

국내 콘크리트구조물의 지진대비책

국내 콘크리트 구조물의 내진설계 기준 및 관례(토목)

Criterion and Usual Practice on Earthquake Resistant Design
for Domestic Concrete Structures



방 명 석*

1. 서 론

국내 토목구조물에 최초로 내진설계규정이 도입되어 적용되기 시작한 것은 1991년에 제정된 "고속전철용 설계시방서"이다. 그 이전에도 설계시방서에 규정화되어 있지 않았지만 장대교량 등(예 ; 남해대교, 1973)에서는 지진벽을 설계하중으로 고려하였으나 시방서에 의무화한 것은 상기 시방서가 최초이다. 또한 1992년에는 모든 도로상교량에 적용되고 있는 "도로교시방서"에 내진설계를 의무화하여 현재까지 적용되고 있다. 도로교시방서의 내진설계기준은 미국 도로교시방서(AASHTO Design Specification, 1987)의 내진설계기준을 거의 가감없이 도입하고 있으며, 이 기준의 국내 적용성에 대한 충분한 검증은 매우 부족한 실정이다. 내진설계기준이 도입된지 수십년이 된 일본의 경우를 볼 때에도 내진설계기준은 수많은 개정을 겪었고, 특히 대규모 지진발생시

다 미처 고려되지 못했거나 인식이 부족했던 관계로 입게 되는 주요피해를 교훈으로 삼아 지속적으로 설계기준에 반영해 왔다. 다행스럽게도 국내에서는 구조물에 손상을 줄만큼 큰 지진이 발생되지 않아서 현 내진설계기준의 적합성을 검증하기는 어려우나, 일본이나 미국에서 최근에 발생한 지진에 의해서 받은 피해와 이를 방지하기 위해서 보완되고 있는 내진설계법 개발을 참고할 필요가 있다.

본 고에서는 이러한 내진설계의 초기단계에 있는 국내 토목구조물의 내진설계에 필요한 설계기준을 소개하고 현시방서의 설계개념과 보완이 필요한 내용을 기술해보고자 한다.

2. 내진설계 개념

2.1 설계목적

지진하중(eathquake load)은 사하중(dead

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구실장, 공박, 기술사

load), 활하중(live load) 등과 달리 설계하중의 크기나 발생빈도를 예측하고 설정하기 곤란한(implicit) 하중이다. 물론 과거의 지진기록을 참고하여 발생 가능한 지진의 크기를 설계하중으로 규정하지만, 구조물의 공용기간 중에 이 설계치를 초과하는 지진이 발생할 가능성이 비교적 많다. 따라서 설계하중값을 초과하는 지진의 발생시에 설계대상구조물이 어느 정도 피해를 입을 수 있게 설계할 것인가에 대한 목표설정이 필요하다. 일반적으로 지진하중의 규정치는 설계하중규모에서는 구조물의 기능과 사용성 및 안전성을 유지하고, 공용중에 1회 정도 발생 가능한 대규모 지진하중에서도 구조적인 손상은 허용하나 인명피해를 방지할 수 있게 설계해야 한다.

또한 일반적으로 설계하중 이내에서는 구조물의 탄성거동을 하도록 설계하나 설계하중 이상의 지진에 대해서는 소성변형을 겪을 수 있도록 설계해야 한다.

2.2 유연도(ductility)

설계하중 이상의 대규모 지진이 발생할 경우나, 설계하중 이내일 경우에도 발생빈도가 낮은 지진하중에 대해서 탄성설계를 하는 것은 비경제적이다. 따라서 설계시에 소성설계 개념은 경제성 관점에서 매우 필요하다. 이러한 소성설계를 콘크리트 구조물에 도입할 경우에는 지진과 같은 반복하중 하에서 콘크리트 구조물의 유연도 확보가 가능한 설계기술이 필요하다. 도로교시방서 표 3.4.1의 “응답수정계수”는 이러한 구조물의 유연도를 고려하기 위한 것이다. 상기 값은 AASHTO의 응답수정계수와 동일하며, AASHTO는 이 값의 정의를 위해 두가지 개념을 사용하였다. 첫째는, 반복하중 하에서 콘크리트 구조물의 강성이 계속해서 저하되게 될 때 초기극한강도의 80% 수준까지를 콘크리트 구조물의 유연도를 정의하는 방법이다(그림 1). 둘째는 횡방향 철근(confinement steel)이 최초로 소성변형을 겪게 되는 시점을 유연도로 정의하는 방법이다. 반복하중 하에서 지속적인 인장력을 받는 횡방향 철근이 소성변형을 겪게 될 때 심부콘크리트(core concrete)의 균열 및

