

피로강도와 사용성을 고려한 RC 바닥판의 최소두께

Minimum Thickness of RC Bridge Slab Considering Fatigue and Serviceability

황훈희* 조창빈** 김병석*** 정철현****
Hwang, Hoon Hee Joh, Changbin Kim, Byung Suk Jung, Chul Hun

ABSTRACT

This study was performed to propose the minimum thickness of RC slab that satisfies constructibility, fatigue safety, and serviceability requirements such as deflection control. Three different minimum thicknesses are calculated using concrete shear and rebar fatigue formulas, and deflection control, respectively, and checked by constructibility. The maximum of these three minimum thicknesses is proposed as the minimum thickness of RC slab, which shows that the minimum thickness requirement of RC slab from Korean Bridge Design Code can be thinner than now.

1. 서론

도로교설계기준해설(대한토목학회, 2003)에 의하면 바닥판 최소두께 규정의 목적은 피로에 의한 편침전단과 같은 바닥판의 국부적인 파손을 방지하고 최소한의 사용성과 시공성을 확보하기 위한 것이다. 이 최소두께 규정은 기존 중소지간의 바닥판에 대해서는 상당한 합리성을 갖는 것으로 평가되고 있다. 그러나, 2주형교(이하 2거더교) 등 소수거더교에서 채택되는 장지간 바닥판의 경우, 이 규정을 적용하면 장지간에서 바닥판의 두께가 지나치게 두꺼워져 소수거더교의 경제적 장점을 상실하게 되는 등 문제점이 발생한다.

이 연구에서는 바닥판 최소두께에 대한 정의를 바탕으로 장지간 RC 바닥판에 적절한 최소두께를 바닥판 전단피로강도식, 철근 피로강도식, 처짐 제한 규정을 이용하여 산정하였다. 바닥판 지간별로 산정된 최소두께를 현행 최소두께 규정과 비교한 결과, RC 바닥판의 설계 두께를 시공성, 사용성, 피로 안전성을 저하시키지 않으면서 현행 최소두께보다 얇게 할 수 있는 것으로 나타났다.

2. 전단피로식에 의한 최소두께

전단피로식으로부터 바닥판의 최소두께를 계산하기 위해 3차원 유한요소해석을 이용하여 설계하중에 의한 최대단면력의 크기를 후륜, 중륜, 전륜의 영향을 고려하여 구하였다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 객원연구원, 단국대학교 박사과정 수료

** 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원, 공학박사

*** 정회원, 한국건설기술연구원 연구위원, 공학박사

**** 정회원, 단국대학교 토목공학과 교수, 공학박사

바닥판의 사용연한 동안의 반복재하횟수는 실제 통행특성자료를 근거로 하여 결정되어야 하나 체계적인 교통조사결과가 없는 실정이다. 여기서는 바닥판의 가장 불리한 재하위치에 설계트럭의 후륜하중이 2백만회 통과하는 것으로 설정하였다.

바닥판 콘크리트의 전단피로는 松井 등(1997)의 제안식을 재하하중의 위치나 개수에 관계없이 적용할 수 있도록 수정하여 평가하였다. 수정된 바닥판 전단피로강도식은 식(1)과 같다. 초기균열에 의해 단위화된 바닥판의 정적 편칭전단강도는 식(2)에 나타내었다.

$$\log(Q/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 0.390 \quad (1)$$

$$P_{sx} = 2\tau_{max} \cdot X_m \cdot B + 2\sigma_{tmax} \cdot C_m \cdot B \quad (2)$$

여기서, X_m 은 인장축 콘크리트를 무시한 주철근 단면의 중립축 깊이(cm), C_m 은 주철근의 피복두께(cm), τ_{max} 은 콘크리트 최대 전단강도($=0.252f_{ck} - 0.000246f_{ck}^2$, kgf/cm^2), σ_{tmax} 은 콘크리트 최대 인장강도($=0.583f_{ck}^{2/3}$, kg/cm^2)이고 B 는 바닥판의 균열로 인해 보처럼 거동하는 폭(cm)이다.

