

철근 콘크리트 슬래브의 디자인이 동적 거동에 미치는 영향

Effects of Design on the Dynamic Response of Reinforced Concrete Slabs

오 경 윤* · 조 진 구**† · 최 수 명*** · 홍 중 현****

Oh, Kyung Yoon · Cho, Jin Goo · Choi, Soo Myung · Hong, Chong Hyun

Abstract

This paper is on the research of the special character of the dynamic response according to a design of the clamped reinforced concrete slab. In this study, the 20-node solid element has been used to analyze the dynamic characteristics of RC slabs with clamped edges. The elasto-visco plastic model for material non-linearity and the smeared crack model have been adopted in the finite element formulation. The design factor, which affect the dynamic response of the reinforced concrete slab, are the steel layer thickness, steel layer depth, steel layout method, steel layout angle and the slab thickness and span ratio. The main purpose of this study was to find out the dynamic response of the reinforced concrete slab according to above variables. The reduction of deflection/thickness ratio appeared less than 2% when the slab thickness between 20 and 21cm. It is desirable that the slab thickness must be above 20-21cm. The reduction ratio of deflection is appeared greatly when the value of the span/thickness ratio is between 25 and 30. In conclusion, the steel layer depth and thickness had a little effect on deflection of the dynamic response, but had no effect on the steel layout angle.

Keywords : Dynamic analysis, 3D solid finite element, Non-linear RC slab analysis, Smeared crack model

1. 서 론

철근콘크리트 구조는 현대 산업사회에서 가장 많이 사용되어지고 있는 구조 형식이다. 이러한 철근콘크리트 구조물에 하중이 작용하여 탄성한계를 벗어나면 비선형 거동 및 비탄성 거동을 하게 된다. 철근 콘크리트 구조물의 설계를 위해서는 단순화를 위한 가정들이 도입되지 않으면 안된다. 예를들면 플랫 플레

이트에 대해서 직접 설계법이나 등가 골조법 등이 있지만 이러한 모든 방법들은 구조물 해석 및 설계의 단순화를 위해서 도입된 것들이다. 그러나 이러한 근사해법들은 사용상에 많은 제한들이 있다. 예를들면 직접 설계법이나 등가 골조법은 대단히 규칙적인 형상의 구조물에 대해서만 적용이 가능하다. 한편 철근 콘크리트 구조물의 비선형 해석에 대한 연구가 다양하게 진행되어 왔는데, 철근콘크리트 구조물의 동적 거동과 같은 특성을 정확하게 해석할 수 있다면 철근콘크리트 구조물의 설계는 보다 합리적일 것이다. 수치해석법 특히 유한요소법의 발전으로 철근콘크리트 구조물을 보다 정교하게 해석 할 수 있는 수치모델들이 제시되고 있다.¹⁾ 최근까지 각광을 받고 있는

* 전남대학교 대학원, 정주건설(주)

** 전남대학교 명예교수

*** 전남대학교 농업생명과학대학

**** 탐라대학교 토목환경공학과

† Corresponding author. Tel.: +82-16-661-2151

Fax: +82-62-530-2159

E-mail address: chojg@chonnam.ac.kr

철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 유한요소는 Hinton과 Owen이 제안한 등가단층법에 기초를 둔 퇴화셀요소이다.^{2,3)}

구조물은 안전성이 확보되기 위해서는 정하중은 물론 동하중에 대해서도 안전성이 보장되어야 한다.^{3,9)} 구조물의 동적응답에 대한 연구는 항공기 설계에서 널리 사용되어 왔으며, 최근에는 빈번한 지진의 발생으로 일반 구조물의 설계에서도 많은 적용이 이루어지고 있다.^{2,3)} 철근콘크리트 슬래브를 대상으로 지금까지 이루어진 유한요소 해석에서 사용된 모델은 적층이론에 근거하여 정식화된 Mindlin type의 2차원 요소이다. 그러나 철근콘크리트 슬래브를 정확하게 그리고 효율적으로 해석하기 위해서는 3차원 요소의 사용이 필요하며^{4,10)} 3차원 요소에 의한 해석은 셀 정식화 보다 상대적으로 많은 자유도를 갖게 된다. 그리고 요소의 생성과 해석 후 과정에서 세심한 주의가 필요하다.^{3,10)} 철근콘크리트 슬래브의 재료 비선형 거동은 여러 가지 인자들의 영향을 받기 때문에 매우 복잡하여 실제 상태를 명확하게 모델링 하는 것은 어려운 일이다. 그러나 일반적으로 이들의 거동은 선형탄성모델, 비선형탄성모델, 탄-소성모델 및 탄-점소성모델 등과 같은 수학적 모델로 모델링하여 해결하고 있다.^{2,3)} 과도동적해석의 경우 탄-점소성 모델은 구조 재료의 실제 거동을 잘 근사 표현하고 있다고 할 수 있다.^{2,9)} 따라서 본 연구에서는 재료의 실제적인 거동과 잘 일치하는 탄-점소성 모델에 의해서 재료 비선형 효과를 고려하였다.