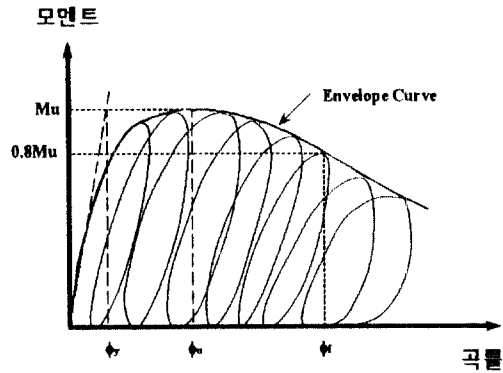


그림 1 유연도의 정의 방법

팽창(dilatation)이 부재파괴의 원인이 되기 때문이다.

2.3 전단설계

지진하중 하에서 구조물의 파괴시에 휨인장파괴(flexural tensile failure)보다 전단파괴(shear failure)나 압축파괴(compressive failure)가 더욱 위험하다. 따라서 도로교시방서에서도 전단파괴나 압축파괴 이전에 휨인장파괴가 먼저 발생할 수 있도록 모든 기준이 제정되었다. 따라서 콘크리트 부재의 전단강성의 평가는 매우 중요하며 이 값보다 휨강성이 작을 수 있도록 설계되어야 한다. 휨강성과 전단강성의 비교를 위해서 유연도(ductility)와 전단강성의 관계 설정이 필요하다. ATC(Applied Technology Council)에서는 콘크리트 부재의 전단강성이 유연도계수 2일 때까지 탄성전단강성을 유지하다가 2 이상에서 선형감소하여 5 이상에서는 탄성전단강성의 25%의 값을 갖는 것으로 정의하고 있다⁽⁵⁾. 따라서 유연도계수가 5 이상이 필요한 휨부재에서는 전단강도가 휨강도의 4배 이상을 확보할 것을 요구하고 있는 것과 같은 의미이다.

또 하나의 고려사항으로는 콘크리트 부재의 전단강성을 평가할 때 축력의 크기를 고려해야 한다. 현재 도로교시방서에서는 전단강성 평가시에 축력의 크기를 고려하고 있지 않으나, ACI에서는 지진하중에 의한 전단력이 전체전단력의 50% 이

상이거나 축력이 $\frac{A_g f_c}{20}$ 보다 작을 경우에는 전단강성을 0으로 평가한다. 또한 미국 캘리포니아 도로 교시방서(Caltrans Code)에서도 축력이 $0.1A_g f_c$ 보다 작을 때는 전단강성을 0으로 평가한다.

효고현 남부지진에서 보듯이 휨인장력에 의한 주철근의 소성변형과 전단력에 의한 띠철근의 전단변형에 의해서 대부분의 교각이 붕괴되었는데 유연도와 휨과괴 개념이 시방서에 도입된 이후에 건설된 교량은 대부분 휨과괴가 먼저 발생한 것을 알 수 있다. 물론 철근연결방법으로 압접을 사용함으로써 열에 의해서 연강(mild steel)이 취성화되어 유연도를 상실함으로써 붕괴되거나, 횡방향 철근의 상세가 불량함으로써 전단력하에서 구속 부위가 이완되고 사인장 균열이 성장하여 붕괴된 교각도 발견되고 있다.

3. 내진성을 고려한 구조설계기준

3.1 구조계획기준

지진하중은 풍하중, 토압 등과 함께 대표적인 횡하중이다. 국내의 교량 등 토목구조물 설계시에 이러한 횡하중의 영향이 비교적 적었기 때문에 대부분의 최적구조설계의 목표는 수직하중에 대해서 최적거동을 할 수 있는 구조계획이 주류였다. 그러나 내진설계에서 바람직한 설계는 구조물의 횡방향거동도 최적이 되도록 구조계획시에 고려되어야 한다. 이러한 횡방향 최적화의 요건은 강성과 함께 질량분포도 고려해야 한다. 즉, 지진은 동하중이므로 강성의 최적배치 못지 않게 질량의 최적배분이 중요하다. 이는 기존설계개념시 수직하중의 최적분배 및 거동과 상충되는 경우가 있을 수도 있으므로 구조계획단계에서 종합적으로 검토해야 한다.

