

강판보강에 의한 원형 RC 교각의 내진성능 향상 Seismic Upgrading of Existing Circular RC Pier with Steel Jacket

김재관*, 김익현**, 임현우***, 이지훈****
KIM, Jae Kwan, KIM, Ick-Hyun, LIM, Hyun-Woo, LEE, Ji-Hoon

ABSTRACT

The existing solid circular RC pier without seismic detailing is found to have poor ductility due to the premature bond failure of lap spliced longitudinal bars. The steel-jacket was introduced to prevent this unexpected type of failure. The nonlinear behavior and the seismic performance of the retrofitted pier were examined through the scale model test and compared with those of existing one. It is confirmed from the test results that the steel-jacket retrofitting can be used as an measure to improve seismic performance considerably.

1. 서론

교량은 사회기반시설로서 평상시뿐만 아니라 지진발생시에도 신속한 피난, 복구 및 2차 재해 방지를 위하여 매우 중요한 역할을 수행한다. 교량의 구성요소 중에서 특히 교각은 지진하중에 대하여 취약한 곳으로 지진 시에도 기능을 수행하기 위해서는 적절한 내진성능의 확보가 필수적이다.

우리나라 도로교의 내진설계는 1996년 이 후부터 본격적으로 실시되고 있어 내진설계가 적용되지 않은 대다수의 기존교량은 지진하중에 대하여 상당히 취약한 구조적 특성을 지니고 있다. 특히 주철근은 시공의 편의상 기초의 직상부 동일한 높이에서 단락되고 겹침이음에 의하여 연장되는 시공법이 적용되어 왔으며 횡구속 철근도 그 양이 적고 이음상태가 겹침이음으로 되어 있어 심부 콘크리트의 적절한 구속효과를 기대할 수 없어 내진성능을 확보하고 있지 못하다.

본 연구는 축소모형실험을 통하여 내진설계가 이루어지지 않은 기존 철근콘크리트 교각의 거동 특성을 살펴보고 소요내진성능을 확보하기 위한 보강방안으로 내진설계 선진국에서 가장 많이 쓰고 있는 강판보강(Steel Jacketing)방법을 도입하여 보강교각의 구조거동 특성 및 내진성능 확인 등 보강효과의 타당성을 검증하였다.

2. 실험의 개요(시험체의 제작 및 실험 방법)

2.1 시험체의 선정

RC교각에서 요구되는 내진성능은 사용기간내에 발생확률이 큰 작은지진에서는 “기능수행수준”을

* 서울대학교 토목공학과 교수, 정회원

** 지진공학연구센터 연구전담교수, 정회원

*** 광주광역시 토목사무관

**** 시설안전기술공단 진단1본부

만족하고 발생확률이 극히 작은 큰 지진에 대해서는 “붕괴방지수준”을 만족하도록 요구하고 있다⁽¹⁾. 기능수행수준을 만족하기 위해서는 설계지반운동에서 구조물의 거동은 탄성한계내에서 제한되어야 하므로 충분한 항복강도를 확보하고 있어야 한다. 붕괴방지 수준을 만족하기 위해서는 일반적으로 큰 연성도를 요구하게 된다. 국내의 RC 기존교각의 단면크기는 교량의 받침크기 등에 의해서 결정되는 경우가 많아 상당한 항복강도를 보유하고 있어 기능수행수준 성능을 확보하는데는 큰 무리가 없는 것이 일반적이다. 다만, 소성현지역역에서의 주철근의 겹침이음이나 심부콘크리트를 구속하기 위한 부적절한 횡철근 상세로 인하여 연성도의 부족이 예상된다. 따라서 붕괴방지수준을 만족하기 위해서는 휨내하력 또는 전단강도의 향상보다 연성도를 향상시킬수 방법이 적절한 보강방법으로 사료된다.

본 연구에서는 소성현지내에 주철근 겹침이음을 가지며 전단파괴가 배제된 교각의 내진성능을 축소모델실험을 통하여 살펴보고 강판보강을 실시한 보강교각의 거동특성을 비교, 분석하여 강판보강의 타당성에 대하여 검토하기로 한다.

2.1 시험체의 제작

1) 기존교각의 축소모형

상기의 파괴모드 및 실험 여건 등을 고려하여 종횡비(Aspect Ratio)는 5.0으로 하고 축소비는 1/3.5를 적용하였다. 주철근은 SD30을 사용하였고 콘크리트의 설계압축강도는 240kgf/cm^2 (실제 강도 152kgf/cm^2)이다. 콘크리트의 피복두께는 주철근 겹침이음부의 부착파괴모델⁽²⁾을 고려하여 결정하였으며 주철근 및 횡철근의 겹침이음길이는 사용철근의 지름(d_b)에 비례하도록 설계하였다($30d_b$). 주철근의 겹침이음위치는 동일한 단면에 있는 것으로 하였다(그림 1). 실험교각과 축소모형의 상세비교는 표1과 같다.