본 연구의 목적은 슬래브의 디자인이 철근콘크리트 슬래브의 동적 거동에 미치는 영향을 규명하는데 있다. 본 연구에서 슬래브의 동적 거동에 영향을 미치는 슬래브의 디자인 인자로는 철근의 배근깊이, 철근의 배치방법, 철근층 두께, 철근의 배근각도, 슬래브 두께, 슬래브 지간비 및 슬래브 지간에 대한 슬래브 두께비 등이 고려되었다.

II. 유한요소 해석

철근 콘크리트 슬래브의 디자인에 따른 동적 거동을 규명하기 위하여 해석방법으로는 유한요소법을 사용하였으며 슬래브의 이산화에는 분산 철근층을 갖는

20절점 등매개변수 입체요소가 사용되었다. 유한요소 방정식의 정식화에서 재료 비선형성은 탄-점소성 모델에 의해서 그리고 콘크리트의 균열모델로는 분산균열모델이 사용되었다. 한편 구조계의 동적 평형 방정식의 시간적분에는 Newmark 방법이 적용되었고, 평형 방정식의 해를 구하는 데는 보편적으로 많이 사용되고 있는 Modified Newton-Raphson 반복법을 사용하였다.

1. 탄-점소성 모델

탄-점소성 모델에서 변형률 속도 $\dot{\epsilon}$ 는 탄성성분 $\dot{\epsilon}_e$ 과 점소성 성분 $\dot{\epsilon}_{vp}$ 으로 나눌 수 있다.^{2,3,9)}

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_{vp} \quad (1)$$

응력속도 $\dot{\sigma}$ 는 탄성 변형률 속도 $\dot{\epsilon}_e$ 와 탄성행렬 \underline{D} 와 관련하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\sigma} = \underline{D} \dot{\epsilon}_e \quad (2)$$

Perzyna이 제안한 점소성 유동법칙을 적용하면 점소성 변형률 속도는 다음과 같이 된다.

$$\dot{\epsilon}_{vp} = \gamma < \Phi(\underline{F}) > \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial \underline{\sigma}} \right\} \quad (3)$$

γ : 유동계수
 (\underline{F}) : 항복함수

식 (2) 및 식 (3)을 식 (1)에 대입하면 변형률은 식 (4)로 표현된다.

$$\dot{\epsilon} = \underline{D}^{-1} \dot{\sigma} + \gamma < \Phi(\underline{F}) > \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial \underline{\sigma}} \right\} \quad (4)$$

2. 콘크리트 균열의 모델링

유한요소 정식화 과정에서 콘크리트의 균열은 이산균열모델 또는 분산균열모델에 의해서 고려될 수

있다. 이산균열모델은 균열이 요소의 경계를 따라서 형성되는 경우에 적용되므로 이 접근법은 몇 개의 균열만 발생하는 문제에 적합하다. 반면에 분산균열모델은 재료의 성질을 수정함으로써 균열로 인한 손상을 고려할 수 있는 편리함이 있으므로 구조공학분야에서 많이 사용된다. 따라서 본 연구에서는 분산균열 모델이 채용되었다.

3. 보강 철근의 모델링

유한요소법에 의한 철근 콘크리트 구조물의 해석에서 철근의 영향은 단순하고 정확하게 고려할 수 있다. 철근은 등가의 두께를 갖는 2차원의 면내층으로 취급되고 철근 방향의 축방향력에만 저항한다고 가정한다.

