

중진지역에서의 한정연성도 내진설계

Limited Ductility Seismic Design in Moderate Seismicity Regions

김재관*

Kim, Jae-Kwan

김익현**

Kim, Ick-Hyun

ABSTRACT

Korea is located in either low or moderate seismicity continental region. It is realized that design codes and underlying design concepts of high seismicity region may not be appropriate to low or moderate seismicity region. In this paper, test results on the seismic response of structures without seismic detailing are reexamined and compared with numerical analysis results. The seismic design concept based on limited ductility is proposed as an alternative seismic design approach in moderate seismicity regions.

1. 서론

우리나라는 판 경계로부터 멀리 떨어져 있지만 역사적 지진기록과 최근의 지진 활동을 보면 중진지역에 속한다는 것을 알 수 있다. 우리나라에서는 서기 2년까지 소급되는 지진기록이 남아 있고 지진계가 처음 설치된 1905년까지의 역사지진은 대략 1900 회 정도인 것으로 문헌에 기록되어 있다. 이 중 진도 5 이상(MMI 기준)의 지진은 876 회로 추산된다. 계기지진은 1905년 이후부터 기록되었으며 여러 자료를 통해 1993년까지 700여 회의 지진 자료를 얻을 수 있는데 MM 진도 5 이상에 해당하는 규모 4.3 이상의 지진은 87 회이다 [한국지진공학회, 1997].

우리나라에서, 현재, 건물, 교량, 그리고 그 밖의 다른 시설의 내진설계에 적용하는 규범은 강진 지역을 위해 개발된 내진설계의 기본개념에 근거하고 있다 [ATC, 1995]. 강진 지역에서의 내진설계는 구조물의 연성 거동에 기초하고 있다. 내진상세에 의하여 연성이 제공되면, 구조물은 지진시 비선형적으로 거동할 수 있고 높은 에너지 흡수능력을 보유하게 된다. 그러나, 내진상세가 고려되지 않은 구조물도 상당수준의 횡방향 내진역량을 보유하고 있으며, 중진지역에서 기대되는 세기의 설계지반운동하에서는 탄성한계 혹은 한정된 비탄성 거동을 보일 것으로 예상되기 때문에 강진지역에 적합한 내진설계개념을 우리 나라와 같은 중진지역의 내진설계에 여과 없이 직접적으로 적용하는 것은 비합리적일 수 있다.

* 서울대학교 교수, 정회원
** 지진공학연구센터, 연구원

본 논문에서는, 먼저, 강진지역의 설계 개념을 살펴보고, 내진상세가 고려되지 않은 구조물의 지진응답에 관한 실험 결과를 재분석하고 수치해석결과와 비교 검토하였다. 그 결과로부터 중진지역에서 적합하다고 판단되는 한정연성도 내진설계개념을 제안하였다. 그러나, 여기에 제시된 것은 극히 제한된 연구에 기초하였으며, 따라서, 앞으로 많은 연구를 거쳐서 발전시켜야 할 필요가 있다.

2. 강진지역 내진설계의 기본 개념

내진설계규범은 기본방침, 설계방법, 지진하중과 조합, 구조해석과 단면강도, 구조 세목 등 많은 항목을 포함하고 있으며, 그 구체적인 내용은 나라 별로 상이하다. 그러나, 기본방침은 유사하여 중소 지진에 대해서는 구조물에 심한 손상이 발생하지 않고, 큰 지진이 발생하더라도 구조물이 완전하게 붕괴하는 것은 방지할 수 있도록 구조물을 내진설계하는 것을 목표로 삼고 있다.

강진지역의 설계지진의 세기는 중진 지역에 비하여 매우 강하며, 구조물이 탄성 거동하도록 설계하는 것은 비현실적이고 또 바람직하지 않게 된다. 따라서 강진지역에서는 큰 지진에 대해 구조물이 비탄성 거동을 할 수 있도록 높은 연성을 제공하는 설계방법을 따르고 있다. 강재는 일반적으로 높은 연성 거동을 보이고 있다. 철근콘크리트 부재도 전단철근 및 횡방향 철근에 의하여 조기 전단파괴를 방지하고 심부를 구속한다면 상당한 연성거동을 하게 된다.

