



국내 콘크리트구조물의 지진대비책

국내 콘크리트 구조물의 지진대비책 (토목)

Seismic Design of Concrete Structures



조 양 희*



김 우 증**

1. 서 언

종래 우리나라에서는 인간의 생활 및 산업시설에 심각한 영향을 미치는 지진 즉, 소위 강진(強震) 규모 이상의 지진을 자주 경험하지 못했던 까닭으로, 산업시설의 건설시 지진에 대한 고려가 거의 없었다고 할 수 있다. 그러다가 근래에 들어서는, 국내 원자력발전소의 건설과 더불어 절대에 가까운 안전성 확보를 위해 수행되는 내진설계 개념이 관련 기술분야에 소개됨과 함께, 구소련, 멕시코, 미국, 일본 등 전 세계적으로 발생되는, 대규모 지진에 의한 가공할 만한 피해 상황이 빈번해짐에 자극을 받아, 국내 건설기술분야에서도 1980년 후반에 들어 관련 법규 및 지방에서 지진 관련 규정을 신설하는등 내진설계의 중요성에 대한 인식이 증가되어 왔다고 할 수 있다.

특히 올해초에 발생된 일본의 관서지방 효고현 남부(兵庫縣 南部) 지진의 경우는 그 규모와 피해

도 막대했을 뿐만 아니라 우리나라와의 지리적으로 인접한 나라에서 발생했다는 이유로 인하여, 국내 학계 및 산업계에서 지대한 관심속에서 현장 답사 및 후속평가와 대책수립 등에 고심하고 있는 상황이라고 할 수 있다. 이와 같은 계기가 국내 각종 산업시설물의 내진설계 및 지진 방재대책의 개선 및 발전을 위한 전환점이 될 것으로 기대되고 있다.

이번 효고현 남부지진의 교량 및 건축물 피해 상황에서도 극명하게 밝혀졌듯이, 지진발생시 콘크리트 구조물의 경우 상대적으로 연성(ductility)이 큰 강구조물에 비해 심각한 지진피해상황을 나타내고 있다. 또, 같은 콘크리트 구조물에서도 최근 강화된 내진 설계규정적용 이전에 건설된 구조물의 피해가 더욱 심했다고 보고되고 있다. 이와 같은 사실들로부터, 콘크리트 구조물의 내진설계에 대한 중요성 및 관련기술의 연구·개발 필요성이 가일층 부각되었다고 할 수 있다.

본고에서는 이상과 같은 상황을 계기로, 국내의 주요 콘크리트 구조물 중 토목분야 구조물에 해당되는 교량구조와 원자력발전소구조물의 내진설계

* 성회원, 인천대학교 토목공학과 교수, 공박

** (주)삼우기술단 상무이사, 공박

현황과 이와 관련된 지진대비책에 대하여 소개함으로써, 이에 대한 인식의 제고 및 기술발전의 계기로 삼고자한다.

2. 교량의 지진대비책

2.1 국내교량의 내진설계현황

국내의 내진설계는 지진발생시 인명피해가 큰 건축구조물부터 1988년 1월 '건축물의 구조기준 등에 관한 규칙'에 내진설계를 의무화시켰으나 대부분 국가예산을 사용하는 공공사업인 토목구조물에서는 공사비가 10~30%정도까지 증가될수 있는 내진설계규정의 제정에 신중함을 기하다가 1991년 고속철도용시방 하중편에 언급되고 1992년 12월 정식으로 개정된 도로교표준시방서에서 내진설계를 규정하였다.

1992년 12월 도로교에 내진설계가 규정되기전에는 대부분의 교량에 지진하중을 고려하지 않았으며 다만 1988년 건축구조물에 적용이후 관심이 고조되어 신설되는 대형교량에 부분적으로 적용되기 시작하였다. 이러한 콘크리트교량으로는 1989년에 설계된 강동대교, 1990년 설계된 북부도시고속도로등이 대표적인 예이다.

그러나 그당시 교량의 내진설계를 위한 국내시방이 없었으므로 건축시방에서 정한 지진강도(최대지반가속도 0.12g)를 사용하였으며 해석방법도 미국의 AASHTO규정을 준용하는등 일정하지 않았다.