단위화 바닥판의 정적내하력에 대한 식(2)로부터 X_m 과 B 를 전개하여 아래와 같은 2차 방정식을 구할 수 있다.

$$ad_m^2 + bd_m + c - P_{sx}' = 0 \quad (3)$$

여기서, $a = 4\tau_{max} k_m$, $b = 2\tau_{max} k_m (b - 2D) + 4\sigma_{tmax} C_m$, $c = 2\sigma_{tmax} C_m (b - 2D)$ 이다.

최대전단력과 2백만회 반복재하횟수에 의해 식(1)로부터 단위화 바닥판의 요구되는 정적내하력 P_{sx}' 을 구하고 그림 1과 같은 절차에 의해 바닥판의 전단피로를 만족하는 최소두께를 결정하였다.

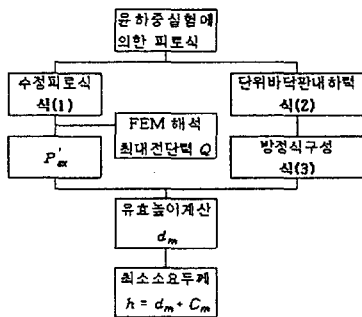


그림 1. 전단피로식에 의한 최소두께

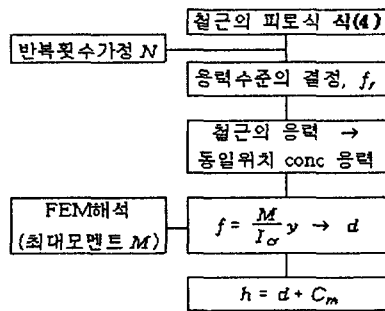


그림 2. 철근휨피로식에 의한 최소두께

3. 철근휨피로식에 의한 최소두께

철근의 휨피로는 식(4)의 Tilly의 피로강도식(Mallet, 1991)을 적용하여 검토하였다. 식(4)와 전단피로에 의한 최소두께를 구할 때와 같은 2백만회 반복재하횟수를 이용하여 철근의 응력수준을 결정할 수 있다. 철근의 응력으로부터 환산된 콘크리트 응력과 최대모멘트값을 휨응력 공식에 대입하여 그림 2와 같은 방법으로 최소두께를 구하였다. 이 때, 콘크리트의 응력은 균열응력을 초과하므로 균열환산

단면2차모멘트를 사용하였다.

$$\log f_r = 2.87 - \frac{1}{9} \log N \quad (4)$$

여기서, N 은 반복재하횟수이고 f_r 은 활하중에 의한 응력(N/mm^2)이다.

3. 처짐제한에 따른 최소두께

공용상태의 RC 바닥판은 하면의 양방향 균열로 인해 이방성 거동을 하게 된다. 여기서는 계산의 편의를 위해 교축 및 교축직각 방향에 대해 각각 전단면 2차모멘트에 대한 균열환산단면 2차모멘트의 비를 구하였으며, 교축직각방향(주철근단면)에 대한 교축방향의 비로써 이방성도를 정의하였다. 콘크리트의 설계기준강도와 바닥판의 지간에 따라 계산된 이방성도를 표 1에 나타내었다. 이방성도의 비율에 따라 유한요소해석모델의 교축 및 교축직각 방향 탄성계수를 수정하였으며 두께를 변화시켜가면서 반복해석을 수행하여 최대처짐량이 허용처짐과 일치하는 두께를 구하였다.

표 1 RC바닥판의 균열발생에 따른 이방성도

지간(m) \ f_{ck}	이 방 성 도					평 균	
	240	270	300	350	400	지간별	누적
2	0.47	0.46	0.45	0.43	0.42	0.45	0.45
3	0.57	0.56	0.55	0.54	0.54	0.55	0.50
4	0.55	0.54	0.53	0.53	0.52	0.53	0.51
5	0.52	0.52	0.51	0.49	0.49	0.51	0.51
6	0.49	0.48	0.48	0.47	0.47	0.48	0.50
7	0.47	0.46	0.46	0.45	0.45	0.46	0.50

4. RC 바닥판의 최소두께 제안

바닥판 최소두께에 대한 정의를 바탕으로 장지간 RC 바닥판에 적절한 최소두께를 제안하였다. 바닥판 전단피로강도식, 철근 피로강도식, 처짐 제한 규정을 이용하여 산정한 최소두께를 강도설계법에 의한 최소휨설계두께와 비교하였다(그림 3, 4, 5).

