

반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 피로손상

Fatigue Damage of Reinforced Concrete Bridge Columns Subjected to Cyclic Load

김 태 훈* 김 운 학** 신 현 목***
Tae-Hoon Kim Woon-Hak Kim Hyun-Mock Shin

ABSTRACT

This paper presents an analytical prediction of the fatigue damage of reinforced concrete bridge columns subjected to cyclic load. Material nonlinearity is taken into account by comprising tensile, compressive and shear models of cracked concrete and a model of reinforcing steel. The smeared crack approach is incorporated. In boundary plane at which each member with different thickness is connected, local discontinuity in deformation due to the abrupt change in their stiffness can be taken into account by introducing interface element. The effect of number of load reversals with the same displacement amplitude has been also taken into account to model the reinforcing steel and concrete. The proposed numerical method for fatigue damage of reinforced concrete bridge columns subjected to cyclic load is verified by comparison with reliable experimental results.

1. 서 론

최근 들어 그리스, 터키, 대만 등에서는 큰 지진으로 인하여 수많은 인명 피해뿐만 아니라 건축물, 사회기간시설물 등에도 심각한 피해를 입었다. 이로부터 주요구조물의 내진성능의 확보가 인명 및 재산을 지진으로부터 보호하기 위하여 얼마나 중요한지를 다시 한번 확인할 수 있다.

지진시에 대비한 철근콘크리트 구조물의 내진성능평가를 위해서는 비탄성 범위에서 반복 주기하중을 받는 부재의 특성, 즉 부재의 연성, 강성저하, 에너지의 소산능력 등을 파악하여야 하며, 이를 위해서는 부재의 이력 거동 특성을 정확히 규명할 필요가 있다.

반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 최대 강도 이후의 거동을 해석적으로 예측하기 위해서는 해석모델에 하중재하 회수의 누적에 따른 강도 및 강성 저하의 영향을 고려할 필요가 있다. 즉, 철근콘크리트 구조물의 내진성능평가를 해석적으로 수행하기 위해서는 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 거동을 정확히 예측할 수 있는 재료모델 뿐만 아니라 하중재하 회수의 누적에 따른 강도 및 강성 저하의 영향을 고려할 수 있는 재료모델의 개발이 필요하게 된다.

이 연구에서는 철근콘크리트 부재의 역학거동의 해석적인 예측에 대해서는 저자들에 의하여 기 보

* 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 수료

** 정회원, 국립한경대학교 토목공학과 부교수

*** 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수

고된 논문¹⁻³⁾의 비선형 재료모델을 그대로 인용하고 같은 변위진폭에 있어서의 하중재하 회수에 대한 피로거동을 고려할 수 있는 모델을 개발함으로써 철근콘크리트 교각의 하중재하 회수에 따른 강도와 에너지 소산능력 등의 비선형 이력거동을 예측할 수 있는 해석기법을 제시하고자 한다.

2. 피로손상을 고려한 철근콘크리트의 비선형 재료모델

2.1 이차원 응력 하에서의 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트는 복합재료이며, 재료의 비선형성은 타구조재료에 비해 극히 복잡하다. 특히 균열발생 후의 비선형성은 현저하게 나타나며, 이러한 재료적 비선형성에 대해서는 철근콘크리트 요소의 직교 이방성의 가정에 따라, 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다¹⁻³⁾.

2.2 피로손상을 고려하기 위한 재료모델의 수정

지진하중과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각은 필연적으로 피로손상이 나타난다. 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동에 영향을 미치는 피로손상에는 큰 변형률의 교번작용으로 인한 주철근의 Low-cycle 피로와 반복하중 하에서의 콘크리트의 강도저하 등이 있다. 따라서, 이러한 영향들을 고려한 해석을 하여야만 정확한 비탄성 거동을 예측할 수 있는 것이다.

