

분포하중이 철근 콘크리트 슬래브의 동적 거동에 미치는 영향

Effects of Distributed Load on the Dynamic Response of the Reinforced Concrete Slabs

오경윤* · 조진구**·† · 최수명*** · 홍종현****

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

Abstract

This study has been carried out to investigate the dynamic characteristics of RC slabs. For this purpose, the 20-node solid element has been used to discretize the RC slabs into two parts of concrete and rebar. The material non-linearity considering elasto-visco plastic model and the smeared crack model have been adopted in the finite element formulation. The applied load can handle step load, load intensity of harmonic load, area of distributed load and frequency.

The frequency of harmonic load has an significant effect on dynamic behaviour in terms of displacement. As the frequency is increased, the effect of load amplitude is more serious. Especially, if the frequency of harmonic load exceeds 30 Hz, it is noted that the displacement by harmonic load is greater than that by step load. In case of harmonic load, the damping effect shows no certain tendency with respect to frequency of load. In details, the damping is effective when the frequency of harmonic load is 2 Hz, but there is no consistent tendency according to damping ratio. The dynamic response when the frequency of harmonic load is 3 Hz shows same result for undamped case as well as for damped case with 5% damping ratio. It is also noted that we can get the largest deflection for damped case with 1% damping ratio. However, there is not any damping effect when the frequency of harmonic load is greater than 4 Hz.

Keywords : Dynamic analysis, 3D solid finite element, Harmonic load, Frequency, Smeared crack model

1. 서 론

철근 콘크리트 슬래브는 가장 보편적인 구조요소이다. 수많은 철근 콘크리트 슬래브가 설계되고 또 건설되고 있지만 그들의 동적 거동에 대한 효과는 올

바르게 평가되지 못 할 뿐 만 아니라 정당하게 고려되지도 못하고 있다.⁹⁾ 따라서 철근 콘크리트 슬래브의 동적 해석에 대한 연구가 꾸준히 계속되어 왔다.^{3,7-9)} 만일 철근 콘크리트 슬래브의 동적 거동의 특성을 정확하게 예측할 수 있다면 철근 콘크리트 슬래브의 설계는 한층 용이하게 될 것이다. 수치 해석법 특히 유한요소법의 확장으로 철근 콘크리트 슬래브를 보다 정교하게 해석 할 수 있는 수치모델들이 많이 제안되고 있다. 최근까지 각광을 받고 있는 철근 콘크리트 구조물의 해석을 위한 유한요소는 Hinton과 Owen(1984)이 제안한 등가단층법에 기초를 둔 퇴

* 전남대학교 대학원, 정주건설(주)

** 전남대학교 명예교수

*** 전남대학교 농업생명과학대학

**** 탐라대학교 토목환경공학과

† Corresponding author. Tel.: 016-661-2151

Fax: +82-62-530-2159

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

화 셀요소이다.

구조물은 어떠한 경우라도 안전성이 확보되어야 하고 그러기 위해서는 정하중은 물론이려니와 동하중에 대해서도 안전성이 보장되어야 한다.^{1,9)} 구조물의 동적응답에 대한 연구는 항공기 설계에서 널리 사용되어 왔으며 최근에는 빈번한 지진의 발생으로 일반 구조물의 설계에서도 많은 관심을 받게 되었다. 철근 콘크리트 슬래브에 관한 지금까지의 수치 해석에서 사용된 모델은 적층 셀 요소로서 정식화 과정은 요소의 두께 방향으로 몇 개의 층으로 구성되어 있고 이때 각 층은 평면응력 상태에 있다고 가정하는 소위 적층이론에 근거하고 있다. 그러나 이러한 가정은 중립면에 수직한 법선응력을 무시하는 것이며 대부분의 모델에서 면내응력과 전단응력의 연성작용이 무시되는데 이것은 실제와 일치되는 것은 아니다. 이러한 이유로 철근 콘크리트 슬래브를 정확하게 그리고 효율적으로 해석하기 위해서는 3차원 요소의 사용이 필요하다.²⁾ 철근 콘크리트 슬래브의 재료 거동은 응력이력 및 현재의 응력상태 등 여러 가지 인자들의 영향을 받기 때문에 매우 복잡하여 실제 상태를 명확하게 모델링 하는 것은 매우 어려운 일이다. 많은 구조재료에 대해서 관측 전 현상과 경험적인 미세한 거동에 대한 이해가 필요하지만 동하중을 받는 공학 구조물의 해석에 있어서는 실현 가능한 재료모델로서 정식화하지 않을 수 없으며 더욱이 정식화에 필요한 모든 수치들은 쉽게 측정 가능하고 신뢰할 만한 실험자료들로부터 쉽게 얻을 수 있어야한다. 과도 동적 해석의 경우 탄-점소성 모델은 많은 구조 재료의 실제 거동을 잘 근사 표현하고 있으므로 순간적인 최대 응력 변화의 현상이 잘 모델화 되었다고 할 수 있다.^{2,10)} 따라서 본 연구에서는 재료의 실제적인 거동과 잘 일치하는 탄-점소성 모델에 의해서 재료 비선형성을 고려하였으며 콘크리트의 균열모델은 분산균열모델이 사용되었다.

