

건축물의 내진설계에서 정적 비선형해석의 적용과 오차에 대한 고찰

State-of-art on Its Application and Errors in Pushover Analysis of Building Structures

전 대 한*
Jun, Dae-Han

송 호 산**
Song, Ho-San

Abstract

The pushover analysis is becoming a popular tool for seismic design of building structures. In this paper the state-of-art on static nonlinear analysis of building structures is presented with the emphasis on the effects of analysis parameters; i. e., lateral load patterns, modeling of members, and analysis computer programs. The analysed results may have variation even if a same structure is analysed. This paper is to investigate how large the variation is and what the main causes of the variation are. The difference of analysed results, the resultant variation of lateral story shear force and flexural strength of structural members are discussed.

The pushover analysis procedure are routinely used in the seismic design of building structures, but some problems must yet be clarified, such as the effects to evaluate the parameters of analysis on the basis of a lateral load patterns and modeling of members.

Keywords : Pushover analysis, Skeleton curve, Plastic hinge, Ductility, Yield point

1. 서론

최근 건축물의 내진설계는 성능공학에 기초한 설계개념으로 구조설계의 패러다임이 바뀌고 있다. 건축구조물의 내진설계의 흐름을 간략히 살펴보면, 먼저 적절하게 내진성능 목표를 설정하여 그것에 따르는 효율적인 구조형식을 결정하는 단계, 즉 구조계획단계가 있다. 여기서는 건축물의 기능, 경제성, 건축주의 요구조건, 건축설계자의 요구조건, 시공조건에 부합하도록 내진 구조계획을 세운다. 공학적 판단, 경험, 구조물의 정적 및 동적거동 등의 개략적인 이해가 수학적 문제의 이해보다 먼저 요구된다. 재료적 거동과 지진동의 성질, 강성, 강도에 대한 기초적인 지식과 경험법칙이 구조물의 형상과 구조형식을 결정하는데 중요한 역할을 담당하게 된다.

다음으로 구조형식이 결정된 후, 구조해석 모델을 설정하고 단면설계를 실시하는 단계이다. 설계된 구조물에 대한 내진성능을 평가하고, 규정된 내진성능 목표에 가장 적합하도록 부재의 거동특성(내력, 강성, 변형능력)을 수정·보완하는 과정이다. 설계 지진동에 의해 부과되는 내진 요구내력(demand)의 추정, 중요한 내진성능지표(capacity parameter)의 확인, 내력성능지표에 대한 설정된 허용치 등 필요한 모든 성능수준에 대하여 요구성능 및 내력평가를 실시한다. 평가하고자 하는 성능수준에 따라 적절한 요구성능 평가법 뿐만 아니라 적합한 내진성능지표와 설정된 허용치는 달라질 것이다. 따라서 구조부재의 모델화, 해석에 사용되는 각종 변수 등이 성능평가에 중요한 영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 내진설계에서 사용되는 비선형 정적해석(이하 Pushover 해석)에 대하여 해석방법, 해석상의 주의점, 해석결과의 오차 등에 대하여 고찰하고자 한다.

* 정희원, 동서대학교 건축공학전공 부교수

** 정희원, 동의대학교 건축공학·빌딩시스템공학부 교수

2. Pushover 해석의 목적

구조물의 내진설계에서 비선형 시간이력해석법이 구조부재의 단면력, 변형(손상) 등을 예측하는데 가장 신뢰성이 높고 정확한 해석법임에는 틀림없다. 비선형 시간이력해석을 수행하기 위해서는 부재의 지반특성, 진앙거리, 지진동의 강도(세기), 계속시간 등에 대한 불확실성을 고려한 3방향 성분의 입력지진동의 설정이 필요하다. 또한 구조부재의 하중-변형 관계, 지반의 상호작용 효과, 해석방법의 타당성 등이 확립되어야 하므로, 실무적으로 시간과 경제적인 비용이 과다하게 소모된다. 그리고 구조부재의 변형능력, 허용한계상태에 대한 정의가 명확히 규정되어야 할 것이다.