부재가 연성을 보유하면 탄성한계를 초과하는 외력이 작용하더라도 부재는 비록 큰 변형을 경험하게 되지만 바로 파괴되지는 않는다. 비탄성 영역에서는 또한 이력거동특성을 보이기 때문에 에너지의 소산이 많아지게 된다. 이러한 특성을 이용하여 탄성상태에서 요구되는 단면의 강도보다도 낮은 설계강도를 갖도록 부재를 설계할 수 있으며 바로 이것이 강진지역에서의 연성설계의 원리이다.

Two Models on Reduction Factor

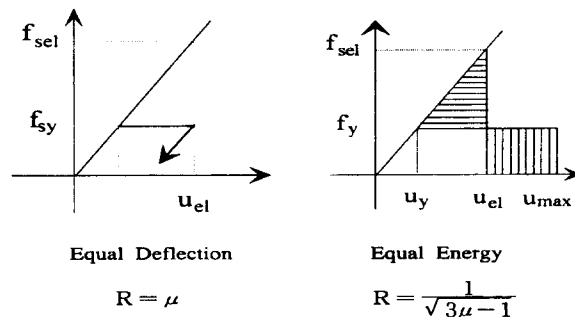


그림 1 강진지역에서의 설계 개념

3. 내진상세가 고려되지 않은 구조물의 응답 특성

3.1 건축 구조물

국내 중, 저층 건축물에 많은 부분을 차지하고 있는 3층 철근 콘크리트조의 내진성 평가를 위해서 1/5 축소모델의 (그림 2) 진동대 실험이 수행되었다 [이한선, 1998]. 이 구조물에는 지진에 대한 내진 상세가 고려되지 않았다. 진동대 실험의 입력 지반 운동으로 Taft 지진의 남북 방향의 축소된 시간이력이 사용되었다. 0.12g, 0.20g, 0.30g, 와 0.4g의 PGA(Peak Ground Acceleration)값을 축소된 가속도 시간 이력으로 사용하였다. 각 입력 운동에 대한 바닥 전단력(base shear)의 시간 이력은 측정된 데이터로부터 계산되었고 그림 3에 나타내었다. 0.12g와 0.20g의 지진입력에서는 뚜렷한 손상이 관찰되지 않았다. 0.12g의 입력지진 후의 고유주기는 실험전의 고유주기와 거의 일치하였고 0.2g의 실험 후의 고유주기는 17% 정도 길어졌다. 0.3g에서 미세한 균열이 발전하는 것이 관찰되었고 0.4g 입력 수준에서 전단 파괴가 발생하였다.

“내진설계기준연구” [한국지진공학회, 1997]에 의하면 내진 1등급 구조물인 경우 재현주기가 100년의 설계지진에 대해서 기능 수행 성능을, 재현주기 1000년인 설계 지진에 대해서는 붕괴방지 성능을 확보하도록 하고 있다. 단단한 토사 지반에서 설계지진에 상응하는 지반의 최대 가속도는 각각 0.09(g), 0.22(g)이다. 재현주기 2400년에 해당하는 설계지진의 경우에는 0.32g로 주어지게 된다. 그림 4의 실선은 대상 구조물의 바닥전단력-상대변위 관계를 비선형 수치해석에 의하여 산출한 결과이다. 그림에서의 강성 K_s 는 구조 부재의 최연단 철근이 항복할 때의 정할 강성을 나타낸다. 진동대 실험에서 구한 바닥 전단력과 변위도 함께 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 해석 결과는 실험 결과와 잘 일치하고 있다. 입력지진 0.3g 내에서는 구조물은 탄성 영역 내에서 거동하며, 2400년의 재현주기의 설계지진에 대해서도 구조물은 붕괴될 가능성은 매우 낮다는 것을 알 수 있다.

