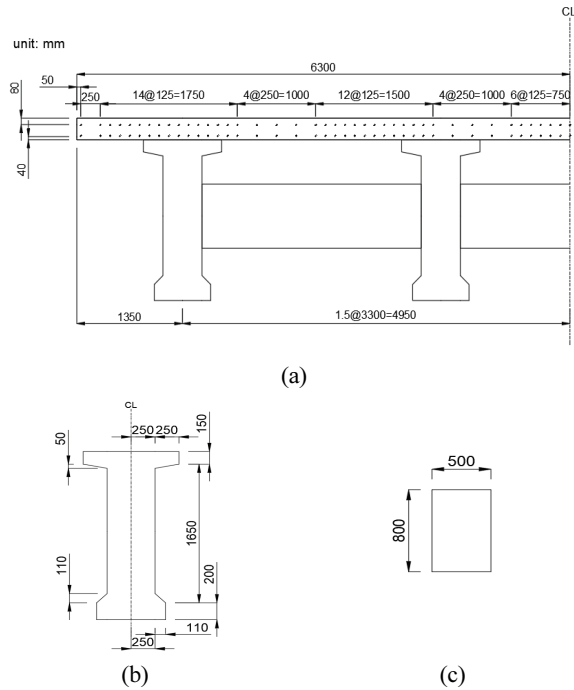


Fig. 5 Cross section of PSC I-girder bridge: (a) half size of the bridge (b) girder (c) cross beam

Table 2 Section properties of each section in PSC I-girder bridge

Section	Property
Deck	▪ Density of concrete: 2452 kg/m ³
	▪ E _c (Elastic modulus of concrete): 26702 MPa
	▪ Poisson's Ratio: 0.18
	▪ f _{ck} (Compressive strength of concrete): 27 MPa
Steel	▪ f _r (Modulus of rupture of concrete): 3.27 MPa
	▪ Density of steel: 7800 kg/m ³
	▪ E _s (Elastic modulus of steel): 200 GPa
	▪ Poisson's Ratio: 0.3
Girder	▪ f _y (Yield stress of steel): 400 MPa
	▪ Density of concrete: 2452 kg/m ³
	▪ E _c (Elastic modulus of concrete): 30867 MPa
Cross beam	▪ Poisson's Ratio: 0.18
	▪ Density of concrete: 2452 kg/m ³
	▪ E _c (Elastic modulus of concrete): 28554 MPa
	▪ Poisson's Ratio: 0.18

참고하여 다음 식을 적용하였다.

$$E_c = 8500 \sqrt[3]{f_{cu}} \quad (4)$$

$$f_r = 0.63 \sqrt{f_{cu}} \quad (5)$$

$$f_{cu} = f_{ck} + \Delta f \quad (6)$$

여기서, E_c는 콘크리트의 탄성계수이고, f_r은 콘크리트의 파

괴계수, f_{ck}는 콘크리트 설계기준압축강도이며, Δf는 f_{ck}의 값이 40 MPa 이하일 경우는 4 MPa, 60 MPa 이하일 경우는 6 MPa, 40 MPa과 60 MPa 사이인 경우는 직선 보간으로 결정된다.

철근의 경우는 항복변형률을 0.002로 정의하고 콘크리트 구조기준(MOLIT, 2012)에 따라 인장지배변형률의 한계를 0.005로 적용하였다. 사용된 철근은 직경 D16에 강도 SD400이며, 극한강도는 철근 인장시험에 의해 결정되는 점을 고려하여 본 연구에서는 항복강도 이후 극한강도로 도달하기까지 항복강도 크기로 일정하게 유지된다고 가정하였다.

3.2 철근부식 시나리오 구성

한국시설안전공단의 정밀안전진단의 상태평가 및 안전성 평가(KISC, 2019)에 정의된 철근노출면적률과 함께 철근이 부식된 정도를 기준으로 다양한 시나리오를 구성하였다.

철근노출면적률은 정밀안전진단의 상태평가 기준인 2%부터 8%, 15%, 20%로 총 4가지를 선정하였다. 2%의 10배인 20%까지의 변화를 보면서 교량 바닥판의 철근노출면적률이 구조적 안전성에 미치는 영향을 분석하였다. 철근노출면적은 바닥판 하부인 인장철근 부분에 발생하는 것으로 하여 바닥판과 거더가 맞닿는 면을 제외하고 바닥판의 전체 면적에서 철근노출 길이 당 폭 0.25 m을 적용하여 산정하였다. 노출면적은 직사각형 형태로 바닥판의 중앙에서 교량 폭을 기준으로 교축 방향 길이만큼 발생한 것으로 정의하였고, 노출된 면적의 두께는 콘크리트 피복두께에 철근 직경의 절반만큼으로 설정하여 철근의 절반이 노출되게 하였다. 철근과 콘크리트 사이의 부착응력은 존재하지 않는 것으로 가정하였다. Fig. 6은 철근노출면적률을 적용한 PSC I형 교량의 하부이다.