본 연구는 작용 하중이 주변에서 고정된 철근 콘크리트 슬래브의 동적 거동에 미치는 영향을 규명하는데 있다. 여기서 작용하중은 단계하중과 조화하중이고 하중의 크기, 분포면적 및 진동수 등이 고려되었다.

II. 유한요소 해석

작용하중이 철근 콘크리트 슬래브의 동적 거동에 미치는 영향을 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. 한편 감쇠행렬은 질량행렬과 강성도행렬에 비례한다고 가정하였다.

1. 철근과 콘크리트의 역학적 성질

가. 콘크리트

1축 압축하중을 받는 경우 재하속도의 영향은 많은 연구자들에 의해서 연구되었다. 콘크리트에 관한 여러 가지 실험결과들로부터 얻어진 보통 콘크리트의 동적 하중 조건에서의 몇 가지의 중요한 거동 특성은 다음과 같다.

- 보통 콘크리트의 강도는 변형률 속도에 따른다.
- 초기 탄성 계수는 변형률 속도에 따른다.
- 어떤 특정 콘크리트의 어떤 변형률 속도에 대한 파괴변형률은 거의 일정하다.

물론 위에서 열거된 결론들은 1축 시험에서의 경우이고 다축 응력 상태의 경우에 반드시 적용되는 것은 아니다. 그러나 다축 응력 상태에 대한 실험자료가 얻어지기 전까지는 재료 모델에 적용 될 필요가 있다.

나. 보강철근

콘크리트와는 대조적으로 철근의 기계적 성질은 잘 알려져 있다. 동적 1축 시험에서 얻어진 결론들은 다음과 같다.

- 철근의 항복응력과 극한응력은 변형률 속도 증가함에 따라 증가한다.

- 초기 탄성계수는 변형률 속도의 영향을 거의 받지 않는다.
- 연성은 변형률 속도가 증가함에 따라 감소한다.
- 변형률 속도의 영향은 인장과 압축에서 같다.

2. 탄-점소성 모델

일반으로 탄-점소성 모델에서 변형률 속도 $[\dot{\epsilon}]$ 는 탄성 성분 $[\dot{\epsilon}_e]$ 과 점소성 성분 $[\dot{\epsilon}_{vp}]$ 으로 나눌 수 있다.⁵⁻⁷⁾

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

응력속도 $[\dot{\sigma}]$ 는 탄성 변형률 속도 $[\dot{\epsilon}_e]$ 와 탄성행렬 $[D]$ 와 관련하여 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

Perzyna이 제안한 점소성 유동법칙을 적용하면 점소성 변형률 속도는 식 (3)과 같다.

$$[\dot{\epsilon}_{vp}]_n = \gamma < \Phi_n(\mathbf{F}) > \left\{ \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\}_n \quad (3)$$

식 (2) 및 식 (3)을 식 (1)에 대입하면 변형률 속도는 식 (4)와 같다.

$$[\dot{\epsilon}]_n = [D]^{-1}[\dot{\sigma}]_n + \gamma < \Phi_n(\mathbf{F}) > \left\{ \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\}_n \quad (4)$$

γ : 유동계수
 (\mathbf{F}) : 항복함수

3. 콘크리트 균열의 모델링

유한요소 정식화 과정에서 콘크리트의 균열은 이산 균열모델 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 균열로인한 손상을 고려할 수 있는 편리함이 있으므로 구조공학분야에서 널리 사용된다. 따라서 본 연구에서도 이 접근법이 채용되었다. 균열 발생의 간단한 기준은 최대 인장응력이 어떤 한계 값을 초과하면 발생하는 것으로 하였다.