2.2.1 철근의 피로모델

지진하중과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 거동을 지배하는 주철근은 매우 큰 인장과 압축변형률을 교번으로 받는다. 이러한 큰 변형률의 교번작용으로 인한 Low-cycle 피로 문제는 휨부재에서 파괴의 두드러진 형태이다.

이 연구에서는 다음 식과 같은 Coffin - Manson의 제안식⁴⁾을 적용하였다.

$$\epsilon_{ap} = 0.0777(N_{2f_0})^{-0.486} \quad (1)$$

여기서, ϵ_{ap} 는 $\frac{\Delta \epsilon_p}{2}$, $\Delta \epsilon_p$ 는 $(\epsilon_p)_{\max} - (\epsilon_p)_{\min}$, N_{2f_0} 는 피로파괴시까지의 하중재하 회수, $(\epsilon_p)_{\max}$ 는 하중재하 회수당 최대변형률, 그리고 $(\epsilon_p)_{\min}$ 는 하중재하 회수당 최소변형률이다.

콘크리트 속의 철근에 대한 피로거동은 철근만의 특성과 함께 부착효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 이 연구에서는 철근만의 특성을 고려한 Coffin - Manson의 제안식을 많은 경우에 대한 해석결과로부터 다음 식과 같이 수정 제안하였다.

$$N_{2fr} = k_r N_{2f_0} \quad (2)$$

여기서, N_{2fr} 는 피로파괴시까지의 하중재하 회수, k_r 는 철근에 대한 수정계수 ($1.5 s_k$), s_k 는 $\frac{f'_{cc}}{f_{co}}$, f'_{cc} 는 구속된 콘크리트의 최대압축강도, f_{co} 는 구속되지 않은 콘크리트의 압축 강도이다.

이 연구에서는 Miner가 제안한 선형의 손상모델⁵⁾을 기본적으로 사용하였으며 많은 하중재하 회수

를 경험하는 경우의 누적 손상지수 (AD_r)는 다음 식과 같이 구한다.

$$AD_r = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(N_{2fr})_i} \quad (3)$$

또한 철근의 응력은 피로손상이 없다고 가정하고 구한 철근의 응력에 다음 식으로 정의한 피로 파라미터를 곱하여 산출함으로써 하중재하 회수의 누적에 따른 콘크리트 속의 철근의 응력저하를 고려하였다.

$$fgr_r = 1.0 - 0.3 \times AD_r \quad (4)$$

여기서, fgr_r 는 응력저하를 고려하기 위한 피로 파라미터이다.

2.2.2 콘크리트의 피로모델

콘크리트의 피로손상 중에서 가장 특징적인 것은 반복하중 하에서의 강도저하이다. 많은 실험결과들은 강도저하가 하중재하 회수의 함수인 것을 보여주고 있다.

이 연구에서는 Kakuta 등의 제안식⁽⁶⁾을 수정 제안하였다. 즉, 비선형 유한요소해석을 전제로 유한요소해석에서 필연적으로 계산되는 가우스적분점에서의 변형률을 이용하여 다음 식과 같이 피로파괴시까지의 하중재하 회수를 구한다.

$$(1) \quad \epsilon_{\max} < 0.7 \epsilon_{co}$$

$$\log \frac{N_{2fc}}{k_c} = \frac{1}{\beta} \left[1 - \frac{(\epsilon_{co} - \epsilon_{\min})^2 - (\epsilon_{co} - \epsilon_{\max})^2}{(\epsilon_{co} - \epsilon_{\min})^2} \right] \quad (5)$$

$$(2) \quad \epsilon_{\max} \geq 0.7 \epsilon_{co}$$

$$\log \frac{N_{2fc}}{k_c} = \frac{0.09 \epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} - 0.7 \epsilon_{co}} \frac{1}{\beta} \frac{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}}{\epsilon_{cu} - \epsilon_{\min}} \quad (6)$$

여기서, N_{2fc} 는 피로파괴시까지의 하중재하 회수, k_c 는 콘크리트에 대한 수정계수 ($2.0 s_k$), ϵ_{co} 는 구속되지 않은 콘크리트의 변형률, ϵ_{\min} 는 반복하중 하에서의 콘크리트의 최소변형률, ϵ_{\max} 는 반복하중 하에서의 콘크리트의 최대변형률, ϵ_{cu} 는 구속된 콘크리트 압축부재의 파괴시 압축변형률, 그리고 β 는 재료상수로서 0.0588이다.

