

도로교 RC 바닥판의 피로파괴에 관한 연구

Fatigue failure of RC decks in highway bridge

김 경찬* 西林新蔵** 井上正一** ○ 권 혁문**
Gyong-Chan Kim S.Nishibayashi S.Inoue Hyug-Moon Kwon

ABSTRACT

Possibility of fatigue failure in punching shear of reinforced concrete decks of highway bridges is analytically investigated by applying Matsui et al.'s experimental finding to models of 2-meter span decks designed in compliance with previous and current codes.

Decks made of concrete of compressive strength of 240kg/cm² showed longer fatigue life than decks made of 210kg/cm² concrete at the same M_d/U ratios; higher M_d/U ratio resulted in longer fatigue life but its effect is insignificant in decks having effective depths of 14 and 15cm. Decks designed to higher load factors as specified by current codes showed longer fatigue life than decks designed to lower load factors specified by previous codes; yet fatigue failure appeared to occur in both decks within their normal life span, thus indicating need for redefining the minimum deck thickness.

1. 서론

PC 및 강합성 도로교 바닥판은 대부분이 철근콘크리트(이하 RC라 함) 슬래브로 되어 있다. 근년 교통량의 증대와 대형트럭의 증량화로 이들 RC바닥판에 균열이 생기고, 콘크리트의 부분적인 박락과 포장면의 함몰 등의 손상사례가 여러 곳에서 문제시되고 있다. 그러나, 구미에서는 허용응력 설계법, 소성이론에 기초한 강도설계법으로 설계한 도로교 콘크리트 단면은 피로파괴되지 않는다고 단정하고 있으며, 또한 대기중에서 콘크리트보는 응력비 70%이하에서는 피로파괴가 일어나지 않는다는 것은 이미 잘 알려진 사실로서 콘크리트 단면은 힘에

대하여 충분한 피로내력을 가지고 있는 것으로 보고되고 있다.(1) 그러나, 바닥판은 직접 운하중을 받기 때문에 다른 교량부재에 비해 피로의 영향을 받기 쉬우며, 극하중을 받아 편칭전단형으로 파괴되는 것은 오래전부터 실제 교량의 파괴형태로부터 경험적으로 알고 있으며, 岡田(2)등의 연구에서 일방향 RC슬래브의 200만회 피로강도는 정적강도의 약 1/2로 저하, 특히 균열내에 우수가 침투한 경우는 정적내력의 약 1/5로 저하한다는 보고와 園田(3)등, 松井(4)등의 이러한 편칭전단 피로파괴에 관한 연구가 있으며, 바닥판을 관통한 균열에 우수가 스며들었을 때는 피로수명이 50~250배로 감소한다는 보고를 보았을 때, 우리나라와 같이 과적차량이 많은 곳에서는 바닥판의 피

* 영남대학교 공과대학 토목공학과

** 日本國 鳥取大學 工科大学 土木工學科

로를 더욱 더 고려해야 한다고 생각되기에 본 논문에서는 지간 2m인 RC바닥판을 모델로 하여 松井(5)등이 연구한 실험결과를 기초로 피로파괴 가능성에 대하여 규명하고자 한다.

2. 편칭전단내하력 산정식과 바닥판 단면

2.1 편칭전단내하력 산정식

지금까지 제안된 식에서 상판의 편칭전단 내하력의 영향인자는 상판 유효높이, 콘크리트강도, 재하판 주장, 철근비, 철근항복강도, 극한 휨내하력 등이 있다. 경우에 따라서는 상판 전두께, 배력철근비, 재하판의 형상, 재하판의 크기, 상판의 지지조건, 재하위치 등도 영향을 미친다. 정확한 값을 구하기 위해서는 이들 모든 인자를 고려해야 하지만, 주 재료로 사용하고 있는 철근콘크리트의 불균일성, 상판두께와 배근의 시공오차 때문에 모든 인자의 영향을 고려하여 평가하는 것은 어렵다. 특히, 상판의 편칭전단 파괴기구 그 자체의 해명도 아직 충분하지 않다. 그러나, 비교적 실험치에 가까운 값을 나타내는 松井(4)등이 제안한 식을 소개하면 식(1)과 같다.