또한 지진하중을 단순한 하중의 개념으로 생각하여 최소한 기능유지를 도모한 것으로 수평력증가에 따른 전단력이나 휨모멘트의 증가를 고려하여 철근량을 증가시켰으나 구조적연성을 증가시키기 위한 철근의 배치, 지진력의 분산이나 저감등을 위한 구조물의 상세처리등은 충분히 고려되지 않았다.

1992년 12월 도로교시방서 내진설계편이 규정됨에 따라 교량의 설계에 지진하중을 적용하도록 되어있으나 실무지침미비와 복잡한 해석방법으로 내진설계의 정착이 지연되어 오다가 설계실무자들이 설계기법을 습득함에 따라 최근 서서히 정착

되고 있는 추세이다.

2.2 국내 콘크리트교량의 내진설계에

콘크리트교량은 자중이 커서 지진에 의한 수평력발생이 크므로 내진설계하기가 타 교량형식에 비하여 어렵다고 할 수 있다. 먼저 국내 콘크리트교량 내진설계의 현수준을 가늠하고 추후 효율적인 내진설계가 되는데 도움이 되고자 국내에 설계된 주요 콘크리트교량의 지진대비설계의 예를 들고자 한다.

(1) 강동대교

강동대교는 판교-구리간고속도로의 일부분으로 주교량은 $82.5+5@125+82.5=790m$ 의 경간구성을 가진 현장타설켄틸레바공법을 사용한 프리스트레스트 콘크리트교량으로 지진력기준으로 최대지반가속도 0.12g를 적용하였으며 교량중앙교각상단에 1.0m x 2.5m의 대형콘크리트전단키(I형강재삽입)가 지진력을 저항토록 설계되었다.

이 교량은 교각높이에 비하여 교각의 강성이 커서 하나의 교각이 상부지진수평력을 저항하는 것이 가능하였다.

(2) 북부도시고속도로

북부도시고속도로 중 성산IC와 홍제동구간의 약 9.4km의 주교량은 7@50=350m의 경간구성을 가진 연속교로 구성되었다. 프리캐스트켄틸레바공법을 사용한 프리스트레스트 콘크리트교량으로 지진력기준으로 최대지반가속도 0.12g를 적용하였으나 홍제천을 경유하는 교각이 높고 날렵하여 교량중앙부 1개의 교각에서 지진수평력을 저항하지 못하여 고정지점이 있는 교각의 양측으로 각각 1개 교각 즉 교량당 총 3개의 교각에서 지진력을 저항하도록 전단키를 설치하였다. 전단키와 교량의 접촉예상부위는 교량의 온도변화로 인하여 접촉이 되지 않도록 간격을 두었다. 콘크리트전단키는 강재및 강봉을 사용하여 수평력을 저항하도록 하였다.

콘크리트교각에는 수직으로 프리스트레싱을 하여 강도를 증가시키고 연성을 증가시켰다.

(3) 서해대교

서해대교는 서해안고속도로의 일부분으로 총 7.31km이며 현재 시공중에 있다. 서해대교중 약 5.8km의 구간은 10@60=600m의 경간구성을 가진 연속교로 구성되었다. 프리캐스트공법을 사용한 프리스트레스트 콘크리트교량으로 지진력기준으로 현재시방기준인 최대지반가속도 0.14g를 적용하였으나 항해를 위한 형하고확보때문에 교각높이가 65m정도까지에 이르므로 교량중양부 고정지점 1개 또는 몇개의 교각에서 지진수평력을 저항하지 못하며 온도에 의한 영향이 커서 교각과 상부를 일체로 하지 못하였다.

적용된 설계개념은 먼저 지진이 발생하면 교량중양부 교각의 고정받침이 수평력에 의해 수평고정역할을 상실하고 이때 상부주형이 과대변형을 일으키려고 할때 매 교각상단에 설치되어 있는 전단키에서 상부주형의 이동을 억제하고 수평력을 분담한다는 개념으로 설계되었다.

