

비선형 정적해석을 이용한 철근 콘크리트 구조물 성능평가기법

Performance Evaluation Methods of Reinforced Concrete Structures using Nonlinear Static Analysis

윤 성 환* 박 대 효** 이도형***

Yun, Sung Hwan Park, Tae Hyo Lee, Do Hyung

ABSTRACT

There are representative two performance evaluation methods for performance-based design(PBD) of reinforced concrete structures by the nonlinear static analysis, one method includes the capacity spectrum method(CSM) suggested in ATC-40(1996) and the other is the displacement coefficient method(DCM) in FEMA-273(1997).

The objective of this paper is to compare and verify two methods and suggest the displacement-based design for new performance evaluation of reinforced concrete structures.

1. 서론

성능기반설계(performance-based design, 이하 PBD)라 함은 구조·비구조 요소와 내부 내용물에 대한 설계기준의 설정, 적절한 구조시스템 선정, 배치계획, 부재의 크기결정 및 상세 결정과 시공 상의 품질보증과 품질관리 및 장기적인 유지관리로 이루어져 있으며, 이미 규정한 신뢰도 범위 내에서 기준 외부하중 수준에 의한 구조물의 손상수준이 규정된 한계상태를 초과하지 않도록 한다. PBD를 수행하기 위해 먼저 목표요구성능을 위험도와 신뢰도 범위 내에서 결정하고, 특정한 성능목표를 달성할 수 있는 설계법을 선택하여 이에 따라 구조물을 설계하며, 설계의 적합여부를 검증하는 중요한 단계인 허용여부 검토 해석을 수행한다. 허용여부 검토 해석 단계에서는 해석에 의해 얻어진 응답변수와 산정된 목표요구성능 수준에 따른 응답변수의 허용제한값을 비교함으로써, 구조설계가 설계목표와 허용기준을 만족하는지를 판별하게 된다. 이러한 구조물의 성능을 평가하는 해석적 연구 중 가장 많이 적용되는 해석 방법이 pushover analysis 혹은 plastic hinge analysis라고 일컬어지는 비선형 정적해석(nonlinear static analysis, 이하 NSA)이다.

NSA는 구조물이 항복 이후에 발생할 수 있는 변형 능력에 대하여 예측하고, 고려된 외부하중에 대한 요구수준과 비교함으로써 대상 구조물의 비탄성 응답을 평가하는 간단하면서도 실용적인 해석 방법으로서, 대표적인 것이 ATC-40(1996)에서 제시하고 있는 능력스펙트럼법(capacity spectrum

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원, 한양대학교 토목공학과 부교수

*** 정회원, 배재대학교 토목공학과 조교수

method, 이하 CSM)과 FEMA-273(1997)에서 제시하고 있는 변위계수법(displacement coefficient method, 이하 DCM)이다. 위 방법들은 지진을 경험한 건축물에 대한 평가방법의 일환으로 내진공학에서 처음 소개되었으나, 구조물의 설계검토 및 기존 구조물에 대한 손상평가 등 성능에 기초한 공학의 모든 방법에 적용 가능하다.

본 연구에서는 CSM과 DCM의 개념을 정립하고 이를 비교·분석하여, 기존 연구방법의 이론적 근거와 근본적 가정에 대한 문제점을 파악하였고, 향후 나아갈 새로운 설계기법에 대한 비선형 해석 연구의 방향을 제시하였다.

