

반응수정계수의 변천과정 및 구성요소



한 상 환*

1. 반응수정계수의 정의 및 변천

내진설계의 설계지진 (design earthquake) 하중은 건물이 위치할 지역에서 건물의 수명을 50년이라 가정할 때 그 수명동안 10% 발생할 수 있는 지진으로 정하고 있다. 이러한 지진하중은 재현주기 (return period) 로 환산하면 475년만에 한번 발생하는 지진으로서 연간발생률로 보면 0.0021이다. 이렇게 발생확률이 낮은 하중에 대하여 구조물이 탄성적으로 거동하도록 설계하지 않고 비선형 거동을 허용하는 현행 설계규준의 개념은 매우 타당하다고 할 수 있다.

건축물의 내진설계는 미리 산정된 횡력 (lateral force) 을 사용하여 선형 탄성해석 (linear elastic analysis) 을 수행하고, 여기에서 구한 부재력에 대하여 내진저항요소를 설계하는 것이 일반적이다. 이러한 횡력은 허용응력설계법 또는 강도설계법에 따라 각각 다르게 정의된다. 즉, 미국의 Uniform Building Code (UBC, 1994) 는 허용응력

설계법으로 적용할 수 있는 횡력을 규정하고 있으며, NEHRP Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings (1994) 은 강도설계법에 의한 횡력을 정의하고 있다. 건축물의 내진설계에 사용되는 설계지진력은 구조물이 탄성적으로 거동하기 위하여 필요한 수평강도를 반응수정계수 (Response Modification Factor, R) 로 나누어줌으로써 산정된다.

국내 내진설계 규정 (1987) 은 UBC규준과 ATC 3-06 보고서 (1995) 를 참고로 하여 1987년에 작성되었으며, 1997년에 1차 개정작업을 진행하고 있다. 따라서, 미국의 내진설계 규정에 대한 고찰을 바탕으로 반응수정계수의 도입배경과 변천 과정을 파악하는 것이 필요하다고 판단된다. 반응수정계수는 1978년에 발행된 Applied Technology Council의 ATC 3-06 보고서 (1995) 에서 처음으로 등장하였다. NEHRP 규정은 1985년에 처음으로 발행되었으며, ATC 3-06 보고서를 모태

* 성회원·한양대학교 건축공학부, 조교수

로 하여 만들어진 내진설계규정이다. ATC 3-06 보고서가 발행된 지 10년 후인 1988년에는 허용응력설계법에서 적용할 수 있도록 반응수정계수를 수정하여 UBC 규준에 채택되었다. 그림 1에서는 국내 내진설계 규정의 근간이 되는 미국의 대표적인 내진설계 규준의 변천과정을 보여주고 있다.

양호한 배근상세를 갖는 내진저항요소는 설계수평강도를 초과한 수평하중이 작용하더라도 붕괴에 이르지 않고 연성적으로 비탄성 변형을 충분히 할 수 있다는 가정을 바탕으로 반응수정계수의 개념이 설정되었다. 반응수정계수 R은 구조물에 가해지는 수평하중의 비율로서 표현될 수 있는데, 설계지진에 해당하는 지진동을 받는 구조물이 탄성적으로 거동하기 위하여 필요한 수평하중에 대해서 비탄성 변형을 나타내는 수평하중의 비로서 표시된다.

UBC 규준에서는 중립하중(고정하중, 적재하중 및 설하중)과 환경하중(풍하중, 지진하중)을 사용성 수준의 하중으로 규정하고 있다. 철골구조물은 최근에 하중저항계수설계법(Load and Resistance Factor Design, LRFD)의 등장으로 강도설계법이 적용되고 있지만, 사용성 수준의 하중에 대해서 허용응력법을 적용하여 설계하는 것이 일반적이다. 철근콘크리트구조물은 사용하중에 하중계수(load factor)를 곱한 극한상태(significant yielding)의 하중에 대하여 설계되고 있다. 즉, UBC 규준에서 설계지진력은 탄성설계스펙트럼강도를 반응수정계수(R_w)로 나누어줌으로써 사용하중 수준으로 지진하중을 산정하게 된다. 이 경우 반응수정계수(R_w)의 값은 4에서 12 사이의 값을 갖는다.

