

Steel Strap으로 횡보강된 콘크리트 바닥판의 매개변수해석을 통한 설계식 제안

Design Equation Suggestion through Parametric Study of Laterally Restrained Concrete Decks with Steel Strap

김철환¹⁾ 이성태^{2)*} 조병완³⁾
Cheol-Hwan Kim Seong-Tae Yi Byung-Wan Jo

Abstract

A deterioration of typical reinforced concrete (RC) bridge deck is due to the use of calcium chloride, cracks and water penetration inside of the deck slab with steel reinforcement. In order to eliminate the defects of RC decks in terms of material, therefore, the steel-strapped deck system is studied and developed by maximizing the arching effect while the girders are restrained using straps in lateral direction to the bridge. This parametric study was performed to analyze the structural characteristics of steel-strapped deck, and to identify the factors of the thickness, span length and lateral restraint stiffness of deck slab considering the concrete non-linearity. Finally, a design equation, which is adequate to South Korea, is suggested.

Keywords : Lateral restraint, Concrete deck, Parametric study, Design equation, Reinforced concrete

1. 서론

일반적으로 사용되는 철근콘크리트 (RC) 교량의 바닥판에는 겨울철 과도한 염화칼슘의 사용과 그로인해 유발되는 성능저하로 인해 균열이 발생하고 수분이 침투하여 바닥판 내부의 철근이 부식됨으로써 균열이 생성 및 진전된다. 이러한 RC 바닥판의 단점을 원천적으로 차단하기 위하여 바닥판 내부의 철근을 제거한 후 바닥판 외부에서 Steel strap을 이용하여 거더의 횡방향 거동을 구속시킴으로써 아칭효과를 극대화하고 내하력을 향상시킨 무철근 교량 바닥판이 최근에 북미를 중심으로 개발 및 실용화되고 있다 (CHBDC, 2000; Newhook and Mufti, 1996).

본 연구에서는 횡구속된 무철근 바닥판의 영향인자를 파악하기 위하여 바닥판의 두께, 지간장 및 횡방향 구속강성도 등에 대하여 콘크리트의 재료 비선형성을 고려한 비선형 유한요소 매개변수해석을 수행했다. 또한, 이러한 해석결과를 활용하여 횡구속된 바닥판의 구조적 거동특성을 분석하고

국내 KHBDC (2010)의 바닥판 최소두께를 고려하여 Steel strap으로 횡보강된 무철근 콘크리트 교량 바닥판의 설계식을 제안하고자 한다.

2. 비선형 모델링 및 유한요소해석

2.1 비선형 모델링

유한요소해석은 Fig. 1과 같이 폭 3m, 거더간격 2.2m, 두

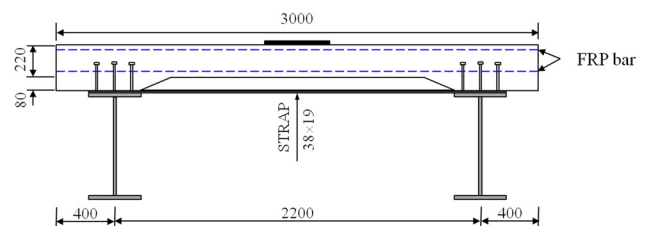


Fig. 1 Cross-section of laterally restrained deck (unit: mm)

1) 정회원, 포스코건설 기술연구소, Director
2) 정회원, 인하공업전문대학 토목환경과 교수, 교신저자
3) 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수

* Corresponding author : yist@inhac.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2014년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

께 220mm 실물 크기의 교량 바닥판 (Jo and Kim, 2012)을 대상으로 하였으며 Steel strap의 배치간격은 1m, 그리고 균열제어용 FRP bar는 125mm와 250mm 간격으로 배근하였다. 실험결과와의 비교 및 평가를 위한 유한요소해석은 재료의 비선형 모사가 가능한 범용프로그램인 Midas-FEA를 이용하여 수행하였다. 주형 거더는 4절점 판요소를 사용하였고, FRP bar는 내부 정의 Embedded reinforcement 요소를, Strap의 경우 트러스 요소를, 콘크리트의 바닥판의 경우 Solid 요소를 사용하였다. 바닥판과 주형은 해석 단계에 맞게 합성 전후를 구분하기 위해 합성 후에는 경계면의 자유도를 구속하였다. 지지점의 경계조건은 Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 실험량에서 교좌장치의 배치를 감안하여 종/횡방향으로 구속력이 발생하지 않도록 자유도를 이완시켰다.

각 요소의 물성치는 재료실험에서 얻은 결과를 사용하였으며, 전체 모델형상은 Fig. 2와 같고 이 모델을 이용하여 실험부재의 비선형해석을 수행하였다. 콘크리트 재료모델은 Smeared crack model에 근거한 Total strain crack model을 사용하였다.

콘크리트의 압축강도는 실험실에서 얻은 결과인 50MPa를 사용하였다. 압축강도에 대응하는 극한변형률 (0.0025)은 Fafitis와 Shah (1985)의 회귀분석 식으로부터 구하였다. 콘크리트

의 압축응력-변형률 곡선식 (Fig. 3)으로 Ascending part에는 횡보강을 고려한 Fafitis와 Shah (1985)의 식을 Descending part에는 Hognestad (1951)의 제안식을 적용하였다. Ascending part에서 Fafitis와 Shah (1985)의 식은 다음과 같다.

$$f_c = f_{ck} \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^A \right] \quad (1)$$

여기서, A 는 $E_c \epsilon_0 / f_{ck}$, 최대변형률 (ϵ_u)은 0.004, 극한변형률 (ϵ_0)은 $1.33 \times 10^{-4} \sqrt[3]{f_{ck}} = 0.0025$ (f_{ck} : psi) 그리고 콘크리트 탄성계수 (E_c)는 $3,300 \sqrt{f_{ck}} + 7,700$ 이다.

