

비선형 동적해석을 통한 입체라멘 교각의 파괴 메카니즘 모사

Numerical Simulation of Failure Mechanism of Space Frame Structure by Nonlinear Dynamic Analysis

김익현*

KIM, Ick-Hyun

ABSTRACT

The characteristics of non linear behavior and the failure mechanism of RC space frame structure serving railway under seismic action have been investigated by numerical analysis in time domain. The structure concerned is modeled in 3 dimensional extent and RC frame elements with fibers are employed. Fibers are characterized as RC one and PL one to distinguish different energy release after cracking. Due to the deviation of mass center and stiffness center of entire structure the complex behavior under seismic action is shown. The excessive shear force is concentrated on the pier beside flexible one relatively, which leads to failure of bridge concerned.

1. 서론

최근, 세계 각지의 지진으로 인한 심각한 인적, 물적피해는 우리로 하여금 다시 한번 시설물의 내진성능 확보가 얼마나 중요한 것인지를 일깨워 주는 계기가 되고 있다. 건설교통부에서도 이를 인식하여 1997년, 일부 시설물별로 상이하게 수행되어 오던 시설물의 내진설계기준을 성능기초 내진설계(Performance Based Seismic Design) 개념으로 통일화한 상위개념의 설계기준을 작성하였으며 또한, 주요 시설물에 대한 내진성능 평가기법의 개발과 이에 기초한 합리적인 내진보강을 목표로 다양한 연구과제를 추진 중에 있다.

철도구조물은 도로와 더불어 인적, 물적자원을 수송하는 기간시설물로 지진에 의한 피해는 사회적, 경제적으로 큰 피해를 초래하게 된다. 따라서, 신설구조물뿐만 아니라 기존구조물에 대해서도 내진성능의 확보가 절실하게 요구되고 있다. 내진설계 또는 내진보강을 통하여 구조물의 내진성능을 확보하기 위해서는 구조물의 동적거동 특성을 명확하게 이해하는 것이 매우 중요하다. 특히, 철도구조물에서 널리 사용되고 있는 입체식 라멘구조는 상부구조와 하부구조가 강결되어 있고 지반고에 따라 교각의 높이가 교축방향으로 다른 경우가 일반적이다. 따라서, 지진에 의한 관성력의 작용위치와 교각의 강성 중심의 위치가 일치하지 않아 교축직각 방향으로 비틀림이 발생하여 복잡한 거동을 나타내는 특성을 지니고 있다.

본 연구에서는 질량중심위치와 강성위치가 서로 다른 입체라멘구조를 대상으로 하여 비선형 거동특성을 고려하여 시간영역에서의 지진거동특성을 살펴보고 파괴 메카니즘에 대하여 살펴본다.

* 서울대학교 건설인력 및 사회기반시설 양성사업단 계약교수, 정회원

2. 해석모델

RC 구조물의 지진 시 거동특성을 비교적 정확하게 모사하기 위한 방법으로는 3차원 비선형 유한요소해석을 고려할 수 있다. 그러나, 구조물의 형상이 복잡해지고 구조물을 구성하는 부재 수가 많은 경우, 3차원 해석은 많은 시간과 노력을 필요로 하게 되어 현실적으로 적용에 큰 어려움이 있다. 본 연구에서는 입체라멘구조의 지진 거동특성을 고려하여 대상구조물을 3차원영역에서 구조모델링(Structural Modeling)하고 1차원의 역학모델(Mechanical Modeling)을 도입하여 수치해석을 수행하였다.

