

재료 특성이 철근 콘크리트 슬래브의 동적 거동에 미치는 영향

Effects of Material Characteristics on the Dynamic Response of the Reinforced Concrete Slabs

오 경 윤* · 조 진 구**·† · 홍 중 현***

Oh, Kyung Yoon · Cho, Jin Goo · Hong, Chong Hyun

Abstract

The reinforced concrete slab is one of main structure members in the construction industry sector. However, most of researches regarding to RC slabs have been focused on two-dimensional Mindlin-type plate element on the basis of laminated plate theory since three-dimensional solid element has a lot of difficulties in finite element formulation and costs in CPU time. In reality, the RC slabs are subjected to dynamic loads like a heavy traffic vehicle load, and thus should insure the safety from the static load as well as dynamic load. Once we can estimate the dynamic behaviour of RC slabs exactly, it will be very helpful for design of it.

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 applicability of the proposed finite element has been tested for dynamic behaviour of RC slabs with respect to characteristics of concrete materials in terms of cracking stress, crushing strain, fracture energy and Poisson's ratio. The effect on dynamic behaviour is dependent on not crushing strain but cracking stress, fracture energy and Poisson's ratio. In addition to this, it is shown the damping phenomenon of RC slabs has been identified from the numerical results by using Rayleigh damping.

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

1. 서 론

철근 콘크리트구조물은 현대 산업사회에서 가장 많이 사용되어지고 있는 구조형식이다. 철근 콘크리트 구조물에 하중이 작용하여 탄성한계를 벗어나면, 비선형 거동 및 비탄성 거동을 하게 되므로 철근콘크

리트 구조물의 비선형 해석에 대한 연구가 꾸준히 계속되어 왔다. 만일 철근 콘크리트 구조물의 동적 거동과 같은 특성을 정확하게 예측할 수 있다면 철근 콘크리트구조물의 설계는 한층 용이하게 될 것이다. 유한요소법의 확장으로 철근 콘크리트 구조물을 보다 정교하게 해석 할 수 있는 수치모델들이 많이 제안되고 있다. 최근까지 각광을 받고 있는 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 유한요소는 Hinton과 Owen(1984)이 제안한 등가단층법(equivalent single-layered approach)에 기초를 둔 퇴화 쉘요소(degenerated shell element)이다.

* 전남대학교 대학원, 정주건설(주)

** 전남대학교 명예교수

***탐라대학교 토목환경공학과

† Corresponding author. Tel.: +82-62-530-2151

Fax: +82-62-530-2159

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

철근 콘크리트구조물은 교통하중과 같은 충격하중에 대해서 안전성이 확보되어야하고, 이를 위해서는 정하중은 물론 동하중에 대해서도 안전성이 보장되어야한다.^{1,2)} 구조물의 동적응답에 대한 연구는 항공기 설계에서 널리 사용되어 왔으며, 최근에는 빈번한 지진의 발생으로 일반 구조물의 설계에서도 많은 관심을 받게 되었다.⁸⁾ 철근 콘크리트 구조물에 관한 지금까지 이루어진 연구에서 구조물의 모델링에 많이 이용된 적층 쉘 요소는 요소의 두께 방향으로 몇 개의 층으로 구성되어 있고 이때 각 층은 평면응력 상태에 있다고 가정한다. 그러나 이러한 가정은 중면에 수직한 법선응력을 무시하는 것이다. 더구나 대부분의 모델에서 면내응력은 전단응력과 분리 취급되는데 이것은 실제와 일치되는 것은 아니다. 이러한 이유로 철근 콘크리트 구조물을 정확하게 그리고 효율적으로 해석하기 위해서는 3차원 요소의 사용이 필요하다. 3차원 해석은 쉘 정식화 보다는 많은 자유도를 갖게 된다. 그리고 요소의 생성, 해석 후 과정에서 세심한 주의를 필요로 한다.^{3,10)}

철근 콘크리트 구조물의 과도 동적 해석에서 사용될 재료모델은 변형률 속도의 민감성과 강도의 점증적인 저하 현상이 반드시 포함되어야 한다.^{5,10)} 탄-점소성 모델은 이러한 재료의 실제 거동을 잘 근사 표현하고 있다. 따라서 본 연구에서는 재료의 실제적인 거동과 잘 일치하는 탄-점소성 모델에 의해서 재료 비선형성을 고려하였으며 보강 철근은 등가의 두께를 갖는 2차원의 면내층으로 취급되고 철근 방향의 축방향력에만 저항한다고 가정하였다.