그리고, 본 연구에서는 철근이 부식된 정도는 철근부식률이라고 정의하였다. Kashani et al.(2013)에서는 철근부식 실험 데이터를 토대로 철근부식에 따른 질량감소율을 적용한 항복강도와 극한강도의 회귀분석 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$f_{yt} = f_y (1 - 0.015\psi) \quad (7)$$

$$f_{ut} = f_u (1 - 0.015\psi) \quad (8)$$

여기서, ψ는 철근부식 전 질량 대비 철근부식 후 질량의 감소율이며, f_{yt}와 f_{ut}는 철근부식에 따른 항복강도와 극한강도이다. Eqs. (7)과 (8)에 따르면 질량감소율은 66.66%까지만 고려할 수 있게 되어 있다. Kashani et al.(2013) 연구에 따르면 철근부식이 발생하여도 철근의 선형 탄성계수에는 변화가 없지만, 항복강도와 극한강도의 감소와 함께 항복변형률과 극한변형률은 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 질량감소율과 동일한 의미로 철근부식률을 적용하였고, 질량감소율

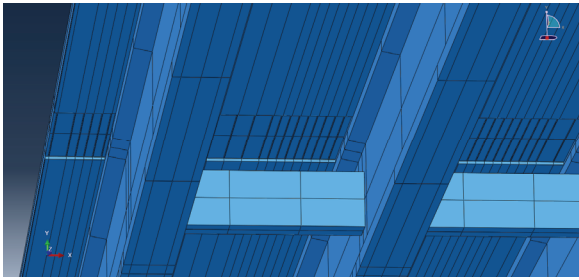


Fig. 6 Rebar exposed area of PSC I-girder bridge

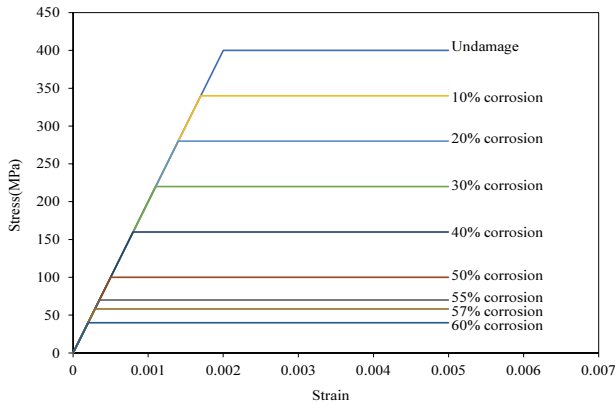


Fig. 7 Stress-strain relationship with the rate of rebar corrosion

을 철근의 공칭단면적이 감소하는 비율로 표현하였다. 철근 부식률은 철근노출면적률로 산정된 노출면적에만 적용하였고, 부식 정도는 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 55%, 57%, 60%로 총 8가지도 정의하였다.

Fig. 7은 정의된 8가지의 철근부식률에 대해서 응력-변형률 변화를 표현한 것이다. 철근부식이 일어나지 않은 철근의 항복강도 400 MPa 및 항복변형률 0.002를 기준으로 Eqs. (7)과 (8)을 적용하여 철근부식률에 따른 강도 변화를 산정하였고, 철근은 완전소성거동하는 것으로 정의하였다. 최종적으로 철근노출면적률 4가지와 철근부식률 8가지를 혼합하여 총 32가지의 철근부식 시나리오를 설계하고 시뮬레이션을 실시하였다.