이러한 최적의 해를 구하기 위한 노력은 필요하겠지만, 현재의 지식과 실무 현황을 감안하면 한계가 있음을 인식할 필요가 있다. 솔직히 말해 현 단계에서는 위에서 언급한 모든 항목들을 만족시킬 수 있는 방법은 없다^[9]. 이러한 한계점을 고려하여 상대적으로 간편하면서, 내진성능 평가에 중요한 영향을 미치는 인자를 파악할 수 있는 방법으로 성능평가를 수행해야 한다. 정확한 성능예측을 할 필요는 있지만, 입력지진동과 구조부재의 내력과 변형을 정확히 파악할 수 없기 때문에 정확한 성능평가는 거의 불가능한 일이다.

Pushover 해석의 목적은 비선형 정적해석으로 설계지진하중에서의 구조물의 요구강도와 요구변형을 파악하여 예상되는 구조물의 성능을 평가하고, 각 성능수준에서의 내진 요구와 구조물의 성능을 비교·평가하는 것이다. 성능평가는 최상층 변위, 층간변위, 부재의 비선형 변형, 부재와 접합부의 단면력 등 중요한 성능평가지표를 사용한다. 비선형 Pushover 해석은 탄성범위를 초과하는 관성력이 구조물에 작용할 때 발생하는 응력 재분배를 근사적으로 고려하여 단면력과 부재 변형을 계산하는 방법이다.

Pushover 해석은 탄성 정적 및 동적해석으로부터 얻을 수 없는 여러 가지 응답치를 제공한다. 이러한 응답치의 종류로서 다음과 같은 것이 있다.

- 기둥의 압축력, 브레이스 부재의 축력, 보-기둥

- 접합부 모멘트, 깊은 Spandrel 보의 전단력 등과 같은 취성 부재의 실제 요구강도의 파악.
- 지진동에 의한 변형도 에너지를 흡수하는 비선형 부재의 요구변형의 평가
- 구조물의 거동에 영향을 미치는 각 부재의 강도 저하 효과
- 큰 변형 능력이 요구되는 부위와 상세설계 부분의 파악
- 비탄성 영역에서 동적 특성에 변화를 일으킬 수 있는 평면 및 입면상의 강도 불규칙성 파악
- 강도 또는 강성 불규칙성 및 손상의 조절, P-Delta 효과를 고려한 층간 변위 파악
- 구조부재, 접합부, 내력에 영향을 미치는 중요한 비구조 요소 및 기초구조 등을 고려한 힘의 흐름을 정확하고 명확히 파악

Pushover 해석의 이러한 장점들은 중요한 모든 부재의 모델링 작업, 부재의 비선형 하중-변형 특성 설정, 3차원 비선형 중분 해석을 수행해야 하므로 추가적인 해석 비용을 가져오는 단점도 있다.

3. Pushover 해석의 방법

Pushover 해석과정은 구조부재의 선형 및 비선형 응답특성을 고려하여 2차원 또는 3차원 구조모델을 설정하여, 연직하중이 작용한 상태에서 정해진 수평하중 분포를 질량 중심의 질점에 작용시켜, 목표 변위에 도달할 때까지 수평력을 점점 증가시키면서 해석한다. 목표 변위에서 계산된 단면력과 변형으로 요구 성능의 허용치와 비교하여 성능을 확인한다.

간단한 예를 Fig. 1에 나타낸다. 그림은 가장 단순한 2차원 골조로서 수평하중만 작용할 때, 기둥과 보의 휨항복이 동시에 도달하도록 설정했다. Pushover 해석은 추가 수평하중이 작용하여 휨모멘트 강도에 도달하여 힌지로 취급되는 점까지 일련의 탄성해석으로 수행된다. 변형도 경화(hardening)나 연화(softening) 현상이 부재 응답의 중요한 특성이면 이선형 또는 다선형 하중-변형곡선이 고려되어야 한다. 해석은 목표변위 δt 에 도달할 때까지 수행하여, Fig. 1에 나타난 형태의 밀면전단력-지붕층 변위 관계를 얻는다. 목표

변위에서는 항복한지 발생과 P-Δ 효과 때문에 작은 정(+), 또는 부(-) 수평강성을 가지므로 대부분 변위를 조절하면서 해석을 수행한다. 목표변위에서의 부재력과 변형을 성능평가용 내력과 비교한다.