전단키는 강재와 콘크리트를 사용하여 수평력을 저항토록하였으며 전단키와 교량의 접촉에 상부위는 교량의 온도변화로 인하여 접촉이 되지 않도록 간격을 두었다. 콘크리트교각에는 수직으로 프리스트레싱을 하여 강도를 증가시키고 연성을 증가시켰다.

위의 예에서 알 수 있듯이 현재 국내의 콘크리트교량의 내진설계는 상부주형의 낙교방지와 교각 및 기초의 지진수평력저항에 초점이 맞추어져 있다. 그리고 낙교방지를 위해서는 수평력저항이 강한 교량받침이나 시방서에서 제한한 연단거리 확보방법보다 전단키를 사용한 직접적인 방법을 사용하고 있다.

또한 지진이 많은 일본이나 미국에서 사용되는 지진력저감이나 지진력흡수와 같은 면진개념의 고가의 장비나 특수교량받침이 내진설계에 반영되고 있지않은 데 이것은 국내 내진장비관련분야가 활성화되지 않고 지진발생자체에 대한 의구심때문에 유지관리가 어려운 고가의 외산특수장비를 적용에 투자를 주저하고 있기 때문이다.

2.3 콘크리트교량의 지진대비책

2.3.1 요구 내진안전성의 정립필요

콘크리트교량은 강교에 비하여 자중이 크므로 근본적으로 지진에 대하여 불리한 구조이며 따라서 설계상 요구되는 내진안전성의 정도에 따라 구조물의 경제성에 직접적인 영향을 주게되며 구조적 안전이 판단되고 또한 설계시 내진이나 면진을 하기위한 장비의 적용을 판단할 수 있게된다.

예를 들면 현 시방서의 내진설계의 기본개념을 보면 다음과 같다.

(1) 인명피해를 최소화한다.

(2) 설계지진시 교량부재들의 부분적인 피해는 허용하나 전체적인 붕괴는 방지한다.

(3) 지진시에도 교량의 기본기능은 발휘한다.

(4) 교량의 정상수명 기간내에 설계지진력이 발생할 가능성은 희박하다.

위의 (2)항에서 허용되는 교량의 부분적인 피해가 무엇인지 구체적으로 알 수 없고 낙교만 되지 않으면 되는것처럼 되어있으며 (3)항과 상치되는 데 올바른 해석인가? 또한 (3)항에서 교량의 기본기능이란? 예를 들면 지진시 교량받침이나 신축이음장치가 파손되어 임시강판을 얹어놓고 차량이 통행하면 교량의 기본기능은 유지되지 않은 것인가? (4)항은 지진에 대비하여 고가의 장비설치와 계측장치는 필요없다는 뜻인가?

위에서 알 수 있듯이 내진설계의 기본개념을 명확하고 구체적으로 정립하는것이 시방서를 적용하여 실제로 설계하는 설계실무자들에게는 매우 중요하며 곧 이것이 교량의 내진안전성판단척도가 되며 과거에 설계된 기존교량의 내진안전성확보를 위한 보강유무 및 보강규모판단에 구체적 지표가 될것이다.

2.3.2 내진해석법의 단순화필요

현 도로교시방서의 내진설계편에 제시되어 있는 방법은 일반직선교의 내진설계만 하더라도 매우 복잡하고 난해하여 설계실무자들이 오류없이 실제설계에 적용하기가 매우 어렵다는 지적이 많다. 따라서 단순한 형태의 교량은 단순식을 제시하여 병용할 수 있도록 하고 검토가 가능토록 하

는 것이 바람직할 것이다.

2.3.3 경제적인 콘크리트단면 개발

콘크리트교는 타교량형식에 비하여 상부주형의 자중이 큰 특성을 갖기 때문에 지진에 의해 발생하는 수평력이 매우 크므로 이러한 수평력과 발생하는 모멘트에 저항하기 위하여 큰 단면의 교각과 기초말뚝의 증가가 요구된다. 이러한 것은 콘크리트교량의 경제성과 직접적인 영향을 갖게되므로 좀더 가볍고 튼튼한 콘크리트단면의 개발이 필요하다. 이를 위해서 고강도콘크리트나 프리스트레싱을 사용하는 등 중량을 줄이면서 강도를 향상시키는 방법이 개발되어야 하고 이를 설계에 반영할 수 있도록 체계화시키는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

또한 교각에 있어서도 교각의 높이에 따라 내진 성능이 우수한 단면 및 형태가 연구되어야 할 것이다.