$$P_{sx} = 2\tau_{s, \max} x_m B + 2f_{t, \max} C_m B \quad (1)$$

여기서,

B : 피로에 대한 상판의 유효폭,
($b + 2d_d$) (cm),

b : 재하판의 배력철근방향의 변장 (cm),
20cm,

x_m : 주철근에 직각인 단면의 인장측 콘크리트를 무시한 단면의 중립축 깊이 (cm),

d_d : 배력철근의 유효높이 (cm),

C_m : 주철근중심으로부터의 덮개두께 (cm),
4cm,

$\tau_{s, \max}$: 콘크리트의 최대전단응력,
 $0.252f'_c - 0.000246f'_c{}^2$, (kg/cm²)

$f_{t, \max}$: 콘크리트의 최대인장응력,

$$0.583(f'_c)^{2/3}, \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

f'_c : 콘크리트압축강도, (kg/cm²)

E_c : $210000 + 900(f'_c - 300)$,
(kg/cm²).

단, 철근의 탄성계수는 2.04×10^6 kg/cm²로 한다. 식(1)에서는 편칭전단 내하력에의 주요 영향인자인 상판두께, 유효높이, 철근량, 콘크리트 압축강도, 재하판의 크기 및 형상에 관해서 고려한 것이다.

2.2 바닥판 단면과 편칭전단내하력

도로교 시방서에서는 도로교 RC바닥판의 편칭전단에 대한 조항이 없으므로, 본 논문에서는 지간 2m에 대하여 1985년판 및 1992년판 도로교 표준시방서(6,7)(이하 85, 92년판 시방서라 함)의 규정에 따라 휨모멘트만 고려하여 설계한 단면을 대상으로 편칭전단파괴 가능성에 대하여 검토한다. 철근단면적을 결정할 때 D13은 실제 주철근으로는 거의 사용되지 않으나, 여기서는 같은 M_d/U 에서 비교하기 위해 사용하였다.

2.2.1 85년판 도로교 표준시방서 규정에 따라 설계한 단면

콘크리트 표준시방서(8)의 규정에 따라 $U=1.2D+1.8L$, $\phi_f=0.85$ 와 85년판 시방서의 충격계수 $i=20/(50+L)$ 를 적용한 휨모멘트에 대하여 설계한 단면과 식(1)에 의해 계산한 편칭전단 내하력 P_{sx} 는 Table 1과 같다.

2.2.2 92년판 도로교 표준시방서 규정에 따라 설계한 단면

92년판 시방서 규정에 따라 $U=1.3D+2.15L$, $\phi_f=0.85$, 충격계수 $i=15/(40+L)$ 를 적용한 휨모멘트에 대하여 설계한 단면과 식(1)에 의해 계산한 편칭전단 내하력 P_{sx} 는 Table 2와 같다.

3. 피로파괴형태, S-N曲線

3.1 피로파괴형태

Fig.1은 실제 교량의 피로균열을 나타낸 것이며, 피로파괴시험에서와 같은 양상을 나타낸다. 피로반복이 진행됨에 따라, 처음에는 주철근방향에 일정간격으로 휨균열이 발생한 후 이에 직각방향으로 균열이 발생하여 격자 또는 거북등 모양으로 된다. 주철근 방향의 균열은 점차 진행되어 단면을 관통하게 되므로 판구조인 바닥판은 보구조화 되어 최종적으로 주철근에 직각인 단면이 전단파괴된다.