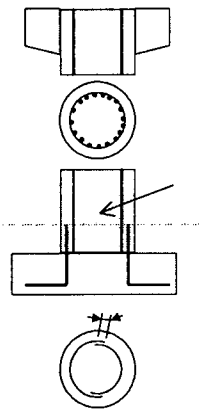


그림 1 축소모형 상세

표 1 실험교각과 축소모형의 상세비교

구 분		Prototype	Model(s=1/3.5)
재료강도 (kgf/cm^2)	콘크리트	240(설계강도)	152
	철 근	SD30	SD30
D:지름(m)		3.5	1.0
H:높이(m)		17.5	5.0
주철근	지 림	D32	D13
	철근비(%)	0.858	0.855
횡철근	지 림	D13	$\phi 6$
	Spacing (소성현지부)	20cm	8cm
	철근비(%)	0.158	0.151
피복두께(cm)		8.4cm+18.4cm (2열배열)	3.5cm
축력		0.05~0.10	0.0378 (=71.20tf)

2) 보강교각의 축소모형

주철근 겹침이음의 적절한 횡구속을 위하여 강판 덧씌우기 공법을 도입하였다. 소요연성도를 확보하기 위한 횡구속재의 양은 횡구속된 콘크리트의 응력-변형도 관계식⁽²⁾을 이용하면 계산 가능하다. 그러나, 일단 보강이 결정되면 횡구속재료의 재료비가 차지하는 비용은 그다지 크지 않아 충분한 연성도를 확보하는데 필요한 보강재를 일반적으로 사용하게 된다. 일본의 경우 기존교각의 강판보강을 위한 강

판의 두께는 9mm 또는 12mm로 표준화하여 적용하고 있다.

본 연구에서는 기존의 실제교각에 12mm 강판을 도입하는 경우를 상정하고 용접 및 상용성 등을 고려하여 모형에 적용하는 강판의 두께는 4.5mm(보강비=1.8%)로 하였다. 강판은 SWS400 ($\sigma_y = 2400 \text{ kgf/cm}^2$, $\sigma_u = 4000 \text{ kg/cm}^2$)을 사용하였다. 보강높이는 1500mm(이는 강판 꼭대기 부분의 교각에 걸리는 휨모멘트가 그 부분의 강도의 75%를 초과하지 않도록 하기 위한 것이다.)로 하고 교각과 강판의 연속성을 유지하기 위해서 7mm의 간격을 두고 무수축 몰탈로 채웠다. 또한, 수평하중의 증가에 의한 교각의 큰 회전변형으로 강판이 기초면에 접촉되어 지압되는 것을 피하기 위해 기초로부터 25mm의 간격을 두었다(그림 2).

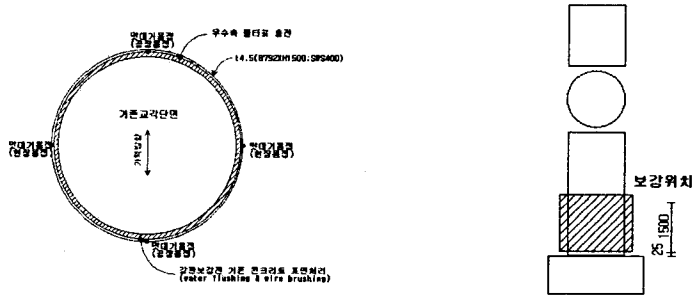


그림 2 강판보강교각의 상세도

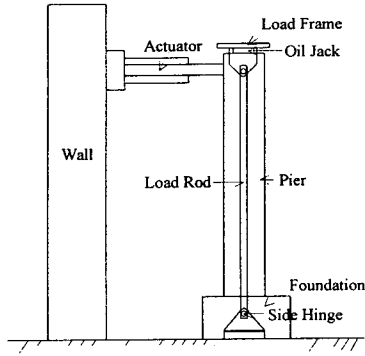
2.2 실험 방법

준정적 반복하중재하 실험을 실시하여 교각의 내진성능을 평가하였다.