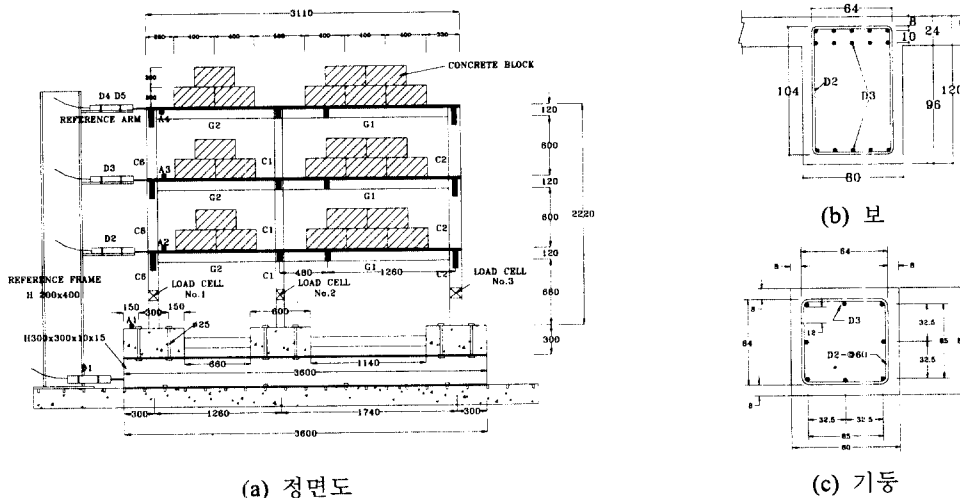


그림 2.3 층 철근 콘크리트조의 축소모델[이한선]