Pushover 해석에 의한 응답 예측 못지않게 구조 부재의 능력(내력)을 정확히 계산하는 것도 중요하다. 현재로서는 변위와 관련되는 허용 기준을 설정하여 도입할 필요가 있다. 정확한 변위 예측이 요구되지만 정확히 예측하기 곤란한 부분도 있다. 특히 열화현상(deteriorate)이 점진적으로 일어나는 부재에서는 예측이 매우 어렵다. 현실적으로 구조물의 붕괴와 인명안전을 위협하는 수직, 수평하중 흐름에 영향을 미치는 중요한 부재와 접합부의 취성 파괴 모드가 중요한 요소이다. 성능평가에서 주의하여야 할 부분은 다음과 같다.

- 원만한 하중 흐름 확인
- 목표변위 수준의 변형상태에서도 하중 흐름이 충분히 이루어지는지 확인
- 접합부가 부재요소 사이의 하중을 전달 할 수 있는지 검토
- 취성파괴 될 수 있는 부재와 과하중이 걸린 중요부재의 파악
- 국부파괴가 붕괴나 인명안전을 초래하고 있는 것이 아닌지, 파괴된 부재를 지배하고 있는 하중을 안전하게 다른 부재로 전달할 수 있는지, 파괴된 부재가 탈락되어 있는 것이 아닌지 등 확인

현재까지의 연구 성과를 기초로 신중히 Pushover 해석을 적용하면 대부분의 경우에 만족할만한 응답을 얻을 수 있다^[1]. 그러나 더 많은 연구와 개발을 통하여 해결되지 못한 부분을 밝힐 필요가 있다. 추가로 연구되어야 할 중요한 몇 가지 예를 들어 보면 다음과 같다.

- 비틀림 효과의 고려(질량, 강성, 강도 비정형성)
- 3차원 영향 문제(직교부재 효과, 하중 작용방향, 비강막 효과)
- 규정된 부지의 설계용 스펙트럼 사용
- 누적 손상 문제
- 매우 중요한 부재에서 국부적인 항복이 발생한 후의 고차모드의 영향 고려^[2]

지진동에 의한 비선형 응답을 일으키는 구조물

의 지진요구와 내진성능을 반드시 이 분야의 전문가가 아니라도 신뢰성 있게 적용할 수 있고, 모든 구조물에 일반적으로 적용할 수 있는 일반 범용 해석프로그램을 개발하는 것도 필요하다.

4. 해석 예

Fig. 1에 나타난 간단한 골조구조에 대한 Pushover 해석을 수행하여, 수평하중(P)의 증가에 따른 비선형 거동특성을 알아본다. 기둥, 보 부재의 휨모멘트-곡률 관계의 골격곡선은 이선형(bilinear)으로 하고, 항복 후의 강성은 초기강성의 3%로 설정한다. 재료의 탄성계수 $E=2.0 \times 10^8 \text{ kPa}$ 이고, 전단 및 축변형에 대해서는 선형탄성을 유지한다고 본다. 부재의 단면성질과 휨항복 강도는 다음과 같다.

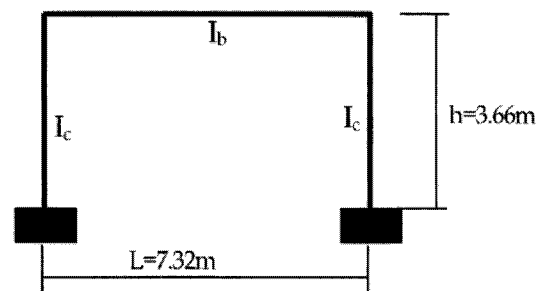
기둥 : 단면2차모멘트 $I_c=6.077 \times 10^7 \text{ mm}^4$

휨 항복강도 $f_y=50.18 \text{ kN-m}$

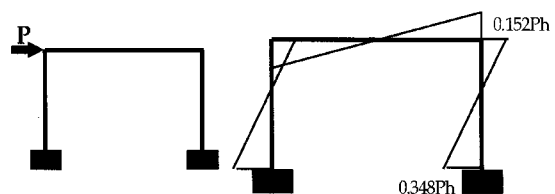
보 : 단면2차모멘트 $I_b=3.134 \times 10^7 \text{ mm}^4$

휨 항복강도 $f_y=21.65 \text{ kN-m}$

이와 같은 조건에서는 Fig. 2와 같이 수평하중만 작용하는 경우에는 기둥 하단부와 보의 양단부에서 동시에 휨항복 상태에 도달하게 된다. 따라서 Fig. 4