2.1 구조모델(Structural Model)

RC 구조물의 비선형거동을 비교적 정확하게 모사하기 위해서는 합리적인 구조모델과 재료모델이 필요하다. 교량구조물의 거동은 교축방향과 교축직각 방향에 대해 독립적으로 수행하는 것이 일반적이다. 그러나, 입체라멘 교량구조물의 경우 교각의 높이는 교각이 위치하는 지반고에 따라 다르게 되어 교량구조시스템의 강성위치가 지진 시 관성력이 작용하는 상부구조의 질량중심과 일치하지 않아 지진 시 거동이 매우 복잡해진다. 따라서, 2차원 해석으로 대상구조물의 거동특성 및 파괴메카니즘을 모사하기 위해서는 상당한 어려움이 있어 본 연구에서는 그림 1에서와 같이 3차원 영역에서 구조모델링을 수행하였다. 거더를 포함한 슬래브는 탄성체로 하고 교각에 대해서는 파이버(Fiber)로 구성되는 RC프레임요소를 도입하였다. 각 파이버는 균열 후 응력소산특성의 차이를 고려하여 RC(철근콘크리트) 및 PL(무근콘크리트) 영역으로 나누어 모델링하였다. RC 영역은 주철근 주위의 영역으로 균열 후에도 철근과 콘크리트의 부착특성으로 균열의 진전이 제어되어 응력의 저하가 천천히 발생한다(Tension Stiffening). PL 영역은 주철근에서 떨어진 내부영역으로 콘크리트에 균열이 발생하면 급작스러운 응력강하(Tension Softening)가 발생한다.

해석에서는 축방향 변형도와 직교하는 2방향의 휨 변형도가 주어지면 각 파이버에서 변형도가 계산되고 비선형재료모델에 따라 대응하는 축력, 전단력, 휨과 같은 내부 힘이 계산된다. 따라서, 휨에 대해서는 매우 정확한 거동모사가 가능하게 된다. 그러나, 전단력은 선형관계식으로부터 계산되어 전단파괴에 대해서는 3절에서와 같은 방법으로 별도의 검토가 필요하다. 본 연구에서는 구조물의 기초부위는 완전고정으로 가정하였으며 흙과 구조물의 상호작용은 고려하지 않았다.

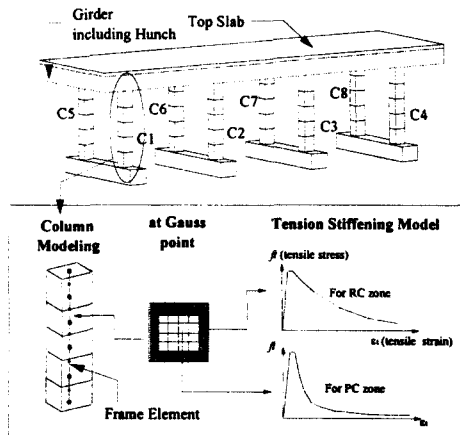


그림 1. 구조 모델링

2.2 역학적 모델(Mechanical Model)

RC 구조물의 비선형거동을 잘 모사하기 위해서는 RC의 재료모델이 중요하다. 본 연구의 구성 모델은 콘크리트와 철근의 구성모델로 구성되며 이들 구성모델은 상정 볼륨(Control Volume)내에서 하중전달경로에 종속적(Path-Dependent)인 평균응력과 평균변형도의 관계식으로 주어진다.

콘크리트의 구성모델은 작용응력의 상태에 따라 압축, 인장, 전단 구성모델로 구성되며 균열의 포함 유무에 따라 다른 모델을 적용한다. 콘크리트의 압축모델로는 콘크리트의 거동을 영구 변형과 에너지 흡수능력의 손실을 나타내는 소성(Plasticity)과 파괴(Fracture)로 표현되는 탄소성 파괴 모델(Elasto-Plastic Fracture Model)을 적용하였다.⁽¹⁾ 콘크리트의 인장구성모델은 RC 영역에 인장경화(Tension Stiffening)모델, PL 영역에 인장연화(Tension Softening)모델을 적용하였다. 충분한 철근비를 가진 RC부재에 일축 인장력을 가하면 부재의 평균 인장응력은 균열 발생 후에도 즉시 “영”으로 떨어지지 않는다. 이는 균열 발생 면에서의 철근의 인장응력이 여전히 항복점 이하여서 철근과 이를 에워싼 콘크리트의 부착특성에 의해 작용 하중을 균열이 발생하지 않은 이웃 단면으로 전달하기 때문이다. 식(1)은 평균 인장응력과 평균 변형도의 관계식이다.⁽²⁾

$$\sigma_t = \sigma_t(\varepsilon_t : c) = f_t \left(\frac{\varepsilon_{tu}}{\varepsilon_t} \right)^c \quad (1)$$