또한 이 연구에서는 철근의 피로모델과 같이 Miner가 제안한 선형의 손상모델을 기본적으로 사용한다. 그리고 많은 하중재하 회수를 경험하는 경우의 누적 손상지수 및 하중재하 회수의 누적에 따른 콘크리트의 응력저하는 철근의 피로모델과 같이 식 (3) 및 식 (4)로써 표현하였다.

3. 비선형 유한요소해석프로그램 RCAHEST

유한요소해석 프로그램을 작성하는 방법은 사용목적에 맞는 전용 프로그램을 새롭게 작성하는 방법

과 사용자가 개발한 요소를 추가할 수 있는 모듈화된 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하는 방법으로 구분될 수 있다. 전자의 방법은 전용프로그램으로서 입력자료의 작성이 간단하고 해석시간을 줄일 수 있는 장점이 있는 반면에 이미 개발된 또는 앞으로 개발될 다른 종류의 요소와 조합으로 사용하기가 곤란하다.

이 연구에서는 후자의 방법을 택하여 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 그리고 경계면요소 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁷⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)¹⁾를 사용하였으며 이차원 응력 하에서의 철근콘크리트의 비선형 재료모델을 피로손상을 고려할 수 있도록 수정하여 적용하였다.

4. 수치예제 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석모델의 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 1에 나타난 것과 같은 철근콘크리트 교각의 실험체⁸⁾를 선정하였다. 이 실험체를 검증 예로 채택한 이유는 같은 변위진폭에 있어서의 하중재하 회수에 의한 철근콘크리트 교각의 피로거동을 정량화 시킨 실험이기 때문이다.

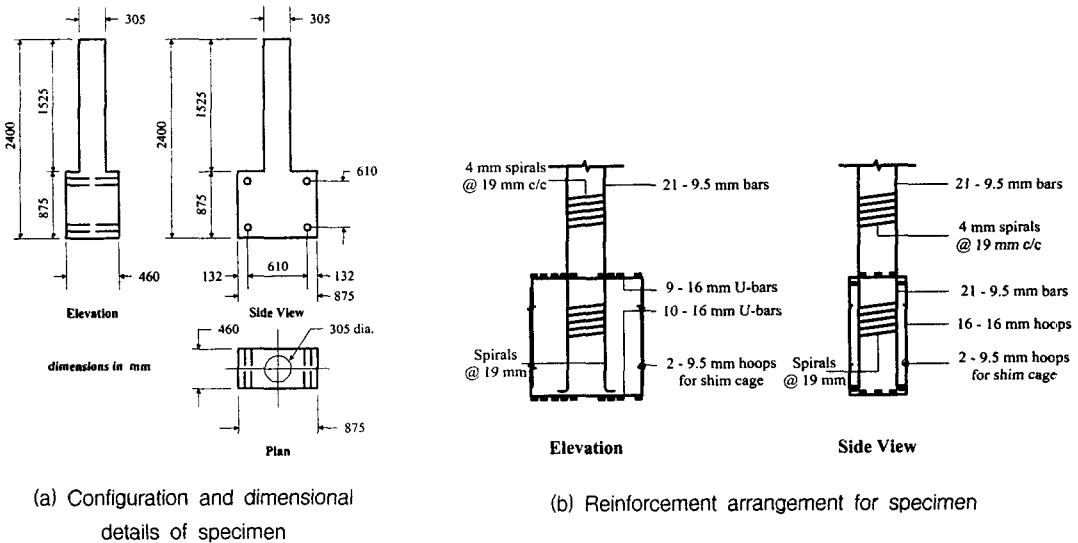


Fig. 1 Specimen details

실험체는 AASHTO의 규정에 따라 설계된 단일주 원형교각을 실험 여건상 1/4로 축소된 모형으로서 구조제원, 재료물성, 그리고 재하방법 등은 참고문헌⁸⁾에 자세히 설명되어있다.