3.2 S-N曲線

슬래브 두께 18cm의 기건상태($N_{1,2}$)와 습윤상태($W_{1,2}$, $WS_{1,2}$)에서 이동하중에 의한 S-N곡선은 Fig.2와 같다. 습윤상태에서의 피로수명은 분산이 커서 기건상태의 것보다 50~250배 저하된 것을 Fig.4에서 볼 수 있다. 이것과 비슷하게 西林(9)등은 콘크리트 부재의 일점고정 재하에 의한 보의 피로파괴는 대기중과 수중에서 다른 형태로 나타나고, 200만회 피로강도는 대기중에서보다 수중에서 15~25%감소한다고 보고하였

Table 1. Sections and P_{sx} 's for deck designed by standard specifications for highway bridges Ed. 1985

d	A_s^*	A_d^*	M_d/U	P_{sx}
14	D16@15	D16@20	1.033	29.648
14	D16@12.5	D16@15	1.210	31.160
14	D16@10	D16@12.5	1.457	33.075
14	D19@15	D16@15	1.412	32.516
15	D13@10	D13@12.5	1.070	32.018
15	D16@15	D16@20	1.113	32.007
15	D16@12.5	D16@15	1.306	33.679
15	D19@15	D16@15	1.528	35.195
16	D13@10	D13@12.5	1.146	34.407
16	D16@15	D16@20	1.193	34.422
16	D16@12.5	D16@15	1.402	36.257
16	D19@15	D16@15	1.643	37.941
17	D13@10	D13@12.5	1.222	36.849
17	D16@15	D16@20	1.272	36.891
17	D16@12.5	D16@15	1.497	38.896
17	D16@12.5	D16@15	1.497	38.896
18	D13@12.5	D13@15	1.056	36.800
18	D13@10	D13@12.5	1.298	39.343
18	D16@15	D16@20	1.351	39.414
18	D16@12.5	D16@15	1.592	41.593
19	D13@12.5	D13@15	1.116	39.142
19	D13@10	D13@12.5	1.373	41.888
19	D16@15	D16@20	1.430	41.989
19	D16@12.5	D16@15	1.687	44.347

d	A_s^*	A_d^*	M_d/U	P_{sx}
14	D13@10	D13@12.5	1.007	30.936
14	D16@15	D16@20	1.048	30.905
14	D16@12.5	D16@15	1.232	32.509
14	D16@10	D16@12.5	1.457	34.552
15	D13@10	D13@12.5	1.084	33.334
15	D16@15	D16@20	1.128	33.328
15	D16@12.5	D16@15	1.328	35.097
15	D16@10	D16@12.5	1.578	37.354
16	D13@10	D13@12.5	1.160	35.786
16	D16@15	D16@20	1.208	35.806
16	D16@12.5	D16@15	1.424	37.745
16	D19@15	D16@15	1.643	39.538
17	D13@12.5	D13@15	1.005	35.833
17	D13@10	D13@12.5	1.236	38.290
17	D16@15	D16@20	1.287	38.339
17	D16@12.5	D16@15	1.497	40.453
18	D13@12.5	D13@15	1.065	38.185
18	D13@10	D13@12.5	1.312	40.846
18	D16@15	D16@20	1.366	40.925
18	D16@12.5	D16@15	1.592	43.219
19	D13@12.5	D13@15	1.125	40.583
19	D13@10	D13@12.5	1.387	43.453
19	D16@15	D16@20	1.445	43.563
19	D16@15	D16@20	1.430	43.563

d:effective depth (cm), $M_d = \phi_f \cdot M_n$, *:Diameter, spacing of reinforcement

(a) $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, span=2.0m

(b) $f'_c = 240 \text{ kg/cm}^2$, span=2.0m

다. 이와 같이 노면의 방수상태가 좋지 않고 노출된 경우에 비가 지속적으로 오면 노면이 습윤상태로 되어, RC 바닥판의 피로강도는 현저히 저하되는 것으로 나타나고 있다.

4. Simulation에 의한 피로파괴가능성

실제 바닥판에 작용하는 운하중은 랜덤형이므로, 차량 총중량의 분포형과 그 분포의 매개변수를 결정하여 차량 총중량을

분포형에 맞게 발생시켜, 이에 대응하는 운하중 분배계수를 적용하여 운하중을 결정한다. 이 운하중에 의한 피로손상도를 계산, Miner의 선형 누적피로 손상도 D 를 구하여 D 가 1보다 크게 되면 파괴하는 것으로 한다.