본 연구는 분포된 철근층을 갖는 20 절점 입체 유한요소모델을 주변에서 고정된 철근 콘크리트 슬래브의 동적 해석에 적용하여, 재료 특성에 따른 슬래브의 동적 거동특성을 규명하는데 있다. 이를 위해 균열응력, 파쇄변형률, 파괴에너지 및 포아송 비 등의 재료 특성이 고려되었고, 요소생성의 자동화를 위한 프로그램을 개발하였다.

II. 유한요소 해석

철근 콘크리트 슬래브의 동적 거동 해석에서 해석 방법으로는 유한요소법을 사용하였으며 Fig. 1과 같

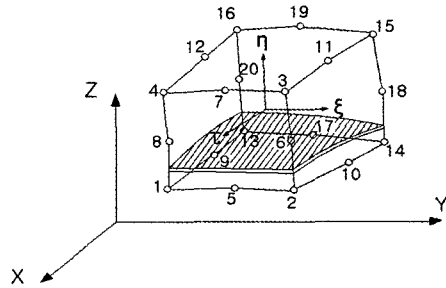


Fig. 1 Isoparametric solid element with smeared reinforcement

은 분산된 철근층을 갖는 20절점 등대개변수 입체요소³⁾가 채용되었다.

1. 동적 해석

동하중을 받는 구조물의 임의시간 t_n 에서의 평형방정식은 다음과 같다.

$$\underline{M}\ddot{\underline{d}} + \underline{C}\dot{\underline{d}} + \underline{P}(\underline{d}, \dot{\underline{d}}) = \underline{F} \quad (1)$$

여기서 $\underline{d}, \dot{\underline{d}}, \ddot{\underline{d}}$: 절점 변위, 속도 및 가속도 벡터

\underline{M} : 질량 행렬

\underline{C} : 감쇠 행렬

$\underline{P}(\underline{d}, \dot{\underline{d}})$: 저항 절점력 벡터

\underline{F} : 절점 외력 벡터

식 (1)의 시간적분 방법으로는 Newmark^{2,8)} 방법이 적용되었고 평형 방정식의 해를 구하는 데는 보편적으로 많이 사용되고 있는 Modified Newton-Raphson 반복법²⁾을 사용하였다.

2. 탄-점소성 모델

탄-점소성 모델에서 전체 변형률과 변형률 속도는 탄성성분과 점소성 성분으로 나눌 수 있다.^{5~7)} 따라서 임의 시간 t_n 에서의 전체 변형률과 변형률 속도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \underline{\epsilon}_n &= \underline{\epsilon}_e_n + \underline{\epsilon}_{vp_n} \\ \dot{\underline{\epsilon}}_n &= \dot{\underline{\epsilon}}_e_n + \dot{\underline{\epsilon}}_{vp_n} \end{aligned} \quad (2)$$

응력속도는 탄성 변형률 속도와 탄성행렬과 관련 하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\dot{\sigma}] = [D][\dot{\epsilon}_e] \quad (3)$$

한편 탄-점소성 모델에서 점소성 유동법칙은 Perzyna이 제안한 식 (4)가 널리 사용된다.

$$[\dot{\epsilon}_{vp}]_n = \gamma < \Phi_n(F) > \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}_n \quad (4)$$

식 (3) 및 식 (4)를 식 (2)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$[\dot{\epsilon}]_n = [D]^{-1}[\dot{\sigma}]_n + \gamma < \Phi_n(F) > \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}_n \quad (5)$$

여기서 $[\dot{\epsilon}]_n, [\dot{\epsilon}_e]_n, [\dot{\epsilon}_{vp}]_n$: 전체, 탄성 및 점소성 변형률 속도
 $[\dot{\sigma}]$: 응력속도
 $[D]$: 탄성행렬
 γ : 유동계수
 (F) : 항복함수
 $< \Phi_n(F) > = 0$: 항복이 일어나지 않았을 때
 $= 1$: 항복이 일어났을 때

또한 탄성상태에서 응력과 변형률은 다음의 관계가 있다.

$$[\sigma]_n = [D][\epsilon_e]_n \quad (6)$$

$[\sigma]_n$: 탄성상태에서 응력
 $[\epsilon_e]_n$: 탄성상태에서 변형률

한편 Euler 적분공식에 의하면 시간 t_{n-1} 에서의 변형률은

$$[\epsilon_{vp}]_{n+1} = [\epsilon_{vp}]_n + [\dot{\epsilon}_{vp}]_n \cdot \Delta t \quad (7)$$

