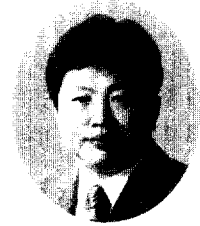


콘크리트구조물의 내진상세 및 보강대책

## 고베지진의 피해분석 및 보수·보강대책

Damages to R/C Structures due to the Great Hanshin Earthquake and Repair or Rehabilitation Methods



심 중 성

### 1. 서 언

1995년 1월 17일 오전 5시 46분경 고베시 남서쪽에 위치한 淡路島 북단을 진원지로 하는 지진이 일본 본토 남부의 관서지방 兵庫縣 남부일대를 덮쳤다. 이 지진의 진원의 깊이는 약 14km 이내로 추정되며 지진의 크기는 리히터 지진계로 진도 7.2의 대규모 지진이다. 이번 지진발생의 특징은 고베시 하부를 동북으로 관통하는 六甲 활단층계가 활동하여 발생하였으며 도시직하부의 얇은 지층에서 발생하였다 하여 도시직하형 지진으로 부르고 있다. 이러한 내륙성 직하형 지진은 해양성 지진과 달리 내륙의 지표아래 또는 육지에 인접한 연안을 진원지로 하기 때문에 지진 발생시 진동이 바로 전달되는 이유로 예측이 어려우며 매우 큰 피해를 초래하는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 내륙성 직하형 지진의 발생은 일본에서도 사례가 많지 않은 것으로서 1943년 진도 7.2의 鳥取지진과 1948년 진도 7.1의 福井지진이 발생한 이후 거

의 50년만에 나타난 대지진이다.

일본은 유라시아판, 태평양판, 그리고 필리핀판 등 3개의 지판이 만나는 바로 위에 위치하고 있는 지역적인 단점으로 지진에 대한 훌륭한 방재대책을 갖고 있음에도 불구하고 이번의 고베지진으로 오천여명 이상의 인명피해 및 대형건축물의 파괴, 토목구조물로서는 철도, 도로, 항만, 전기통신터널등 각종 기간 시설이 막대한 손상을 당하여 제 기능을 발휘하지 못하는 피해를 입었다.

여기서 주목할 점은 이번 고베지진으로 피해를 입은 대부분의 구조물들이 1981년 이전의 지방서 규정에 의해 설계된 구조물이라는 사실이다. 이 결과를 역으로 유추하면 우리나라의 지방서에 내진에 관한 규정이 도입되기 전에 설계·시공된 구조물의 경우 이와같은 지진이 발생할 경우 얼마나 내진안정성을 가질수 있을까 하는 점에서는 의문을 가지게 된다. 우리나라의 경우 지금까지 적지 않은 수의 지진이 발생하였지만 대개 진도가 작은 크기의 지진이 발생하

\* 정회원, 한양대학교 환경·토목공학과 교수

있고 각종 구조물도 피해를 입지 않아 지진에 대하여 안전한 것으로 생각되어 왔다. 그러나 최근에 미진이기는 하지만 강원도 내륙지역에서 수차례 지진이 발생하므로써 구조물의 내진설계에 관한 사회적 관심이 증폭되고 있다. 이글은 본인이 고베지진 피해직후 및 보수·보강 공사가 거의 마무리 되던 시점에 현지를 2회 방문하여 수집한 각종자료에 근거하여 작성되었다. 본기사에서 내진대책이 비교적 잘되어 있었다던 일본의 콘크리트구조물의 지진피해현황과 이들의 복구현황을 살펴봄으로써, 한반도가 지진의 사가지대가 아니라는 주장이 제기되는 시점에 국내의 초대형 건물, 원전시설 및 장대교량과 같은 특수구조물을 포함하는 각종 구조물의 안전성을 다시 한 번 생각하게 하는 계기가 되었으면 한다.

## 2. 콘크리트 구조물의 피해분석

### 2.1 건축물의 피해

고베지진에 의한 건축구조물의 피해는 주로 지반의 액상화, 지진파의 크기와 특징, 기초구조의 형태, 상부구조재의 구조형식, 시공년도 등의 종합적인 원인에 의해 발생하였다. 표 1에는 일본에서 방재업무를 총괄하고 있는 國土廳이 고베지진으로 피해를 입은 건축물을 집계한 피해상황이다.