4.1 차량혼입율

평균일일트럭통행량(ADTT)은 8000 trucks/day로 정하고, 무적재차량은 운하중이 작으므로 피로의 영향을 고려하지 않기

Table 2. Sections and P_{sx} 's for deck designed by standard specifications for highway bridges Ed. 1992

d	A_s^*	A_d^*	M_d/U	P_{sx}
14	D16@12.5	D16@15	1.081	31.160
14	D16@10	D16@12.5	1.302	33.075
14	D19@15	D16@15	1.261	32.516
14	D19@12.5	D16@12.5	1.459	34.104
15	D16@12.5	D16@15	1.167	33.679
15	D16@10	D16@12.5	1.409	35.798
15	D19@15	D16@15	1.364	35.195
15	D19@12.5	D16@12.5	1.583	36.958
16	D13@10	D13@12.5	1.024	34.407
16	D16@15	D16@20	1.065	34.422
16	D19@15	D16@15	1.467	37.941
16	D19@15	D16@15	1.467	37.941
17	D13@10	D13@12.5	1.092	36.849
17	D16@15	D16@20	1.136	36.891
17	D16@12.5	D16@15	1.338	38.896
17	D19@15	D16@15	1.570	40.753
18	D13@10	D13@12.5	1.160	39.343
18	D16@15	D16@20	1.207	39.414
18	D16@12.5	D16@15	1.423	41.593
18	D19@15	D16@15	1.672	43.629
19	D13@10	D13@12.5	1.227	41.888
19	D16@15	D16@20	1.277	41.989
19	D16@12.5	D16@15	1.507	44.347
19	D16@12.5	D16@15	1.507	44.347

d	A_s^*	A_d^*	M_d/U	P_{sx}
14	D16@12.5	D16@15	1.101	32.509
14	D19@15	D16@15	1.290	33.960
14	D16@10	D16@12.5	1.333	34.552
14	D19@12.5	D16@12.5	1.500	35.663
15	D16@15	D16@20	1.008	33.328
15	D16@12.5	D16@15	1.186	35.097
15	D19@15	D16@15	1.393	36.715
15	D16@10	D16@12.5	1.440	37.354
16	D13@10	D13@12.5	1.037	35.786
16	D16@15	D16@20	1.079	35.806
16	D16@12.5	D16@15	1.272	37.745
16	D19@15	D16@15	1.496	39.538
17	D13@10	D13@12.5	1.104	38.290
17	D16@15	D16@20	1.150	38.339
17	D16@12.5	D16@15	1.357	40.453
17	D19@15	D16@15	1.598	42.426
18	D13@10	D13@12.5	1.172	40.846
18	D16@15	D16@20	1.221	40.925
18	D16@12.5	D16@15	1.442	43.219
18	D19@15	D16@15	1.700	45.378
19	D13@12.5	D13@15	1.005	40.583
19	D16@15	D16@20	1.291	43.563
19	D16@15	D16@20	1.291	43.563
19	D16@12.5	D16@15	1.527	46.043

d:effective depth (cm), $M_d = \phi_f \cdot M_n$, *:Diameter, spacing of reinforcement

(a) $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, span=2.0m

(b) $f'_c = 240 \text{ kg/cm}^2$, span=2.0m

로 한다. 적재차량과 무적재차량의 비율을 1:1로 정하면, 고려 대상차량은 4000 trucks/day로 된다. 차량혼입율은 Table 3과 같다.