4. 보강 철근의 모델링

콘크리트에 대해서 기술된 탄-점소성 모델에서 재료 파라미터들의 값이 적당히 선정된다면 보강철근에 대해서도 그대로 적용될 수 있다.

철근은 등가의 두께를 갖는 2차원의 면내층으로 취급되고 철근 방향의 축방향력에만 저항한다고 가정한다.

콘크리트에 대해서 기술된 탄-점소성 모델에서의 변형률 속도는 식 (5)에서 구한다.

$$\dot{\epsilon}_{vps} = \pm \gamma(\dot{\epsilon}_s)(\boldsymbol{\sigma}_s - \boldsymbol{\sigma}_y) / \boldsymbol{\sigma}_y \quad (5)$$

여기서 $\boldsymbol{\sigma}_s$: 보강 철근의 현재 응력

$\boldsymbol{\sigma}_y$: 보강 철근의 항복 응력으로서 일정하다고 가정한다.

또한 흐름계수는 식(6)에서 구한다.

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

여기서 a_0 와 a_1 은 실험적으로 정해지는 수치이다.

5. 균열 발생 후 전단력의 전달

균열 콘크리트의 전단력 전달 능력의 고려는 균열 콘크리트의 구성방정식에서 전단계수를 감소시키는 단순화된 접근방법이 일반적으로 사용된다.

$$G_c = \beta G_0 \quad (7)$$

여기서 G_c : 균열콘크리트의 전단계수

G_0 : 균열이 발생하지 않은 콘크리트의 전단계수

β : 감소계수로서 0.0~1.0 사이의 값을 갖는다.

일반으로 감소계수는 식 (8)로부터 계산된다.

$$\beta = 1 - (\epsilon_t / 0.005)^{k_1} \quad (8)$$

여기서 ϵ_t : 균열면에 수직한 방향의 가상 인장 변형률

k_1 : 0.3~1.0 사이의 값

III. 수치에 및 고찰

수치예제에서 모델로서 선정된 구조물은 Fig. 1과 같은 4m x 4m 크기의 주변 고정 철근 콘크리트 슬래브이다. 선정된 모델 구조물은 대칭성을 고려하여 전체영역의 1/4을 16개의 요소로서 모델링 하였다. 이때 사용된 재료의 성질은 Table 1과 같다.

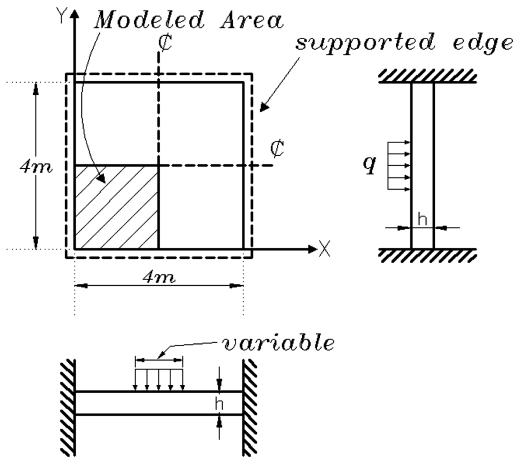


Fig. 1 Geometry of clamped R/C slab

Table 1 Material properties (unit: MPa)

material	properties	
concrete	Elastic modulus E_c	2.0×10^5
	Poisson's ratio ν	0.17
	Ultimate comp. stress f_c	35.0
	Ultimate comp. strain ϵ_u	0.0035
steel	Elastic modulus E_s	2.0×10^6
	Yield stress f_y	460.0

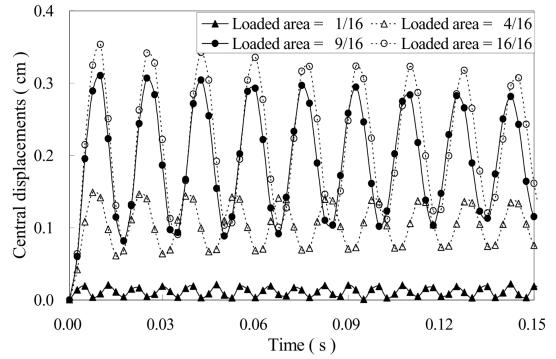


Fig. 2 Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to loaded area in case of load intensity $q = 0.1\text{MPa}$

수치예에서 고려된 하중은 단계하중과 정현곡선으로 주어지는 조화하중이 작용하는 것으로 하였다.