표 1 건축물의 피해상황(1995년 3월 1일 현재)

구분		피해현황
주 목	전면파괴	98,484
	부분파괴	83,926
	강미한 파괴	33,868
공공건물		517
기타 건물		3,115

일본 건축학회의 조사에 의하면 철근콘크리트 구조물의 경우 71년 이전에 지어진 건물의 경우 70%, 71~81년 사이의 건물은 35% 정도, 81년 이후의 건물은 약 15% 정도만 피해를 입은 것으로 나타나 새로운 내진규정을 적용한 81년 이후의 피해가 가상적일 것으로 나타났다.

미국의 캘리포니아 내진설계개념은 강도보다는 연성도를 키우는 방식을 사용하고 있으나 일본의 내진

규정의 기본개념은 건축물의 강도를 증가시키는 방법을 사용하고 있으므로 예상보다 큰 지진이었던 고베지진의 경우 붕괴피해가 증가되었던 것으로 보인다. 사진 1, 2 및 3은 고베지진에 발생한 건축물의 대표적인 파괴형태이다.

- 피로티형식의 구조물(상점이나 차고 등을 1층에 배치한 구조물)의 붕괴[사진 1]
- 건물중간층의 붕괴[사진 2]
- 비대칭구조형식의 건물의 붕괴[사진 3]
- 인접건물과의 충돌부 파괴
- 부재의 파괴형태



사진 1 고베시 Nada 지역의 피로티 형식의 구조물 파괴양상

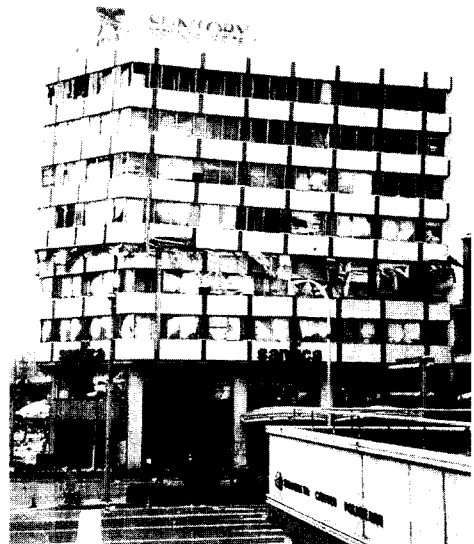


사진 2 고베시 Chuo 지역의 9층 건물의 5층 부분이 크게 파괴된 모습

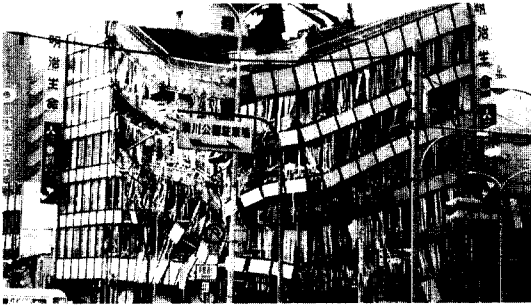


사진 3 고베시 Hyogo 지역의 비대칭 건물의 코너부분이 파괴된 모습

## 2.2 고속도로상의 교량의 피해분석

고베지진으로 현저한 피해를 입은 고속도로상의 교량은 한신 고속도로와 명신 고속도로로서 주로 교각의 손상 및 붕괴로 인해 전도 및 낙교 등의 손상을 입었다. 피해의 원인을 상세하게 파악하기 위해서 일본의 산·학 관계자들이 지진동, 지반, 구조, 설계기준과의 연관성 여부를 실험 및 해석을 통하여 분석한 결과 철근콘크리트(RC) 교각의 피해상황은 다음과 같다. 한신고속도로의 경우 Fukae 경사진입로 근처의 T형 RC교각들이 큰 손상을 입었는데 635m 정도의 구간이 보도로 전도되었다(사진 4). 붕괴된 구간은 RC 거더가 원형단면의 T형교각에 강강된 pirtz 구조였다. 교각붕괴의 원인은 연성(ductility)이 부족한 교각에 큰 지진력이 작용하여 휨균열과 전단균열에 이어 부적절하게 설계된 띠철근이 파괴되면서 구속기능을 상실하였고 철근의 용접이유부가 대부분 파괴됨으로써 붕괴를 유발한 것으로 판단되며, 그 붕괴메카니즘을 추정해 보면 다음과 같다.