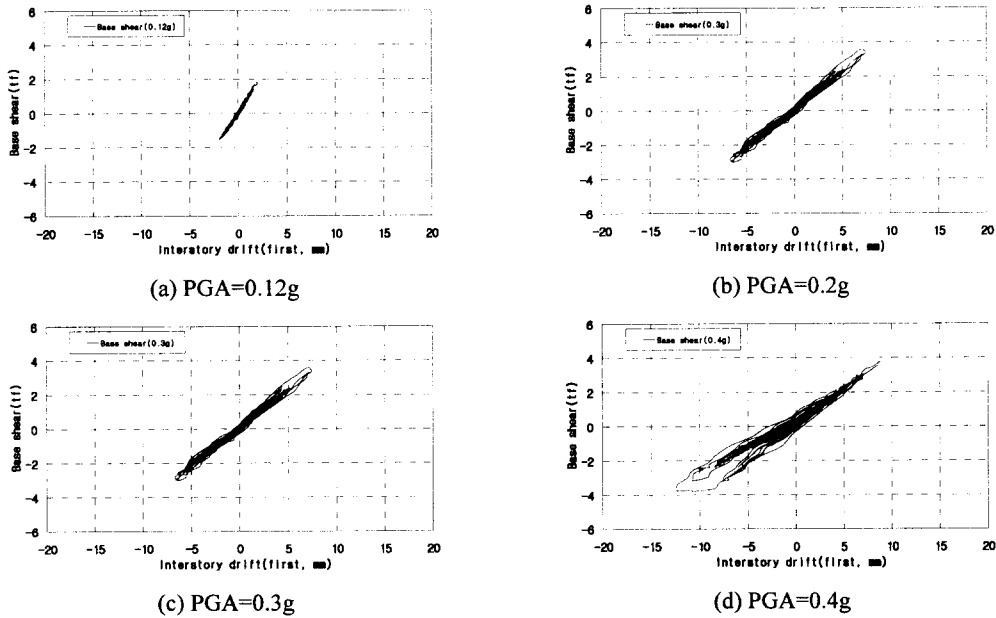


그림 3 바닥전단력의 시간이력

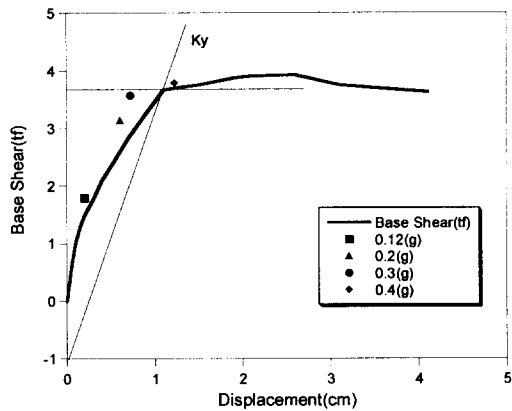


그림 4 구조물의 바닥전단력 및 입력지진별 응답크기 특성

3.2 교량의 교각

교량 교각의 내진성 평가를 비선형 동적 해석을 통해 실시하였다. 대상 교각은 금강에 건설된 것으로 단면 상세는 그림 5 와 같다. 교각의 모델은 Fiber 모델을 이용한 보 요소가 도입되었다 [kim, 1998]. 교각의 기둥 부분의 질량은 있는 그대로 분포 시켰으며, 상부 슬래브와 거더의 하중

400tf는 이들 무게 중심에 집중 시켰다. 그림 6은 수평 하중에 대한 교각의 비선형 거동을 나타낸다. 뚜렷한 항복점이 보이지 않으나 최연단 철근의 최초의 항복은 82tf에서 확인 되었다. 축력을 고려할 때 구조물의 공칭 모멘트는 1755tf이다. “내진설계기준연구”[한국지진공학회, 1997]에 의거하여 구조응답에 대한 입력지진 크기를 계산하면 표 1과 같다. 구조물의 응답이 소성영역 내일 때는 강성을 정할 강성으로 하여 구조물의 주기를 산출하였다. 여기서 소성 영역이라함은 최연단 철근이 항복한 이 후를 의미한다. “내진설계기준연구” [한국지진공학회, 1997]에 의하면 1등급 구조물의 기능 수행 및 붕괴방지 성능에 사용되는 설계 지진의 재현주기는 각각 100년, 1000년으로 위험도 계수를 고려하여 단단한 토사지반에서의 최대지반가속도로 환산하면 0.09g, 0.22g이다. 재현주기 2400년에 해당하는 설계지진의 경우에는 0.32g이다. 기능 수행 지진에 대해 탄성영역 내에서 변위가 제한되고 붕괴 방지 수준에서는 비탄성의 값을 보임을 알 수 있다. 또한 최대잠재지진(재현주기 2400년)에서는 약 1% 정도의 Drift가 발생한다. (그림 6).