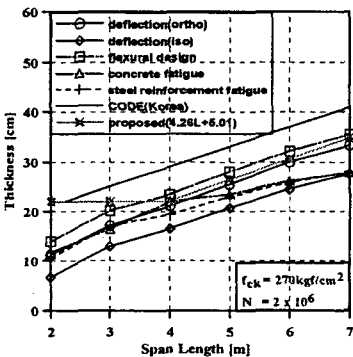


그림 3. 270 kgf/cm², 2백만회

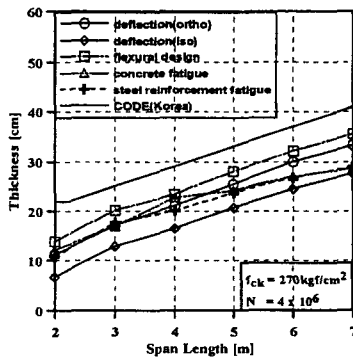


그림 4. 270 kgf/cm², 4백만회

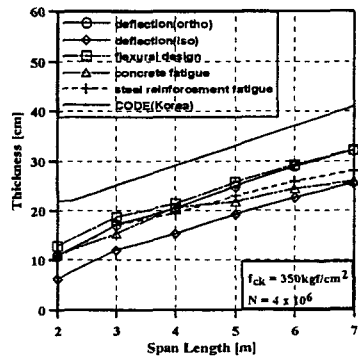


그림 5. 350 kgf/cm², 4백만회

고강도콘크리트의 사용과 장지간화 추세에 따라 바닥판 콘크리트의 전단피로보다 철근의 휨피로가 선행될 가능성이 있는 것으로 나타났으며 이방성을 고려한 처짐에 의해 도출된 두께가 피로에 의해 계산된 소요두께보다 크게 나타나므로 RC 바닥판의 사용성은 피로보다는 처짐에 의해 제어되어야 할 것으로 판단된다. 최소휨설계두께는 피로나 처짐 등에 의한 최소두께에 대해 안전측으로 나타나므로 일반적인 하중조건하에서 사용성을 만족할 것으로 예상되었다.

따라서, RC 바닥판의 최소두께를 아래와 같이 제안하였다.

$$t_{\min} = \max(22, 4.26L + 5.01) \quad (5)$$

여기서, L 은 바닥판의 지간(m)이다.

식(5)의 제안식과 현행 도로교설계기준의 바닥판최소두께 규정을 비교하면 RC 바닥판의 경우, 특히 장지간인 경우, 바닥판의 시공성, 사용성, 피로안전성을 확보하고도 현재의 최소두께 보다 얇게 설계할 수 있을 것으로 나타났다.

제안된 RC 바닥판의 최소두께는 해외에서 제안된 전단피로강도식과 철근 피로강도식을 사용하여 이론적으로 산정된 것으로 피로거동에 있어서 국내의 특성이 반영되지 못한 단점이 있다. 따라서 이 제안식의 실제 적용을 위해서는 국내실정을 고려한 피로평가식에 의해 반드시 검토되어야 할 것이다. 이를 위해 국내실정을 고려한 바닥판 전단피로강도식 및 철근 피로강도식의 개발이 절실히 요구된다.

5. 결론

RC 바닥판 콘크리트의 전단피로 및 철근의 휨피로 거동과 처짐 제한을 고려한 최소두께를 이론적으로 구하여 이를 제안하였으며 강도설계법에 의한 최소휨설계두께와 비교하였다.

제안된 최소두께에 비하면 현행 도로교설계기준의 바닥판 최소두께 규정은 지나치게 안전측인 것으로 경제적인 바닥판 설계를 위해서 보다 얇은 바닥판의 설계가 허용돼야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 대한토목학회(2003), “도로교설계기준해설”, 대한토목학회
2. 松井繁え(1997) 床版の技術開發 -耐久性の向上, 施工合理化. 橋梁と基礎, Vol.31, No.8, pp.84~94.
3. G.P.Mallet(1991), "Fatigue of Reinforced Concrete", HMSO, London.