- (a) 휨모멘트로 인한 휨균열이 원주방향에 발생
- (b) 이들 휨균열 발생에 이어 경사방향으로 전단균열의 발생
- (c) 전단균열 중단부근의 콘크리트가 압괴
- (d) 접이음으로 정착된 띠철근의 전단력분담이 커지고 내부콘크리트 구속기능이 상실되어 콘크리트의 압괴가 내부까지 미침
- (e) 콘크리트의 압괴가 계속 진행되어 교각이 붕괴 또한 교각은 온전하였으나 거더가 교축방향으로 이동하여 교각에서 밀려남으로써 낙교 방지장치가 파괴되어 낙교한 경우도 있었다

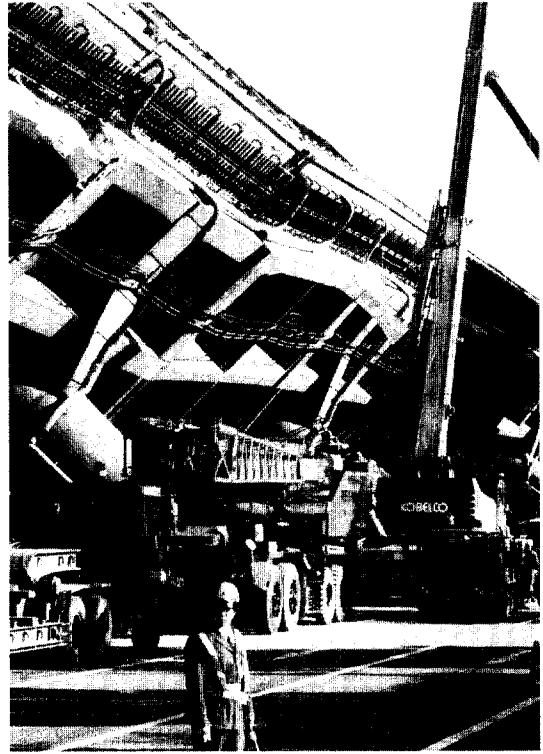


사진 4 한신고속도로의 교배부근의 635m 구간이 전도파괴후 전도된 모습

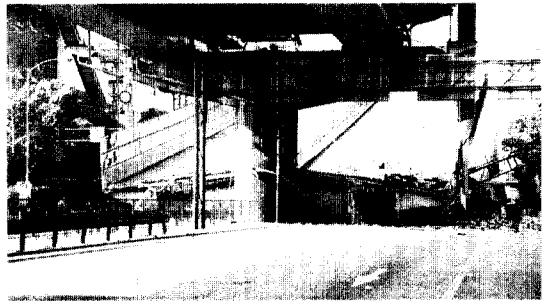


사진 5 한신고속도로의 Nishinomiya 근처에서 교량이 낙교한 모습

[사진 5].

명신고속도로의 경우 Amagasaki와 Nishinomiya 인터체인지 사이에 벽식 철근콘크리트 교각이 많은 피해를 입었으며 X 형태의 전단균열이 교축직각 방향에 걸쳐서 관통은 되었지만 축방향철근의 벽의 외측이 크게 만곡되었을 뿐 교량이 붕괴되지는 않았다. 이와같이 RC 교각 피해결과를 조사한 결과 연성

(ductility)에 대한 고려를 실시하지 않은 1990년 이전의 설계기준으로 설계된 구조물의 경우 피해가 두드러졌으며, 연성을 배려한 새로운 내진설계기준으로 설계된 RC교각(한신고속도로)에서는 거의 피해가 나타나지 않았으며 이번과 같은 강진등에도 견딜 수 있음을 증명한 셈이다.

### 2.3 철도구조물의 피해분석

철도구조물의 피해구간은 新幹線의 경우 京都와 岡山간 219km, 山陽新幹線의 新大阪과 姫路간 92km이며 재래선으로는 JR선 123km, 民鐵 296km나 된다. 주요구조물의 피해 유형은 라아멘 고가교의 파괴 및 낙교, 프리스트레스트콘크리트(PC) 및 RC 거더교의 손상 및 낙교 그리고 터널구조물의 손상 및 파괴 등으로 조사되었다.