한편, Descending part의 Hognestad (1951) 식은 다음과 같다.

$$f_c = f_{ck} (\epsilon_u - 0.85\epsilon_0 - 0.15\epsilon_c) / (\epsilon_u - \epsilon_0) \quad (2)$$

인장응력-변형률 곡선식 (Fig. 4)으로는 파괴에너지 (G_f)를 고려하는 Hordijk (1991) 모델을 사용하였으며, Hordijk이 제시한 인장응력-변형률 곡선에서의 균열에너지는 CEB-FIP 1990

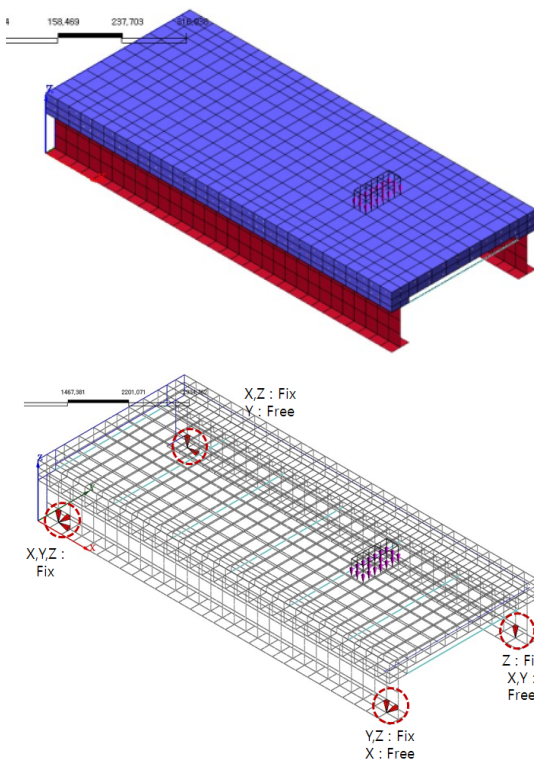


Fig. 2 Modelling of FEA (load-boundary condition)

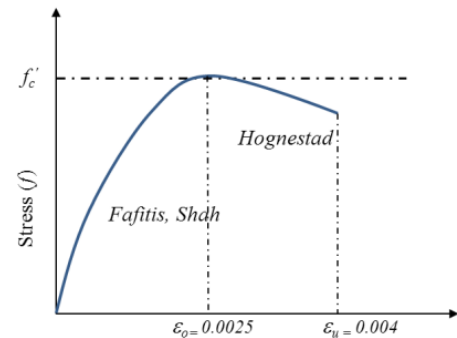


Fig. 3 Compressive stress-strain curve of concrete

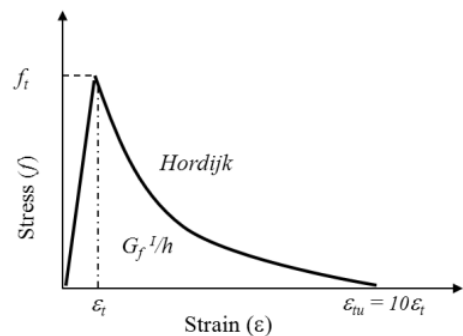


Fig. 4 Tensile stress-strain curve of concrete

기준에서 구하였다. 균열에너지는 $G_f = G_{f0}(f_{cm}/f_{cm0})^{0.7}$ 으로 표현되며, 여기서 G_{f0} 는 골재크기의 함수로 $44\text{J}/\text{m}^2$ ($0.04\text{N}/\text{mm}$), f_{cm} 은 콘크리트의 평균압축강도이고 f_{cm0} 는 10MPa 이다.

한편, 콘크리트의 균열폭 (h)은 $\beta_f(G_f/f_{ctm})$ 이다. 여기서 β_f 는 골재크기 함수로 6.0 , 콘크리트의 평균인장강도 (f_{ctm})는 $1.4(f_{ck}/f_{cm0})^{2/3}$ 이다.

2.2 유한요소해석 결과

유한요소해석 시, 하중으로는 Fig. 2에서와 같이 바닥판 외측으로부터 1.5m 거리에 분포하중을 재하하였다. Fig. 5는 파괴시까지 하중과 Steel strap의 응력변화에 대한 비선형 유한요소해석 결과이며 파괴하중은 $1,150\text{kN}$ 으로 파괴전인 960kN 에서부터 Steel strap은 이미 항복하였다. 이 결과는 파괴상태직전에서 이미 Steel strap이 항복응력 (240MPa)에 도달함을 보여주며 이는 Steel strap이 먼저 항복상태에 도달함으로써 적절한 연성이 확보되었음을 의미한다.

Fig. 6은 바닥판에 하중을 재하함에 따라 발생하는 균열양상에 대한 비선형해석 결과의 일부를 나타내고 있다. 해석결과, KHBDC (2010)의 후륜하중에 상응하는 100kN 재하시에 균열이 발생하지 않고 있으며, 200kN 재하시는 바닥판 하부에서 균열이 일부 관측되었고, 560kN 재하시는 하중 재하점 근처에서 상하부 관통균열이 발생하고, 960kN 재하시는 종방향 단부를 관통하는 균열이 발생함을 알 수 있었다. 파괴하중인 $1,150\text{kN}$ 에 도달하면 종/횡 양방향으로 단부 관통균열이 발생하여 결국 파괴에 도달했다.