4. 철근부식 시나리오에 따른 안전성 분석

4.1 교량의 철근부식에 따른 휨모멘트 분석

총 32가지에 대한 시뮬레이션을 실시하고 자중과 활하중에 대한 최대휨모멘트를 측정하였다. 자중에 의한 최대휨모멘트와 2.3절에서 언급한 활하중에 의한 최대휨모멘트는 바다판의 중앙부 단면에서 교축직각방향의 중앙을 기준으로 폭 1 m에 대해 측정하였고, 수직방향의 휨모멘트를 측정하는 기능을 사용하였다. Fig. 8은 최대휨모멘트를 측정된 위치와 최대

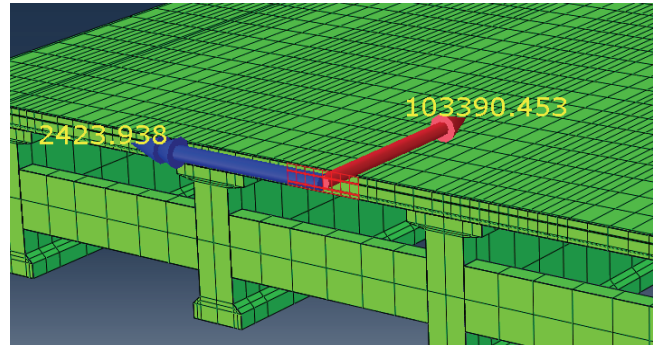


Fig. 8 The maximum bending moment defined in the cross section of PSC I-girder bridge

휨모멘트를 측정된 결과를 보여준다. 32가지 철근부식 시나리오에 대해서 M_d 와 M_b , ϕM_n , i 를 측정 및 계산하고 2.2절에 언급한 Eqs. (2)와 (3)을 적용하여 각각의 안전율과 내하율을 계산하고 철근노출면적률과 철근부식률에 대한 변화를 분석하였다.

4.2 PSC I형 교량의 철근노출면적률에 대한 안전성 분석

PSC I형 교량의 32가지 철근부식 시나리오에 대해서 철근부식률을 기준으로 철근노출면적률 4가지에 대해 안전율과 내하율의 변화를 분석하였다. 즉, 철근부식률이 동일할 경우, 철근노출면적률이 변화할 때 안전율과 내하율에 미치는 영향을 확인하였다.

Figs. 9와 10은 철근노출면적률이 증가할 때 안전율과 내하율의 변화를 그래프로 표현한 것이다. 철근노출면적률이 2%에서 20%로 증가함에 따라 PSC I형 교량의 안전율과 내하율은 선형 감소는 아니지만 모두 감소하는 경향을 보였다. 특히 철근노출면적률이 2%에서 8%로 증가할 때 안전율과 내하율은 급격히 감소하였다.

4.3 PSC I형 교량의 철근부식률에 대한 안전성분석

철근부식률이 증가할수록 안전율과 내하율도 감소하는 경향을 보였다. 따라서, 철근노출면적률을 기준으로 철근부식률 변화에 따른 PSC I형 교량의 안전율과 내하율을 분석하였다. Figs. 11과 12는 철근노출면적률 4가지에 대하여 철근부식률이 증가함에 따라 안전율과 내하율의 변화를 나타낸 것이다. 철근부식률이 10%에서 60%까지 증가하면서 안전율과 내하율이 감소하는 경향이 나타났다. 특히 철근노출면적률 2%의 경우는 안전율과 내하율이 급격히 감소하여 철근부식률 60%일 때는 각각의 철근노출면적률에 따른 안전율과 내하율의 차이가 최대 0.1 정도로 작게 나타나는 것을 알 수 있었다.