실험체 A2는 증가되는 변위진폭을 가진 반복하중을 파괴시까지 재하한 경우이며 실험체 A3 ~ A6은 2Δy, 3Δy, 4Δy, 5Δy의 같은 변위진폭을 파괴시까지 재하한 경우이다⁸⁾.

이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 원형 철근콘크리트 교각을 등가환산단면을 이용하여 2차원 평면요소로 해석이 가능하도록 하였다. 등가환산단면은 원형 철근콘크리트 교각의 실제거동과 유사하도록 철근과 콘크리트의 단면적, 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트를 같게 하여 유도하였다²⁾. 또한 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 철근콘크리트요소 61개, 경계면요소 5개, 그리고 집중하중이 작용하는 부분의 파괴를 방지하기 위한 탄성요소 2개로 총 68개의 요소로 분할하였다. 철근콘크리트요소

의 경우에는 8절점을 갖는 면요소로서 3점 가우스적분을 적용하고, 경계면요소의 경우에는 6개의 절점을 가지며 요소의 길이방향으로 3개의 적분점에 대해서 변형률과 응력을 산정하도록 하였다.

Fig. 2는 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

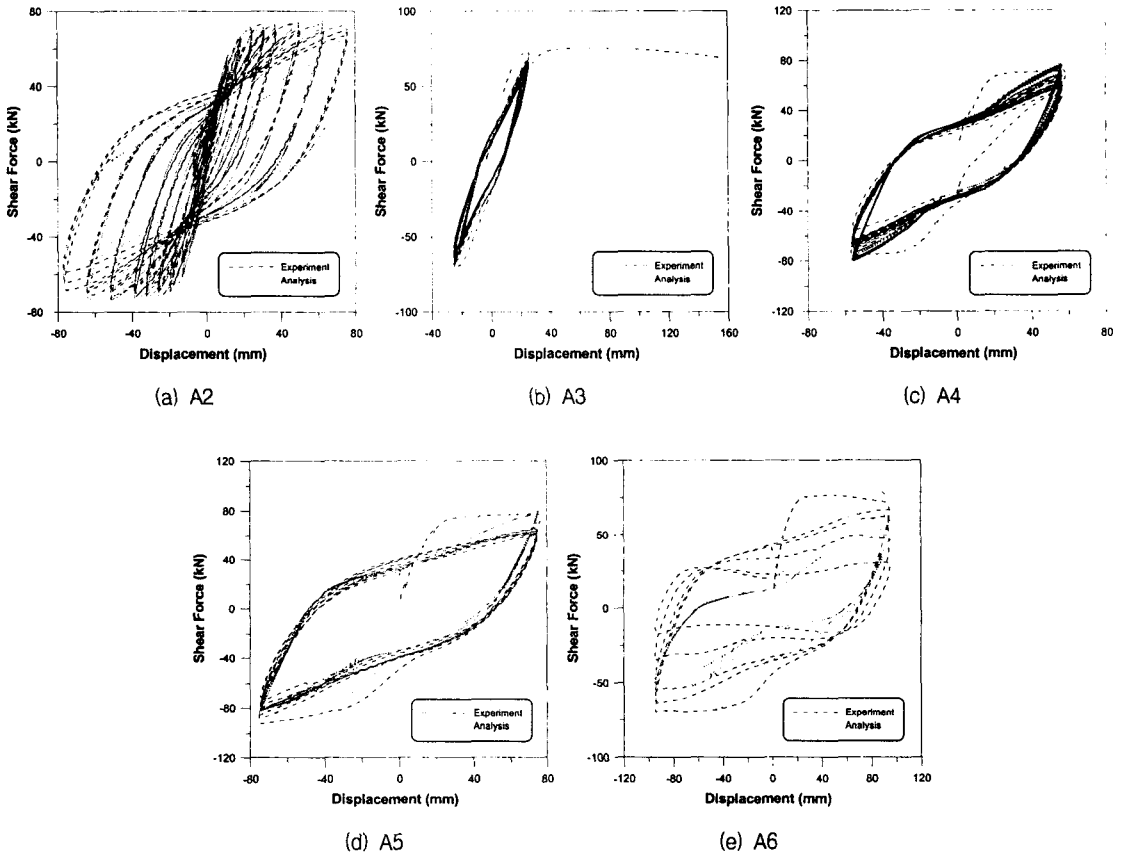


Fig. 2 Shear vs. Displacement response of specimen

이로부터 이 연구에서 제안하고 있는 피로손상을 고려한 해석모델은 실험체에 반복 주기하중이 진행되는 동안 소성흔지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 이로 인한 손상이나 파괴 등을 잘 추적하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

이 연구에서는 같은 변위진폭에 있어서의 하중재하 회수에 의한 철근콘크리트 교각의 피로손상을 포함한 비선형 거동을 파악하기 위한 해석기법과 모델을 제시하였고, 제안된 해석기법과 모델을 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램을 사용하여 반복하중을 받는 실험체를 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

1) 재료적 비선형성을 고려하기 위해서 균열 발생후의 콘크리트의 인장강성 및 압축강성, 균열면에

서의 전단전달강성, 철근의 부착 등에 대한 각각의 구성방정식을 조합하여 유한요소해석에 적용함으로써 지진하중과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각구조의 균열발생에서부터 철근의 항복 및 파괴에 이르는 모든 응력상태에 대한 비선형 거동을 비교적 충실히 예측할 수 있었다.

2) 지진하중과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비선형 이력거동 특성을 올바르게 평가하기 위해서는 하중재하 회수에 의한 피로거동을 무시할 수 없으며 이에 대한 충분한 고려가 필요하다. 이 연구에서는 철근과 콘크리트의 해석모델에 하중재하 회수의 누적에 따른 강도 및 강성 저하의 영향을 적용함으로써 피로손상을 고려하였다.