NEHRP 규정에서의 설계하중은 강도설계용으로 산정된다. 실제적으로 철골구조는 허용응력에 1.7배를 해 준 극한상태 응력에 대해서 설계되며, 철근콘크리트구조는 극한상태 하중에 대해서 설계된다. NEHRP 규정으로 산정된 설계지진력은 탄성설계스펙트럼강도를 반응수정계수(R)로 나누어 준 것이다. 이 경우 반응수정계수(R)의 값은 1.25에서 8사이의 값을 갖는다. NEHRP와

UBC 규준에서 사용하고 있는 반응수정계수(R 및 R_w)의 상관관계는 각각의 규준에서 의도하고 있는 설계법과 관련된 것으로서 다음장에서 자세히 비교하게 될 것이다.

내진설계에서 큰 값의 반응수정계수를 사용한다는 것은 일반적으로 2가지의 대립되는 양면성을 내포하고 있다. 즉, 큰 값의 반응수정계수를 사용함에 따라 설계지진력이 감소되므로 경제적인 설계가 가능하지만 설계지진의 작용에 대해서는 상대적으로 큰 비탄성 응답이 발생하게 되므로써 초래되는 피해의 규모는 커질 수 있다.

다양한 구조형식에 대한 R값들을 ATC 3-06 보고서에서 제시하고 있는데, 이는 (a) 과거의 지진피해로부터 관찰된 보편적 구조성능, (b) 시스템에 대한 보편적인 인성(toughness)의 평가, (c) 비탄성 응답으로부터 감쇠(damping)의 평가를 바탕으로 ATC 3-06 집필위원들간의 합의에 의해 선택된 것이다. 따라서, ATC 3-06 보고서에서 제시하고 있는 R값들은 기술적, 실증적 자료가 부족하다고 할 수 있다. ATC 3-06의 해설(commentary)⁴⁾에서는 R값과 관련하여 다음

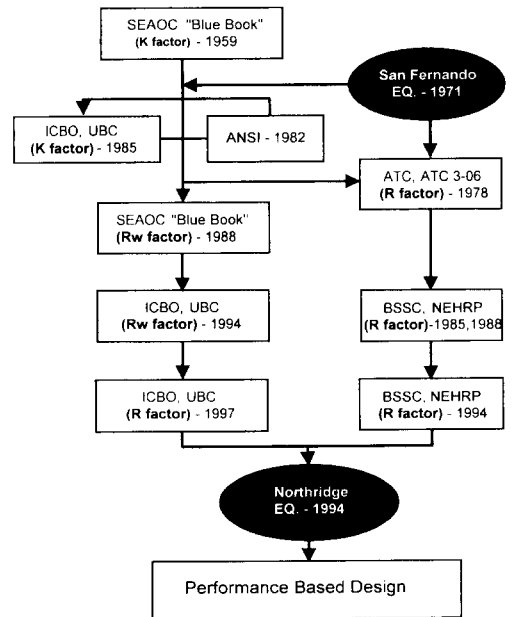


그림 1 미국의 내진설계 규정의 변천과정

과 같이 기술하고 있다.

"...R값의 선택과 사용은 판단(judgement)에 의한다. ...잉여도(redundancy)가 작은 구조물은 작은 R값을 사용해야 하며, 설계강도와 유사한 수준으로 횡력이 작용할 경우 메카니즘을 형성하는데 필요한 모든 소성힌지들은 순차적으로 발생될 수 있어야 한다."

반응수정계수를 정리한 표의 각주에서는 구조시스템에 따라 다른 R값을 적용하면서 과생될 수 있는 불확실성에 대해서 다음과 같이 기술하고 있다.

"이 값(R값)들은 집필 당시의 이용 가능한 자료와 판단을 근거로 선택된 것이며, 주기적으로 재검토를 해야 할 필요가 있다."

내진설계 과정에서 사용한 R값이 적절하지 못했을 때, 건물들이 임계 될 막대한 지진피해와 이에 따른 재정적, 사회적 손실을 감안한다면 내진설계 기준에 사용되는 R값은 최근까지 정립된 내진공학의 기술수준과 실제 설계 및 시공상황을 반영하여 평가되어야 한다. 이러한 평가작업은 설계기술자들의 판단기준이 되는 지침으로 역할을 하게 될 것이다.