2.3.4 콘크리트부재의 연성향상을 위한 집중적인 연구필요

이번 일본 관서지방 효고현남부지진의 교량 피해 상황에서도 밝혀졌듯이, 지진발생시 콘크리트 구조물의 경우 연성(ductility)이 큰 강구조물에 비해 심각한 지진피해상황을 나타내고 있다. 특히 콘크리트교각의 파괴는 연성부족이 주요인으로서 지적되고 있다. 그리고 같은 콘크리트 구조물에서도 최근 강화된 내진 설계규정에 의해 연성을 증가시킨 구조물은 이전에 건설된 구조물보다 피해가 경미한 것으로 보고되고 있다.

이와 같은 사실로 볼때 콘크리트부재의 연성향상은 내진능력향상의 핵심적인 사안이며 이에 대한 시공성을 감안한 집중적인 연구가 필요하다.

2.3.5 실무지침서의 개발

지진에 의한 교량의 파손은 다음과 같이 교량의 구성부분에 따라 5 가지정도로 구분할 수 있다.

- (1) 교량주형의 낙교, 본체파손
- (2) 신축이음장치의 파손
- (3) 교량받침의 파손
- (4) 교각의 파손

(5) 기초와 지반의 변형

위에 언급된 각 부분에 대한 내진설계실무지침을 체계적이고 구체적으로 제시하고 이를 교량설계의 기본개념에 포함시켜야 한다.

예를 들면 신축이음장치는 지진시 파괴되기도 되는 것인지 교량받침이 파손되어도 별도의 전단키로 낙교가 방지되면 괜찮은 것인지에 대한 논의 및 지침이 필요하고 또한 최근에는 주행성향상을 위하여 교량을 길게 계획하고 고성능의 신축장치를 사용하는 추세인데 이러한 개념은 내진의 입장에서보면 상반되는 것으로 설계자의 판단에 완전히 좌우되는 것인지 실무자를 위한 지침이 필요한 것이다.

2.3.6 콘크리트교량에 쉽게적용할 수 있는 내진 관련장치의 연구와 활성화필요

콘크리트교량에서 지진의 영향을 해석하게되면 현재까지 일반적으로 사용되던 교량받침이 부반력을 받게되며 또한 보통 수평고정받침이 보유하고 있는 수평반력저항치를 훨씬 상회하게 된다. 그러나 현재 국내에서는 활성화되지 않아 주문생산을 하여야 하므로 상당한 비용의 증가가 예상된다.

또한 최근 외국에서 적용되고 있는 구조물의 진동주기변경기능과 에너지발산기능을 가진 장치등도 연구되어 실용화되는 것도 바람직할 것이다.

3. 원전구조물의 지진대비책

현재 우리나라는 18개 호기의 원전이 가동 혹은 건설중에 있는 세계적인 원전국가라고 할 수 있다. 이러한 원자력발전소구조물은 그 내부에 다량의 방사능물질들을 포함하고 있고, 또 그 대부분이 방사능차폐를 위하여 육중한 콘크리트 구조물로서 건설되는 관계로, 지진하중이 가장 중요한 설계하중으로 작용하게 된다. 따라서, 원전의 내진설계 즉, 지진에 대한 안전대비책은 여타 산업시설에 비하여 그 중요성이 월등히 크다고 할 수 있다. 이러한 이유로, 원전 건설이 되는 모든 나라에서 지진에 대한 원전의 안전대비책으로서, 원전설비를 위하여 별도로 제정된 정밀내진설계기준에

따라 지진에 의한 원전안전사고 발생확률이 10^{-6} /년 이하로 유지되도록 하고 있다.