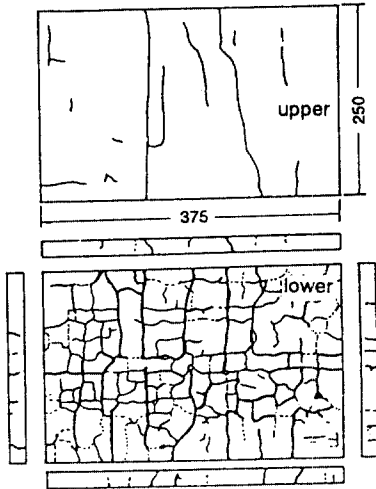


Fig.1 Crack pattern of actual RC deck

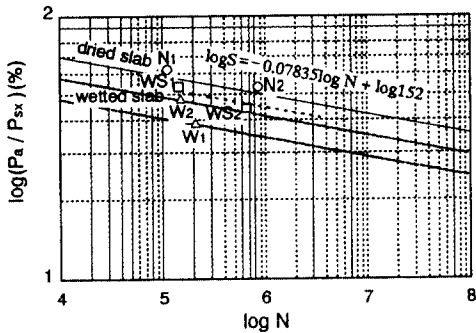


Fig.2 S-N curves for RC slab

4.2 차량 총중량의 분포형, 매개변수와 운하중

대형트럭은 대체로 대수-정규분포가 적합하므로, 여기서도 대수-정규분포를 사

용한다. 매개변수는 한국건설기술연구원에서 보고한 평균치와 표준편차(10)를 이용하고, truck I의 운하중 분배율은 전후축 1:1, truck II와 semi-trailer는 오병환의 표준트럭형상(11)을 이용하였다. 즉, 트럭의 전축은 차량 총중량의 0.2W, 제 2, 3축은 각각 0.4W, semi-trailer의 전축은 0.12W, 나머지 4축은 각각 0.22W를 사용하였다.

4.3 지수분포에 의한 차량중량의 랜덤발생

Box-Muller의 알고리즘을 개량한 Polar법을 이용하여 정규분포난수를 발생, 대수-정규분포로 변환하였으며 알고리즘은 다음과 같다.(12)

1. $U(0,1)$ 으로부터 2개의 독립 무작위

변수 U_1, U_2 를 발생

$$i=1,2 \text{에 대하여 } V_i = 2U_i - 1$$

$$W = V_1^2 + V_2^2$$

2. 만약 $W > 1$ 이면 단계 1로, 아니면

$$Y = [(-2 \ln W)/W]^{1/2}$$

$$X_1 = V_1 Y, X_2 = V_2 Y$$

3. 정규분포 난수를 대수-정규분포로 변환

$$\mu_1 = E(X), \sigma_1^2 = \text{Var}(X)$$

$$\mu = \ln[\mu_1^2 / (\sigma_1^2 + \mu_1^2)^{1/2}],$$

$$\sigma^2 = \ln[(\sigma_1^2 + \mu_1^2) / \mu_1^2]$$

$$X = \text{EXP}(X_1 \sigma^2 + \mu), \text{EXP}(X_2 \sigma^2 + \mu)$$

4.4 S-N곡선식, 피로수명과 피로손상도

기전상태의 S-N곡선식은 Fig.2에 나타난 것을 사용하고, 본 연구는 피로파괴 가능성이 연구이기에 습윤상태는 Fig.2에서 가장 불리한 W_1 의 S-N곡선식을 사용한다. 편칭전단 피로에 대한 일반적인 S-N곡선식

Table 3. Ratios of vehicle composition

veh. type	corresponding vehicles	ratio
small truck	(2A4,6T : pickup, Ceres, etc)	0.485
truck I	(2A6T : 8t cargo, 8t dump, 4.5t boxer)	0.281
truck II	(3A10T: 11t cargo, 15t dump, tank car)	0.198
semi-trailer	(5A : container trailer)	0.006

은 식(2)와 같다.

$$\log S = A \cdot \log N + \log B \quad (2)$$

식(2)로부터 구한 부재의 편칭전단응력비 S에 대한 피로수명은,

$$N_f = 10^{(\log B - \log S)/A} \quad (3)$$

Fig.2의 S-N곡선은 시간중양에 대한 것이나, 실제 조사에 의하면, 편칭전단피로 파괴는 대개 지점에서 50cm 떨어진 곳에서 일어나므로, 이에 대한 시간 2m의 전단력비 $Q_s/Q_c=1.6$ 와 재하판 크기에 대한 보정으로 0.779(5)를 사용하면, Miner법칙에 의한 보정계수는,

$$\alpha = 1.6^{(1/0.07835)} \cdot 0.779^{(1/0.07835)} \quad (4)$$

누적피로손상도는,

$$D = \sum \frac{1}{N_f} \quad (5)$$

이상을 기초로 하여 구한 RC바닥판의 피로수명 계산의 흐름도는 Fig.3과 같다.