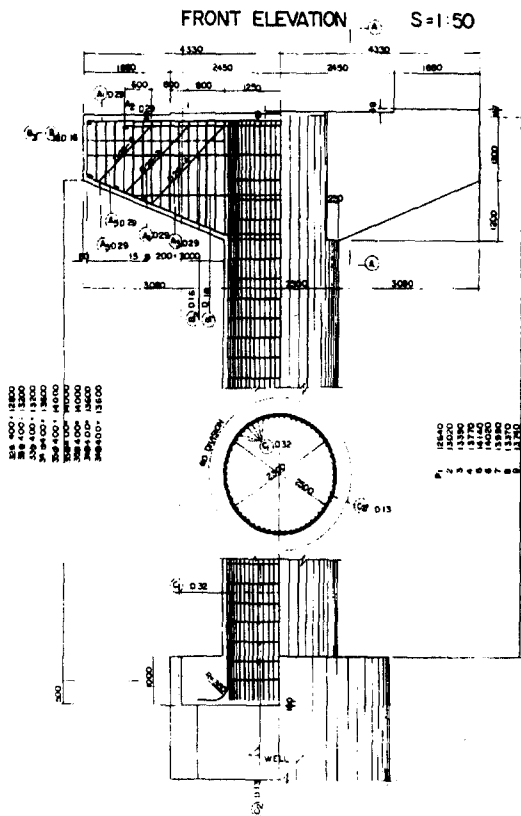


그림 5-a 교각의 정면도

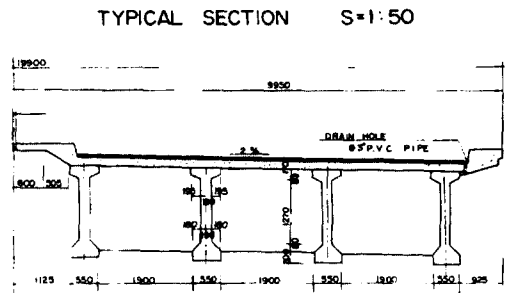


그림 5-b. 상부구조 단면도

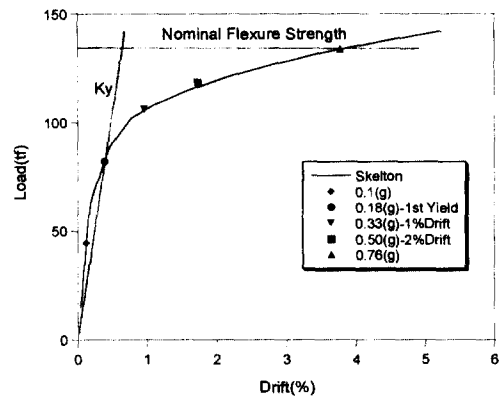
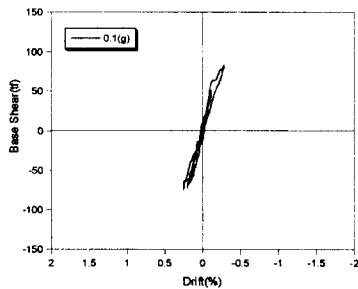


그림 6 수평내하력 및 입력지진별 응답크기

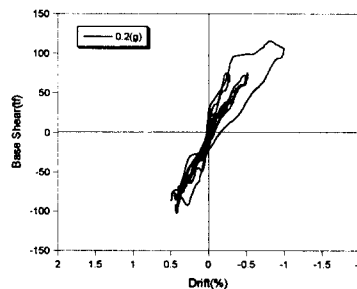
표 1 입력지진 크기에 따른 구조물 응답 크기

	초기항복	1% Drift	2% Drift	파괴
주기(sec)	1.07	1.55	2.08	2.77
하중(tf)	82	107	119	135
변위(cm)	5	13	26	52
Drift(%)	0.38	1	2	4
PGA(g)	0.18	0.33	0.50	0.76

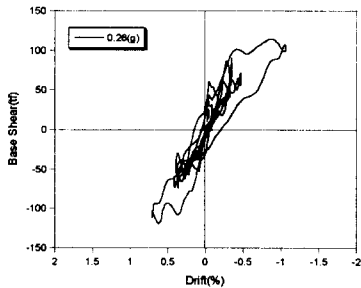
그림 7은 Elcentro 지진의 PGA를 스케일하여 대상구조물의 지진응답을 수치 해석한 결과이다. 표.1의 지반가속도에 대한 응답보다는 조금 큰 응답특성을 보여 주고 있으나 설계지반 운동의 세기에 대해 그 응답은 한정된 연성도 내에서 제한되고 있음을 알 수 있다.



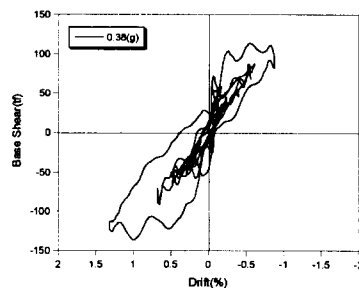
(a) PGA=0.1(g)



(b) PGA=0.2(g)



(c) PGA=0.26(g)



(d) PGA=0.4(g)

그림 7 교각 구조의 지진 응답

매우 유사한 관찰이 NCEER 보고서에서도 보고되고 있다 [NCEER-a,b]. 내진상세가 고려되지 않은 일반 교량의 교각에 대해 풀 스케일(Full Scale)과 1/3로 축소된 모델로 내진역량 실험을 수행하였다. 이 실험은 지진하중에 대해서는 응답 특성이 검토 되지는 않았지만 교량 교각 모델은 PGA 0.4g 수준의 지진하중에 대해서도 탄성적으로 거동함을 보여주고 있다(표 2).