보강철근은 철근 방향의 1축 성질을 갖는 것으로 가정하고 콘크리트에 대해서 기술된 탄-점소성 모델에서의 변형률 속도는 식 (5)에서 구한다.

$$\dot{\epsilon}_{vps} = \pm \gamma(\dot{\epsilon}_s)(f_s - f_y) / f_y \quad (5)$$

여기서 f_s : 보강 철근의 현재 응력
 f_y : 보강 철근의 항복 응력으로서 일정하다고 가정한다.

또한 흐름계수는 식(6)에서 구한다.

$$\gamma(\dot{\epsilon}_s) = a_0 (\dot{\epsilon}_c)^{a_1} \quad (6)$$

여기서 a_0 와 a_1 은 실험적으로 정해지는 수치이다.

III. 수치 예 및 고찰

수치 예에서 모델케이스로서 선정된 구조물은 Fig. 1과 같은 4 m × 4 m 크기의 주변 고정 철근 콘크리트 슬래브이다. 선정된 모델 구조물은 대칭성을 고려하여 전체영역의 1/4만을 16개의 요소로서 모델링하였으며 사용된 재료의 성질은 Table 1과 같다.

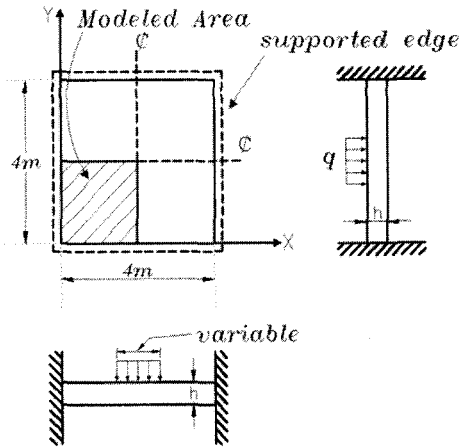


Fig. 1 Geometry of clamped R/C slab

Table 1 Material properties

material	properties(cm, kg)	
concrete	Elastic modulus E_c	200,000.0
	Poisson's ratio ν	0.17
	Ultimate comp. stress f'_c	350.0
	Cracking stress f_{ck}	11.786
	Ultimate comp. strain ϵ_u	0.0035
	Tensile stiffn. coef. a	0.5
steel	Tensile stiffn. coef. ϵ_m	0.002
	Elastic modulus E_s	2,000,000.0
	Yield stress f_y	4600.0

1. 철근의 배근 깊이에 따른 처짐의 동적 거동

철근의 배근 깊이에 따른 처짐의 동적 거동 특성을 알아보기 위하여 철근비를 슬래브 단면적의 1%로 하고 슬래브의 상대높이가 2(-1~+1)일 때 철근의 배근 깊이를 중면으로부터 -1.0~+1.0, -0.9~+0.9, -0.8~+0.8, -0.7~+0.7 및 -0.6~+0.6으로 하였을 경우 중앙점 처짐 응답은 Fig. 2와 같다.

철근의 배근 깊이가 중면으로부터 멀어질수록 피크에서의 처짐은 작게 나타났으며 진동 주기는 길게 나타났다. 예를 들어 첫 번째 피크에서의 처짐은 철근 배근깊이에 따라 각각 0.346 cm, 0.350 cm, 0.354 cm, 0.358 cm, 0.361 cm 및 0.364 cm로서 아랫면 윗면(-1.0~+1.0)에 배근한 경우의 처짐 0.346 cm에 대해서 1.15%, 2.31%, 3.46%, 4.33% 및 5.20%