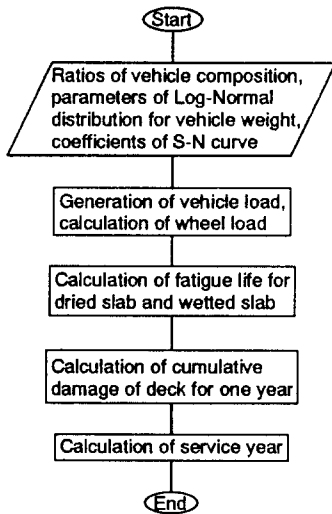


Fig.3 Flow chart of calculating fatigue life

5. 비교분석

Fig.3의 흐름도에 의해 연간 시간당 0.5mm이상 되는 강우강도의 합이 10일에 대한 Table 1, 2 단면의 피로수명을 구한 결

과를 도식하면 Fig.4, 5와 같다.

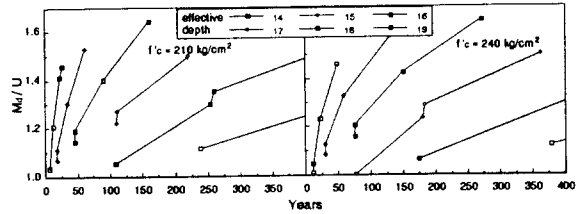


Fig.4 Relationships between M_d/U and fatigue life for sections of table 1

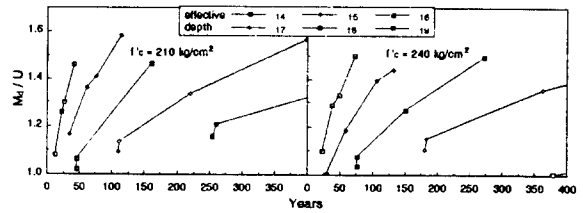


Fig.5 Relationships between M_d/U and fatigue life for sections of table 2

편칭전단피로파괴의 기준을 100년으로 하면 공용기간은 그의 반인 50년으로 된다. 85년판 시방서에 의해 M_d/U 를 1.2~1.5로 설계했을 때, 연간 습윤상태 10일인 경우, 콘크리트 강도 210, 240 kg/cm² 모두 유효높이 16cm이하에서 피로파괴가 100년안에 일어날 가능성이 Fig.4에서 나타나고 있다.

92년판 시방서에 의해 M_d/U 를 1.2~1.5로 설계했을 때, 연간 습윤상태 10일인 경우, 콘크리트 강도 210, 240 kg/cm² 모두 유효높이 15cm이하에서 피로파괴가 100년안에 일어날 가능성이 Fig.5에서 나타나고 있다. Fig.4, 5에서 같은 M_d/U 에 대해 콘크리트 강도 240 kg/cm²가 210 kg/cm²보다 피로파괴수명이 길게 나타나고, 유효높이 14, 15cm는 M_d/U 를 크게 하여도 피로수명에는 큰 증가가 없는 것으로 나타나고 있다. 같은 조건에서 92년판 시방서에 의해 설계한 단면이 85년판 시방서에 의해 설계한 것보다 피로파괴수명이 약 50% 증가된 것으로 나타나고 있으나, 양 시방서에 의해 설계한 단면 모두 편칭전단피로파괴가 일어날 수 있다. 특히, 85년판 시방서 강교편에는 차도부 바닥판의 최소두께가 18cm, 콘크리트

교편에서는 16cm, 92년판 시방서는 강교편, 콘크리트교편 모두 18cm, 주철근이 차량 진행방향과 직각인 연속판의 경우 3t+11 cm이므로 지간장이 2m인 경우는 17cm가 되므로 이 규정에 의해 설계했을 경우 피로파괴가 편칭전단에 의해 일어날 수 있으므로 바닥판의 최소두께를 조정해야 될 것이다.