#### 1) 라아멘 고가교

피해의 정도 및 양상은 크게 3개 지역으로 구분되며 한구간에서는 거의 대부분의 고가교에 피해가 발생하였으며 피해형상은 2층 라아멘의 상층측 또는 하층측의 기둥이 완전히 붕괴되어 마치 1층 라아멘과 같이 궤도면이 낮아지는 등 고가교가 원형을 유지하고 있지 않은 경우, 피복 콘크리트가 박리되어 내부 콘크리트도 파괴되고 철근도 크게 변형되었으나 고가교로서 형상을 유지하고 있는 경우 또는 전단균열로 피복콘크리트는 박리되어 있으나 주철근은 변형되지 않는 경우 등 여러 형태의 손상이 있었다.

#### 2) PC 및 RC거더교

PC 및 RC 거더교의 경우에는 거더는 거의 손상을 입지 않았으나 거더 단부의 콘크리트가 파괴 탈락되는 경미한 손상만이 발생하였고 피해는 교대와 교



사진 6 교축방향으로 변위가 발생하여 낙교한 PC 거더교

각에만 집중되어 있었다. 그러나 거더의 횡방향이동이 발생되어 교량이 낙교 혹은 이와 유사하게 붕괴된 고가교도 일부 조사되었다(사진 6).

#### 3) 터널구조물

고베고속철도의 1962년 경에 개착식 공법으로 시공된 일부 지하구간에 손상 및 파괴가 많이 발생하였고 구조형식은 박스라아멘 구조였다. 파괴형상은 중간기둥이 완전히 파괴되고 동시에 라아멘 상부슬래브가 파괴되어 2~3m 정도가 침하, 붕괴되었으며 이외의 일반 터널부위 박스라아멘구조에서도 중간기둥이 많이 파손되었다.

### 2.4 항만시설물의 피해현황

항만시설물 및 항만간선도로상의 콘크리트 구조물에도 많은 피해가 발생하였는데, 지반의 액상화에 의한 침하, 이동 등에 의해 안벽주변 변형이 발생되었으나(사진 7), 내진설계된 안벽자체는 이용에 지장이 없을 정도로 피해가 미소하였다. 항만간선도로에서는 상부질량이 큰 2층 철근콘크리트 교각에 피해가 집중되는 경향이 있었고 단면변화부에서도 많은 손상을 입었다.

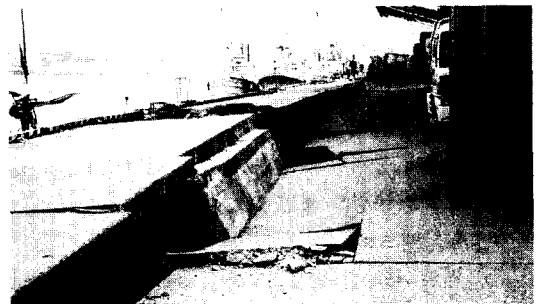


사진 7 매립지의 지반 액상화에 의해 파괴된 고베항

### 3. 철근콘크리트 구조물의 보수·보강실태

#### 3.1 한신고속도로

고베지진으로 피해를 입은 한신고속도로상의 교량은 전도된 구간은 1개소로 18경간에 635m이며 붕괴된 구간은 Kobe선에는 4개소(총 10경간), Wangan

선에는 1개소(1경간)이고 다른 손상을 입은 교량은 총 300개소 정도이다. 지진발생전 한신고속도로의 공용구간은 총 200km이었으며 교통량은 920,000 대/일 이었다. 지진발생이후 긴급안전조치로써 한신 고속도로의 경우 고속도로 하부를 통과하는 도로의 안전을 확보하기 위해서 전도되거나 파손된 교량상부 및 위험단면은 우선 제거하였으며 교각이 손상을 입은 경우 가교각을 설치하고 강판을 이용하여 교각을 보강하였다(사진 8).