여기서, σ_t 는 균열에 수직인 평균 인장응력, f_t 는 콘크리트의 인장강도, ε_t 는 균열에 수직인 인장 변형도, ε_{tu} 는 콘크리트의 균열 시의 인장변형도, c 는 경화계수이다. 경화 계수는 부착특성에 의해 결정되며 콘크리트와 일반 이형철근에서는 일반적으로 0.4가 이용되고 있다.⁽²⁾

RC와 달리 무근 콘크리트의 경우 부착응력 특성이 없어 균열 발생 후의 응력은 급격하게 감소하게 된다. 이런 인장 연화 특성은 파괴 에너지(Fracture Energy)를 사용하여 특성화할 수 있다⁽³⁾. 파괴 에너지는 많은 실험을 통해서 최대 골재 크기와 큰 상관 관계가 있는 재료의 성질이라는 사실이 알려져 있다. 따라서, 재료의 성질이 주어지면 결정되게 된다. 이 파괴 에너지의 개념은 균열의 폭을 대신하는 요소의 대표크기(Reference Size)를 도입하여 근사적으로 분산균열 모델을 이용한 FEM에 적용할 수 있다. 이런 파괴에너지를 만족시키는 인장응력-변형도의 관계식은 여러 형태로 고려할 수 있지만 본 연구에서는 식 (1)을 사용하고 인장경화계수(c)로 2.0을 적용하였다.

콘크리트 내에서의 철근의 거동특성은 철근 자체만의 거동특성과 달리 철근 및 부착특성에 따라 달라진다. 균열이 발생한 콘크리트 부재 내에서 철근에 작용하는 인장응력은 동일하지 않고 콘크리트가 인장력을 부담하지 못하는 균열 면에서의 응력이 최대가 된다. 따라서, 균열 면에서의 철근이 항복하여도 철근의 평균 인장응력은 철근 자체의 항복점보다 낮아진다⁽²⁾. 하중의 제하 및 재재하에 대해서는 가토 모델⁽⁴⁾을 채용하여 바우징거 효과 및 변형 경화를 모사하였다.

3. 다축 하중을 고려한 전단파괴의 검토방법

전술한 바와 같이 본 해석모델에서는 전단에 대해서는 비선형 구성모델을 채용하고 있지 않아 부재의 전단파괴에 대한 별도의 검토가 필요하다. 지진 시 부재에 도입되는 지진하중은 부재의 주축과 일치하지 않는다. 따라서, 축하중을 포함하여 직교하는 2방향 하중에 대한 전단파괴의 검토가 필요하다.

양방향 하중을 받는 RC 부재의 전단강도는 한쪽 방향으로 기 재하된 하중의 세기에 따라 감소되고 이 때 전단파괴 포락선은 그림 2와 같이 타원형으로 나타낼 수 있다. 이러한 경향은 그림 2에서와 같이 3차원 해석(Full 3D Analysis)으로도 모사 가능하다. 만약, 1축방향 재하 시 부재의 전단강도를 잘 나타내는 실험식을 이용한다면 이러한 파괴포락선을 쉽게 구축할 수 있다. 그림 2에서 파선으로 나타낸 파괴포락선은 식(2)로 표현되는 전단강도 평가식을 이용한 경우로 수치해석

결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 식(2)에서와 같이 부재의 전단강도는 축하중의 크기(β_n)에 따라 변화하여 지진 시의 축력의 변동에 따른 부재의 전단파괴 포락선은 수축 또는 확대되게 된다. 따라서, 지진 시 각 하중스텝에서 축력과 직교하는 양방향 전단력을 계산한다면 그림 2에서와 같이 하나의 파괴포락선과 전단력을 표시할 수 있다(그림 2에서 검은 사각형). 따라서, 전단력의 크기 (|S|)와 내하력(|V|)의 크기를 각 하중 단계에서 비교함으로써 부재의 전단파괴를 검토할 수 있다.

$$f_v = f_w(0.75 + 1.4d/a)\beta_p\beta_n\beta_d \quad (2)$$

여기서, f_w 는 전단경간비(a/d)가 5.6, 전단철근비가 1%, 유효높이(d)가 1m 일때의 콘크리트의 전단강도(MPa)이며 $\beta_p, \beta_n, \beta_d$ 는 전단철근비, 축력, 유효높이에 따른 보정계수이다.