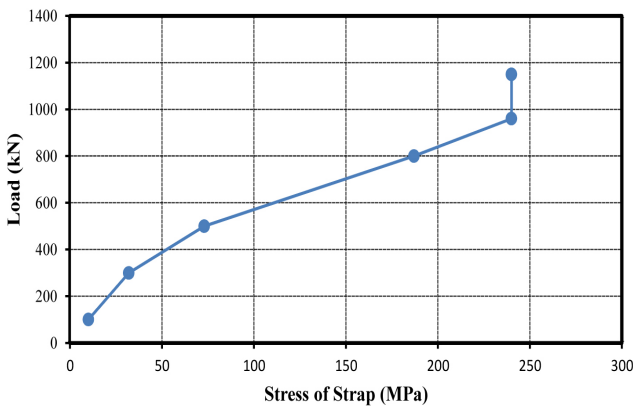


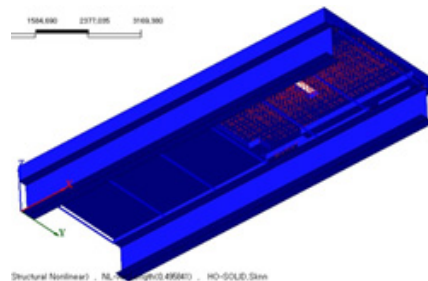
Fig. 5 Load with stress of steel strap

3. 매개변수해석

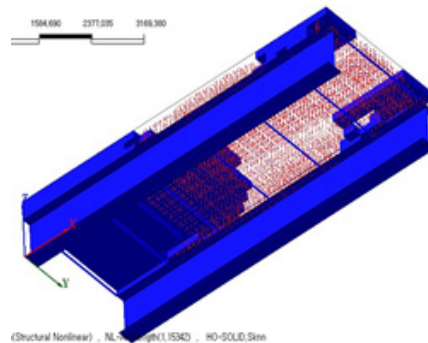
3.1 개요

무철근 바닥판의 구조시스템을 최초로 고안한 캐나다의 Mufti et al. (1991; 1993)은 실험적 연구를 통하여 새로운 바닥판 시스템을 검증하였다. 캐나다 도로국 설계기준 (CHBDC)에 규정되어 있는 무철근 바닥판의 Steel strap 설계식은 실험적 연구와 수치해석을 통하여 구한 경험식이다. 이 설계식은 캐나다의 하중 등 설계기준에 근거하여 만든 경험식으로 국내 설계기준에 바로 적용하기에는 무리가 있다. 특히, 캐나다 설계기준은 활하중 후륜하중을 87.5kN 으로 바닥판 최소두께를 175mm 로 규정하고 있으나, 국내 도로교설계기준은 후륜하중 96kN 으로 캐나다 설계기준보다 10% 정도 크며 바닥판 최소두께는 220mm 로 약 26% 정도 캐나다 기준보다 크다. 또한 현재까지도 바닥판의 두께나 지간장, Strap 배치 간격, Strap의 단면적 변화 즉 횡방향구속 정도가 편칭강도에 미치는 상관관계 등에 관한 연구는 국내외적으로 거의 전무한 실정이다.

본 연구에서는 이들 다양한 영향인자에 대한 유한요소해



(a) loading of 560kN



(b) loading of 1,150kN

Fig. 6 Crack patterns of deck at some loading steps

석을 통하여 국내 설계기준에 적합하며 보다 효율적인 설계를 위한 가이드라인을 제안하고자 한다.

3.2 설계영향인자 분석

무철근 횡보강 바닥판의 설계영향인자에 대한 분석을 위해 폭 3m, 지간장 2.2m, 두께 220mm 실물 크기의 교량의 바닥판을 대상으로 Midas-FEA를 이용하여 콘크리트 비선형성을 고려한 유한요소해석을 수행하였다.

3.2.1 바닥판의 두께 (t)에 대한 영향

바닥판 두께 220mm, 지간장 2.2m, Strap 간격 1m의 바닥판 (이하 표준바닥판)에 180mm, 250mm의 바닥판 두께를 추가하여 해석을 수행하였다.

180mm 바닥판 두께는 캐나다 도로국 설계기준의 바닥판 최소두께 175mm와 교차 검증하기 위하여 추가하였고, 두께 220mm는 국내 도로교설계기준 바닥판 최소두께에 상응하는 두께이며, 두께 250mm는 국내에서 가장 사용 빈도수가 높은 바닥판 두께이다 (Fig. 7).

외부 작용하중이 직접 재하되는 바닥판의 두께에 대한 매개변수해석 결과, 두께와 극한하중은 비례하고 있다 (Fig. 8). 따라서, 바닥판의 응력과 균열분포를 포함한 사용성 측면에서 큰 영향을 미치는 바닥판의 두께는 중요하게 검토되어야 할 매개변수로 판단된다.

3.2.2 바닥판의 지간장 (L)에 대한 영향

표준바닥판에 1.8m, 2.8m 그리고 3.6m의 바닥 지간장을 추가하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다 (Fig. 9).

Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 극한하중은 바닥판 지

간장에 반비례 (역수에 비례)하는 것을 보여주는데, CHBDC 기준의 설계식에서는 지간장의 제곱에 반비례하는 것으로 규정되어 있어 본 연구 결과와 뚜렷한 차이를 보여 주었다.

3.2.3 FRP bar의 배근간격에 대한 영향

표준바닥판에서 FRP bar에 의한 영향을 분석하기 위해 FRP bar를 125mm간격과 250mm간격으로 배근한 경우 및 FRP bar를 제거한 경우에 대하여 해석을 수행하였다 (Fig. 11).