우리나라의 원전내진설계는 원자력법규에서 별도 규정하고 있는 입력지진 및 안전성확보 절차에 근거하여 이루어 지고 있지만, 그 구체적인 기술 내용 및 세부절차는 현재 미국의 규제기준을 준용하고 있는 상황이다. 이와 같은 원전 특유의 지진 대비책은 크게 내진안전성확보와 지진 발생시의 방재대책으로 양분할 수 있다. 이중 내진안전성 확보과정은 그 간의 기술개발 및 경험축적을 통하여 충분한 정도의 기술이 확보·반영되고 있는 상황이며, 지진발생시 방재대책의 경우는 현재까지도 계속적인 개선이 이루어지고 있는 상황이라고 할 수 있다. 그 구체적인 내용은 다음과 같다.

3.1 내진성확보 절차

원전의 내진성확보는 크게 구조물의 내진설계와 관련시스템의 내진검증과정을 통하여 이루어진다. 여기서, 구조물의 경우는 미리 정해진 설계지진력에 견딜 수 있도록 단면을 결정하는 “내진설계(seismic design)”과정을 거치는 반면, 대부분의 기기는 기성제품이 특정 원전의 설계지진에 대하여 안전한지의 여부를 확인하는 과정을 거치기 때문에 “내진검증(seismic qualification)”이라는 용어를 사용한다. 또, 원전은 그 안전에 대한 중요도가 서로 다른 수백개개의 구조물 및 기기로 구성되어 있기 때문에 이들 시설 모두를 엄격한 원전 내진설계기준에 따라 설계할 필요는 없다. 따라서, 원전시설물은 크게 내진안전등급(seismic category I)과 비내진안전등급(non-seismic category I)으로 분류하여 서로 다른 내진설계기준을 적용하고 있다. 또, 설계입력지진도 그 크기가 다른 두가지 입력지진을 정하여 시설물의 종류 및 여타하중과의 조합 등을 고려하여 각각 서로 다른 지진을 설계입력으로 사용하고 있다. 두가지의 입력지진이란 안전정지지진(safe shutdown earthquake : SSE)과 운전기준지진(operating basis earthquake : OBE)이 그것으로서 일반적으로 SSE는 OBE의 2배정도의 크기를 갖는다.

원전의 내진성확보과정은 크게 다음과 같은 단계로 구분할 수 있다.

- 설계입력지진의 결정
- 지진응답해석
- 구조물의 내진설계 및 기기의 내진검증

한편, 지진발생에 방재대책으로서는 발전소 각 건물, 주요기기, 지표면 등에 각종 지진계측기를 설치하여 실제 지진기록을 감지·기록하여 설계지진레벨이상의 지진발생시에는 발전소의 운전정지 및 안전성평가를 수행하도록 요구하고 있다. 또, 지진발생시 각 시간대별 조치내용을 별도 규정하여 지진에 따른 방사능누출사고의 방지를 위한 중복안전개념의 대비책을 강구해 놓고 있다. 한편, 이와는 별도로 최근에는 안전관련시설물을 대상으로 지진에 대한 확률론적안전성분석(seismic probabilistic safety assessment)의 수행을 추가의무사항으로 규정하고 있다.

각 항목별로 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 설계입력지진의 결정

원전의 설계를 위한 입력지진에는 전술한 바와 같이 두가지의 서로 다른 크기의 지진 즉, 안전정지지진(SSE)과 운전기준지진(OBE)이 있다. SSE는 방사능안전관련시설물의 설계에만 사용되는 지진으로서 발생 가능한 최대크기의 지진이며, 연간 발생확률이 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 정도로서 그 발생확률이 지극히 낮은 지진이다. 이에 비하여 OBE는 원전의 모든 시설물 설계에 전반적으로 사용되는 설계지진으로서 발전소 수명기간 중 1~2회 정도 발생 가능성이 있는 상대적으로 작은 크기의 지진이다. 우리나라 원전에서는 수평가속도값이 각각 0.2g와 0.1g인 SSE와 OBE를 사용하고 있으며, 수직방향설계지진의 크기는 수평방향지진의 2/3를 사용하고 있다. 이러한 원전설계용 입력지진은 여타 시설물에서와는 달리 정해진 절차에 의하여 각 대상부지별로 그 고유한 지질 및 지진특성을 고려한 별도의 설계입력지진을 결정하여 사용하도록 하고 있다.