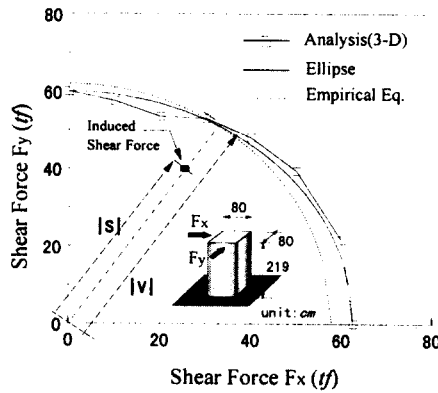


그림 2. 다축하중하에서의 부재의 전단파괴 평가방법

4. 입체라멘교각의 동적거동특성 및 파괴메카니즘

4.1 대상구조물

본 연구에서는 그림 3과 같은 교장 30m의 3경간 연속 입체라멘교의 지진시 거동특성을 모사하였다. 대상구조물은 일본 효고현 남부 지진시 교각의 전단파괴로 교축직각방향으로 붕괴가 발생한 구조물이다. 각 경간장은 8m이고 교각의 높이는 지반고에 따라 차이가 있다. 우측교각이 가장 짧고 중간 두 교각은 같고 좌측의 교각이 가장 길다. 교각의 단면크기는 80cm로 모든 교각이 동일하기 때문에 교량시스템의 교축직각방향의 강성중심은 상부구조의 질량 중심보다 우측에 위치하게 된다. 교각의 횡방향 철근비는 0.1% 이하로 현행 일본 콘크리트표준시방서에서 요구하는 0.2% 이상과 비교하면 매우 작아 심부콘크리트의 횡구속을 기대하기는 힘든 구조적 특성을 지니고 있다.

설계압축강도는 240kgf/cm^2 이고 주철근과 횡철근의 항복강도는 각각 3500kgf/cm^2 , 2400kgf/cm^2 이다. 표 1은 각 교각의 휨강도, 전단강도 및 강도비를 나타낸 것으로 교각의 전단파괴의 위험성이 매우 높은 구조임을 알 수 있다.

지진 해석에 이용한 입력지진운동은 암반지역에서 계측된 지진파를 구조물이 위치한 토질상태를 고려하여 역해석으로 얻은 지진파로 최대가속도는 교축 및 교축직각방향으로 각각 0.41g, 0.71g이다. 수직운동은 계측지진파가 불완전하여 고려하지 않았다.