Fig. 11에서 알 수 있는 바와 같이 FRP bar의 배근량에 따른 하중-변위곡선 간의 차이는 크게 나타나지 않았다. 이는 균열제어를 위하여 배치된 FRP bar의 배근량보다 1m 간격으로 설치된 Steel strap의 강성이 횡방향 거동에 지배적인 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

3.2.4 강제 주형의 횡방향 구속강성에 대한 영향

주형의 횡방향 구속강성에 의한 영향인자 분석을 위해 주

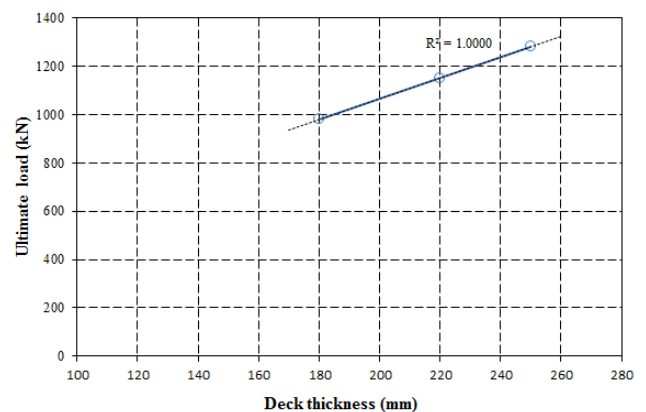


Fig. 8 Ultimate load with deck thickness (regression analysis)

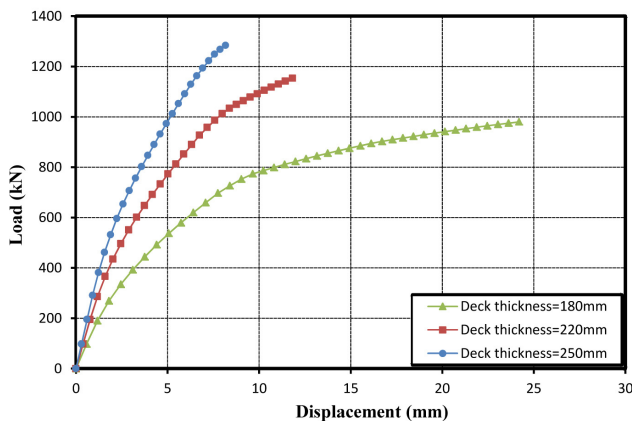


Fig. 7 Parametric study for deck thickness

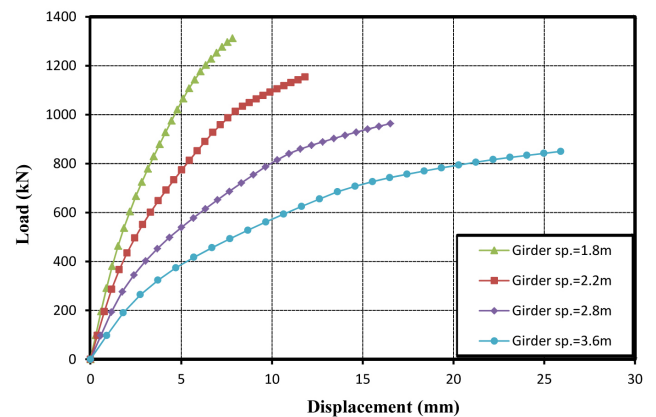
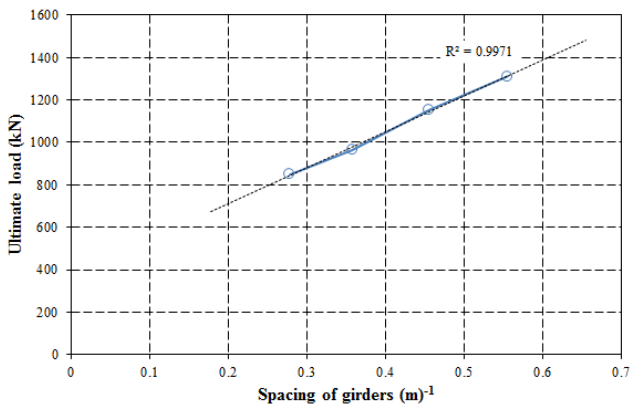
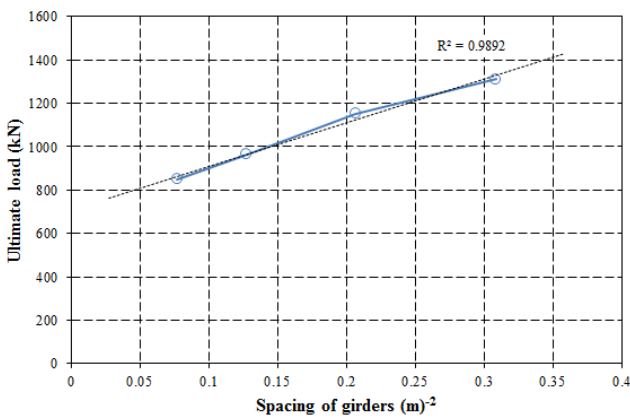


Fig. 9 Parametric study for deck span length



(a) ultimate load with girder spacing⁻¹



(b) ultimate load with girder spacing⁻²

Fig. 10 Ultimate load with girder spacing (regression analysis)

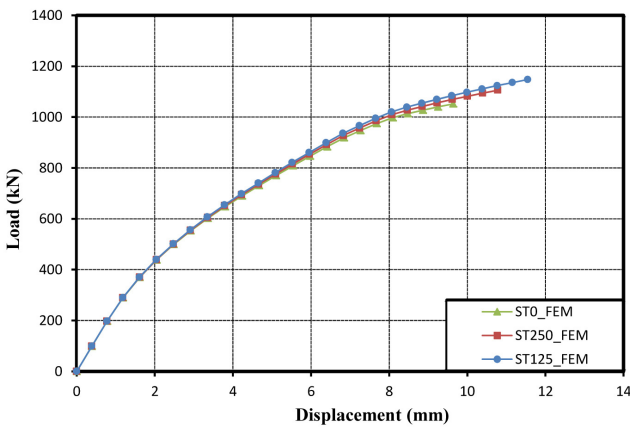


Fig. 11 Parametric study for spacing of FRP bar

형의 탄성계수 (E)를 표준바닥판 대비 0.5배, 1배, 1.5배 그리고 2배로 변화시키면서 해석을 수행하였다.