이러한 설계입력지진은 지진의 발생지인 진원(epicenter)에서 생긴 지진운동이 전파되면서 감쇄(attenuation)되어 발전소 근처의 자연상태의

지점(free field)에 설치된 통제점(control point)에 도달 하였을 때의 운동 즉, 통제점의 운동(control motion)을 말한다. 일반적으로 입력지진은 실제로 발생하는 지진운동을 알 수 없으므로 여타 설계하중과는 달리 결정적인(deterministic) 어떤 값을 정할 수가 없다. 따라서 지금까지의 지진기록과 지반이 가지고 있는 지진 및 지질의 특성에 관련된 자료를 통계적으로 분석하고 설계대상시설물의 중요도를 고려하여 발생확률(혹은 재래주기)을 정하고 실제로 생길 수 있는 지진과 가장 유사하다고 생각되는 지진운동을 입력지진으로 결정하게 된다.

입력지진운동의 형태를 나타내는 방법으로는 최대가속도값만을 표시하는 가장 단순한 형태인 g -값(최대가속도값)과 진동수특성을 나타내는 응답스펙트럼(response spectrum)이나 PSDF(power spectrum density function), 시간의 변화에 따라서 생기는 모든 값을 나타낼 수 있는 시간이력(time history) 등이 있으며, 설계대상구조물의 중요도나 해석방법 등을 고려하여 적합한 방법을 사용하게 된다. 원전의 경우 이와같은 여러 가지 형태의 입력운동을 모두 사용하게 되며, 대상 시설물의 종류에 따라서 서로 다른 입력운동형태 및 해석방법을 선택하여 적용하고 있다.

입력 운동의 결정은 우선 대상부지를 중심으로 한 반경 320km(200마일)내의 지반에 대한 모든 지질 및 지진특성과 역사적인 지진기록 등을 통하여 최대지반가속도값, 부지의 설계응답스펙트럼 및 PSDF를 결정하게 된다.

(2) 지진응답해석

동적지진응답해석은 전단계에서 얻어진 대상구조물 혹은 기기의 아래부분에서 정의된 입력운동을 대상시설물에 작용시켜 대상시설물의 각 위치에서 필요한 형태의 지진응답을 계산하는 과정을 말한다. 현행 요건상 그 타당성이 입증되는 경우에 한해서 동가정적해석(equivalent static analysis)을 사용할 수도 있다고 규정하고 있으며, 지진활동이 적은 지역에서 많이 사용하고 있다. 모든 원전내진설계에 거의 예외없이 이용되는 동적해석방법은 크게 응답스펙트럼해석법(response

spectrum analysis)과 시간이력해석법(time history analysis)으로 구분되는데, 전자는 주로 구조물 설계를 위한 구조물의 지진단면력을, 후자는 기기의 내진검증이나 부계통(subsystem)의 내진설계에 사용되는 층응답스펙트럼(floor response spectrum)을 각각 얻기 위해 사용되고 있다.

이 과정에서 지반이 구조물응답에 미치는 영향을 해석하는 과정인 지반-구조물 상호작용해석이 그 특유의 불확실성으로 인하여 가장 중요한 과정이 되며, 현재까지도 많은 논란이 있는 분야라고 할 수 있다. 한편, 원전의 본체건물과 분리되어 있는 지상탱크 및 지하매립관에 대해서는 별도의 내진설계규정을 두고 있다.

(3) 구조물의 내진설계 및 기기의 내진검증

구조물의 내진설계에서는 응답해석과정에서 얻어진 설계지진력을 여타하중과 조합하고 이와같은 조합하중에 대하여 견딜 수 있는 단면을 결정하게 된다. 원전의 경우는 일반 산업시설과는 달리 원자로사고에 의한 높은 온도 및 압력하중이 주요설계하중으로 작용하게 된다. 따라서 원전구조물은 이들 사고하중과 지진하중 조합방법, 각 하중조합별 허용응력 등을 명시한 별도의 시방서의 요구사항에 따라 설계된다.