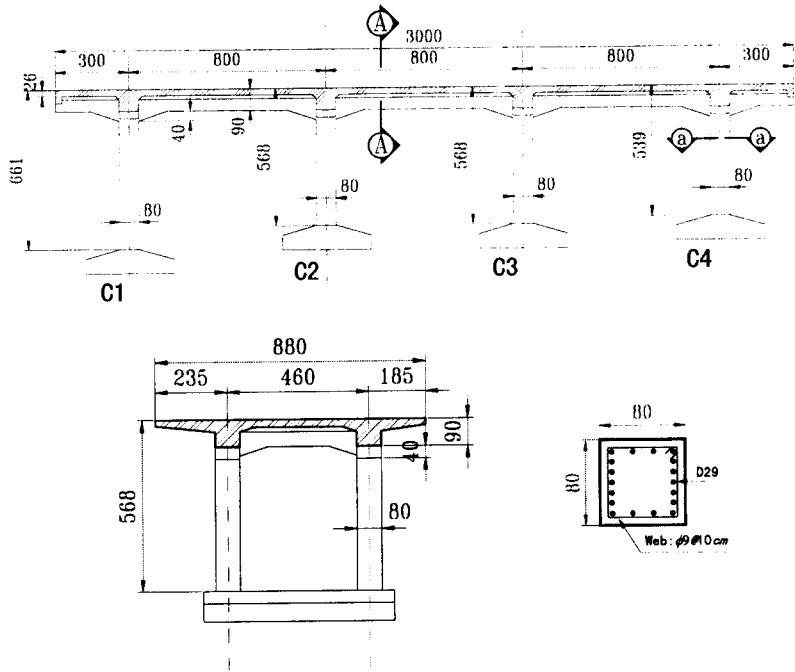


그림 3. 대상교량의 제원 및 교각 단면도

표 1. 각 교각의 휨, 전단강도 및 강도비

교각	전단경간 (a, cm)	유효높이 (d, cm)	전단경간 비(a/d)	휨 강도($M_u, tf-m$)		전단강도(V, tf)		여유도($V \times a / M_u$)	
				교축	직각	교축	직각	교축	직각
C1	266	72.5	3.67	135.1	131.2	54.2	57.8	1.07	1.17
C2, C3	219	72.5	3.02	135.1	131.2	57.4	61.3	0.93	1.02
C4	205	72.5	2.83	135.1	131.2	58.7	62.6	0.89	0.98

4.2 해석 결과 및 분석

본 연구에서는 콘크리트의 압축변형도가 1%에 도달할 때 휨 파괴가 발생하는 것으로 가정하고 해석을 수행하였지만, 휨 파괴는 발생하지 않았다. 그림 4는 3절의 검토방법으로 각 지진하중단계에서 각 교각의 전단파괴에 대한 검토를 수행한 것으로 교각 C2에서 전단파괴가 발생하는 것을 알 수 있다. 교각 C2의 전단파괴시까지의 지진거동을 살펴보면 교축직각방향으로 큰 전단력이 발생하는 것을 알 수 있다(그림 5). 그림 6은 대상교각의 전단파괴곡선과 교각에 도입되는 전단력을 함께 도시한 것으로 거의 교축직각방향으로 전단파괴가 발생하여 실제피해 현상과 잘 일치하고 있다. 대상교각의 이력곡선을 그려보면 큰 소성변형 없이 급작스러운 전단파괴가 발생하는 것을 알 수 있다(그림 7).

구조물 전체의 지진시 거동특성을 파악하기 위하여 각 교각의 교축직각방향의 응답변위를 함께 도시하였다(그림 8). 질량중심과 강성중심의 차이로 회전운동이 동반된 복잡한 거동을 하는 것을 알 수 있다. 그림 9와 같이 교각 C2에 가장 큰 지진하중이 걸린다. 지진에 의해 교량에 도입되는 전단력이 교각에 어떻게 분배되는지를 살펴보기 위하여 그 분담비율을 하중단계별로 나타내었다

(그림 10). 교각 C3(C7)는 약 1/4의 지진하중을 거의 일정하게 분담하고 있다. 교각 C4(C8)는 강성은 가장 크지만 회전운동의 회전축이기 때문에 오히려 가장 작은 지진하중을 분담하고 있다. 회전운동으로 인해 교각 C4(C8)가 분담하는 지진하중의 대부분이 교각 C2(C6)에 전달되는 것을 알 수 있다. 이러한 거동특성으로 교각 C2에 전단파괴가 발생하며 이것이 교량구조 전체의 붕괴로 이어진다.

5. 결론

RC 입체라멘교량은 일반적으로 교량시스템의 강성중심의 위치와 질량중심의 위치가 일치하지 않아 지진 시 회전운동을 동반하는 복잡한 거동특성을 보인다. 따라서, 2차원 해석으로 이러한 거동특성을 모사하기에는 무리가 있으며 3차원 해석으로는 계산시간 등을 고려할 때 한계가 있다.