2. 능력스펙트럼법(CSM)

CSM은 구조물이 보유하고 있는 저항능력이 예상 가능한 외부하중의 요구수준보다 커야한다는 개념을 해석적으로 평가할 수 있는 매우 효과적인 성능평가기법으로 가장 널리 사용되고 있다. 비선형 정적 해석을 이용하여 구조물의 횡하중에 대한 저항능력과 외부하중에 대한 목표요구성능을 스펙트럼 형식으로 서로 비교함으로써 비탄성 최대응답을 평가하는 해석 방법으로 전체적인 진행과정은 그림 1과 같다. 두 스펙트럼의 교차점인 성능점(performance point)은 구조물의 저항능력과 외부하중의 요구수준이 일치하는 점으로써, 구조물의 동적 평형이 이루어지는 상태를 의미하고 비선형 최대 변위 응답에 대한 강성과 강도의 영향을 매우 효과적으로 나타낼 수 있다

능력스펙트럼법의 가장 큰 특징은 구조물의 점성감쇠에 의하여 이력에너지 소산을 평가한다는 점이다. 유효감쇠(β_{eff})는 이선형 이력모델의 임계감쇠(β_0)와 소산된 이력에너지에 의한 등가감쇠(β_{eq})의 합으로 나타내고, 구조물의 강성저하 및 편칭과 같은 이력특성을 반영하기 위해 β_0 에 감쇠조정계수(damping modification factor, k)를 적용한다. 응답스펙트럼의 조정계수인 응답감소계수(spectrum

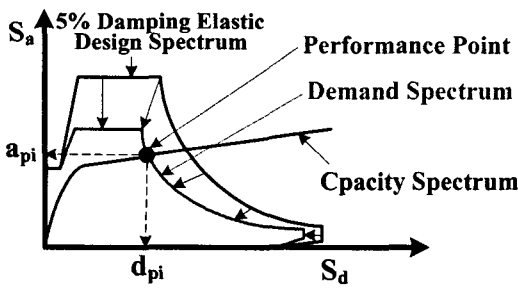


그림 1 능력스펙트럼법(CSM)

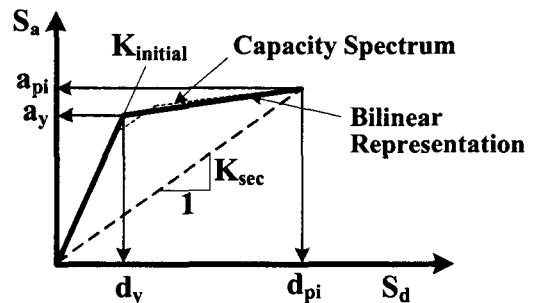


그림 2 활선 강선(secant stiffness)

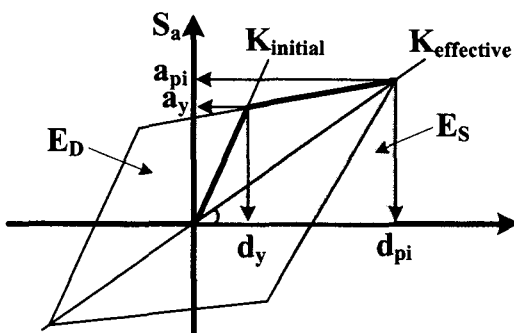


그림 3 유효 감쇠(effective damping)

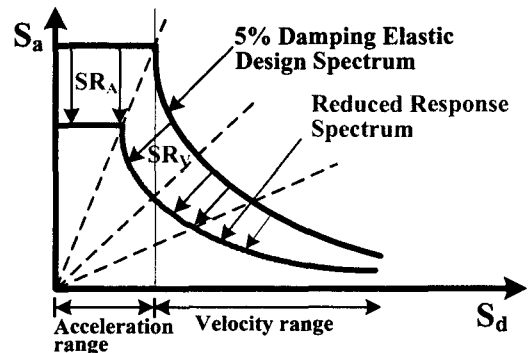


그림 4 응답감소계수(spectrum reduction factor)

reduction factor, SR)는 β_{eff} 를 이용하여 가속도구간의 응답감소계수(SR_A)와 속도구간의 응답감소계수(SR_V)로 구분하여 산정하며, 유효감쇠와 응답감소계수의 관계식은 다음과 같다.

$$\beta_{eff} = k\beta_0 + 0.05 = \frac{0.637k(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}}$$