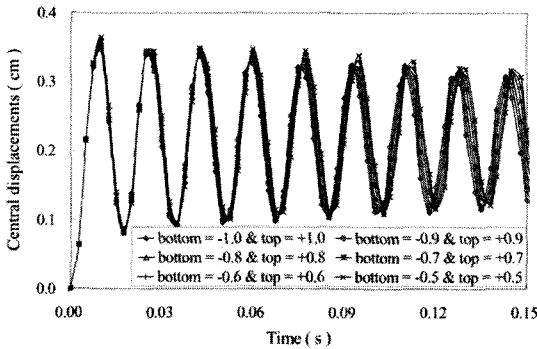


Fig. 2 Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to steel positions

의 증가를 나타냈다. 다섯 번째 피크에서의 처짐은 0.319 cm, 0.321 cm, 0.323 cm, 0.331 cm, 0.339 cm 및 0.345 cm로서 윗면(-1.0~+1.0)에 배근한 경우의 처짐 0.319 cm에 대해서 0.62%, 1.25%, 3.76%, 6.26% 및 8.15%의 증가를 나타냈다. 즉 철근 배근깊이의 영향은 진동시간이 지남에 그리고 철근층이 중립면에 가까운 경우에 더 크게 나타났다.

2. 철근의 배치방법에 따른 처짐의 동적 거동

철근의 배치방법에 따른 처짐의 동적 거동 특성을 알아보기 위하여 철근비를 슬래브 단면적의 1.0%로 하고 철근의 배치는 슬래브의 아랫면에만 배근한 경우(Lay-1), 아랫면과 윗면에 각각 배근한 경우(Lay-2), 슬래브의 중앙 부분 4L/5은 아랫면에 그리고 지지면에서 L/5되는 곳은 윗면에 배근한 경우(Lay-3) 및 슬래브의 중앙 부분 3L/4은 아랫면에 그리고 지지면에서 L/4되는 곳은 윗면에 배근한 경우(Lay-4)로 하였다. 이때 철근의 문힘 위치는 철근 덮개 등을 고려하여 아랫면에 배근되는 철근은 중면 아래로 0.8 (전체 높이를 2로 한 경우 상대적인 값) 그리고 위쪽에 배근된 철근은 중면 위로 0.8 만큼 떨어진 곳에 배근하는 것으로 하였다.

Lay-1의 경우에 피크에서의 처짐은 가장 크게 그리고 진동주기는 가장 길게 나타났으며 다음으로는 Lay-4의 경우에 크게 나타났다. Lay-2 및 Lay-3의 경우에 처짐은 가장 작게 나타났다. 구체적으로 첫 번째 피크에서의 처짐을 보면 철근의 배근 방법에 따

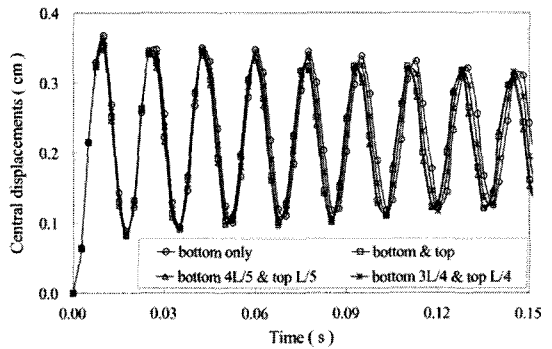


Fig. 3 Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to steel layouts

라 처짐은 각각 Lay-1에서 0.367cm, Lay-2에서 0.354 cm, Lay-3에서 0.348 cm 및 Lay-4에서 0.360 cm로서 Lay-1의 경우를 기준하여 처짐은 각각 Lay-2에서 3.54%, Lay-3에서 5.17% 및 Lay-4에서 1.90%의 감소가 있었다. 다섯 번째 피크에서의 처짐을 보면 철근의 배근 방법에 따라 처짐은 각각 Lay-1에서 0.344 cm, Lay-2에서 0.323 cm, Lay-3에서 0.318 cm 및 Lay-4에서 0.335 cm로서 Lay-1의 경우를 기준하여 처짐은 각각 Lay-2에서 6.10%, Lay-3에서 7.55% 및 Lay-4에서 2.61%의 감소가 있었다. 즉 철근의 배치방법의 동적 거동에 대한 영향은 진동시간이 지남에 따라 더 크게 나타났다.

3. 철근층 두께에 따른 처짐의 동적 거동

철근층 두께에 따른 처짐의 동적 거동 특성을 알아보기 위하여 철근층의 두께를 0.10 cm, 0.12 cm, 0.14 cm, 0.16 cm, 0.18 cm, 0.20 cm, 0.22 cm 및 0.24 cm로 하였을 경우 중앙 처짐의 동적 응답은 Fig. 4와 같다.