미국의 설계기준에서 R값이 처음으로 등장한지 20년의 세월이 경과했다. 이 기간 동안 빈번한 중진 및 강진의 발생(특히, 1989년 Loma Prieta 지진, 1994년 Northridge 지진)에 따라 내진설계법에 대하여 심도있는 재검토가 필요하다는 지적이 대두되었으며, 이에 부응하여 1995년에는 현행 내진설계법과 반응수정계수에 대한 검토 보고서(1995)를 발간하였다. 이 보고서들은 지금까지 축적된 지식과 지진피해의 허용수준에 대한 기대치의 변화 및 시공상황의 변화를 반영하기 위한 적절한 노력의 결과라고 평가할 수 있다.

한편, 국내의 내진설계 규정은 ATC 3-06을 근간으로 하여 1987년에 제정되었다. 설계용 지진하중을 산정하는 중요한 설계계수 중의 하나인 반응수정계수는 당시 일반화된 허용응력설계법에 맞추기 위하여 ATC 3-06에서 제시하고 있는 값보다 작은 값을 사용하고 있다. 또한, 당시 제정위원들은 관련자료가 부족한 상황에서 어렵게

결정된 "...반응수정계수에 대해서는 앞으로도 지속적으로 연구되고 조정되어야 할 사항..."이라고 기술하고 있다.

반응수정계수, R은 구조물이 심한 강복상태에 도달하여도 부가적인 저항능력이 있음을 고려하여 경험적으로 개발되어 왔다. 구조물 설계시 지진에 대한 밀면전단력을 산정할 때, R은 분모의 항으로 밀면전단력의 크기를 감소시키는 설계지진력 저감계수라고 할 수 있다. 이 계수는 구조시스템의 초기 항복을 넘은 극한하중과 변위에 도달하기에 충분한 변형능력과 감쇠특성을 반영하는 계수라 할 수 있다.

캘리포니아의 Structural Engineers Association(SEAOC)가 1957년 캘리포니아의 내진설계법을 제안하기 위하여 "Blue Book"⁷⁾을 만들면서 수평력계수 K(Horizontal Force Factor)를 도입한 이후 현재는 반응수정계수(R)로 명칭되고 있으며, 다양한 지진피해 경험과 연구결과에 의하면 반응수정계수는 앞으로도 많은 개선과 연구를 필요로 하는 사항이다. 하지만, 현재 사용하고 있는 R은 1950년대에 도입된 K 계수의 이름만 변경되었을 뿐 그 역할과 값의 차이는 크지 않다.

2. 반응수정계수의 문제점

현행 내진설계기준은 설계된 구조물이 강진시 비탄성적으로 거동할 것이라는 가정을 기초로 작성된 것이다. 이러한 이유로 내진설계기준에서는 설계지진에 대하여 탄성적으로 구조물이 거동하는데 필요한 강도보다 훨씬 낮은 값으로 설계지진력을 설정하고 있다. 즉, 설계지진력은 "반응수정계수, R"로 알려진 강도감소계수를 사용하여 선형탄성 설계응답스펙트럼(LEDRS; Linear Elastic Design Response Spectrum)을 감소시켜 산정된다. 반응수정계수는 구조물의 연성능력(ductility), 초과강도(overstrength), 잉여도(redundancy) 및 감쇠특성을 반영하기 위한 설계계수이다. 그러나, 기준에서 제시하고 있는 반응수정계수는 일반적인 구조시스템을 대상으로 과거 지진발생에 따른 피해와 거동특성을 관찰한 내용을 바탕으로

결정한 수치로써 이론 및 실험적 산출근거는 미약한 상황이다.

Berkeley대학 연구팀(Bertero,1986)⁸⁾, ATC-19⁵⁾ 및 ATC-34⁶⁾ 연구팀에 의해서 수행된 최근의 연구결과에 의하면, 현행 내진설계기준에서 사용하고 있는 반응수정계수의 값과 산정방법에 있어서 다음과 같은 문제점이 있다.

① 반응수정계수는 건물의 높이, 평면 형태, 구조의 배치와는 무관하고 주어진 구조형식이 동일하면 같은 값을 사용한다는 것은 부적합하다.