여기서 Δt : 시간 간격

3. 콘크리트 균열의 모델링

무근 콘크리트의 재료 특징은 낮은 인장 강도를 갖고 있다는 것이며 이로 인하여 대단히 낮은 응력에서 인장 균열을 일으킨다. 유한요소 정식화 과정에서 콘크리트의 균열은 이산균열모델 또는 smeared crack model에 의해서 고려될 수 있다. 이산균열모델은 균열이 요소의 경계를 따라서 형성되는 경우에 적용되므로 전파되는 균열을 나타내기 위해서는 균열위에 경계를 갖는 새로운 요소를 도입해야 한다. 반면에 smeared crack model은 재료성질의 수정에 의해서 균열로인한 손상을 고려할 수 있는 편리함이 있으므로 구조공학분야에서 많이 사용된다. 따라서 본 연구에서도 이 접근법이 채용되었다.

4. 감쇠의 모델링

선형탄성 문제에서 감쇠에 관한 정보는 대단히 제한적으로만 알려져 있으며 특히 비선형의 경우에는 감쇠에 관한 유효한 자료는 거의 없는 실정이다.^{4,8)} 감쇠구조계의 동적응답은 비감쇠계의 동적응답에 비해 적으며 하중이 재하되는 초기시간에만 나타나므로 동적하중에 의한 구조계의 거동 해석에서는 감쇠효과를 무시한 해석이 지배적이다. 감쇠를 고려하는 경우 식 (1)에서 감쇠행렬은 식 (8)과 같이 주어진다.

$$C = \int_V N^T c N dv \quad (8)$$

여기서 c : 감쇠계수

N : 형상함수 행렬

일반으로 식 (8)에서 감쇠계수 c 는 알지 못하므로 감쇠행렬을 질량행렬과 강성도행렬에 비례한다고 가정하는 것이 관례화 되어 있다.⁴⁾ 즉 감쇠행렬을 식 (9)와 같이 나타내고 이것을 Rayleigh damping이라고 한다.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (9)$$

여기서 α, β 는 임의 비례상수이다.

III. 수치에 및 고찰

수치예제를 제시하기 위하여 모델케이스로서 선정된 구조물은 Fig. 2와 같은 4m × 4m 크기의 4변 고정 철근 콘크리트 슬래브이다. 선정된 모델 구조물은 대칭성을 고려하여 전체영역의 1/4만을 해석영역으로 하였고 요소의 분할은 x-축 및 y-축 방향으로 4등분 하였으며 z-축 방향으로 1등분하였고 철근층의 두께는 슬래브 두께의 1%로 하였다. 이때 사용된 재료의 성질은 Table 1과 같다.

1. 콘크리트의 균열응력에 따른 동적 거동

콘크리트의 균열응력을 파괴계수(fr)의 1.3배~0.8배(1.3fr~0.8fr)로 변화 시켰을 경우 슬래브 중앙 변위의 동적거동은 Fig. 3과 같다.

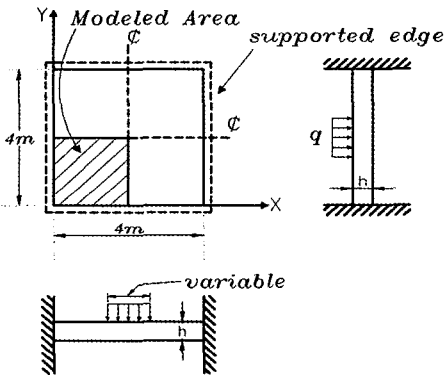


Fig. 2 Geometry of clamped R/C slab

Table 1 Material properties(cm, kg)

material	properties	
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 stiffness coef. α	0.5
	Tensile stiffn. coef. ϵ_m	0.002
steel	Elastic modulus E_s	2,000,000.0
	Yield stress f_y	4600.0
	Elastic modulus E_T	0.0