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.681 \ln(\beta_{eff})}{2.12}, \quad SR_V = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}{1.65}$$

여기서, a_y : 성능스펙트럼상의 항복강도, d_y : 성능스펙트럼상의 변위, a_{pi} : 성능점강도, d_{pi} : 성능점변위

3. 변위계수법(DCM)

DCM은 비선형 최대 변위응답 산정에 있어서 탄성시스템에서의 최대변위에 대하여 비선형 시스템의 효과를 고려한 다양한 동적계수들을 사용함으로써 직접적이고 간단하게 적용할 수 있는 방법이다. 구조물의 비탄성 응답을 평가하는데 있어 매우 간단하고 실용적이기 때문에 예비설계 단계에서 주로 적용된다. 비탄성 특성이 반영된 구조물의 목표변위(target displacement) 결정 방법과 이에 대한 관계식은 그림 5에 나타나 있다.

여기서, T_e : 유효주기, T_i : 구조물의 탄성 1차모드 진동주기, K_i : 초기강성, K_e : 이상화된 곡선에서의 유효강성, C_0, C_1, C_2, C_3 : 비탄성 목표변위 산정을 위한 동적보정계수를 나타내고 각각의 계수 의미는 표 1에 나타나 있다.

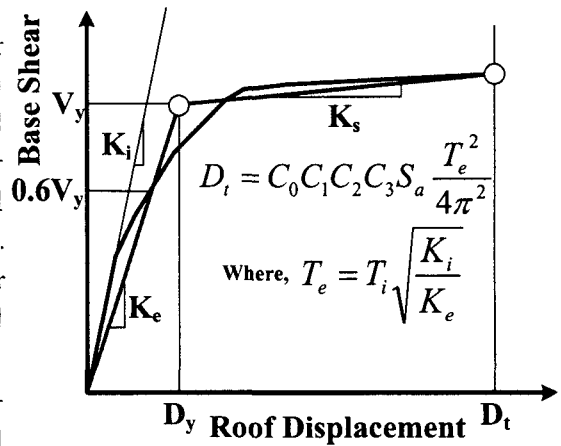


그림 5 변위계수법(DCM)의 목표변위 결정

표 1 동적보정계수

탄성 및 비탄성 변위 관계의 동적보정계수, C_1	이력거동을 고려한 동적보정계수, C_2	동적이차효과를 고려한 동적보정계수, C_3																								
$C_1 = 1.0$ $T_e \geq T_0$ $C_1 = \left[1.0 + \frac{T_0}{T} (R-1) \right]$ $T_e < T_0$ $C_1 = 2.0$ $T_e < 0$ $R = \frac{S_a \cdot W}{V_y} \cdot \frac{1}{C_0}$	<table border="1"> <tr> <td rowspan="2">구조물 성능수준</td> <td colspan="2">$T \leq 1.0$</td> <td colspan="2">$T < T_s$</td> </tr> <tr> <td>Framing Type 1</td> <td>Framing Type 2</td> <td>Framing Type 1</td> <td>Framing Type 2</td> </tr> <tr> <td>층시거주</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>인명안전</td> <td>1.3</td> <td>1.0</td> <td>1.1</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>붕괴방지</td> <td>1.5</td> <td>1.0</td> <td>1.2</td> <td>1.0</td> </tr> </table>	구조물 성능수준	$T \leq 1.0$		$T < T_s$		Framing Type 1	Framing Type 2	Framing Type 1	Framing Type 2	층시거주	1.0	1.0	1.0	1.0	인명안전	1.3	1.0	1.1	1.0	붕괴방지	1.5	1.0	1.2	1.0	$C_3 = 1.0$ $\alpha \geq 0$ $C_3 = 1.0 + \frac{ \alpha (R-1)^{3/2}}{T_e}$, $\alpha < 0$
구조물 성능수준	$T \leq 1.0$		$T < T_s$																							
	Framing Type 1	Framing Type 2	Framing Type 1	Framing Type 2																						
층시거주	1.0	1.0	1.0	1.0																						
인명안전	1.3	1.0	1.1	1.0																						
붕괴방지	1.5	1.0	1.2	1.0																						