본 연구에서는 3차원 영역에서 구조물을 모델링하고 1차원 RC 프레임요소를 도입하여 거동특성 및 파괴메카니즘을 살보았다. 특히, 기둥부재와 같이 철근이 부재내에 균일하게 배근되어 있지 않은 부재의 비선형거동을 보다 정확하게 모사하기 위하여 균열후의 에너지 소산을 고려한 피아버모델을 적용하였다. 부재의 전단파괴는 다축하중을 고려하여 검토하였다.

지진 시 교각에 도입되는 지진하중은 교각의 강성뿐만 아니라 교량시스템의 전체거동특성에 따라 다르게 된다. 유연한 교각에 인접한 강성이 큰 교각에 큰 지진하중이 집중되게 되어 파괴의 위험성이 매우 높다. 특히 교각의 전단파괴 가능성이 큰 경우에는 교량시스템 전체의 붕괴로 이어지게 된다.

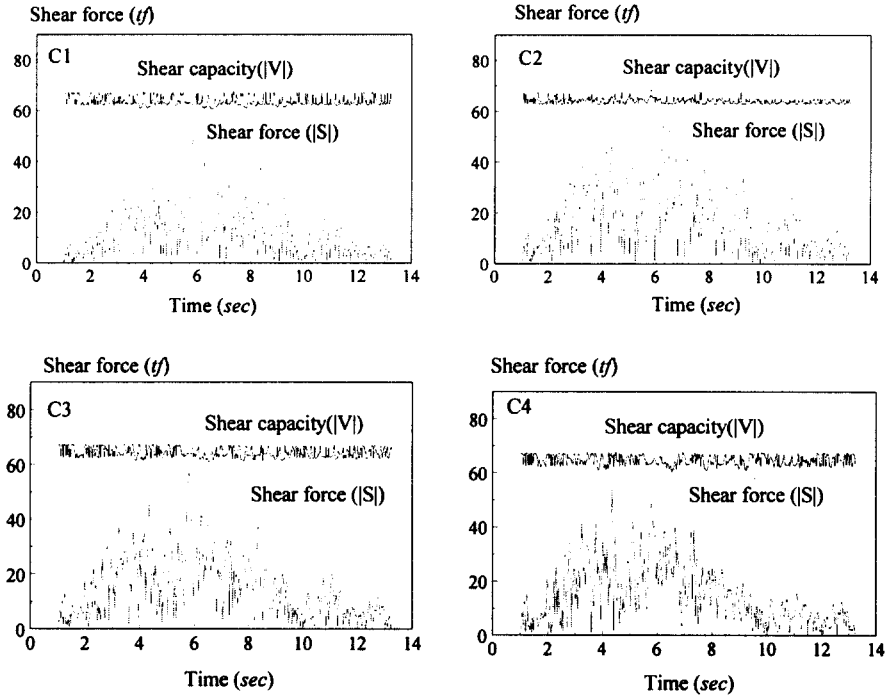


그림 4. 각 교각의 전단파괴 검토

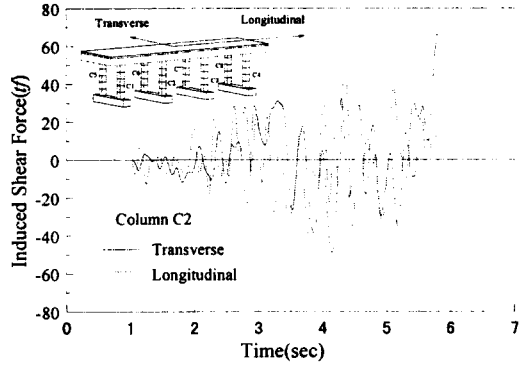


그림 5. 교각 C2의 지진 시 동적거동

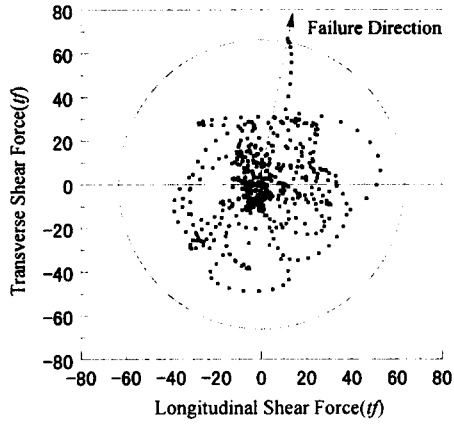


그림 6. 전단파괴포락선과 전단력(교각 C2)