(1) 하중 분포 면적에 따른 동적 거동

$q = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ 의 크기를 갖는 분포하중의 작용 면적을 달리 하였을 경우 슬래브 중앙변위의 동적 거동은 Fig. 2와 같다. 하중의 작용면적은 슬래브의 중앙을 중심으로 전체 면적의 1/16, 4/16, 9/16 및 16/16으로 하였다.

일정한 크기를 갖는 분포하중이 작용하는 경우 분포면적이 증가할수록 변위와 진동주기는 모두 점차로 증가되었다. 하중분포 면적이 전체면적의 16/16~1/16으로 감소함에 따라 피크에서의 변위는 각각 3.54 mm, 3.1 mm, 1.49 mm 및 0.193 mm로서 전체 면

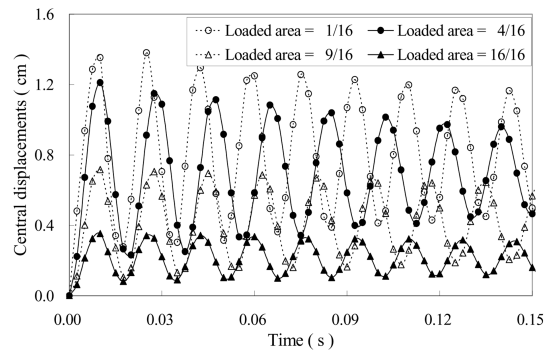


Fig. 3 Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to loaded area in case of total load is constant

적에 하중이 작용하는 경우의 변위 3.54 mm를 기준하여 87.6%, 42.1% 및 5.5%로서 분포면적이 4/16 이하일 때 변위의 감소가 현저하였고, 특히 분포면적이 1/16인 경우에는 변위 및 진동주기가 현저하게 감소하였다.

슬래브에 작용하는 전체 하중의 크기를 일정하게 한 후 분포면적을 달리 하였을 경우 동적 거동은 Fig. 3과 같다.

슬래브에 작용하는 전체 하중의 크기를 일정하게 한 후 분포면적을 다르게 한 경우 분포면적이 작을수록 피크에서의 변위는 크게 나타났고 특히 하중분포 면적이 전체면적의 1/16 및 4/16 일 때 변위의 차이는 크지 않았지만 하중분포면적이 전체면적의 9/16 및 16/16이면 변위의 감소가 현저하였다. 구체적으로 하중분포 면적이 전체면적의 16/16~1/16로 감소함에 따라 피크에서의 변위는 각각 3.54 mm, 7.17 mm, 12.1 mm 및 13.5 mm로서 전체 면적에 하중이 분포하는 경우의 변위 3.54 mm를 기준으로 할 때 202.5%, 341.8% 및 381.3%로서 분포면적이 4/16 이하일 때 변위의 증가율이 현저하였다.

(2) 조화하중의 크기에 따른 동적 거동

$f(t) = b_0 \sin \omega t$ 로 주어지는 조화하중의 진동수가 각각 4 Hz와 10 Hz이고, 0.1~1.6 MPa인 조화하중이 작용할 때 슬래브의 동적 거동은 Fig. 4와 같다.

조화하중의 진폭이 증가함에 따라 변위는 점차 증가하였지만 진동모드는 큰 차이가 없었다. 진동수가

4 Hz인 경우 하중의 진폭에 따른 피크에서의 최대변위는 1.81 mm, 2.38 mm, 3.00 mm 및 3.68 mm로서 진폭 1.0일 때의 변위 1.81 mm에 비하여 31.4%, 65.7% 및 103.3% 증가 하였으며, 최소 변위는 -2.11 mm, -2.84 mm, -3.94 mm, 및 -4.72 mm로서 하중의 진폭 1.0일 때의 변위 -2.11 mm에 비하여 34.5%, 86.7% 및 123.6% 증가를 나타냈다.