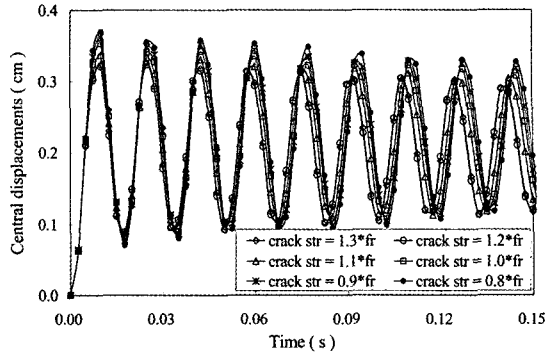


Fig. 3 Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to cracking stress

콘크리트의 균열응력이 증가함에 따라 슬래브 중앙의 변위는 점차로 감소하였다. 구체적으로 첫 번째 피크에서의 변위를 보면 균열응력이 1.3fr~0.8fr로 감소함에 따라 변위는 0.324cm, 0.322cm, 0.338cm, 0.354cm, 0.363cm 및 0.370cm로서 균열응력이 파괴계수와 같을 때의 변위 0.354cm를 기준하면 91.5%, 90.9%, 95.4%, 100%, 102.5% 및 104.5%로서 변위의 증가는 -8.5%, -9.1%, -4.6%, 0.0%, 2.5% 및 5.5%이었다. 균열응력이 파괴계수의 10% 증감에서의 변위의 증감을 보면 1.3fr~1.2fr일 때 0.6%, 1.2fr~1.1fr일 때 4.5%, 1.1fr~1.0fr 일 때 4.6% 1.0fr~0.9fr 일 때 2.5% 및 0.9fr~0.8fr 일 때 3.0%의 증감으로서 균열응력이 파괴계수의 1.2fr~1.0fr 일 때 변위의 증감이 가장 현저하게, 그리고 1.3fr~1.2fr일 때 변위의 증감이 가장 작게 발생하였다. 다섯 번째 피크에서의 변위를 보면 균열응력에 따라 0.314cm, 0.313cm, 0.319cm, 0.323cm, 0.335cm 및 0.349cm로서 균열응력이 파괴계수와 같을 때의 변위 0.323cm를 기준하면 97.2%, 96.9%, 95.6%, 100%, 103.7% 및 108.0%로서 변위의 증가는 -2.8%, -3.1%, -4.4%, 0.0%, 3.7% 및 8.0%이었다. 균열응력이 파괴계수의 10% 증감에서의 변위의 증감을 보면 1.3fr~1.2fr일 때 0.3%, 1.2fr~1.1fr일 때 1.3%, 1.1fr~1.0fr 일 때 4.4% 1.0fr~0.9fr 일 때 3.7% 및 0.9fr~0.8fr 일 때 4.3%의 증감으로서 균열응력이 파괴계수의 1.0fr~0.8fr일 때 변위의 증감이 현저하게, 그리고 1.3fr~1.2fr일 때 변위의 증감이 가장 작게 발생하였다.

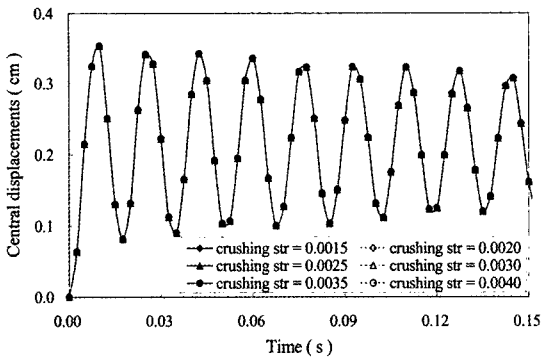


Fig. 4 Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to crushing strains of concrete

2. 콘크리트 파쇄변형률에 따른 동적 거동

콘크리트 압축연단의 파쇄변형률을 0.0015~0.0040으로 변화 시켰을 경우 슬래브 중앙 변위의 동적거동은 Fig. 4와 같다.

콘크리트 압축연단의 파쇄변형률에 따른 슬래브 변위의 동적 거동은 완전히 일치 되었다. 즉 파쇄변형률이 슬래브 변위의 동적 거동에 미치는 영향은 찾을 수 없었다.

그림의 제시는 되지 않았지만 철근두께 0.05cm 및 0.3cm 인 경우에도 파쇄변형률에 따른 거동은 완전히 일치되는 것을 확인하였다. 이것은 철근 콘크리트 슬래브가 인장지배를 받기 때문에 만일 압축지배의 경우라면 콘크리트 압축연단의 파쇄변형률의 영향이 있을 것이다. 그러나 실제 설계에서도 인장지배 단면으로 설계되기 때문에 문제 되지는 않을 것으로 판단된다.