〈Fig. 1〉 해석모델

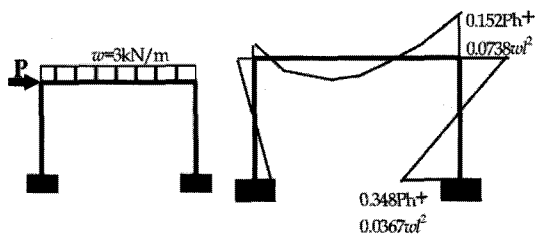


〈Fig. 2〉 수평하중에 의한 휨모멘트도

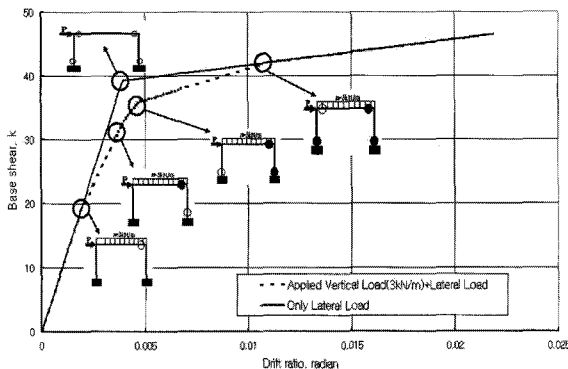
에서 굽은 선으로 표시된 하중-수평변형 곡선은 항복하중 $P_y=39.2kN$ 에서 항복이 발생하고, 동시에 불안정상태에 도달하여 붕괴기구를 형성한다.

일반적으로 건축구조물에서는 중력에 의한 수직하중이 작용하고 있는 상태에서 수평하중이 추가로 가해진다. 이러한 상태를 묘사하고 있는 것이 Fig. 3이다. 먼저 수직하중이 작용한 상태에서 수평하중이 점차 증가되면, Fig. 4의 점선과 같은 하중-수평변위 관계곡선이 얻어진다. 그림에서 현재의 하중 단계에서 휨항복이 발생한 위치를 ○로 표시하고, 소성힌지 상태에 있는 것을 ●로 표시하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 제일 먼저 보의 우측 단부에서 휨항복이 발생하고, 다음으로 우측 기둥의 하단부, 좌측 기둥의 하단부, 보의 좌단부 순서로 휨항복이 발생하는 것을 보여준다.

Fig. 4의 하중-수평변위 곡선은 수직하중에 의한 영향으로 항복하중과 항복변위에서 수평하중만 작용하는 경우와 뚜렷한 차이를 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 Pushover 해석을 수행할 때, 수직하중에 의한 단면력이 중첩될 수 있는 해석방법을 적용해야 할 것이다.



〈Fig. 3〉 수직하중+수평하중에 의한 휨모멘트도



〈Fig. 4〉 Pushover 해석결과

5. 수평하중 분포

구조물의 성능평가에서 수평 하중분포의 선정은 매우 중요한 문제이다. 수평 하중분포는 설계지진에 의한 관성력 분포를 나타내는 것이다. 관성력의 분포는 지진의 세기(비선형 변형의 크기)와 지진동의 시간이력에 따라 변화한다. 고정된 하중 분포가 사용된다는 것은 관성력 분포가 지진 시간이력동안 일정하다는 것으로 가정하는 것이며, 또한 일정한 하중 분포에서 얻어진 최대 변형은 설계 지진동에 의한 최대 변형과 대비될 수 있는 것으로 가정한다. 이러한 가정은 어느 정도는 타당성이 있지만 일반적으로 도입될 수 없는 가정이다. 구조물 응답이 고층 모드의 영향을 많이 받지 않고, 구조물은 고정된 하중 분포에 의해 발생하는 하나의 항복기구를 가지게 될 경우, 이 가정은 타당성이 있다.

적절한 고정 층 하중분포는 부재의 변형을 정확히 추정할 수 있다. 하나의 하중 분포는 설계 지진에 의한 국부적인 변형을 파악할 수 없기 때문에, 예상되는 극한 상태의 관성력 분포를 표현할 수 있는 최소한 2개의 하중 분포를 사용할 것을 권장한다. 일정 하중분포(uniform load pattern)는 상부층에 비해 하부층의 요구변형이 상대적으로 크게 나타나고, 전도모멘트보다 층전단력의 효과가 상대적으로 증폭된다. 그리고 현재의 설계기준에서 많이 사용되는 고차모드의 영향을 고려하여 SRSS법으로 층전단력을 유도한 설계하중 분포가 있다.