한편 진동수 10 Hz인 경우 하중의 진폭에 따른 피크에서의 최대변위는 2.47 mm, 3.54 mm, 4.31 mm 및 4.92 mm로서 진폭 1.0일 때의 변위 2.47 mm에 대하여 최대변위는 43.3%, 74.4% 및 99.1% 증가 하였으며 최소변위는 -2.82 mm, -3.85 mm, -4.64 mm 및 -5.31 mm로서 진폭 1.0일 때의 변위 -2.82 mm에 비하여 36.5%, 64.5% 및 88.2%의 증가를 나타냈다. 하중의 진폭이 1.2~1.4인 경우에는 진동수가 10 Hz인 경우에 변위의 증가가 더 크게 되었지만 진폭이 1.6인 경우에는 오히려 진동수가 4 Hz인 경우에 변위의 증가가 더 크게 나타났다.

(3) 조화하중의 진동수에 따른 동적 거동

조화하중의 진동수를 4~40 Hz로 변화시켰을 경우 변위의 동적 거동은 Fig. 5와 같다.

조화하중의 진동수가 증가함에 따라 변위는 현저히 증가되었다. 구체적으로 조화하중의 진동수가 4~40 Hz로 증가할 때 피크에서의 최대 변위는 1.83 mm, 2.82 mm, 3.06 mm, 4.41mm 및 9.99mm 로 증가 하였다. 이를 $f(t) = 1.0$ 의 단계하중이 작용할 때 피크

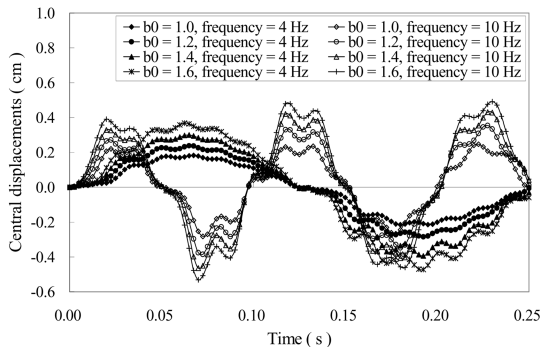


Fig. 4 Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to amplitude and frequency of harmonic load

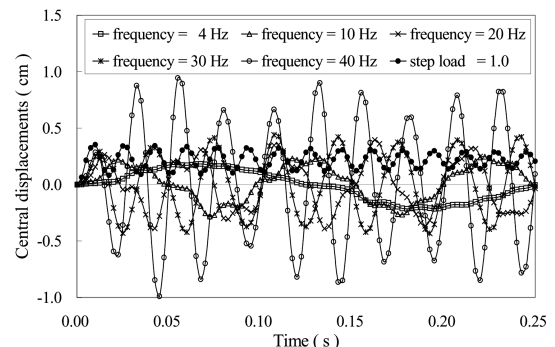


Fig. 5 Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to frequency of harmonic load

에서의 최대변위 3.54 mm와 비교하면 51.7%, 79.7%, 86.4%, 124.6% 및 279.7%의 변위가 발생되었다. 즉 조화하중의 진동수가 30 Hz 이상이면 단계하중이 작용하는 경우보다 큰 변위가 발생되었다. 그림의 제시되지는 않았지만 진동수가 50 Hz인 경우에는 대단히 큰 변위가 발생되었다. 이를 앞의 경우와 비교하면 조화하중이 작용하는 경우 하중의 크기보다 오히려 하중의 진동수가 더 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

(4) 감쇠를 고려한 경우 동적 거동

감쇠에 따른 동적 거동을 알아보기 위하여 감쇠를 0%, 1% 및 5%로 하였을 경우 동적 거동은 Fig. 6과 같다. 여기서 감쇠 0%는 비감쇠를 의미한다.

조화하중의 진동수가 2 Hz인 경우 진동 초기에는 감쇠의 영향이 없었지만 0.4초 후 변위는 비감쇠인 경우 1.49mm, 감쇠 1%의 경우 2.14mm 및 감쇠 5%의 경우 2.34mm로서 비감쇠의 경우와 비교하여 43.6% 및 57.0%의 감소가 있었다. 0.64초 후 변위는 비감쇠인 경우 2.77mm, 감쇠 1%의 경우 2.58mm 및 감쇠 5%의 경우 3.22mm로서 비감쇠의 경우와 비교하여 감쇠 1%의 경우에 6.8% 작게 나타났지만 감쇠 5%의 경우 오히려 16.2% 크게 나타났다. 한편 0.88초에서는 변위가 각각 1.69mm, 2.69mm 및 2.35mm로서 비감쇠의 경우와 비교하면 각각 59.1% 및 39.0% 큰 변위가 발생되었다. 즉 진