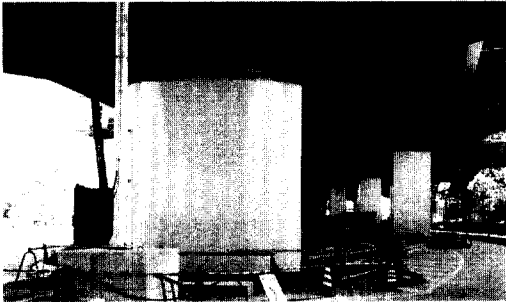


사진 8 강판으로 보강된 RC 교각

한신고속도로 전구간중 가장 심하게 손상을 입은 구간은 Kobe 노선의 27.7km구간이며 이구간은 보강 또는 재시공되어 전 구간이 고베지진 규모의 지진에도 저항할 수 있도록 하였다.

우선 교각의 경우 유연성(flexibility)과 연성(ductility)을 향상시키기 위해서 기둥부위를 강판으로 보강하였으며 띠철근 또는 나선철근의 간격을 기존의 것보다 작게 15cm로 하고 주철근을 절단하지 않게 시공하였으며 중공콘크리트 교각의 경우 콘크리트로 내부를 충전하였다(그림 1).

교량상판의 경우 내진연결구조물의 완충기능과 충

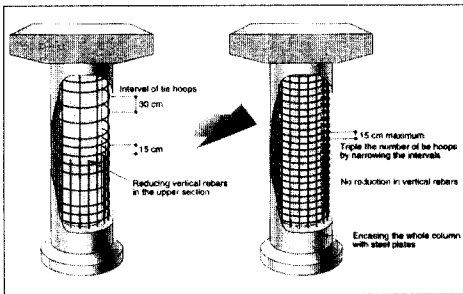


그림 1 교각의 보강

격력에 대한 강도를 높여서 교각 밖으로 상판이 밀려나가더라도 추락하는 것을 방지할 수 있도록 그림 2와 같이 거더와 거더사이를 연결하도록 하였다. 또한 면진교좌장치를 도입하여 교각으로부터 상부구조로 전달되는 지진력을 감소시키며 면진교좌장치의 스프링력과 damping효과로 인하여 지진력에 의해 상부구조에 변위가 발생한 후 최초의 위치로 복구할 수 있도록 하였다(그림 3).

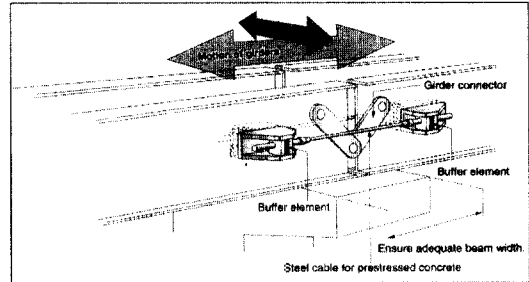


그림 2 상부구조의 낙교방지 대책

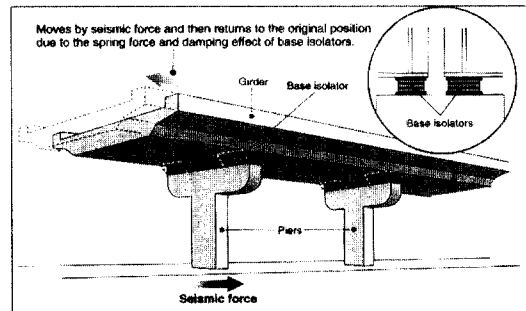


그림 3 면진교좌장치 설치

### 3.2 고베시의 지하철구조물

지진에 의해 피해를 입은 고베시의 지하철구조물은 板宿~新神戸 구간외의 약 8.8km외에 新長田驛 및 역의 東線路部に 약 400m, 上澤驛 및 그 역의 東西線路部の 약 720m, 上官驛部の 약 310m 등 1.4 km 구간의 개착공법으로 시공한 RC 박스단면의 기둥이 전단균열에 의한 전단파괴가 발생하는 손상을 입었다. 그 외에 전차가 주행하는데 필요한 물리적 시설, 즉 도상, 궤도와 같은 시설은 피해가 없었으며 측벽, 상판의 피해는 경미하였다. 따라서 손상된 박스단면

의 RC기둥 보강을 위해서 보강기둥을 설치하여 열차운행을 재개하였으며 보강공사도 병행하여 수행하였다. 지진발생후 1개월간 H형강으로 보강기둥을 설치하고, 피해가 경미하여 보강기둥이 필요없는 기둥에는 에폭시 수지를 주입하여 균열을 보수 완료한후 열차운행을 재개하였다. 그러나 피해가 심한 新長田驛, 三宮驛, 上野驛은 거의 전역사를 재 시공해야 하였으므로 2개월후인 1995년 4월에 운행을 재개하였다.