Fig. 12는 주형의 탄성계수에 대한 비선형 해석결과이다. 주형의 강성은 횡방향 구속에 영향을 미치게 되는데, 위의

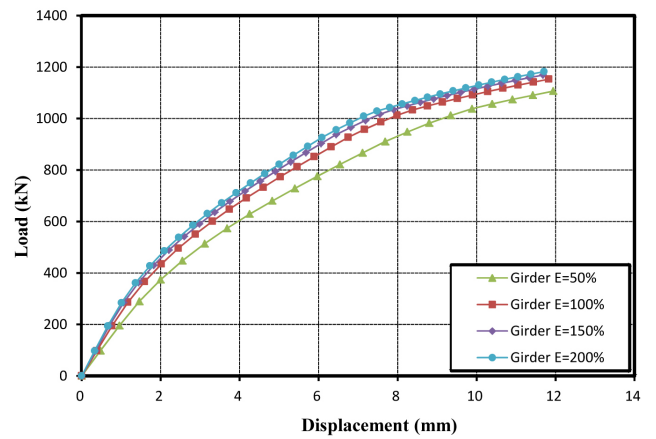


Fig. 12 Parametric study for lateral restraining stiffness of girder

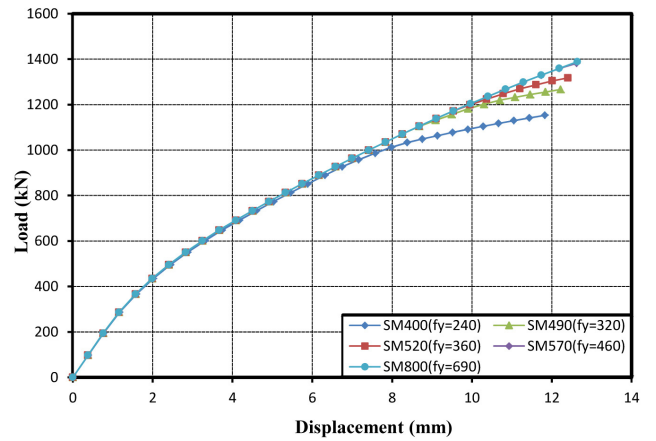


Fig. 13 Parametric study for yield strength of steel strap

결과에서와 같이 주형이 일정수준 이상 (표준 바닥판의 50%)의 강성을 가지면, 극한하중의 결과에는 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

3.2.5 Steel strap의 항복강도 (f_y)에 대한 영향

횡방향 구속장치인 Steel strap의 항복강도에 따른 영향을 분석하기 위해 표준바닥판에서 Strap의 강종을 SM400, SM490, SM520, SM570와 SM800으로 변화시키면서 해석을 수행하였다. 강종에 따른 항복응력은 각각 240, 320, 360, 460 및 690MPa이다.

Fig. 13은 Steel strap의 항복강도변화에 따른 극한하중의 변화값으로 항복강도 100% 증가시 극한하중은 20%정도 증가하며 SM570 이상 강종에서는 극한하중이 거의 일정한 값을 가진다. 또한 1,000kN 이하 하중에서는 Strap의 항복강도 변화에 대한 영향이 거의 없는 것을 알 수 있다.

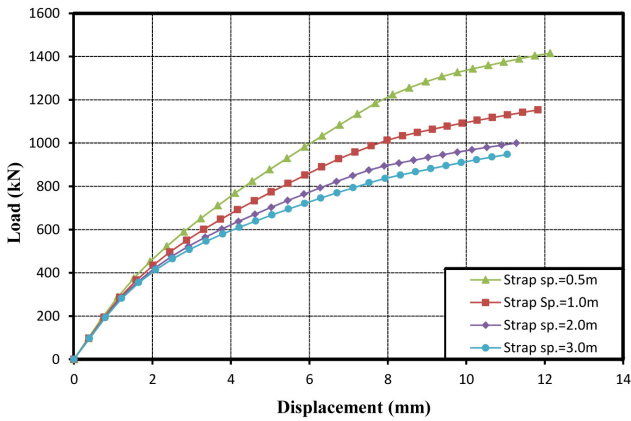


Fig. 14 Parametric study for spacing of steel strap

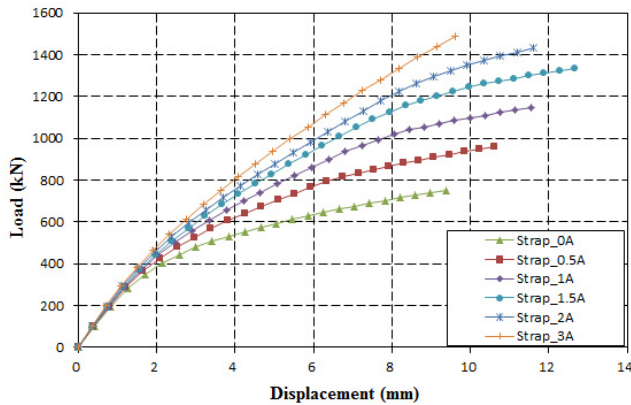


Fig. 15 Parametric study for cross-section spacing of steel strap

3.2.6 Steel strap의 배치간격 (S_s)에 대한 영향

표준바닥판 (Strap 간격 1m)에 0.5m, 2m와 3m의 Steel strap 배치간격을 추가하여 해석을 수행하였다. Fig. 14에서, 극한하중은 Strap 배치간격의 역수에 비례하는 선형관계를 보여줌을 알 수 있다.