처짐의 동적 거동에 대한 철근층 두께의 영향은 구체적으로 다음과 같다. 첫 번째 피크에서의 처짐은 철근층이 0.10~0.24 cm로 증가함에 따라 0.364 cm, 0.359 cm, 0.358 cm, 0.355 cm, 0.356 cm, 0.354 cm, 0.352 cm 및 0.349 cm이었다. 철근층의 두께 0.10 cm인 경우를 기준하면 처짐의 감소는 0.0% (기준), -1.37%, -1.64%, -2.47%, -2.19%, -2.74%, -3.29 및 -4.12%이었으며 다섯 번째 피크에서의 처

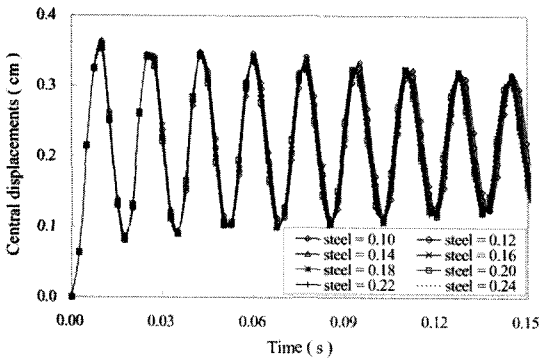


Fig. 4 Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to steel layer thickness

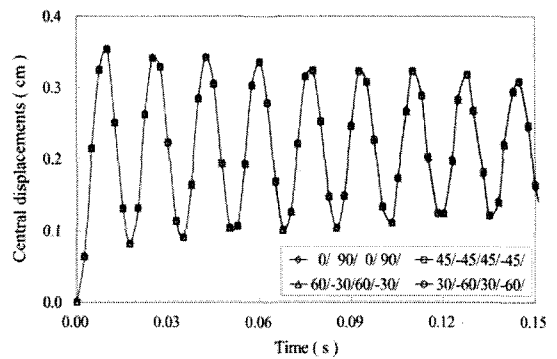


Fig. 5 Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to angle of steel layouts

침은 각각 0.342 cm, 0.336 cm, 0.332 cm, 0.328 cm, 0.326 cm, 0.323 cm, 0.320 cm 및 0.320 cm이었다. 철근층의 두께 0.10 cm인 경우를 기준하면 처짐의 감소는 0.0%(기준), -1.75%, -2.92%, -4.09%, -4.67%, -5.55%, -6.43% 및 -6.43%로서 진동시간이 지남에 따라 약간 증가되었지만 철근층 두께가 슬래브의 처짐의 동적 거동에 미치는 영향은 큰 차이가 없었다.

4. 철근 배근각도에 따른 처짐의 동적 거동

철근 배근각도에 따른 처짐의 동적 거동 특성을 알아보기 위하여 철근비를 1%로 하고 X-방향 및 Y-방향 철근의 배근각도를 0/90/0/90/, 45/-45/45/-45/ 및 60/-30/60/-30/로 하였을 경우 중앙 처짐의 동적 응답은 Fig. 5와 같다. 여기서 배근각도는 X-축으로부터 측정된 값이며 (+)의 값은 X-축으로부터 반시계 방향을 의미한다.

철근의 배근 각도가 처짐의 동적 거동에 미치는 영향은 나타나지 않았다.

5. 슬래브 두께에 따른 처짐의 동적 거동

슬래브의 두께에 따른 처짐의 동적 거동 특성을 알아보기 위하여 슬래브의 두께를 16~30 cm로 하였을 때 중앙점 처짐 응답은 Fig. 6과 같다. 이때 철근층 두께는 슬래브 두께의 1%로 하였으며 철근은 슬래브의 중면으로부터 위, 아래로 0.8 만큼 떨어진 위

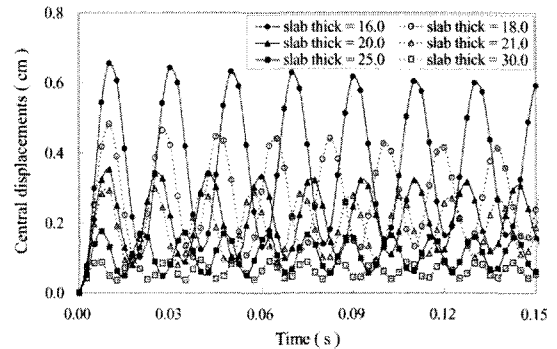


Fig. 6 Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to slab thickness

치에 배근하는 것으로 하였다.