이들 고정된 층 하중분포는 국부 항복힌지 발생과 그에 따른 구조물의 동적성질 변화에 의한 관성력의 재분배를 고려할 수 없다. 그러므로 지진동의 시간이력 변화에 따라 관성력 분포가 변화하는 적응적 하중분포를 사용하는 것에 대한 연구가 이루어지고 있다^{[5][7][8]}. 또한 구조물의 변형 형상에 비례하는 층하중 분포, 각 하중 단계의 접선 강성으로부터 유도된 모드 형상에 따른 SRSS 하중분포, 앞 step의 층 저항 전단력에 비례하는 층하중 분포 등이 있다. 현재 적응적 하중분포에 대한 통일된 하중분포방법은 없으며, Pushover 해석의 정밀도를 높이고 신뢰성 있는 해석결과를 얻기 위해 개선된 하중분포가 필요하다.

현재 하중분포에 대한 문제가 Pushover 해석의 중요한 문제점 중에 하나라고 생각한다. 고정된 하중분포를 사용하면, 국부적으로 항복을 일으키는 장주기 건물의 응답을 잘 못 예측할 수 있다. 기존의 제안된 적응적 하중분포는 좋은 해석결과를 얻을 수도 있지만, 일반화 시킬 수 없다. 좀더 좋은 결과를 얻기 위해서는 하중분포에 대한 연구가 필요하다.

6. Pushover 해석의 문제점

비탄성 Pushover 해석 사용을 권장하는 이유는 정적탄성해석 및 동적탄성해석에 비하여 더 많은 정보를 제공하기 때문이며, 반면에 모든 경우에 대한 일반적인 해석 기법이 없어 권장을 저해하는 측면도 있다. Pushover 해석은 비선형 요구 변위와 강도를 계산하고 설계 취약 부위를 밝혀내는 도구로서 유익한 면도 있지만, 부정확성도 내포하고 있다. Pushover 해석의 장점은 구조설계자가 중요한 지진응답치를 파악하고 힘과 변위 요구에 대한 정확한 판단을 내리는데 도움이 되며, 파괴에 이르는 지진응답을 적절히 조절할 수 있도록 한다. 그러나 이 해석의 단점과 함정을 잘 알지 못하면 오히려 안전에 대한 잘못된 판단을 내릴 수 있다는 것을 알아야 한다.

신중히 수행된 pushover 해석은 강지진 동안의 구조 성능을 평가할 수 있는 구조적 안목을 제공한다. 주로 1차 모드로 진동하는 구조물에 대하여 건물 전체의 거동뿐만 아니라 국부적인 변형 요구도 상당히 정확히 평가할 수 있다. 비선형 해석에서 감추어져 있는 설계상의 약점을 밝혀낼 수도 있다. 그러한 약점으로 층 붕괴, 과도한 변형, 강도 불규칙성, 기둥과 접합부와 같은 취성부재에 대한 과하중 작용 등이 포함된다.

Pushover 해석은 당연히 근사 해석이며, 정적하중에 의한 해석이라는 것을 알아야 한다. 고도의 정확성을 갖는 동적해석을 대신할 수 없다. 강지진 시 구조물에 발생하는 중요한 변형 현상을 발견할 수 없으며, 밝혀낼 수도 없다. 고차모드의 영향이 중요한 경우, 비선형 동적해석은 정적해석의 하중

분포가 고정된 하중 분포이나, 적응적 하중 분포이나에 따라 정적해석의 결과와 상당히 달라진다.

또한 수평하중 분포의 형상에 따라 응답치가 달라지는 단점이 있다. 하중분포가 어떻게 선택되느냐에 따라 하중분포를 유도하는 변형모드로 기울고, 지진동과 구조물의 비선형 동적성질에 의해 생기거나 전달되는 다른 요인들을 놓치게 된다. 가장 간단한 예로 최상층에 약한 층을 갖는 경우이다. 고정된 하중 분포는 최상층에 비선형 변형이 집중되고 다른 층에는 비선형 변형이 전혀 일어나지 않게 한다. 그러므로 하중 분포의 선택과 선택된 하중분포에 대한 해석결과를 분석할 때, 현명한 판단이 요구된다.