표.2 교각 실험에 의한 응답 특성

	풀 스케일 모델	1/3 축소 모델
탄성 한계	0.43g	0.44g
과괴	1.29g	0.89g
연성도	4.00	1.85

4. 중진 지역 한정연성 설계 개념

현재 우리나라에서 사용되고 있는 내진 규범은 강진지역에서 발전된 설계개념을 따르고 있으며 [ATC, 1995] 구조물의 충분한 비선형 변형으로 지진 에너지를 흡수하도록 하여 붕괴를 방지할 수 있도록 요구하고 있다. 그러나, 내진설계는 지역적 특성을 고려한 지진하중 하에서의 구조물의 동적응답 특성에 근거하여야 한다. 강진지역에 비해 상대적으로 지반운동의 세기가 낮은 중진 지역에서는 작은 에너지 흡수 능력(작은 비선형 변형)으로도 고려하는 설계 지진이 요구하는 내진 성능을 만족하게 된다.

구조물의 에너지 흡수 능력을 표현하는 간단하고도 합리적인 인자(Indicator)로서 변위에 대한 연성도(Ductility Ratio)가 널리 이용되고 있다. 이는 콘크리트 부재의 비선형 거동이 본격적으로 진행되는 철근 항복시의 변위(δ_y)에 대한 파괴시의 변위의 비로 정의 할 수 있다. 그림 8 은 콘크리트 구조의 비선형 거동을 Bi-linear 모델로 간략화 그림이다. 철근 항복 시의 변위에 대해서는 부재의 최연단의 철근이 항복하는 초기 항복점의 정할 강성과 부재의 공칭 강도가 교차하는 변위로 설정하였다[Priestley, 1998]. 일본 토목학회의 개정 콘크리트 시방서 [1996]에는 부재의 항복 하중을 부재 내에 인장력을 받고 있는 철근의 무게 중심 위치에서의 변형도가 항복 변형도에 도달할 때의 하중을 항복하중으로 정의하고 있어 이 때의 대응 변위가 항복 시의 변위가 된다.

RC 부재의 전단 강도(V_u)는 콘크리트가 분담하는 저항력(V_c)과 트러스 메커니즘에 의해 분담하는 저항력(V_s) 그리고 축력에 의한 분담력(V_p)의 합으로 나타낼 수 있다[Priestley, 1994]. 콘크리트의 전단 저항력은 응답변위에 반비례해 작아지게 되는데 Priestley 는 콘크리트의 공칭 전단응력을 연성도(μ)에 따라 줄임으로써 연성도에 따른 전단 강도의 저하를 고려하고 있다. 즉, 연성도가 2 보다 작을 때는 공칭전단응력을 $0.29\sqrt{f'_c(MPa)}$ 로 하고 연성도가 4 이상일 때는 $0.10\sqrt{f'_c(MPa)}$ 로 하였다. 연성도가 2 와 4 사이에서는 전단강도가 선형적으로 감소한다(그림 8). Priestley 의 제안식을 이용하여 건축구조 모델의 전단강도를 산출하면 초기전단 강도(V_i)는 $6.1\text{ }tf$ 이며 연성도 4 이상 시의 전단강도(V_f)는 $3.3\text{ }tf$ 이다. 교각구조에서는 각각 $758\text{ }tf$, $389\text{ }tf$ 이다. 위에서 검토 되었듯이 중진지역의 구조물의 지진응답 특성은 강진지역에서와 달리 거의 탄성 영역 내에서 제한되거나 약한 비선형 거동을 보이므로 한정연성도를 목표 연성도로 설정하는 것이 합리적이다. 이런 목표연성도는 강진지역에서와 다른 내진상세(예- 횡방향 철근량)를 도입하여 합리적으로 확보할 수 있다.