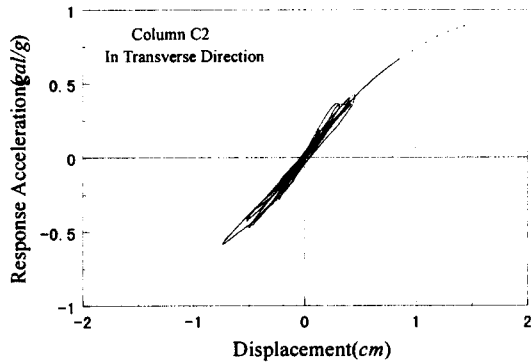


그림 7. 교각 C2의 지진 시 이력곡선

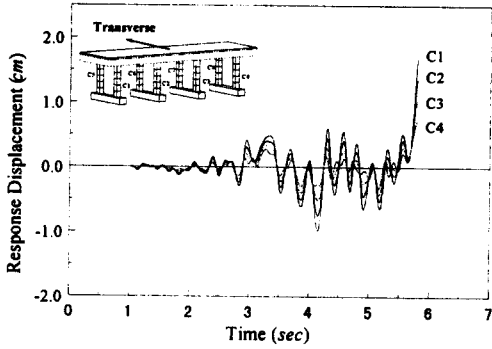


그림 8. 대상 교량의 교각의 응답변위

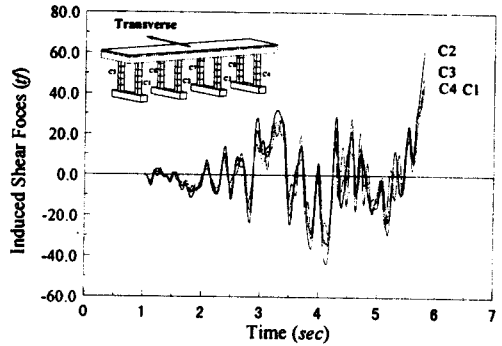


그림 9. 대상 교량의 교각의 전단력

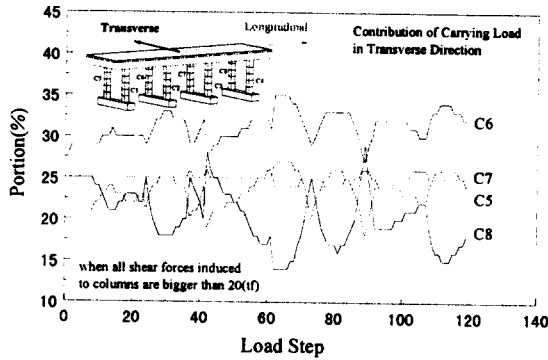


그림10. 교각의 지진하중 분담율

참 고 문 헌

1. Maekawa, K., and Okamura, H. (1983), "The Deformational Behavior and Constitutive Equation of Concrete using Elasto-Plastic and Fracture Model", *Journal of Faculty of Engineering*, University of Tokyo(B), Vol 37, No.2, pp253-328, 1983.
2. Shima, H., Chou, L. and Okamura, H. (1989), "Micro and Macro Models for Bond Behavior in Reinforced Concrete", *Journal of the Faculty of Engineering*, University of Tokyo(B), Vol39, No2, pp.134-194, 1987
3. Bazant, Z., P. and Oh, B., H. (1983) "Crack band theory for fracture of concrete", *Material and Structures*, (RILEM, Paris), Vol.16, pp. 157-177, 1983
4. Kato, B. (1979) "Mechanical Properties of Steel under Load Cycles Idealizing Seismic Actions", *CEB Bulletin D'information*, 131, 7-27