3. 콘크리트 파괴에너지에 따른 동적 거동

콘크리트의 파괴에너지(fracture energy)의 값을 0.05kg/cm에서 0.2kg/cm로 변화시켰을 경우 슬래브 중앙 변위의 동적 거동은 Fig. 5와 같다.

콘크리트 파괴에너지의 값이 동적 거동에 미치는 영향은 비교적 크게 나타났다. 파괴에너지의 값이 0.05kg/cm~0.10kg/cm에서 피크에서의 변위의 감소가 현저하였고 0.15kg/cm~0.20kg/cm에서 피크

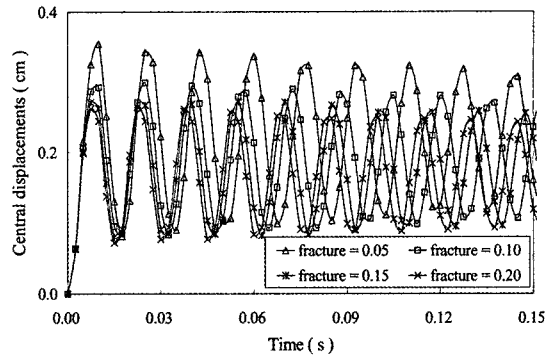


Fig. 5 Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to fracture energy of concrete

에서의 변위의 감소는 비교적 완만하였다. 구체적으로 첫 번째 피크에서의 변위를 보면 파괴에너지의 값에 따라 0.354cm, 0.292cm, 0.270cm 및 0.261cm로서 파괴에너지의 값 0.05kg/cm일 때의 변위 0.354cm를 기준으로 할 때 변위의 감소율은 각각 17.5%, 23.7% 및 26.2%로서 파괴에너지가 0.05kg/cm 증가함에 따라 변위의 증가는 17.5% 6.2% 및 2.5%로서 파괴에너지가 0.15kg/cm 이상이면 변위의 감소가 크게 둔화됨을 알 수 있다. 일곱 번째 피크에서의 변위는 0.323cm, 0.280cm, 0.256cm 및 0.249cm로서 파괴에너지의 값 0.05kg/cm일 때의 변위 0.323cm를 기준으로 할 때 변위의 감소율은 13.3%, 20.7% 및 22.9%로서 파괴에너지가 0.05kg/cm 증가함에 따라 변위의 증가는 13.3%, 7.4% 및 2.2%로서 파괴에너지가 0.15kg/cm 이상이면 변위의 감소가 크게 둔화됨을 알 수 있다. 또한 파괴에너지의 값이 증가 할 수 록 진동주기는 감소하였다.

4. 콘크리트 포아송 비에 따른 동적 거동

콘크리트의 포아송 비의 값을 0.0에서 0.2까지 변화시켰을 경우 슬래브 중앙 변위의 동적 거동 특성은 Fig. 6과 같다.

포아송 비의 값이 증가함에 따라 변위와 진동주기는 점차로 증가하였다. 구체적으로 첫 번째 피크에서의 변위를 보면 포아송 비의 값에 따라 0.285cm, 0.299cm, 0.322cm, 0.345cm 및 0.365cm로서 포아송 비

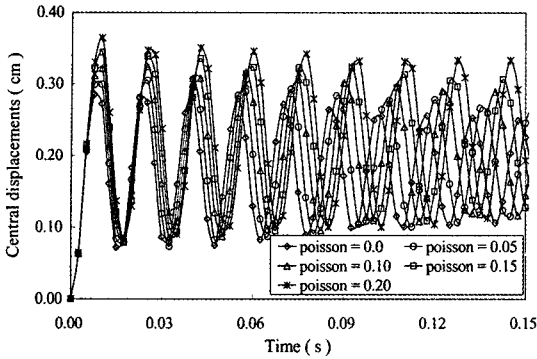


Fig. 6 Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to poisson's ratio of concrete

0.0일 때의 변위를 기준으로 4.9%, 12.9%, 21.0% 및 28.0% 증가를 나타냈다. 다섯 번째 피크에서의 변위를 보면 포아송 비의 값에 따라 0.271 cm, 0.293 cm, 0.306 cm, 0.324 cm 및 0.342 cm로서 포아송 비 0.0일 때의 변위를 기준으로 포아송 비의 값에 따른 변위의 증가는 8.1%, 12.9%, 19.5% 및 26.2% 증가를 나타냈다. 대개 포아송 비의 값이 0.05만큼 증가함에 따라 진동 초기 변위는 4.8%~8.0%의 증가를 나타냈다.