그림 9 및 그림 10 은 상기의 건축 구조물과 교각에 대해 연성도를 검토한 그림이다. 구조의 비선형 거동이 뚜렷한 건축 구조 모델의 예에서는 소요내진역량과 공급내진역량을 산출하기 위해

동일한 구조 거동 특성 모델을 사용할 수 있을 것이다. 그러나, 교각의 예와 같이 완만한 비선형 변형 특성과 함께 제한된 소성 영역에서의 지진 응답을 보이는 경우는 상기의 Bilinear 모델과 다른 구조 거동 모델을 도입하는 것이 합리적으로 공급내진역량을 산출할 수 있을 것이다. 그림 10은 대상 구조물의 공급내진역량이 보수적인 설계 쪽으로 고려되도록 도입된 Trilinear 모델의 한 예이다. 최연단 철근이 항복하는 점을 초기 항복점으로 하고 구조물의 극한 변위(δ_u)까지 선형적으로 변화하여 이 후, 구조 거동이 완전 소성 영역으로 들어가도록 하는 모델이다. 소요내진역량을 산출하기 위해서는 그림 8의 구조거동 모델을 이용하고 항복변위(δ_y)도 동일하게 정의하였다. 내진상세가 고려되지 않아도 건축 구조물의 예에서는 연성도 2 이상을 확보하고 있으며 교각의 예에서 충분한 연성도의 확보로 휨 파괴가 발생함을 알 수 있다.