6. 결론

철근 덮게 4cm, 바닥판 지간 2m이 편칭전단 피로파괴수명에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

① 85년판 시방서에 의해 M_d/U 를 1.2~1.5로 설계했을 때, 연간 습윤상태 10일인 경우, 콘크리트 강도 210, 240 kg/cm² 모두 유효높이 16cm이하에서 피로파괴가 일어날 가능성이 있다.

② 92년판 시방서에 의해 M_d/U 를 1.2~1.5로 설계했을 때, 연간 습윤상태 10일인 경우, 콘크리트 강도 210, 240 kg/cm² 모두 유효높이 15cm이하에서 피로파괴가 일어날 가능성이 있다.

③ 같은 M_d/U 에서 콘크리트 강도 240 kg/cm²이 210 kg/cm²보다 피로파괴수명이 길게 나타나고, 유효높이 14, 15cm는 M_d/U 를 크게 하여도 피로파괴수명에는 큰 증가가 없는 것으로 나타나고 있다.

④ 같은 조건에서 92년판 시방서에 의해 설계한 단면이 85년판 시방서에 의해 설계한 것보다 피로파괴수명이 약 50% 증가된 것으로 나타나고 있으나, 양 시방서에 의해 설계한 단면 모두 편칭전단피로파괴가 일어날 수 있다.

85, 92년판 시방서 규정에 의해 설계했을 경우 편칭전단에 의해 피로파괴가 일어날 수 있으므로 바닥판의 최소두께를 조정해야 할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구에 필요한 실험자료를 제공해

주신 大阪大學의 松井繁之선생님께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 井上正一, 콘크리트의壓縮疲勞特性と部材設計への適用に関する基礎的研究, 博士學位論文, 1985, pp.137-138
2. 岡田 清, 岡村宏一, 園田惠一郎, 島田 功, “道路橋鐵筋콘크리트床版のひびわれ 損傷と疲勞性状”, 土木學會論文報告集, 第321號, 1982年 5月, pp.49-61.
3. 園田惠一郎, 今井宏典, 堀川都志雄, 船越博行, “輪荷重の反復の下でのRC床版の舉動”, 第六回콘크리트工學年次講演會論文集, 1984, pp.649-652.
4. 松井 繁支, “移動荷重を受ける道路橋 RC床版の疲勞強度と水の影響について”, 콘크리트工學年次論文報告集, 第九卷, 第二號, 1987, pp.627-632.
5. 阪神高速道路公團, “道路橋RC床版のひびわれ損傷と耐久性”, 1991.
6. 건설부제정, 도로교 표준시방서, 대한토목학회, 1985, pp.47, 19-22.
7. 건설부제정, 도로교 표준시방서, 대한토목학회, 1992, pp.47, 101-106.
8. 건설부제정, 콘크리트 표준시방서, 대한토목학회, 1988, pp.56-59.
9. 西林新藏, 井上正一, 大谷公行, “水中における鐵筋콘크리트はりの疲勞性状”, 콘크리트工學年次論文報告集, 第九卷, 第二號, 1987, pp.633-638.
10. 한국건설기술연구원, 도로포장설계지침서작성 및 자동차 축하중 조사연구, 건설부, 1988, pp.76.
11. 오 병환, “교량구조물의 합리적인 설계하중 결정 및 설계기준”, 대한토목학회 논문집, 제11권, 제4호, 1991, pp.55-66.
12. Averill M. Law and W. David Kelton, Simulation Modeling and Analysis, McGraw-Hill Book Company, 1982, pp.240-260.