3.2 설계시 고려해야 할 요소

내진성이 양호한 구조물의 설계시에는 가능한 한 단순성(simplicity), 대칭성(symmetry), 연속성(continuity), 집중성(integrity)을 갖도록 설계할 필요가 있다.

구조물을 가능한 한 단순하게 설계하는 것은 내진거동의 파악이 쉽고, 유지관리가 용이하며 복구시 유리하기 때문이다. 또한, 과거의 지진피해기록을 검토해 볼 때 생존비율(survival rate)이 높은 교량은 비교적 단순한 구조물이다. 복잡한 구조물은 동적거동이 복잡하여 예측과 대책수립이 곤란하다. 그러나 지나치게 단순화된 구조물은 유연성(ductility)이 특정부재에 집중화되어 대변형(large deformation)이 발생하여 붕괴원인(failure trigger)이 될 수도 있다.

구조물은 기하학적으로 대칭(geometrical symmetry)이고 역학적(강성, 질량)으로도 대칭(mechanical symmetry)이 되어야 한다. 즉, 횡방향강성의 분포에 따른 횡방향반력의 합력선이 질량중심선과 일치해야 한다. 이 경우에 지진과 같은 횡력에 대해서 최소의 비틀모멘트가 발생하게 되고 교량부재의 전단변형을 줄여서 전단파괴를 방지할 수 있다. 또한 비틀에 의한 회전변위가 발생하는 경우에 횡방향반력의 분배가 교각의 강성과 비례하지 않게 됨으로써 파괴순서를 예측하기 곤란하다.

강성과 질량은 교량길이방향에 대해서 연속성을 갖도록 설계해야 한다. 강성이나 질량의 분포가 급격하게 변하는 경우에 교량부재별로 소성변형의 발생시차가 발생하게 되어, 항복된 부재와 항복되지 않은 부재 사이에 강성중심의 이동이 발생되고, 이는 횡력에 대한 분배구조를 변화시킴으로써 예측 불가능한 파괴와 연속적인 붕괴의 원인이 될 수 있다. 교량의 경우에 일반교각과 교대는 횡강성 및 질량에 큰 차이가 있는 부분이므로 내진설계시 특별한 주의를 요한다.

교량과 같은 토목구조물은 일반적으로 긴 지반 접촉길이를 갖게 되므로 횡방향강성중심이나 질량중심에서 크게 산개되어 있게 된다. 따라서 부재간에 부재력이나 변형의 전달과 분배가 가능하도록 연결부의 강성이 충분해야 한다. 또한 상부구조의 면내력(inplane force)을 하부구조에 분배가 양호하도록 상부구조의 연속성과 상·하부구조 사이의 지지구조가 안전해야 한다. 따라서 연단거리(seat lengths), 전단키(shear keys), 보의 연결선(continuity cables) 등에 대한 설계상

새가 충분한 안전율을 확보해야 한다. 즉, 이러한 연결구조는 상·하부구조의 상대변위(relative displacement)의 최대치와 최소치에 대한 정밀한 해석이 필요하다. 일반적으로 교장이 긴 교량은 다수의 진동단위(dynamic structural units)로 나누어지므로 강성 질량중심은 다수가 되고 독립적인 내진설계가 가능하다.

3.3 구조형태에 따른 고려요인

곡선교(curved bridges)나 사교(skewed bridges)와 같이 가하학적으로 특이한 구조물은 횡력에 의해서 큰 비틀응력이 발생할 가능성이 크므로 정밀한 구조해석이 필요하다. 또한 횡방향거동은 강성 및 질량중심과 지반과의 거리가 커지면 커질수록 복잡하고 불안전하므로 교각의 높이가 큰 교량에서는 비선형 동적해석이 필요하다. 즉, 이차적인 부재력과 변형이 발생하게 된다. 교각들의 높이차가 큰 경우에도 하부구조간에 강성차가 크게 되어 상부구조의 변형차이에 의한 큰 상부구조의 부재력이 발생한다. 이러한 경우에 상부구조의 변위차이를 줄이기 위해서 하부구조와 기초 사이의 연결을 힌지구조나 강결로 적절히 배치할 수 있다.