② 반응수정계수는 구조형식에 따른 연성능력을 고려하기 위하여 제시된 수치이다. 하지만, 특정한 변위연성비를 사용하여 탄성 설계강도스펙트럼을 비탄성 설계강도스펙트럼으로 균등하게 감소시킬 수 없다는 사실을 감안한다면 반응수정계수는 주기에 대하여 종속적으로 표현되어야 한다. 주기에 종속적인 R은 유럽, 멕시코 및 칠레 등의 내진설계기준에서 채택하고 있으며, 식 (1)에서는 칠레기준의 반응수정계수를 보여주고 있다.

$$R' = 1 + \frac{T'}{0.1T_0 + \frac{T'}{R}} \quad (1)$$

③ 지진구역에 따라 건물의 초과강도(설계강도를 초과한 수평강도)는 상당히 다양하게 변하게 된다. 구조물의 실제 보유내력(reserve strength)이 반응수정계수를 구성하는 핵심요소라고 한다면 반응수정계수는 지진구역(seismic zone)에 종속적이며, 연직하중에 대한 지진하중의 비율에 따라 상당한 영향을 받게 된다.

④ 반응수정계수는 감쇠(damping)의 영향이나 초과강도(overstrength)의 영향을 분명하게 고려하여야 한다.

⑤ 각각의 구조시스템에 따라 보유하고 있는 연성능력이 다르므로 반응수정계수는 시스템의 연성능력을 분명하게 고려할 수 있도록 조정되어야 한다.

⑥ 반응수정계수는 구조물의 잉여도(redundancy)에 대한 영향을 정확히 포함할 수 있어야 한다.

⑦ 반응수정계수는 구조물의 주기, 지반조건, 에너지소산능력을 고려해야 한다.

⑧ 일부 구조형식에서 사용되는 R 값은 실제로 설계지진이 작용했을 때 설계단계에서 목표로 하는 내진성능을 보여주지 못할 수 있다.

⑨ 비구조재의 영향을 고려해야 한다.

⑩ 현행 내진설계 기준 및 지침에서 제시하고 있는 반응수정계수를 사용하여 내진설계를 했을 때, 모든 구조형식에 대하여 동일한 수준의 위험도(또는 안전성)를 보장하기 힘들다.

3. 반응수정계수의 핵심 구성요소

반응수정계수 R에 대한 산정식이 처음으로 제시된 이후 많은 연구들이 수행되었다. ATC-34 연구과제⁶⁾는 이러한 최근의 연구결과들을 종합하여, 다음과 같이 반응수정계수 R을 3개 구성요소로 표현하는 새로운 산정식을 제시하였다.

$$R = R_s \times R_c \times R_r \quad (2)$$

여기에서, R_s 는 주기에 의존하는 강도계수이고, R_c 는 주기에 의존하는 연성계수이며, R_r 은 잉여도계수(redundancy factor)를 나타낸다. 이 산정식에서 잉여도계수(redundancy factor)를 제외하면 Berkeley대학 연구진과 Freeman(1990)에 의해 제안된 산정식과 유사하다. Berkeley대학 연구진과는 별개로 독자적으로 제시된 Freeman의 제안식은 강도계수와 연성계수의 곱으로 반응수정계수를 산정하고 있다.

잉여도계수(redundancy factor)는 ATC-34 연구과제에서 처음으로 제안된 것이다. 이 잉여도계수는 건물의 장변방향 및 단변방향 각각에 대하여 수직방향 내진골조의 개수로부터 산정되는 것으로서 내진골조 시스템의 신뢰성을 평가하기 위한 것이다.

4번째 요소인 감쇠계수는 새로운 방법으로 고려되었다. 즉, 부가적인 점성 감쇠장치(viscous damping device)에 의해서 기대할 수 있는 응답의 감소를 고려할 때 사용된다. 이러한, 감쇠계

수는 비선형 골조 시스템의 응답변위를 줄이기 위해서 사용될 수 있지만 이에 비례해서 요구강도의 크기가 감소되지는 않는다. 특히, 상당히 큰 감쇠특성을 갖는 골조 시스템에서는 큰 효과를 기대할 수 없다. 내진설계가 향후에도 강도(strength)를 기준으로 진행된다면 새로운 반응수정계수의 산정식에서는 감쇠계수를 제외하게 될 것이다.