Pushover 해석결과에 대한 정확성을 신중히 판단하기 위해서는 다양한 모양의 구조물에 대한 수많은 해석을 통하여 얻을 수 있다. 이렇게 될 때까지, 기본 성능목표를 결정하지 않고 Pushover 해석에 대한 평가를 수행한 과거의 연구를 바탕으로 예비 판단이 필요하다.

7. Pushover 해석의 오차

Pushover 해석은 구조부재의 비선형 거동을 다루기 때문에 해석에 사용되는 변수들이 매우 복잡하고 다양하다. Pushover 해석은 컴퓨터를 이용한 해석이기 때문에 구조해석 프로그램에 많은 가정조건이 전제되어 있으며, 각 해석 프로그램에 적용되고 있는 부재의 모델화, 해석방법, 부재강도의 산정식에 따라 응답치에 미치는 영향은 매우 크다. 또한 설계자의 판단에 따라 사용하는 계산조건이 달라지며, 동일한 건물이라도 해석프로그램과 설계자의 차이에 따라 해석결과가 달라질 것으로 예상된다. 따라서 구조설계자는 프로그램의 가정조건과 실제 구조물의 거동 관계 및 가정조건의 차이에 따른 해석결과와의 변동 폭을 충분히 고려하여 해석결과를 판단할 필요가 있다.

여기서는 이러한 상황을 감안하여, 동일한 구조물을 이용하고 되도록이면 동일한 가정조건과 계산조건이 되도록 해석변수를 설정하여 수행된 Pushover 해석결과와의 오차를 분석한 결과를 정리하면 다음과

같이 요약할 수 있다^[9].

- 전단벽을 포함하는 골조에서는 최하층의 층 전단력의 변동계수는 0.05~0.07정도이고, 층간변형각의 변동계수는 0.055~0.07정도이다.
- 순수 휨모멘트 저항골조만으로 이루어진 구조에서는 최하층의 층 전단력의 변동계수는 수평변위의 크기에 따라 약간의 차이를 보인다. 즉 항복변위(수평변위각 1/500~1/300 radian) 부근에서는 변동계수가 0.072로 비교적 높은 값을 나타내지만, 그 외의 수평변위 구간에서는 0.03정도이다. 또한 층간변형각의 변동계수는 0.03~0.035정도로 매우 작은 값을 나타낸다.
- 항복흔지 발생은 휨모멘트 저항 골조에서는 해석 조건에 따른 차이가 나타나지 않았지만, 전단벽을 포함하는 골조구조에서는 해석 조건에 따라 차이를 보인다. 특히 최상층 기둥 주두부와 최하층 기둥 주각부의 항복흔지 발생 상황이 다르게 나타났다.
- 휨모멘트 저항골조에서의 해석결과의 오차의 원인은 보 주근의 배근 위치와 슬래브 유효폭 보 강근의 고려 유무에 의한 보 휨내력의 변동에 의한 것, 그리고 기초의 지지조건(지중보를 갖는 경우와 지중보가 없이 직접 독립기초에 고정된 기둥)에 따른 차이의 영향 때문으로 볼 수 있다.
- 전단벽을 포함하는 골조에서의 해석결과의 오차 원인은 모멘트 저항골조에서의 원인과 함께, 전단벽에 직교하는 보의 직교효과 및 전단벽의 모델화 방법에 따른 차이 때문이다.

따라서 휨모멘트 저항 골조만으로 이루어진 건축 구조물의 Pushover 해석결과는 사용하는 프로그램에서 부재의 모델화, 해석방법, 부재강도 산정식의 영향에도 불구하고 상당한 신뢰성이 있는 것으로 판단된다. 전단벽을 포함하는 골조에서는 Pushover 해석용 전단벽의 모델화에 주의가 필요하며, 신뢰성 있는 해석결과를 얻기 위해서는 전단벽의 모델화 방법의 개발이 시급하다^{[10][11]}.

8. 결 론

현재 구조기술자들은 비교적 약산적인 성능평가

기법인 Pushover 해석의 수행이라는 새로운 도전에 직면하고 있다. 적용에 따르는 여러 가지 한계들을 신중히, 현명한 판단으로 수행하면, 기존의 탄성 평가보다는 훨씬 개선될 것이다. 이것은 현재 내진설계기준에서 적용되어온 R 또는 R_w 계수와 같이 부재 거동을 건물 전체 시스템 계수로 평가할 수 없는 기존 건물의 내진 성능평가에 적용된다.