3.2.7 Steel strap의 단면적 (A_s)에 대한 영향

바닥판 두께 220mm의 표준바닥판에서 Steel strap의 단면적 (강성)을 표준 바닥판 단면적 (A) 대비 0배, 0.5배, 1배, 1.5배, 2배 그리고 3배로 각각 변화시키면서 변수해석을 수행하였다.

Fig. 15로부터 Steel strap의 단면적이 증가함에 따라 표준 바닥판 대비 극한하중이 최대 35%정도 증가함을 알 수 있으며 일정 단면적 이상 (1.5A)에서는 내하력 증가량이 둔화됨을 알 수 있다.

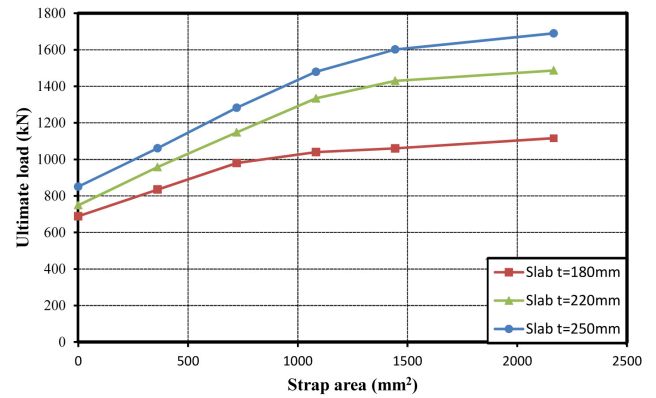


Fig. 16 Punching strength with cross-section of strap

3.2.8 바닥판의 횡방향 구속강성에 대한 영향

180mm, 220mm와 250mm의 바닥판 두께에 대하여 Steel strap의 단면적 (강성)을 표준바닥판 단면적 (A) 대비 0배, 0.5배, 1배, 1.5배, 2배 및 3배로 각각 변화시키면서 해석을 수행하였다. 3가지 두께에 대하여 실험결과 얻은 편칭강도-변위곡선으로부터 편칭강도-Strap 단면적 사이의 관계를 구하면 다음 그림 (Fig. 16)과 같다.

Fig. 16에서 알 수 있는 바와 같이 Strap의 단면적이 증가할수록 극한하중이 비례하여 증가하나, 무한정 증가하는 것이 아니라 일정한 Strap 단면적 이상에서는 강도 증가가 확연히 감소하며 바닥판 두께에 따라 차이가 있음을 보여준다.

이 결과로부터 바닥판 두께에 따라 가장 효율적인 단면의 강성을 보여주는 적절한 Strap 배치량이 존재함을 알 수 있다.

4. 바닥판 설계식의 제안

Azad et al. (1994)은 RC 바닥판의 편칭강도는 철근비에 비례하지만 일정수준 이상의 철근비는 편칭강도 증가에 기여하는 부분이 적다고 밝힌바 있다. Steel strap 바닥판 역시 Strap의 횡구속도가 일정수준 이상이 되면 편칭강도에 기여하는 부분이 작아질 것으로 판단된다.

매개변수해석에서 확인할 수 있는 바와 같이 바닥판의 극한하중 즉 편칭강도 (P_u)는 바닥판 두께 (t), 바닥판 지간장 (L)의 역수, Strap 간격 (S_s)의 역수에 비례한다. 또한 Strap의 단면적 (강성)과의 관계는 Strap의 단면적 (A_s)이 증가할수록 편칭강도도 증가하지만 일정 단면적 이상에서는 변화량이 거의 없음을 알 수 있다. 바닥판의 편칭강도와 각 매개변수와의 관계를 정식화하면 다음 식 (3)과 같다.

$$P_u \propto \frac{A_s t}{L S_s}, P_u = f_L \frac{E_s A_s t}{L S_s} \quad (3)$$

상기 식 (3)에서 E_s 는 Strap 탄성계수로 상수이며, f_L 은 미지의 계수로 길이의 차원을 가진다. 두 번째 식을 구속강성도 (restraining stiffness, K_s)로 표현하면 다음과 같다.

$$K_s = \frac{E_s A_s t}{L S_s} \quad (4)$$

구속강성도 K_s 는 바닥판의 횡방향 구속도를 표현한 것으로 stiffness (N/mm)의 단위를 가진다. CHBDC에서는 횡방향 구속정도를 아래의 식 (5)로 나타나는 구속계수 (restraining factor, F_s)의 값인 5~6MPa로 정의하고 있다.

$$F_s = \frac{E_s A_s t}{L^2 S_s} \quad (5)$$

식 (5)에서 알 수 있는 바와 같이 CHBDC에서의 구속계수는 응력의 단위 (MPa)를 가지며 물리적인 특성은 바닥판 지간길이 역수의 제곱에 비례할 수 있다. 이는 본 매개변수 해석에서 언급한바와 같이 구속강성도가 지간의 역수에 비례하는 것과 분명한 차이점을 보인다.

실질적으로 바닥판이 휨으로 파괴된다면 모멘트에 의해 바닥판이 지배되므로 바닥판 지간의 제곱의 함수 (식 (6))이겠지만 전술한 연구결과에서 알 수 있는 바와 같이 장지간을 제외한 일반적인 교량 바닥판은 주로 편칭전단으로 파괴되기 때문에 2방향 전단력에 의하여 지배되고 전단력은 식 (6)과 같이 바닥판 지간의 함수가 된다.

따라서 본 연구의 구속강성도 개념이 CHBDC의 구속계수 개념보다 좀 더 합리적인 선택으로 판단된다.

$$(Moment \propto L^2) \propto (1/P_u) \quad (6)$$

$$(Shear \propto L) \propto (1/P_u)$$

매개변수해석 결과에서 바닥판의 두께별 (180mm, 220mm 와 250mm)로 편칭강도와 구속강성도 K_s 값을 그래프화하면 Fig. 17과 같다.