처짐의 동적 거동에 대한 슬래브 두께의 영향은 크게 나타났다. 슬래브 두께를 16.0 cm, 18.0 cm, 20 cm, 21 cm, 25 cm 및 30.0 cm로 변화시켰을 경우 첫 번째 피크에서의 처짐은 0.656 cm, 0.483 cm, 0.354 cm, 0.294 cm, 0.176 cm 및 0.087 cm이었다. 이를 처짐/두께비로 나타내면 4.1%, 2.68%, 1.77%, 1.4%, 0.7% 및 0.29%로서 슬래브 두께가 16~18 cm일 때 처짐/두께비의 감소가 비교적 크게 나타났고 두께가 20~21 cm 이상이면 처짐/두께비의 값이 2% 미만으로 비교적 작게 발생하였으며 두께가 25 cm 이상이면 처짐/두께비의 값이 현저하게 작게 나타났다. 즉 슬래브의 두께는 20~21 cm 이상으로 하는 것이 바람직스럽다는 것을 알 수 있다. 또한 슬래브 두께가 두꺼울수록 진동주기는 짧아졌다.

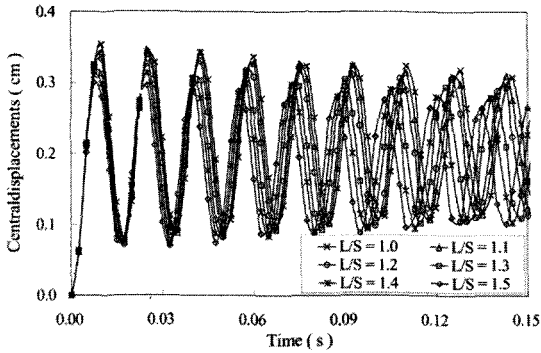


Fig. 7 Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to slab aspect ratios

6. 슬래브 지간비에 따른 처짐의 동적 거동

슬래브의 지간비에 따른 처짐의 동적 거동 특성을 알아보기 위하여 슬래브의 면적을 일정하게 하게 한 후 장·단변의 지간 비를 1.0~1.5로 하였을 경우 중앙점 처짐 응답은 Fig. 7과 같다.

장·단변의 지간 비가 증가할수록 피크에서의 처짐은 감소하였다. 구체적으로 장·단변 지간 비가 1.0~1.5일 때 첫 번째 피크에서의 처짐은 0.354 cm, 0.343 cm, 0.333 cm, 0.315 cm, 0.310 cm 및 0.30 cm로서 정방형 슬래브(L/S=1.0) 처짐 0.354 cm의 96.8%, 94.0%, 89.0%, 87.5%, 84.7%로서 장·단변 지간 비가 0.1씩 증가함에 따라 처짐은 3.2%, 6.0%, 11%, 12.5%, 15.3%의 감소를 나타냈다. 즉 장·단변 지간 비가 증가할수록 처짐의 감소는 증가하였으며 특히 지간 비 1.2~1.3 사이에서 처짐의 감소가 가장 현저하였다.

7. 슬래브 지간/슬래브 두께비에 따른 처짐의 동적 거동

슬래브 지간/슬래브 두께비를 15, 20, 25 및 30으로 하였을 경우 중앙점 처짐 응답은 Fig. 8과 같다.