3.4 소성설계의 적용상 문제점

현행 도로교시방서에서는 소성설계를 허용하고 있으나 이는 진동단위구조의 부정정차수가 적어 소성힌지의 발생메카니즘이 단순할 때에 적용이 가능하다. 그러나 아치교와 같이 교차부정정구조물에서 소성설계를 도입하기는 현실적으로 불가능하다. 즉, 이러한 복잡한 교량에서 지진발생시 순차적으로 소성힌지가 발생하도록 연결부를 설계하기는 매우 어렵다. 따라서 이러한 교차부정정구조물에서 설계는 탄성설계를 하고, 비선형해석을 통한 추가 검토를 실시하는 것이 일반적인 관행이다.

3.5 도로교시방서에 제시된 내진해석방법의 적합성

복잡한 동적거동을 갖는 구조물에서 등가정적하중으로 치환하여 설계하는 것이 얼마만한 정확성을 유지할 수 있을까 하는 의구심은 급변 일본에서 발생한 효고현 남부지진피해에서도 나타나고 있다. 설계업무의 특성상 등가정적해석이 더 실용적이고 많이 사용되고 있으나 구조물이 복잡해 질수록 정확성은 더욱 떨어진다. 도로교시방서의 제5편 내진설계편에 있는 예제의 경우에도 교축직각방향에 대한 등가정적해석 및 동적해석에 의한 결과의 오차가 40%에 달하고 있다⁽⁸⁾.

그러나 모든 교량의 설계시에 등가정적해석과 동적해석의 오차를 확인하는 것은 불가능하다. 따라서 설계자는 경험과 사전지식에 의해서 판단할 수 밖에 없는 것이 현재의 실정이다.

4. 결 론

1993년 1월부터 적용되기 시작한 도로교시방서의 내진설계는 일선 설계실무자들에게 큰 어려움을 안겨 주고 있다. 이는 이 설계기준의 적용의 범위가 분명하지 않은 점과 함께 설계방법에 대한 편람이나 지침이 부족하기 때문이다. 또 다른 요인은 시방서 도입과 함께 논의되었어야 될 내진설계에 따른 경제성, 시공성, 안전성 등에 대한 추가 분석자료들이 부족하기 때문이다. 현 상황은 내진설계가 필요하다는 대전제에 의해서 시방화가 되었으나 실제 지진발생에 의한 어떤 검증도 없는 상황에서 내진설계의 당위성에 대한 학자와 실무자들의 소극적인 반응이 토목구조물의 내진설계를 부실화시키고 있는 원인이 되고 있다.

참 고 문 헌

1. “道路橋 標準 示方書,” 建設部, 1992
2. “道路橋 示方書·同解説,” 日本道路協會, 1980
3. “Guide Specification for Seismic Design of Highway Bridges,” American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 1983

4. "Standard Specification for Highway Bridges Related to Seismic Design," California Department of Transportation, Division of Structures, 1985
5. "Seismic Design Guidelines for Highway Bridges," Report ATC-6, Applied Technology Council, 1981. Also published by Federal Highway Administration as Report FHWA/RD-81/081 1981
6. "Seismic Design and Retrofit Manual for Highway Bridges," Federal Highway Administration, Report FHWA-IP-87-6 1987
7. "Building Code Requirements for Reinforced Concrete," American Concrete Institute, 1989
8. "構造動力學의 理論 및 應用," 한국전산구조공학회(기술강습회 교재), 1995

도서보급 안내

「고성능유동화제를 이용한 고강도콘크리트의 제조와 특성 및 활용」

— 본 학회 국제워크숍 교재 —

• 주요내용

- I. Achieving and Testing High Performance Concrete
Cement and Superplasticizer Compatibility
Current and Future Applications of High Performance Concrete(Dr. Pierre-Claude Aitcin)
 - II. 고강도 콘크리트 제조를 위한 국내의 혼화제 제조 현황 및 특성, 혼화제의 기구(노재성)
 - III. State-of-the-Art on High-Strength Concrete in Japan(Dr. Yasuo Tanigawa)
 - IV. 고강도 콘크리트 건축구조물의 국내 개발과 활용 및 전망(신성우)
 - V. 고성능콘크리트 및 고강도콘크리트의 개발과 국내 토목구조물의 활용전망(오병환)
- 교재보급가 : 회원 18,000원, 비회원 20,000원
 - 문 의 처 : 한국콘크리트학회 사무국
전화 : 543-1916, 545-0199