특히, 원자력발전소의 구조물은 다음 몇가지 사항을 신중히 고려하여 설계해야 한다.

- 비내진범주 I급 구조물의 파괴로 인하여 내진범주 I급 구조물이 구조적 피해를 입지 않도록 설계한다.
- 지진시 인접한 두 건물의 독립적인 거동이 가능하도록 충분한 거리를 두어 설계한다.
- 건물이 지진시 가능한한 단순하고 규칙적인 거동을 하여 그 거동을 해석하기 용이하도록 설계한다.

기기의 내진검증작업은 해석과정에서 얻어진 층응답스펙트럼을 입력으로 한 “해석방법” 혹은, “시험방법”을 통하여 이루어진다.

“해석방법”은 기기의 형태가 비교적 단순한 기계적기기(mechanical equipment)에 대하여 주로 채택되는 방법으로서 대상기기의 수학적모델을 작성하고 이에 대한 동적해석을 통하여 이루어지

며, “시험방법”은 전기나 계측기기 같이 그 형태가 복잡하여 수학적모델링이 곤란한 경우에 채택되는 방법으로서 기기 자체를 진동대(shaking table)에 놓고 모의운동(simulated motion)을 가하여 기기의 안전성여부를 판단하는 방법이다. 경우에 따라서는 두가지 방법을 혼용하기도 한다. 한편, 최근에는 기존 발전소에 설치된 기기의 실제지진거동에 대한 자료가 축적됨에 따라 이러한 자료(experience data base)를 이용한 간접적인 내진검증방법을 많이 이용하고 있다.

(4) 확률론적 안전성분석

지금까지 기술한 원전의 내진설계의 전 과정은 결정론적 접근방법(deterministic approach)이다. 이에 비하여 지진입력이나 원전을 나타내는 지반-구조물시스템등이 너무나 많은 불확실성을 내포하고 있다. 이러한 점을 보완할 목적으로 최근 미국의 원자력규제위원회에서는 전술한 내진성확보과정과는 별도로 건설중혹은 운전중인 모든 원전에 대하여 지진에 대한 확률론적안전성분석(seismic probabilistic safety assessment : SPSA)을 수행하도록 의무화시켰다. SPSA는 크게 대상부지의 발생지진레벨과 빈도의 확률적 상관관계를 계산하는 지진재해도분석과정(seismic hazard analysis), 지진레벨과 대상설비의 파괴가능성의 확률적 상관관계를 계산하는 취약도분석과정(fragility analysis), 또 발전소 전체의 파괴순서를 나타낸 사상 및 故障樹木(event & fault tree)을 이용하여 발전소의 최종 지진손상확률(probability of seismic damage)을 계산하는 과정으로 구분된다.

3.2 지진방재대책

이상과 같은 엄격한 내진성확보과정을 따라 내진신뢰성이 높게 설계된 원전이라고 하더라도 실제 발생된 지진의 크기 및 특성 또는 구조물의 거동이 설계시 가정 혹은 예상한 것과 다를 수 있다. 이에 대비하여 원전에서는 충분한 지진계측장치를 설치·운용하고 있으며, 계측결과에 따른 피해정도별 시간대별 지진방재대책을 수립하여 대비

하고 있다.

(1) 지진계측시스템

원전에서는 실제 원전구조물과 기기에 충분한 지진계측장치를 설치하여, 가동기간중 발생할 수 있는 모든 지진을 정확히 계측하고, 그 영향을 신속히 분석한 다음 필요한 후속조치를 취하도록 요구하고 있다. 여기서 설치되는 지진계측기의 종류는 가속계, 최대가속도계 응답스펙트럼계, 지진스위치 등이며 이러한 기기들은 지진시 작동기(trigger)의 지진감지에 의하여 작동히 되도록 되어 있다. 특히, 원전가동중에 설계지진 즉 OBE를 초과하는 지진이 발생할 경우에는 일단 원전의 운전을 정지시킨 후, 발생된 지진의 영향평가를 통해서 원전의 재운전여부를 판단하도록 하고 있다. 이러한 지진안전성 평가는 지진계측장치에서 얻어진 실제 지진기록과 원 설계시의 내진설계자료와의 비교·분석을 통하여 이루어진다. 이 경우, 만일 실제지진에 의한 응답이 설계시 예상한 응답을 초과할 경우에는 계측기에서 얻은 실제지진기록을 입력으로 하는 재지진해석을 수행하는 등의 후속조치가 취해지게 된다. 이러한 절차는 원전의 계속적인 안전성 유지를 위하여 필수적이며, 이를 위해서는 엄격한 지진계측설비의 설치 및 운용을 의무화하고 있다.