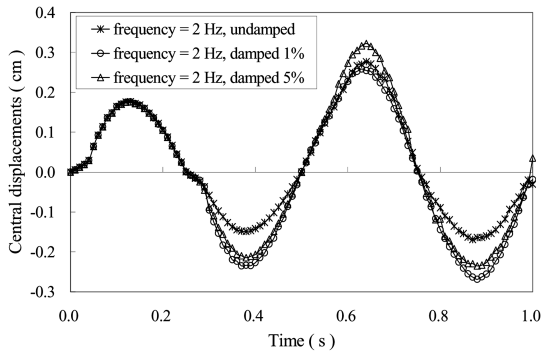


Fig. 6(a) Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to damping in case of harmonic loading (frequency = 2 Hz)

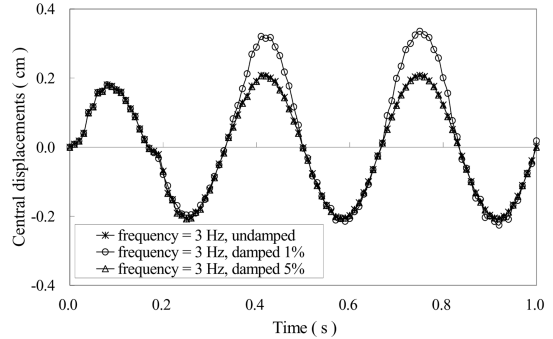


Fig. 6(b) Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to damping in case of harmonic loading (frequency = 3 Hz)

동수가 2 Hz인 경우 감쇠의 영향은 나타났지만 일정한 경향을 찾을 수가 없었다.

조화하중의 진동수가 3 Hz인 경우 비감쇠의 경우와 감쇠 5%인 경우에 진동현상은 거의 일치되었고, 감쇠 1%인 경우에 변위가 오히려 크게 발생되었지만 시간 0.8초 후 부터는 감쇠의 영향이 나타나지 않았다.

구체적으로 감쇠의 영향이 가장 크게 나타난 0.4초에서 변위는 비감쇠인 경우 2.08 mm, 감쇠 1%의 경우 3.20 mm 및 감쇠 5%의 경우 2.07 mm로서 비감쇠의 경우와 비교하여 53.8% 크게, 0.48% 작게 발생되었다. 한편 0.75초에서는 변위가 각각 2.07 mm, 3.36 mm 및 2.07 mm로서 비감쇠의 경우와 비교하면 감쇠 1%인 경우에 62.3% 큰 변위가 그리고 감

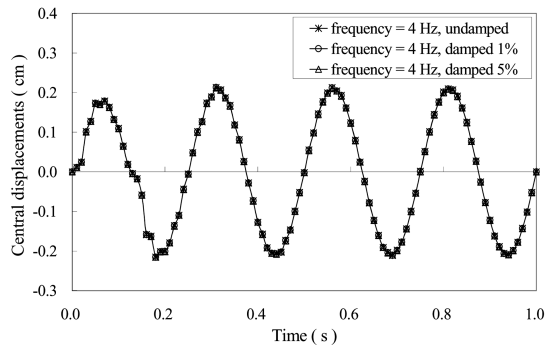


Fig. 6(c) Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to damping in case of harmonic loading (frequency = 4 Hz)

쇠 5%인 경우에는 일치되었다. 즉 진동수가 3 Hz인 경우에는 감쇠 1%에서 가장 큰 변위가 발생되었다.

그러나 조화하중의 진동수가 4 Hz인 경우에는 감쇠의 영향이 나타나지 않았다.

IV. 요약 및 결론

본 연구의 목적은 분포하중이 철근 콘크리트 슬래브의 동적 거동 특성에 미치는 영향을 규명하기 위한 것으로 이를 위하여 해석방법으로는 유한요소법이 사용되었고 구조계의 이산화에는 분산 철근층을 갖는 20 절점 비선형 입체 유한요소가 채용되었다. 분포하중의 조건은 단계하중 및 조화하중의 하중강도, 하중의 분포면적 및 진동수를 고려하였다.