슬래브 지간/슬래브 두께비가 증가할수록 처짐은 현저하게 증가하였고 진동주기도 약간씩 증가하였다. 구체적으로 첫 번째 피크에서의 처짐을 보면 슬래브 지간/슬래브 두께비에 따라 1.61 cm, 0.837 cm, 0.354

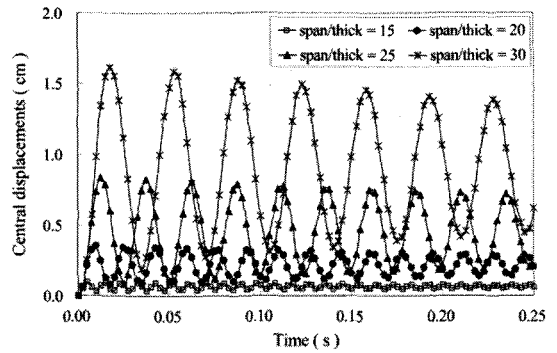


Fig. 8 Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to slab span/slab thickness

cm 및 0.098 cm 슬래브 지간/슬래브 두께비 15일 때 처짐 1.61 cm에 비교하여 처짐의 감소율은 48.0%, 78.0% 및 93.9%로서 현저하게 크게 나타났다. 슬래브 지간/슬래브 두께비가 5씩 증가함에 따라 처짐의 감소는 15~20일 때 48.0%, 20~25일 때 30.0%, 25~30일 때 15.9%로서 슬래브 지간/슬래브 두께비가 15~20에서 처짐의 감소가 가장 크게, 25~30에서 처짐의 감소가 가장 작게 나타났다.

8. 슬래브 동적 거동 해석 방법의 비교

2 방향 슬래브의 1 방향 슬래브로의 해석 가능성을 검토하기 위하여 장·단변 지간 비를 1.5~3.0으로 하였을 경우 두 해석 결과를 비교하면 Fig. 9와 같다.

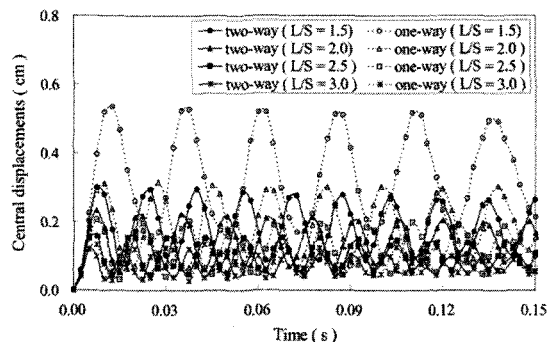


Fig. 9 Comparison of deflection between the two-way slab and the one-way slab

장·단변 지간 비의 값이 증가함에 따라 2 방향 슬래브를 단변 방향 지간을 갖는 1 방향 슬래브로 해석한 결과는 오차가 감소하고 있음을 알 수 있다. 구체적으로 첫 번째 피크에서의 처짐을 비교하면 장·단변 지간 비의 값이 1.5일 때 2 방향 슬래브로 해석한 처짐은 0.3 cm, 단변 방향 지간을 갖는 1 방향 슬래브로 해석한 경우 처짐은 0.535 cm로서 2 방향 슬래브의 처짐을 기준하여 78% 크게 평가되었다. 같은 방법으로 장·단변 지간 비의 값이 2.0일 때 처짐은 각각 0.233 cm, 0.312 cm로서 33%, 장·단변 지간 비의 값이 2.5일 때는 0.157 cm, 0.206 cm로서 31% 그리고 장·단변 지간 비가 3.0일 때는 0.119 cm, 0.132cm로서 10% 크게 평가 되었다. 즉 장·단변 지간 비의 값이 3.0인 경우 2 방향 슬래브를 단변방향 지간을 갖는 1 방향 슬래브로 해석 하여도 오차는 약 10%이었다.

IV. 요약 및 결론

본 연구의 목적은 주변고정 철근 콘크리트 슬래브의 디자인에 따른 동적거동 특성을 규명하기 위한 것으로 이를 위하여 해석방법으로는 유한요소법이 사용되었다. 철근 콘크리트 슬래브의 이산화에는 분산 철근층을 갖는 20 절점 비선형 입체 유한요소모델이 채용되었다. 몇 가지의 수치 예를 통하여 철근의 배근 깊이, 철근의 배치 방법, 철근층의 두께 및 배근각도, 슬래브 두께 및 슬래브 지간비 등에 따른 철근콘크리트 슬래브의 처짐의 동적 거동 특성을 알아보았다.