바닥판 두께 180mm의 경우 K_s 값 13,000N/mm 이상에서 편칭강도 증가량은 거의 일정하며 이 값을 CHBDC의 구속

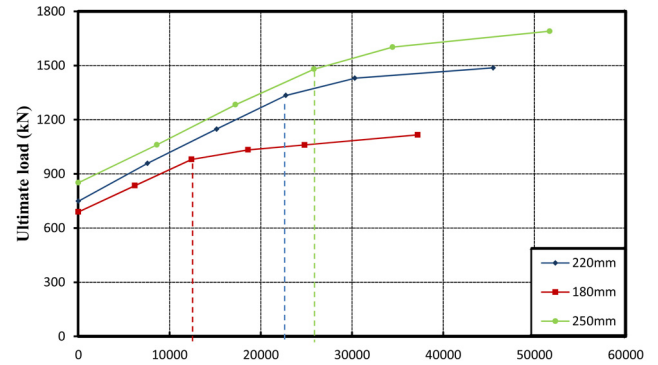


Fig. 17 Punching strength with restraining stiffness

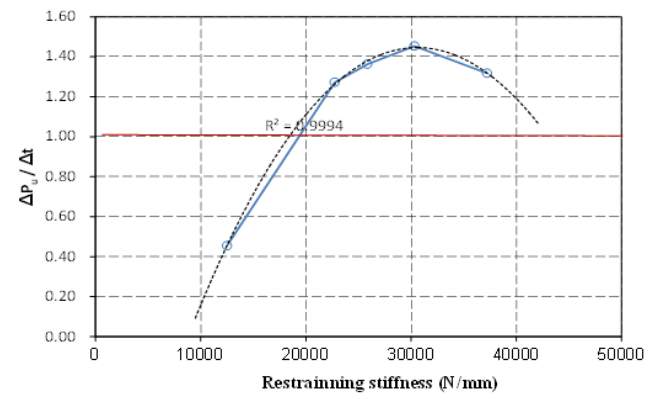


Fig. 18 Incremental of ultimate load with increase of deck thickness (regression analysis)

계수 F_s 로 환산하면 5.6MPa로 이는 CHBDC에서 정의하고 있는 범위 (5~6MPa)와 거의 일치함을 보여준다. 하지만 바닥판 두께 220mm 경우도 동일한 K_s 값인 13,000N/mm를 적용하면 바닥판 두께가 22% 증가하는데 편칭강도 증분량은 10%정도여서 비효율적인 설계임을 알 수 있다. 국내 도로교설계기준에서 제시하고 있는 바닥판 최소두께에 상응하는 두께 220mm 경우 Fig. 17에서 보는 바와 같이 K_s 값이 22,000N/mm 이상에서 편칭강도 증가량이 급격히 감소함을 알 수 있다. 또한 구속강성도 K_s 값이 22,000N/mm의 경우, 바닥판 두께가 180mm에서 220mm로 22%증가할 때 극한하중이 편칭파괴강도는 약 28% 증가하여 보다 효율적임을 알 수 있다. 이와 같이 바닥판의 두께 증가에 따른 파괴강도의 증분량을 계산하여 회귀분석을 수행한 결과, Fig. 18과 같이 가장 효율적인 구속강성도 K_s 값을 18,000N/mm로 도출하였다.

결론적으로 국내 도로교설계기준인 바닥판 최소두께 220mm 이상의 바닥판에서는 CHBDC에서 제시하고 있는 구속계수

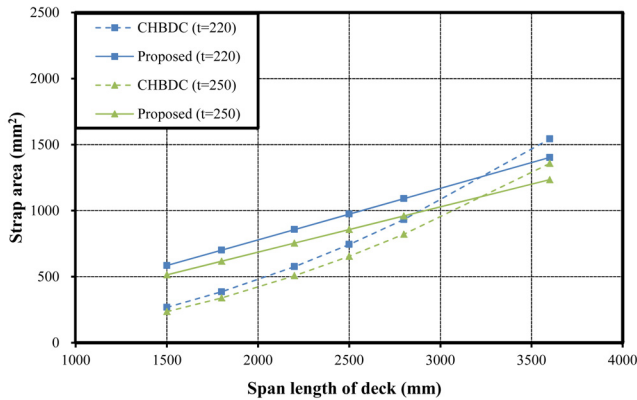


Fig. 19 Comparison of design equations with span length

(R)는 5~6MPa (K_s 값 13,000N/mm에 상응)이 아닌 수정된 Strap의 설계식을 제안하는 것이 필요하다고 판단한다.

식 (4)를 Steel strap의 단면적 A_s (mm²)에 대해서 정리하면 Strap 단면의 설계식은 다음 식 (7)과 같다.

$$A_s = K_s \frac{L S_s}{E_s t} \quad (7)$$

여기서 구속강성도 K_s 는 18,000N/mm, L은 바닥판 지간 (mm), S_s 는 Strap의 간격 (mm), E_s 는 Strap의 탄성계수 (210,000MPa), t는 바닥판의 두께 (mm)로 최소값은 220mm이다.

Strap의 간격을 1m로 고정하고 바닥판 두께 220과 250mm에 대하여 바닥판 지간장을 변화시키면서 Strap 단면 설계식을 그래프로 나타내면 Fig. 19와 같다.

Fig. 17에서, Strap의 새로운 제안식에서 제시한 구속강성도 ($K_s = 18,000$ N/mm)는 두께 220mm의 표준바닥판에서 펀칭강도 1,200kN에 상응하는 강성도이다. RC 바닥판의 실험결과 (Jo and Kim, 2012), 펀칭강도는 1,200kN을 약간 상회하므로 이는 K_s 값을 18,000N/mm으로 Strap 단면을 설계하면 220mm 두께의 무철근 바닥판은 철근콘크리트 바닥판에 상응하는 내하력을 가질 수 있음을 의미한다.