박스단면내 기둥의 보강공사는 손상정도에 따라 4가지 등급으로 나누어 수행하였다. 강판 등과 같은 보강재료를 이용하여 보강을 해야 하는 1등급에서 3등급까지의 손상을 입은 기둥이 270개소, 미세균열만 발생하여 에폭시수지 주입공법을 이용한 보수외에 보강이 필요하지 않는 4등급 정도의 손상을 입은 기둥이 3600개소 정도이다. 1등급과 2등급의 손상은 콘크리트의 경우 경사진 진단균열의 발생으로 손상을 입었으며 철근도 변형이 발생하여 눈으로 확인할 수 있는 정도의 변형(직경의 3배이상의 변형이 발생한 경우, 1등급)이 발생한 경우인데 1등급의 경우 18

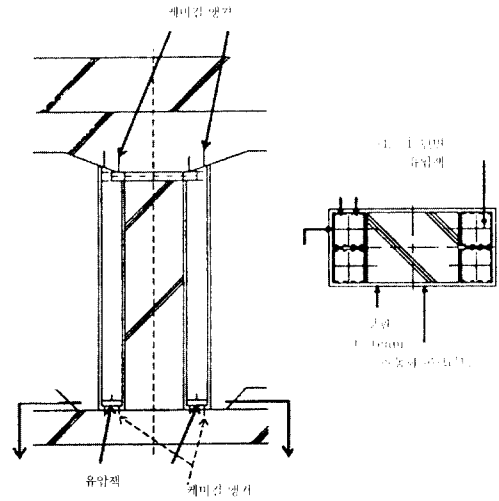


그림 5 보강기둥 상세도

표 2 손상등급에 따른 지하철 구조물의 보수, 보강공법

보강공법	H형강 보강	강판보강	수지주입	콘크리트 제거	철근대체	철근추가 보강
Ⅰ	○	○	○	○	○	○
Ⅱ	○	○	○	○	○	○
Ⅲ	-	○	○	-	-	-

개소, 2등급의 경우는 44개소이다. 그림 4와 5는 보강기둥의 설치 및 상세도를 나타낸 것이다.

보강공사는 크게 H형강을 이용한 축력보강과 강판( $t=6\text{mm}$ )을 이용한 전단보강으로 나눌수 있는데 이와 같은 기둥의 보강은 이번 지진과 동일한 규모의 지진에 충분한 안전율을 가질수 있도록 하였다. 또한 보강공정에 있어서 파괴부의 콘크리트는 브레이크를 이용하여 완전히 제거하고 보강철근(D13 @ 125)을 시공하였으며 1등급의 손상을 입은 기둥의 철근은 진단하여 제거한후 동종의 철근으로 대체 시공하였다. 표 2에는 손상등급에 따른 보강공법을 나타내었다.

### 3.3 전기통신용 터널

지진발생으로 통신용 터널 역시 많은 손상을 입었다. 고베시의 통신용 터널은 庫舎에서 長田까지 약 10km, 東灘까지 약 2km로서 전체 12km 정도이며, 개착식과 쉘드식터널의 비는 약 4 : 6정도이다. 개착식 통신용 터널은 표준단면부의 경우 전혀 지진