긍정적인 관점에서 보면, 신중히 수행된 Pushover 해석은 강진 동안 건물의 성능을 판단할 수 있는 자료를 제공할 수 있다. 주로 1차 모드로 진동하는 구조물에 대하여, Pushover 해석은 전체 거동뿐만 아니라 국부적인 비선형 변형 응답에서도 좋은 평가결과를 제공한다. 이 해석은 탄성해석에서 밝혀지지 않았던 설계 취약부위를 밝혀낼 수도 있다. 층 붕괴, 과도한 변형 응답, 강도 불규칙성, 기둥 및 접합부와 같은 취성 부재의 과하중 등이 여기에 속한다.

부정적인 관점으로 보면, Pushover 해석으로부터 얻어진 변형은 고차모드의 영향이 중요한 구조물이거나 층전단력-층간변위 관계가 작용하중 분포에 민감한 구조물에서는 부정확한 결과를 낳게 되는 것이다. 이러한 문제점은 탄성 고차모드의 영향을 고려한 하중분포와 같이 하나 이상의 작용 하중분포를 사용함으로써 해결할 수 있다. 근본적인 문제는 Pushover 해석이 지진에 의해 생기는 1차 국부 항복기구만 찾아낼 수 있고, 이 1차 국부 항복기구가 형성된 후 구조물의 동적거동 변화에 의한 다른 취약점을 노출시키지 않는 점이다.

Pushover 해석은 모든 구조물에 대하여 수행할 수 있지만, 고차모드 효과가 중요하다고 판단되면, 다른 평가 방법을 선택해야 할 것이다. 고차모드 효과의 중요성은 건물의 층수뿐만 아니라 설계용 스펙트럼의 피크(peak)치 및 평활한 위치의 값에 따른 상대적 모드 특성에도 의존하므로 단 하나의 기준으로 평가조건을 설정하는 것은 부적절하다. 권장하는 다른 평가방법으로서 대표성을 갖는 지진동을 입력한 동적 비선형해석, 감소계수를 고려하지 않은 스펙트럼을 사용한 탄성 동적(모드)해석, 적절한 모드중첩법(CQC, SRSS) 등이 있다.

참고문헌

- [1] Bracci, J. B., Kunnath, S. K., and Reinhorn, A. M. (1997). "Seismic performance and retrofit evaluation of reinforced concrete structures," Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 123, pp. 3-10.
- [2] Reinhorn, A. (1997). "Inelastic techniques in seismic evaluations," in Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes, Fajfar, P., and Krawinkler, H., eds., Bled, Slovenia, 24-27 June 1997.
- [3] Krawinkler, H. and Seneviratna, G.D.P.K., (1998) "Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation, Engineering Structures, Vol. 20, Nos 4-6, pp.452-464.
- [4] Kim, S. and D'Amore, E.(1999), "Pushover analysis procedure in earthquake engineering", Earthquake Spectra, Vol. 15, pp. 417-434.
- [5] Chopra, A. K., and Goel, R. K. (2001), A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: theory and preliminary evaluation, Report No. PEER 2001/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Jan.
- [6] Gupta, Balram and Kunnath, Sashi K., (2000) "Adaptive Spectra-Based Pushover Procedure for Seismic Evaluation of Structures", Earthquake Spectra, Vol. 13(1A), pp. 367-391.
- [7] Mwafy, A. M., and Elnashai, A. S. (2001). "Static pushover versus dynamic collapse analysis of RC buildings," Engineering Structures, Vol 23 (2001), pp. 407-424.
- [8] Elnashai, A.S.,(2001) "Advanced inelastic static(pushover) analysis for earthquake applications", Structural Engineering and mechanics, Vol. 12, No. 1, pp.151-69.
- [9] 今西達也, 中川佳久, 窪田敏幸, "R C 造建物の耐震性能評価に用いる各種静的漸増解析プログラムの解析結果のばらつき比較"日本建築学会構造系論文集, Vol. 545, pp.127-134, 2001. 7.
- [10] 松本和行, 壁谷澤壽海, 倉本洋(1993), "非線形骨組解析における耐震壁の部材モデル化," 日本建築學會, 構造工學論文集, Vol. 39B, pp.245-254.
- [11] 전대한(2000), "철근콘크리트 벽식구조물에서 전단벽의 탄소성 해석용 모델화 방법의 검토", 한국콘크리트학회 가을 학술발표 논문집 2권 2호. pp.291-296.