철근노출면적률과 철근부식률로 구조물 안전성 예측을 위해 Figs. 11과 12의 4가지 철근부식률 변화 그래프에 대해서

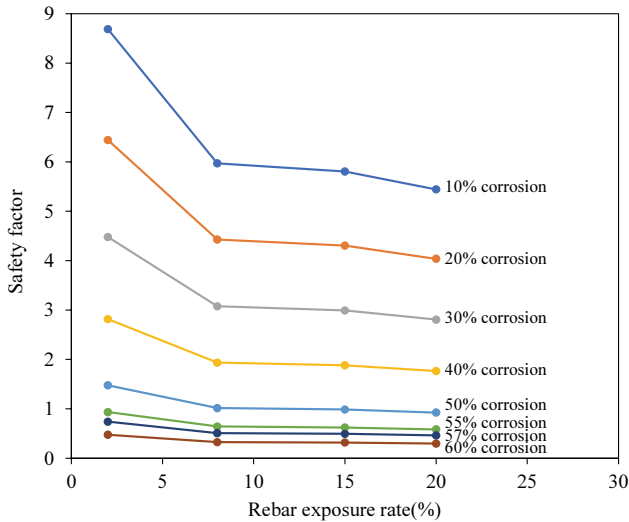


Fig. 9 Safety factor of PSC I-girder bridge with increasing rebar exposure rate

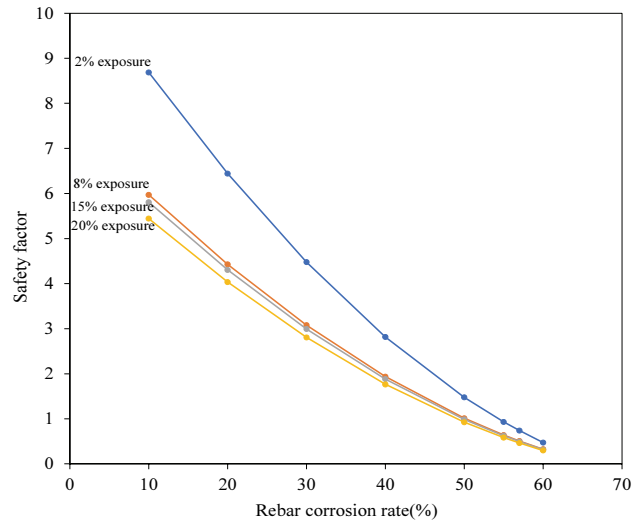


Fig. 11 Safety factor of PSC I-girder bridge with increasing rebar corrosion rate

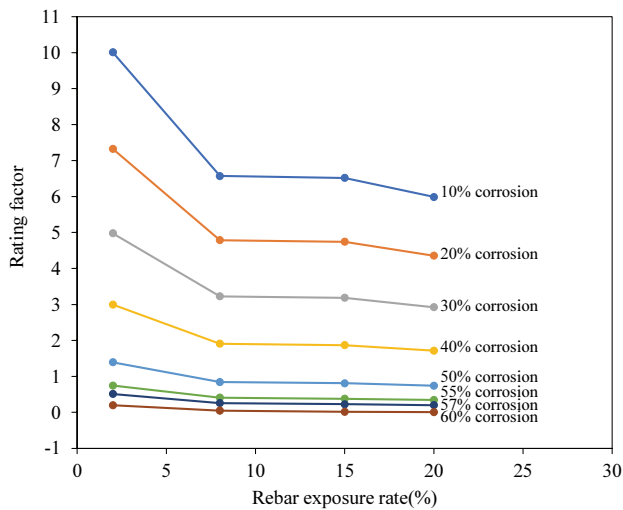


Fig. 10 Rating factor of PSC I-girder bridge with increasing rebar exposure rate

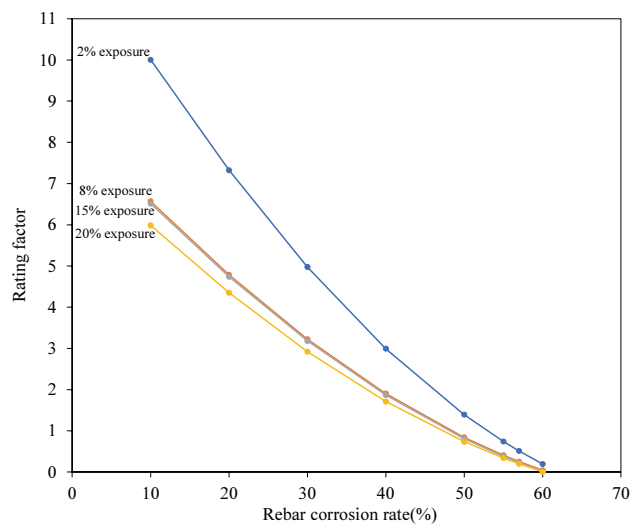


Fig. 12 Rating factor of PSC I-girder bridge with increasing rebar corrosion rate

추세선 분석을 하였다. 철근부식률이 10%에서 60%까지 증가할 때 안전율과 내하율 모두 초기에는 급격하게 감소하다가 점차 점차 완만하게 감소되는 되었다. 따라서, 2차 수식을 사용하여 철근부식률과 안전율 및 내하율의 상관관계를 분석하였다. 철근노출면적률 2%에 대하여 안전율 및 내하율에 대한 예측식은 다음과 같다.

$$\widehat{SF} = (1.60 \times 10^{-3})x_{corr}^2 - 0.27x_{corr} + 11.28 \quad (9)$$

$$\widehat{RF} = (1.90 \times 10^{-3})x_{corr}^2 - 0.33x_{corr} + 13.10 \quad (10)$$

여기서, x_{corr} 은 철근부식률이고, \widehat{SF} 와 \widehat{RF} 는 각각 x_{corr} 에 대

한 안전율과 내하율 예측값이다. 검증용 위해 8가지 철근부식률에 대해서 안전율 및 내하율 값과 Eqs. (9)와 (10)에 의해 계산된 값을 비교해본 결과, 안전율의 경우 최대 0.15, 내하율의 경우는 최대 0.14 오차로 거의 일치하게 평가되었다. 따라서 철근노출면적률에 대해서 철근부식률의 안전율과 내하율 추세선을 도출한다면 철근부식률 수치로 구조적 안전성 예측이 가능할 것으로 판단된다.