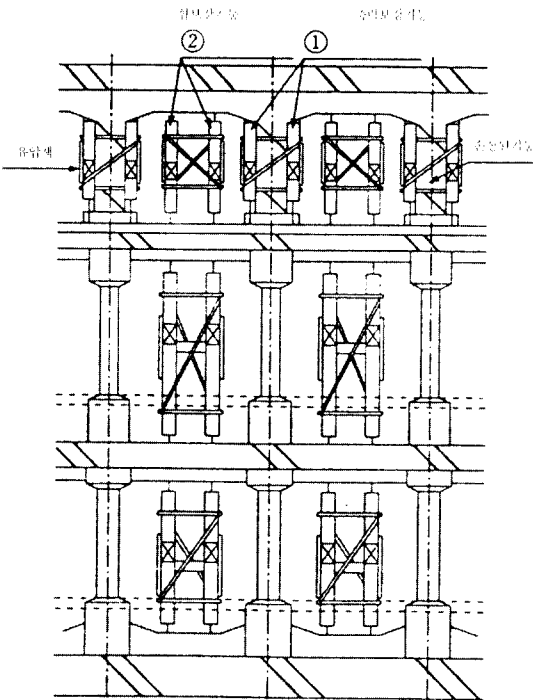


그림 4 보강기둥 일반도

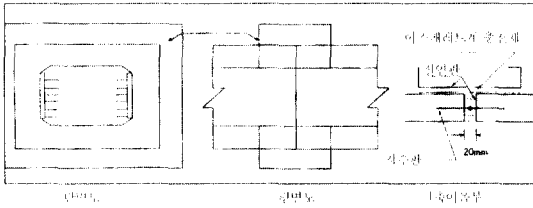


그림 6 통신용 터널 단면도

피해를 입지 않았지만 특수단면부의 슬래브와 측벽에는 균열이 다수 발생하였고 신축이음부에서 횡방향으로는 최대 18cm 정도, 상하로는 13cm 정도 어긋남으로써 지하수가 유입되었다. 철도식 통신용터널의 경우는 약간의 균열 및 콘크리트의 박리가 발생하였지만 전체 구조물에는 손상이 없는 것으로 조사되었다. 이번 지진으로 터널의 구조적인 손상은 발생하였지만 이로인해 터널의 기능(통신 케이블의 보호)이 손상되지는 않았다.

지진발생시 발생한 신축이음부의 어긋남, 균열의 발생 등에 의하여 통신용터널의 차수기능이 떨어지시 지하수가 유입되었으며 또한 터널내에 많은 양의 토사가 유입된 것이 발견되었기 때문에 도로상에서 에스피(전자파를 이용한 지하매설물 탐지장치)를 이용하여 공동이 있는지 여부를 탐사한 결과 1개소를 발견하여 공동을 충전하여 도로의 함몰을 방지하였다.

개착식 통신용 터널의 일반적인 신축이음부의 단면은 그림 6과 같으며 신축이음부의 어긋난 부위의 보강은 그림 7에 나타낸 마와 같이 시공하였으며, 가소성 고무부를 설치하여 차수기능을 가지도록 하였다. 또한 본체구조물에 발생한 균열은 에폭시계 재료를 주입하여 균열을 보수하였으며 이 공정은 1995년말에 완료되었다.

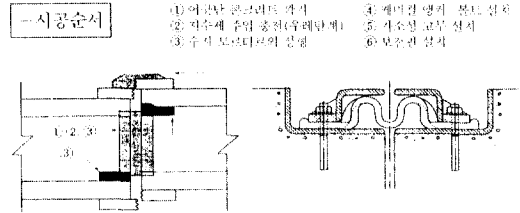


그림 7 신축이음부의 보강

#### 4. 결론

이번 우리학회 특집기사에서는 최근 논란이 일기 시작한 지진 피해의 우려에 부응하여 몇편의 지진 관련 기사를 다루고 있다. 본 기사에서는 1995년 1월 17일에 발생한 고베 지진에 의한 콘크리트 구조물의 피해유형과 이에 대한 보수·보강공사의 내용을 소개하고 있다. 건축물의 경우는 보수·보강 공사가 불가능하여 대부분 전면 철거후 재시공 해야 하였기에 보수·보강공법을 언급할수 없었고, 고속도로의 교각 및 지하철 라멘박스 구조물의 중간 기둥은 대부분 보수·보강공사를 수행하여 재사용 하였는데 주된 개념은 연성 및 유연성 확보의 개념으로 설명될수 있다. 마지막으로 소개된 전기통신용 터널의 경우에는 상대적으로 그 피해 정도가 심하지 않아 보수공사만을 적용하고 있다.

최근 우리나라에서도 그 빈도나 강도가 고조되고 있는 현 시점에서 본 기사가 이 분야와 관련된 산·학·연에 근무하시는 모든 사람들이 다시한번 우리나라의 현실을 충분히 고려해 볼 수 있는 기회 제공의 계기가 되었으면 하는 바람과 함께 본 기사를 마감한다. □