본 연구에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

1. 철근의 배근 깊이가 중립면으로부터 멀어질수록 피크에서의 처짐이 작게 나타났으며 진동 주기는 짧게 나타났다. 배근 깊이에 따른 최소 및 최대 처짐의 차이는 진동시간에 따라 5.2~8.15%로 나타났다.
2. 철근을 아랫면에만 배치한 경우에 피크에서의 처짐은 가장 크게 그리고 진동주기도 가장 길게 나타났으며 윗면 아랫면 배치 및 슬래브의 중앙 부분 4L/5은 아랫면에 그리고 지지면에서 L/5되는 곳은 윗면에 배치한 경우에 피크에서의 처짐은 가장 작게 나타났

다. 철근의 배치 방법에 따른 최소 및 최대 처짐의 차이는 진동시간에 따라 5.17~7.55%로 나타났다.

3. 철근층 두께의 영향은 크게 나타나지 않았으며 한편 철근의 배근각도가 처짐의 동적 거동에 미치는 영향은 나타나지 않았다.

4. 슬래브 두께가 16~18 cm일 때 처짐/두께비의 감소가 가장 현저하였고 두께가 20~21 cm이면 처짐/두께비의 값이 2% 미만으로 비교적 작게 발생하였으며 두께가 25 cm 이상이면 처짐/두께비의 값이 현저하게 감소하였다. 즉 슬래브의 두께는 20~21 cm 이상으로 하는 것이 바람직스럽다는 것을 알 수 있다.

5. 장·단변 지간 비를 1.0~1.5으로 변화시켰을 경우 최대 처짐은 정방향 슬래브에서의 처짐을 기준하여 장·단변 지간 비 0.1 증가에 따라 처짐은 0.0%, 3.2%, 6.0%, 11%, 12.5%, 15.3%의 감소를 나타냈다. 즉 장·단변 지간 비가 증가할수록 처짐의 감소는 증가 하였으며 특히 지간 비 1.2~1.3 사이에서 처짐의 감소가 가장 현저하였다.

6. 슬래브의 지간/슬래브 두께비의 값이 15~20일 때 처짐의 감소율이 가장 크게, 25~30일 때 처짐의 감소율이 가장 작게 나타났다.

7. 장·단변 지간 비가 3.0 인 경우 2 방향 슬래브를 단변방향 지간을 갖는 1 방향 슬래브로 해석 하여도 오차는 약 10% 정도 이었다.

References

1. Cho, Jin Goo, Keun Soo Park, 2001, Effects of Partially Distributed Step Load on Dynamic Response of the Plane Circular Arches, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 43(4), pp.89-96(in korea).
2. Hinton, E and D. R. J. Owen, 1984, Finite Element Software for Plates and Shells, Pineridge Press Ltd., Swansea, U.K.
3. Hinton, E, 1988, Numerical Method and Software for Dynamic Analysis of Plates and Shells, Pineridge Press, Swansea, U.K.

4. Kupfer, H., K. H. Hilsdorf and H. Rush, 1969, "Behaviour of concrete under biaxial stresses", Proc. Amer. Concrete Inst., 66(8), pp.656-666.
5. Hong, Chong-Hyun, Jin-Hwan Park and Kwang-Sung Woo, 2002, "p-version Finite Element Analysis of Composite Laminated Plates with Geometric and Material Nonlinearities", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 22(2-A), pp.355-364(in korea).
6. Kankam, J. A. and H. J. Dagher, 1995, "Non-linear FE analysis of RC skewed slab bridges", J. Struct. Engrg., ASCE, 121, pp.1338-1345.
7. Mondkar and Powell, G. H., 1977, Finite Element Analysis of Nonlinear Static and Dynamic Response, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 11, pp. 499-520.
8. Oh, Kyung Yoon, Jin Goo Cho, and Chong Hyun Hong, 2007, Effects of Material Characteristics on the Dynamic Response of the Reinforced Concrete Slabs, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 49(4), 43-49(in korea).
9. Owen, D. R. J. and A. J. Fawkes, 1983, Fracture Mechanics, Pineridge Press, U.K.
10. Spiliopoulos, K. V. and G. Ch. Lykidis, 2006, "An efficient three-dimensional solid finite element dynamic analysis of reinforced concrete structures", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35(2), pp.137-157.
11. Vecchio, F.J. and M. Tata, 1999, "Approximate analyses of reinforced concrete slabs", Structural Engineering and Mechanics, 8(1), pp.1-18.