식 (2)에서 보여주고 있는 반응수정계수 R은 이론적인 근거에 의해서 산정하도록 하기 위한 시도라고 할 수 있다. 반응수정계수 R의 주요 구성요소들의 산정은 서로 독립적이지 않다는 사실에 염두를 두고 있어야 한다. 본 절의 세부 항목에서는 4개의 주요 구성요소 즉, 보유강도(reserve strength), 연성(ductility), 감쇠(damping) 및 잉여도(redundancy)에 대한 세부적인 평가방법과 상호관계를 보여주고 있다.

제안된 산정식에서는 골조 시스템의 평면형상과 수직적인 강성의 분포에서 비롯되는 불균일성을 배제하고 있다. 이에 반해서, 1981년 일본의 설계규정(BSL)은 2단계 설계과정에서 불균일성(irregularity)을 평가하여 설계지진력을 증가시켜줌으로써 실질적으로 감소된 반응수정계수를 사용하는 효과를 보여주고 있다. 불균일한 평면이나 강성을 갖는 골조 시스템을 설계할 때는 더 큰 값의 설계밀면전단력을 사용하도록 함으로써 불균일한 골조 시스템의 사용을 억제하는 효과를 실제로 기대할 수 있고, 아울러 이러한 건물에서 나타나는 비선형 응답거동과 관련한 불확실성을

감소시킬 수 있을 것이다. 아래그림은 응답스펙트럼과 강도계수, R_s 와 연성계수, R_μ 의 관계를 나타내고 있다.

4. 소 결

본 기사에서는 간략하게 반응수정계수의 정의, 변천, 그리고 문제점에 관련하여 조사하였다. 하지만 반응수정계수란 여러 연구자들의 제안식과 같이 표현하여 평가할 수 있고 이를 통하여 구조물의 적절한 신뢰성도 확보할 수 있다. 하지만 현행 기준이 성능기준이라는 문제에서 기준의 목표와 반응수정계수의 정의, 설계하중산정에서 아직까지도 일치하지 않거나 모호한 부분이 많다. 앞으로 이러한 규명되지 않은 분야에 많은 연구가 필요한 실정이다.

참 고 문 헌

1. 건설부, 내진설계 지침서 작성에 관한 연구, 1987
2. ATC, Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings, Applied Technology Council Report ATC 3-06, Palo Alto, California, 1984
3. ATC, A Critical Review of Current Approaches to Earthquake-Resistant Design, Applied Technology Council Report ATC-34, Redwood City, California, 1995
4. ATC, Structural Response Modification Factors, Applied Technology Council Report ATC-19, Redwood City, California, 1995
5. Building Seismic Safety Council, NEHRP Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulation for New Buildings, Part 1 and 2, Provisions and Commentary, FEMA, Washington, D.C., 1994
6. Christopher Rojahn, "An Investigation of Structural Response Modification Factors",

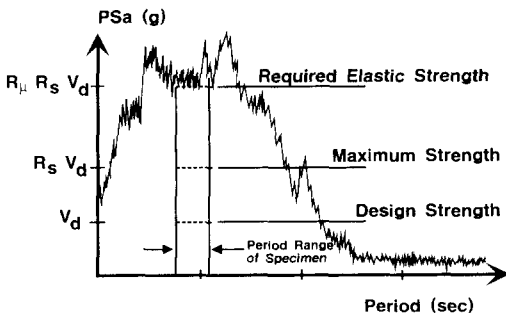


그림 2 강도계수 및 연성계수

- Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 5, Tokyo-Kyoto, Japan., 1998 pp.1087~1092
7. ICBO, Uniform Building Code, International Conference on Building Officials, Whittier, California, 1994
 8. Li Hyung Lee, Sang Whan Han, Young Hun Oh, "Determination of Ductility Factor Considering Different Hysteretic Models," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Accepted, 1999. 3
 9. Han, S.W. and Wen, Y.K., "Methods of Reliability-Based Seismic Design I: Equivalent Nonlinear System", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 3, ASCE, 1997
 10. Li Hyung Lee, Sang Whan Han, Young Hun Oh, "Determination of Ductility Factor Considering Different Hysteretic Models," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (to be published in 1999)
 11. Uang, C.M., and Bertero, V.V., *Earthquake Simulation Tests and Associated Studies of a 0.3 Scale Model of a Six Story Centrally Braced Steel Structure*, EERC, UCB/EERC-86/10, University of California at Berkeley, California, 1986 