(2) 방재대책

원전에서는 지진발생시 그 지진의 크기 및 형태에 따라 즉각적이고도 안전한 조치계획을 사전에 작성해 두고 모든 관련자가 이 절차에 따라 행동함으로써, 지진으로 인한 피해를 방지 혹은 최소화하도록 하고 있다. 그 내용은 우선 지진 발생과 동시에 발생지진이 설계지진을 초과하는지의 여부를 판단하게 되고, 초과 여부에 따라 각기 다른 지진발생후 행동을 취하게 된다. 즉, 설계지진(OBE) 초과시에는 즉각 원전운전을 중단시키고, 각 부품별 점검에 들어가면서 그 전 과정을 규제기관에 보고하게 하고 있다.

지진발생후 조치는 크게 즉시조치(short-term action), 운전정지후 조치(post-shutdown inspections and tests) 및 장기조치(long-term evalu-

ation)으로 구분된다. “즉시조치”에서는 지진발생 후 원전설비의 물리적인 상태 및 기능에 대한 지진의 영향을 평가하고, 설계지진 초과여부에 따라 운전정지 여부를 결정하는 단계적 조치이다. 이때, 만약 운전정지가 필요하다면, 운전을 정지한 다음 후속되는 “운전정지후 조치”를 취하게 된다. 이 단계에서는 원전의 피해정도를 좀더 정확하게 분석·평가하고 피해 대책 수립과 함께, 재운전을 위한 준비단계라고 할 수 있다. 장기조치는 전 단계조치에서 발견되지 못했던 안전관련 기기상의 손상가능성에 대한 재확인 및 점검단계로서 발생 지진을 입력으로 하는 원전 구조물 전반에 대한 정밀지진해석을 재수행하고 이 결과를 이용한 추가 보완작업의 필요성 여부를 확인한다.

4. 결 언

콘크리트교량의 내진설계는 1992년 12월 도로교시방서가 개정된 이후 서서히 정착되고 있는 추세이나 현재 상황을 기준으로 콘크리트교량의 지진대비책으로 다음과 같이 몇가지 소견을 피력해 보았다.

-소요내진안전성의 정립필요

- 내진해석법의 단순화필요
- 경제적인 콘크리트단면개발
- 콘크리트부재의 연성향상을 위한 집중적인 연구필요
- 실무지침서의 개발
- 콘크리트교량에 쉽게 적용할 수 있는 내진 관련 장치의 연구와 활성화필요

또한 대표적인 콘크리트구조물로서 우리나라의 원전은 교량구조물보다 먼저 내진설계를 시작하여 현재 원자력법규에서 별도 규정하고 있는 압력 지진 및 안전성확보 절차의 근거하에 내진설계가 이루어 지고 있다. 원전은 지진대비책으로 크게 내진안전성확보와 지진 발생시의 방재대책의 두 가지 시스템을 가지며 이중 내진안전성 확보과정은 그 간의 기술개발 및 경험축적을 통하여 충분한 정도의 기술이 확보·반영되고 있는 상황이며, 지진발생시 방재대책의 경우는 현재까지도 지속적인 개선이 이루어지고 있는 상황이라고 할 수 있다.

본고에서는 국내의 콘크리트 교량와 원전구조물의 내진설계현황과 이와 관련된 지진대비책에 대하여 언급하였으며 다소나마 국내 콘크리트구조물의 내진설계연구에 도움이 되기를 바란다. □