Fig. 19는 바닥판의 지간장에 따른 Strap의 설계 단면적을 보여주고 있는데 바닥판 지간이 작을수록 본 연구 제안식이 CHBDC보다 더 많은 Strap 단면적을 필요로 하며, 일반적으로 국내에서 가장 빈도수가 많은 2.5m 구간에서는 20%정도 철근 배근량이 증가한다. 이러한 사실은 차륜하중과 바닥판 최소두께에 대한 국내기준이 CHBDC보다 큰 값이라는 점을 감안할 경우 합리적인 것으로 판단된다.

5. 결론

이 논문에서는 전형적인 교량 바닥판의 내부에 위치한 철근을 제거하고, 주형에 Steel strap을 일정간격으로 배치하여 횡구속시킴으로써 바닥판의 내적 아치효과와 내하력을 향상시킨 새로운 형식의 바닥판인 무철근 콘크리트 교량 바닥판의 구조적인 특성에 대한 연구를 수행하였다. 바닥판 두께, 지간장 및 Strap 배치간격과 단면적 등 각 매개변수에 대한 비선형 유한요소해석을 수행하였으며, 각각의 영향인자 분석을 통하여 Steel strap 바닥판의 새로운 설계식을 제안하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 무철근 바닥판의 다양한 매개변수에 대한 비선형 유한요소해석을 통하여 국내 도로교설계기준의 바닥판 최소두께에 부합하는 Strap의 설계식을 개발하였다. 매개변수해석에서 알 수 있는 바와 같이 바닥판의 펀칭강도는 바닥판 두께에 비례하고 바닥판 지간 및 Strap 간격에 반비례한다. 또한 Strap의 단면적 (강성)과의 관계는 Strap의 단면적 즉 구속도가 증가할수록 펀칭강도는 증가하지만 일정 단면적 이상에서는 변화량이 확연히 감소하였다. 매개변수해석 결과를 분석하여 Strap의 설계식을 구속강성도의 함수로 제안하였으며, 바닥판 최소두께가 220mm인 도로교설계기준에 부합하는 구속강성도는 18,000N/mm임을 알 수 있었다.
- (2) 본 연구의 Strap 설계식은 CHBDC 기준과 비교하여 보수적인 결과를 보여주며 지간장 2.5m에서는 20%정도 Strap 단면적 상향이 필요하고 한계지간장인 3.25m 부근에서 CHBDC 설계기준과 일치함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 20131520100750).

References

1. Azad, A. K., Baluch, M. H., Abbasi, M. S., Kaiser, K. (1994), Punching capacity of deck slabs in girder-slab bridges, *ACI Structural Journal*, 91(6), 656-662.
2. Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC) (2000), Section 16, Fibre-Reinforced Structures, 688-706.
3. Fafitis, A., Shah, S. P. (1985), Predictions of ultimate

- behavior of confined columns subjected to large deformations, *ACI Journal*, 82(4), 423-433.
4. Hognestad, E. (1951), A study on combined bending and axial load in reinforced concrete members, Univ. of Illinois Engineering Experiment Station, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, IL, 43-46.
 5. Hordijk, D. A. (1991), Local approach to fatigue of concrete, Thesis of Delft University of Technology, 1-210.
 6. Jo, B. W., Kim C. H. (2012), A Study on Static and Fatigue Behavior of Restrained Concrete Decks without Rebar by Steel Strap, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 16(5), 137-147 (in Korean).
 7. Korean Highway Bridge Design Code (2010), Section 2.1, Load, 6-9 (in Korean).
 8. Midas FEA (2007), Advanced Nonlinear and Detail Analysis System, Analysis and Tutorial, MIDAS Information Technology Co., Ltd., 225-268 (in Korean).
 9. Mufti, A. A., Bakht, B., Jaeger, L. G. (1991), Fiber FRC deck slabs with diminished steel reinforcement, IABSE Symposium Proceedings (Leningrad), 388-389.
 10. Mufti, A. A., Jaeger, L. G., Bakht, B., Wegner, L. D. (1993), Experimental investigation of fibre-reinforced concrete deck slabs without internal steel reinforcement, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 20(3), 398-406.
 11. Newhook, J. P., Mufti, A. A. (1996), A reinforcing steel-free concrete deck slab for the Salmon River Bridge, *Concrete International*, 18(6), 30-34.

Received : 10/17/2013
 Revised : 11/12/2013
 Accepted : 12/09/2013

요 지

일반적으로 사용되는 철근콘크리트 교량의 바닥판에는 겨울철 과도한 염화칼슘의 사용과 그로인해 유발되는 성능저하로 인해 균열이 발생하고 수분이 침투하여 바닥판 내부의 철근이 부식됨으로써 균열이 생성 및 진전된다. 이러한 철근콘크리트 바닥판의 단점을 원천적으로 차단하기 위하여 바닥판 내부의 철근을 제거한 후 바닥판 외부에서 **Steel strap**을 이용하여 거더의 횡방향 거동을 구속시킴으로써 아칭효과를 극대화하고 내하력을 향상시킨 무철근 교량 바닥판이 최근에 개발 및 실용화되고 있다. 본 연구에서는 횡구속된 무철근 바닥판의 영향 인자를 파악하기 위하여 콘크리트의 비선형성을 고려하였고 바닥판의 두께, 지간장 및 횡방향 구속강성도 등에 대하여 유한요소법을 이용한 매개변수해석을 수행했다. 또한, 이러한 해석결과를 활용하여 우리나라의 실정에 적합한 설계식을 제안하였다.

핵심 용어 : 횡방향 구속, 콘크리트 바닥판, 매개변수해석, 설계식, 철근콘크리트