본 연구에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

1. 하중강도가 일정한 경우 하중의 분포면적이 증가함에 따라 변위와 진동주기는 점차로 증가되었다. 하중분포 면적이 전체면적의 16/16~1/16으로 변화함에 따라 피크에서의 변위는 전체 면적에 하중이 작용할 때의 변위를 기준하여 87.6%, 42.1% 및 5.5%로서 분포면적이 4/16 이하일 때 변위의 감소가 현저하였고 특히 분포면적이 1/16인 경우에는 진동주기가 현저하게 감소하였다.

2. 슬래브에 작용하는 전체 하중의 크기를 일정하게 한 후 분포면적을 다르게 한 경우 분포면적이 작을수록 피크에서의 변위는 크게 나타났고 특히 하중분포 면적이 전체면적의 1/16 및 4/16일 때 변위의 차이는 크지 않았지만 하중분포면적이 전체면적의 9/16 및 16/16이면 변위의 감소가 현저하였다. 구체적으로 하중분포 면적이 전체면적의 16/16~1/16로 감소함에 따라 피크에서의 변위는 각각 3.54 mm, 7.17 mm, 12.1 mm 및 13.5 mm로서 전체 면적에 하중이 분포하는 것을 기준으로 할 때 202.5%, 341.8% 및 381.3%로서 분포면적이 4/16 이하일 때 변위의 증가율이 현저하였다.

3. $f(t) = b_0 \sin \omega t$ 형태의 조화하중의 진동수가 4~10 Hz이고 하중진폭(b_0)이 1.0~1.6일 때 진폭이 증가함에 따라 변위는 점차 증가하였지만 진동모드는

큰 차이가 없었다. 하중강도에 따른 변위의 증가는 조화하중의 진폭이 1.2~1.4인 경우에는 진동수가 10 Hz인 경우에 그리고 1.6인 경우에는 진동수가 4 Hz인 경우에 더 크게 발생되었다.

4. 조화하중의 진동수가 증가함에 따라 변위는 현저히 증가되었다. 조화하중의 진동수를 4~40 Hz로 변화시켰을 때 피크에서의 변위는 $f(t) = 1.0$ 의 단계하중 작용할 때 피크에서의 최대변위의 51.7%, 79.7%, 86.4%, 124.6% 및 279.7%의 변위가 발생되었다. 조화하중의 진동수가 30 Hz 이상이면 단계하중이 작용하는 경우보다 큰 변위가 발생되었다.

5. 조화하중이 작용하는 경우 진동수가 2 Hz인 경우 감쇠의 영향은 나타났지만 일정한 경향을 찾을 수가 없었으며 진동수가 3 Hz인 경우에는 비감쇠의 경우와 감쇠 5%인 경우에 진동현상은 거의 일치되었고 감쇠 1%에서 가장 큰 변위가 발생되었다. 그러나 진동수가 4 Hz 이상이면 감쇠의 영향은 나타나지 않았다.

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) : 89-96. (in korea)
2. Hinton, E, 1988, Numerical Method and Software for Dynamic Analysis of Plates and Shells, Pineridge Press, Swansea, U.K.
3. Hinton, E and D. R. J. Owen(1984), Finite Element Software for Plates and Shells, Pineridge Press Ltd., Swansea, U.K.
4. 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, Vol. 22 No. 2-A, pp.355-364. (in korea)
5. Kankam, J. A. and H. J. Dagher(1995),

- “Nonlinear FE analysis of RC skewed slab bridges”, J. Struct. Engrg., ASCE, Vol.121, pp.1338-1345.
6. Kupfer, H., K. H. Hilsdorf and H. Rush (1969), “Behaviour of concrete under biaxial stresses, Proc. Amer. Concrete Inst., Vol. 66(8), pp.656-666.
 7. Mondkar and Powell, G. H., 1977, Finite Element Analysis of Nonlinear Static and Dynamic Response, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 11, pp.499-520.
 8. Oh, Kyung Yoon, Jin Goo Cho, and Chong Hyun Hong, 2007, Effects of Design on the Dynamic Response of Reinforced Concrete Slabs, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 49(6) : 3-10. (in korea)
 9. 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)
 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, Vol. 35 No. 2, pp. 137-157.
 11. Vecchio, F.J. and M. Tata, 1999, “Approximate analyses of reinforced concrete slabs”, Structural Engineering and Mechanics, Vol.8, No.1, pp.1-18.