5. 감쇠율에 따른 경우 동적 거동

감쇠에 따른 동적 거동을 알아보기 위하여 감쇠율을 0%, 1% 및 5%로 하였을 경우 동적 거동은 Fig. 7 과 같다. 여기서 감쇠율 0%는 비감쇠를 의미한다.

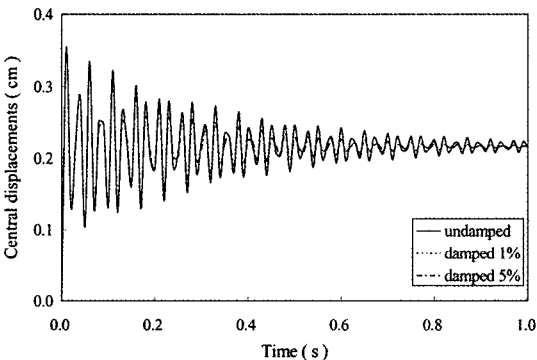


Fig. 7 Dynamic response of deflection at central point of R/C slab according to damping

감쇠율이 클수록 진동현상이 빠른 속도로 소멸되는 현상을 볼 수 있으며 감쇠율 5%의 경우를 보면 약 1초 후 진동현상은 소멸되는 것을 알 수 있었다. 비감쇠의 경우에도 진동시간에 따라 변위에 감쇠현상이 발생하는 것은 본 연구에서 사용된 재료모델은 에너지 소산 효과(energy dissipative effects)를 포함하고 있기 때문이다. 일반적으로 재료모델의 정식화 과정에서 에너지 소산 효과가 고려되었을 경우 구조물의 감쇠는 1% 정도의 감쇠를 고려하는 것이 타당한 것으로 알려져 있다.³⁾

IV. 결 론

본 연구의 목적은 주변고정 철근콘크리트 슬래브의 동적거동 특성을 규명하기 위한 것으로 해석방법으로는 유한요소법이 사용되었고, 채용된 유한요소는 매립 철근층을 갖는 20 절점 비선형 입체 요소이다. 본 연구에서는 철근층이 매립된 20 절점 비선형 입체 유한요소모델을 이용하여 콘크리트의 재료특성에 따른 철근콘크리트 슬래브의 동적거동을 알아보았다.

본 연구에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

- 1) 균열응력에 따른 동적 거동 특성은 피크에서의 변위를 기준하면 균열응력이 파괴계수의 0.8배 일 때 최대 진폭을, 1.3배 일 때 최소진폭을 나타냈으며, 또한 균열응력이 클 수 록 진동주기는 짧아졌다.
- 2) 콘크리트 압축연단의 파쇄변형률에 따른 슬래브의 동적 거동은 완전히 일치 되었다. 즉 파쇄변형률이 슬래브의 동적 거동에 미치는 영향은 나타나지 않았다.
- 3) 콘크리트 파괴에너지가 0.05kg/cm~0.10kg/cm에서 변위의 감소가 가장 크게 나타났고 파괴에너지의 값이 0.15kg/cm이상이면 변위의 감소는 크게 둔화되었다. 또한 파괴에너지의 값이 증가 할 수 록 진동주기는 감소하였다.
- 4) 포아송 비의 값이 0.05만큼 증가함에 따라 변위는 진동 초기에 4.8%~8.0%의 증가를 나타냈다. 또한 포아송 비의 값이 0.15~0.20에서 변위의 증가가 가장 현저하였다.

5) 감쇠는 질량과 강성도에 비례한다고 가정하는 Rayleigh damping에 의해서 감쇠를 고려하였으며 계산예를 통하여 철근 콘크리트 슬래브의 감쇠현상을 확인할 수 있었다. 일반적으로 재료모델의 정식화 과정에서 에너지 소산 효과가 고려되었을 경우 구조물의 감쇠는 1% 정도의 감쇠를 고려하는 것이 타당한 것으로 알려져 있다 (Hinton).

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 Ernest and D.R.J. Owen(1984), Finite Element Software for Plates and Shells, Pineridge Press Ltd., Swansea, U.K.
3. Hinton Ernest, 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., Vol.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, Vol.22 No. 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, Vol.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, Vol. 11, pp. 499-520.
8. Owen, D. R. J. and E. Hinton, 1980, Finite elements in plasticity, Pineridge Press, Swansea, U.K.
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, 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