4.4 PSC I형 교량의 철근부식에 대한 구조적 안전성평가

철근노출면적률과 철근부식률 모두 증가함에 따라 안전율과 내하율이 감소하는 것으로 나타났다. 특히 철근노출면적률

보다는 철근부식률의 영향이 더욱 지배적인 것을 알 수 있었다. Table 1에 따라 안전성평가를 한 결과, 철근노출면적률이 2%, 8%, 15%, 20%이더라도 철근부식률이 40% 이하일 경우는 안전율이 모두 1 이상으로 A등급이 산정되었다. 즉, 철근노출면적률이 변화하여도 철근부식률이 40% 이하면 구조적으로 안전하다는 의미이다. 반면 철근부식률이 50%일 때는 철근노출면적률이 2%, 8%일 경우는 안전율이 1 이상으로 A등급이었지만, 15%, 20%일 경우는 안전율과 내하율이 모두 1보다 작아 C등급으로 산정되었다. 철근부식률이 55%일 경우는 철근노출면적률이 2%일 경우 안전율이 0.933으로 C등급이었고, 8%와 15%, 20%일 경우는 안전율이 0.75 이하로 E등급이 산정되었다. 철근부식률 57% 이상일 경우는 모든 철근노출면적률에 대해서 안전성등급이 E등급으로 산정되었다.

콘크리트 바닥판에 대한 상태평가 기준인 철근노출면적률 2%에 대하여 추세선 분석을 실시하여 안전성등급을 평가하였다. 안전율이 1 이상으로 측정되어 A등급이 산정되는 경우는 철근부식률이 약 55.8% 이하일 때였고, 안전율이 0.9 이상 1 미만에 해당되는 경우는 철근부식률이 약 55.8%~56.9% 일 때였다. 하지만 이 경우의 내하율은 0.79 이하로 측정되어 B등급이 아닌 C등급으로 산정되었다. 안전율이 0.75 이상 0.9 미만으로 D등급이 산정되는 경우는 철근부식률이 약 56.9%~58.5% 일 때이고, 58.5% 이상일 경우는 모두 E등급으로 산정되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 PSC I형 교량을 대상으로 철근부식이 구조적 안전성에 미치는 영향을 분석하였다. PSC I형 교량은 실제 구조물을 참고하여 수치해석 모델을 구성하였고, 바닥판의 경우는 철근 배근과 콘크리트의 파괴, 철근의 항복까지 고려하여 상세하게 설계하였다. 한국시설안전공단의 정밀안전진단 평가 기준을 참고하여 표면 손상으로 인해 철근이 노출된 면적과 철근이 부식된 정도를 기준으로 철근부식 시나리오를 구성하고 시뮬레이션을 실시하였다. 철근노출면적률 4가지와 철근부식률 8가지에 대해서 총 32가지의 시뮬레이션을 실시하였고, 강도설계법에 의거한 안전율과 내하율을 계산하고 안전성등급을 산정하였다.

철근노출면적률에 대해서 안전율과 내하율의 변화를 분석한 결과, 각 철근부식률에 대해서 철근노출면적률이 증가할수록 안전율과 내하율이 감소하는 것을 알 수 있었다. 하지만 철근부식률이 40%이하인 경우는 철근노출면적률 증가로 인해 안전율과 내하율이 감소하더라도 모두 1 이상이기 때문에 안전성등급이 A로 변화하지는 않았다. 철근부식률이 50% 이상일 경우부터는 모든 철근노출면적률에 대해서 안전성등급을 세밀하게 분석할 필요가 있었다. 특히 철근부식률 57%이

상인 경우에는 철근노출면적률에 관계없이 모두 E등급으로 산정되었다.