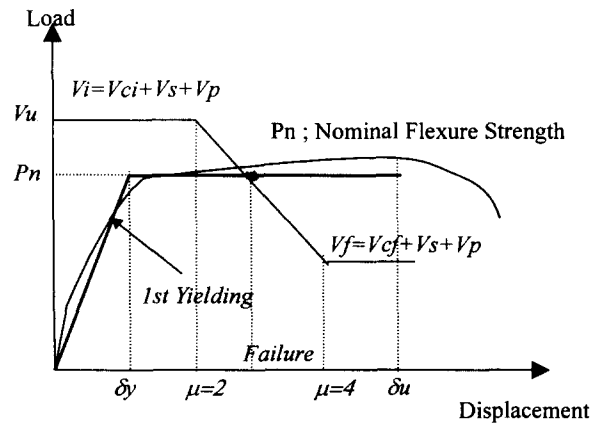


그림 8 한정 연성도 설계 개념도

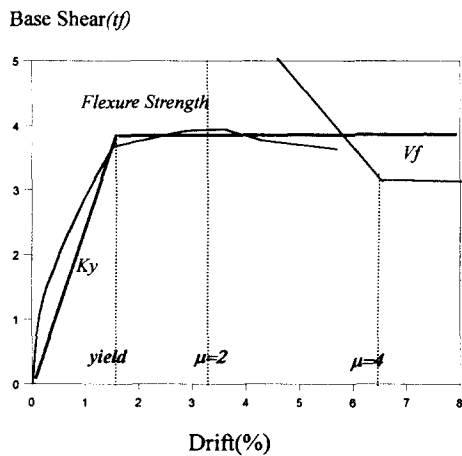


그림 9 건축구조물의 연성도

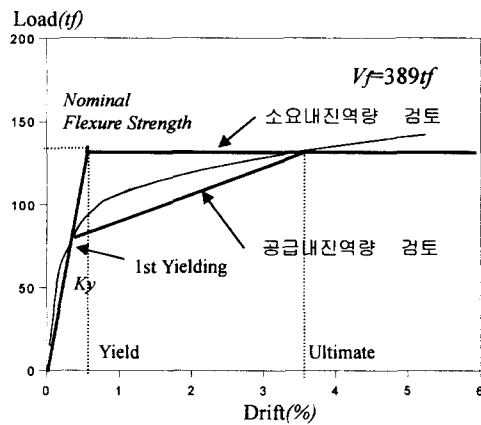


그림 10 교각 구조물의 연성도

5. 결론

우리나라가 속한 중진지역에서의 지진지반운동의 세기는 강진지역에서의 세기와 다르기 때문에 구조물의 지진응답 특성도 다르게 된다. 중저층 철근콘크리트조에 대한 진동대 실험과 교각 교각의 수치해석을 통해 기존 구조물의 지진응답 특성을 검토하였다. 이들 구조물은 내진상세가 고려되지 않았지만 상당한 횡강성을 지니고 있으며 설계 지진하중 하에서 강진 지역에서의 지진 응답 특성과는 달리 상당히 제한된 비선형 영역에서 거동함을 알 수 있다. 따라서 이들 구조물의 목표 연성도를 제한된 한정연성도로 설정하는 것이 중진지역에서의 합리적인 설계 방법이다. 구조부재에 작용하는 연직하중과 횡방향 철근량은 구조물의 연성도에 밀접한 관계가 있는 설계 인자이다. 한정연성도를 고려하지 않고 강진지역에서의 횡방향 철근량을 그대로 적용하면 과도한 연성도를 불필요하게 갖게 되기 때문에 비경제적일 수 있다. 따라서, 중진지역에서의 한정연성도를 확보할 수 있는 내진상세가 합리적으로 고려되어야 한다.

비교적 구조 제원과 설계하중이 정형화된 건축 구조물과는 달리 교량의 교각 구조물은 구조형식에 따라 상부하중의 크기도 크게 달라지며, 교각의 제원, 특히 교각 높이도 건설 위치의 지반고에 따라 현저한 차가 있게 된다. 또한 상부구조와 교각 연결부의 경계조건, 구조물의 진동 단위에 따라 수치해석에서의 차가 있을 수 있다. 따라서 교각 구조물의 구조 응답 특성은 상기의 구조 특성을 고려한 많은 케이스에 대해 파악되어야 할 것이다. 본 연구에서 대상으로 한 교각은 한 예에 해당하는 것임을 지적하며 향후 체계적으로 분석, 검토되어야 할 과제임을 밝혀둔다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

1. ATC (1995), *A Critical Review of Current Approaches to Earthquake -Resistant Design*, ATC-34 report, Applied Technology Council, Redwood City California.
2. ATC-32 (1996), *Improved Seismic Design Criteria for California Bridges: Provisional Recommendation*, Applied Technology Council, 1996
3. 한국지진공학회 (1997), 내진설계기준연구(II), 1 권, 건설교통부.
4. Kim, I.H (1997) 'Method for checking seismic performance of concrete structures and its effectiveness', *Journal of Structural Engineering, JSCE*, Vol. 44A, 871-876
5. Lee, H.-S., Woo, S.-W., Heo, Y.-S. (1998), 'Inelastic behaviors of a 3-story reinforced concrete frame with nonseismic details', *Proc., of KCI Conference-Spring 1998*, 10(1), 429-432.
6. Nadim I.(1998), 'Confinement of Rectangular Bridge Columns for Moderate Seismic Areas', *NCEER Bulletin*,

Spring-1988

7. NCEER (1996a), *Seismic Evaluation of a 30-Year Old Non-Ductile Highway Bridge Pier and Its Retrofit*, Technical Report NCEER-96-0008, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.
8. NCEER (1996b), *Seismic Performance of a Model Reinforced Concrete Bridge Pier Before and After Retrofit*, Technical Report NCEER-96-0009, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.
9. Priestley, M.J.N, Verma, R. and Xiao, Y. (1994), 'Seismic Shear Strength of Reinforced Concrete Columns', *Journal of Structural Engineering*, V.120, No.8, pp.2310-2329.
10. Priestley, M.J.N, (1998), 'Direct Displacement-Based Seismic Design of Building', *ECEE Conference*, Paris, France.