3) 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 피로손상을 포함한 비선형 거동을 제대로 평가함으로써 철근콘크리트 교각구조의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단 지원, 지진공학연구센터(KEERC)의 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김태훈, 신현목, "Analytical Approach to Evaluate the Inelastic Behaviors of Reinforced Concrete Structures under Seismic Loads," 한국지진공학회논문집, 제5권, 2호, 2001, pp. 113-124.
2. 김태훈, 이상철, 신현목, "비탄성 손상 해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가," 대한토목학회논문집, 제21권, 3-A호, 2001, pp. 361-372.
3. Kim, T. H., Lee, K. M., and Shin, H. M., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Shells Using Layered Elements with Drilling Degree of Freedom," *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 4, 2002, pp. 418-426.
4. Mander, J. B., Panthaki, F. D., and Kasalanati, K., "Low-Cycle Fatigue Behavior of Reinforcing Steel," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 6, No. 4, 1994, pp. 453-468.
5. Perera, R., Carnicero, A., Alarcon, E., and Gomez, S., "A Fatigue Damage Model for Seismic Response of RC Structures," *Computers and Structures*, Vol. 78, 2000, pp. 293-302.
6. Kakuta, Y., Okamura, H., and Kohno, M., "New Concepts for Concrete Fatigue Design Procedures in Japan," IABSE Colloquium on Fatigue of Steel and Concrete Structures, Lausanne, 1982, pp. 51-58.
7. Taylor, R. L., FEAP - A Finite Element Analysis Program, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
8. El-Bahy, A., Kunnath, S. K., Stone, W. C., and Taylor, A. W., "Cumulative Seismic Damage of Circular Bridge Columns: Benchmark and Low-Cycle Fatigue Tests," *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 4, 1999, pp. 633-641.