여기서, T_0 는 설계응답스펙트럼에서 특정 지반스펙트럼에 관계되는 주기이고, T_s : 가속도와 속도 비례구간의 경계가 되는 주기이다. 탄성 단자유도 시스템에서의 최대변위와 비탄성 거동의 효과를 고려한 동적계수들은 단자유도 시스템의 응답에 의한 통계적 경험치에 의하여 결정되고, 초기강성이 목표변위를 산정하는데 있어 중요한 역할을 하며, 항복 후 발생하는 구조물의 강도에 대한 영향은 무시된다.

4. 능력스펙트럼법(CSM)과 변위계수법(DCM)의 문제점

CSM은 비선형 최대변위응답을 근사적으로 산정할 수 있으나, 고차모드 효과에 의하여 직접적으로 영향을 받을수 있는 층간변위, 층전단력, 전도모멘트, 소성힌지분포 등은 평가하기 어렵고, 외부하중에 의한 요구수준을 산정하는데 사용하는 탄성설계응답스펙트럼은 조화하중을 받는 단자유도 시스템의 응답에 의해 계산된 등가점성감쇠의 원리를 적용한 것으로, 비탄성 시스템에서 최대변위응답을 유발하는 충분한 감쇠를 등가점성감쇠로 평가하게 되면 유효감쇠를 과대평가할 수 있으며, 응답감소계수와 변위응답의 경우에는 과소평가하게 된다.

DCM에서 적용되는 동적보정계수 중 시스템의 진동주기에 매우 민감한 C_1 계수는 1차모드의 주기에 초기강성과 유효강성의 비에 비례하는 유효주기의 증가 등으로 인해 비탄성 변위응답을 지나치게 과대평가된다. C_2 계수는 구조시스템에 따라 경험적으로 평가되어 그 신뢰성이 떨어지고, 복잡한 P-Delta 효과를 단순화한 C_3 계수에 대한 신뢰성도 다소 부족하다.

5. 결론

ATC-40에서 제안된 능력스펙트럼법은 비탄성 응답을 일으키는 다양한 외부하중에 대해서 구조물에 발생하는 변위를 평가하는 방법으로 구조물의 비탄성 응답을 좀 더 정확하게 평가할 수 있으나, 유효감쇠의 과대평가로 인하여 변위 응답이 작게 평가되고, 시스템 연성도 및 국부적 응답 또한 매우 과소평가되었다. FEMA-273에서 제안된 변수계수법은 비탄성 최대응답을 평가하기 위해 탄성 단자유도 시스템에서의 최대변위와 비탄성 거동의 효과가 고려된 동적계수를 적용하여, 목표변위 산정을 간단하고 직접적으로 평가할 수 있으나, 변위응답을 과대평가함으로써 시스템 연성도 및 국부적 비선형 응답도 과대평가되었다.

성능기반설계(performance-based design)는 하중에 근거한 설계(force-based design)에서 변위에 근거한 설계(displacement-based design)로 전환되는 중간단계로서, 향후 구조물의 변위에 근거한 설계법이 완전하게 적용되기 위해서는 비선형 변위 요구수준에 대한 결정, 국부적인 부재의 요구수준과 시스템 전체에 대한 요구수준의 평가, 국부적 능력과 요구수준에 대한 비교 등에 대한 연구가 수행되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 산하의 한국건설교통기술평가원에서 후원하고 콘크리트코리아 연구단(05-CCCT-D11)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. ATC (1996) Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, *ATC-40 Report*, Applied Technology Council, Redwood City, California.
2. FEMA (1997) NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, *FEMA-273*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.