철근노출면적률과 철근부식률에 따른 안전성등급을 예측하기 위한 상관도 분석을 실시하였다. 철근노출면적률 2%에 대한 추세선 분석 결과, 철근부식률이 약 55.8%까지는 A등급, 56.9%까지는 C등급, 58.5%까지는 D등급, 58.5% 이상인 경우 E등급으로 산정되었다. 결론적으로 본 연구에서 진행한 시나리오에 따르면 PSC I형 교량 바닥판에 철근노출면적률이 2%가 발생하더라도 철근부식률이 56.9%이상인 경우는 구조적 안전성이 D등급으로 산정될 수 있다는 것이다. 즉, 철근노출면적률이 낮더라도 철근부식률이 높으면 교량의 안전성에 문제가 발생할 수 있다는 것을 확인하였다.

PSC I형 교량은 향후 매년 공용연수 30년 이상 된 교량의 수가 증가할 것으로 예상된다. 본 연구에 따르면 한국시설안전공단의 철근노출면적률도 중요하지만 철근부식률이 교량의 구조적 안전성에 매우 중요한 요인인 것으로 판단된다. 하지만 현재까지 철근부식률에 대한 정량적 평가가 이뤄지고 있지 않다. 이러한 점을 비롯하여 향후에는 실제 PSC I형 교량을 통해 철근이 부식된 정도를 측정하는 방법과 재하시험을 통한 실 데이터로 철근부식에 따른 구조적 안전성을 평가하는 등의 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 “철근부식을 고려한 교량의 안전율 평가”(과제번호: 20주요-대1-임무 20200035-001)과 제와 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비(20SCIP-B1469 46-03) 및 인하대학교의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2020), 2020 Road bridge and tunnel status report, Sejong, South Korea.
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), Standard specifications, Sejong, South Korea.
3. Park, J.H., An, H., Han, M., Min, J., and Lee, J.H. (2020), Examination of correlation between the condition evaluation results of superstructure and the safety and load-carrying capacity of bridges. *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 24(4), 64-71.
4. Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (2019), Specification for detailed violation of safety inspection and precision safety diagnosis(bridge), Jinju, South Korea
5. Chen, J., Zhang, W. and Gu, X. (2019), Modeling time-dependent circumferential non-uniform corrosion of steel bars in concrete considering corrosion-induced cracking effects, *Engineering Structures*, 201, 109766, 1-12.

6. Kashani, M.M., Crewe, A.J. and Alexander, N.A. (2013), Nonlinear stress-strain behaviour of corrosion damaged reinforcing bars including inelastic buckling, *Engineering Structures*, 48, 417-429.

7. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2010), Design standards of road bridges, Sejong, South Korea.

8. Korea Concrete Institute (2010), Safety evaluation criteria (Plan) and examples for commonly used concrete bridges, kimoondang,

Seoul, South Korea, 104-114.

9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2012), Concrete structure standard, Sejong, South Korea.

Received : 12/18/2020

Revised : 01/25/2021

Accepted : 01/27/2021

요 지 : 본 논문에서는 노후화된 PSC I형 교량을 대상으로 철근부식에 대한 구조적 안전성을 평가하였다. 대상 PSC I형 교량은 실제 구조물을 참고하여 철근을 배근하고 해석 시 콘크리트의 파괴와 철근의 항복을 고려하였다. 한국시설안전공단 정밀안전진단의 교량 평가 기준을 참고하여 철근노출면적률과 철근부식률로 구분하여 총 32가지의 철근부식 시나리오를 구성하였다. 철근노출은 교량의 바닥판 하부 인장철근이 콘크리트 피복 탈락에 의해 노출된 것으로 가정하였다. 각 시나리오별 해석 결과, PSC I형 교량의 안전율과 내하율은 철근노출면적률과 철근부식률이 증가함에 따라 감소하였다. 철근부식률이 50% 이상일 경우는 모든 철근노출면적률에 대해서 안전성등급을 세밀하게 분석할 필요가 있었으며, 철근부식률 57%이상인 경우는 철근노출면적률에 관계없이 모두 E등급으로 산정되었다. 철근노출면적률 2%에 대해서 상관도 분석을 실시한 결과, 철근부식률이 약 55.8%까지는 A등급, 56.9%까지는 C등급, 58.5%까지는 D등급, 58.5% 이상인 경우 E등급으로 평가되었다. 본 연구를 통해 노후화된 교량에 대한 철근부식의 정량적인 구조적 안전성 평가가 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : PSC I형 교량, 바닥판, 철근노출면적률, 철근부식률, 안전율, 내하율, 안전성평가