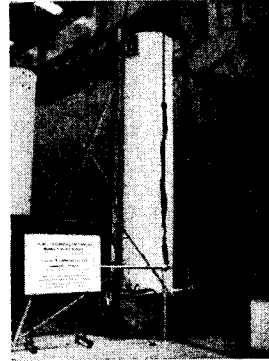
축력은 ENERPAC사의 용량 100tf 오일 잭을 사용하여 재하하였으며 수평력에 의한 큰 소성 변형 시에도 시험체의 상부에 $P-\Delta$ 효과에 의한 추가 모멘트가 걸리지 않도록 디바이스를 설치하였다(그림 3). 수평력은 MTS사의 Stroke가 $\pm 10\text{in.}$ (254mm)이고 용량 2000kN의 Hydraulic Actuator를 이용하여 항복변위 Δ_y 를 결정하기 위해서 $0.75 P_i$ 까지는 하중재하방식, 그 후는 변위재하방식으로 반복하중(Cyclic Load)을 재하하였다. 먼저, 횡구속되지 않은 교각에서 실측된 재료값들을 이용한 해석을 통하여 콘크리트 압축단면의 극한 변형률이 0.003인 상태에서의 이론적 수평내하력 P_i (Ideal Lateral Load Capacity)을 구하였다. 다음, $0.75 P_i$ 을 하중재하방식에 따라 재하하여 Push Direction과 Pull Direction의 변위 $\Delta'_{0.75}$, $\Delta''_{0.75}$ 를 각각 구하고 외삽법에 의해 각 방향에 대한 항복변위 Δ_{y1} , Δ_{y2} 를 구하고 이를 평균하여 항복변위 Δ_y 를 구하였다(식1). 이후로는 $1.0 \Delta_y$, $1.5 \Delta_y$, ...의 변위를 각 2회씩 변위재하방식에 따라 재하하였다. 보강교각에 대해서도 동일한 방법으로 변위를 산정하여 재하하였다.

교각의 비선형거동특성은 시험체의 기초상면에서 50cm, 100cm, 200cm, 500cm의 위치에 LVDT를 설치하여 횡방향 변위를 계측하여 검토하였다. 한편, 재하방향의 양쪽 보강강판면에 기초로부터 20cm, 40cm의 위치에 종, 횡방향으로 Strain gauge를 측정하여 강판의 변형률을 관찰하고 이를 통하여 보강강판의 구속효과를 평가하였다

$$\Delta_y = \frac{\Delta_{y1} + \Delta_{y2}}{2} = \frac{\Delta'_{0.75} + \Delta''_{0.75}}{2 \times 0.75} \quad (1)$$



(a) 설치 도면



(b) 설치 사진

그림 3 시험체의 설치

3. 실험 결과 및 분석

3.1 수평내하력과 변위의 관계

최대하중연성도 μ_m (수평 내하력이 최대가 될 때의 변위 Δ_m 을 항복변위 Δ_y 로 나눈 값) 및 파괴연성도 μ_f (수평 내하력이 최대점을 지나 그 최대 수평 내하력의 80%에 이를 때의 변위를 파괴 변위 Δ_f 로 정의할 때, 변위 Δ_f 을 항복변위 Δ_y 로 나눈값)로 내진성능을 평가하였다. 그리고, 하중-변위 이력곡선의 안정성을 평가하기 위해 파괴/최대하중 연성도비 μ_f/μ_m 를 제안하여 사용하였으며 이 값이 클수록 안정적인 하중-변위 이력곡선을 의미한다.

1) 기존교각

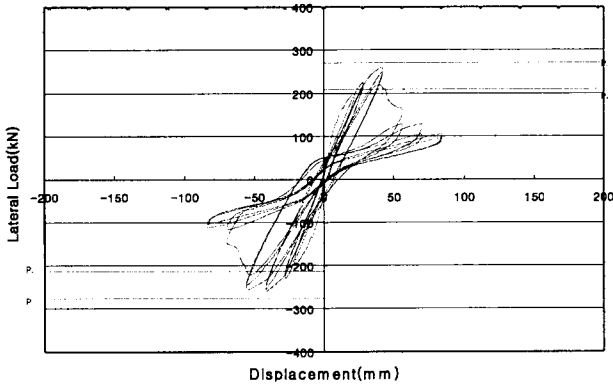
그림 4(a)에서 볼 수 있는 것처럼 연성도 $\mu_d=1.5$ 까지는 안정적인 이력곡선(hysteresis loop)의 특성($\mu_f/\mu_m=1.00$)을 보이다가 그 후로 갑작스러운 수평 내하력의 저하로 성능이 저하되는 것을 알 수 있다. 이는 이 지점에서 주철근 겹침이음부의 부착파괴(bond failure)가 일어나 갑작스러운 성능저하가 발생했기 때문이다. 이러한 것은 수평균열이 교각 상층부에서 하층부로 생성되고 미세한 수직균열이 수평균열 주위로 생성되다가 $\mu_d=1.5$ 에서 수직균열의 발생이 많아지기 시작하고 $\mu_d=2.0$ 에서 갑작스러운 수직균열의 생성과 기존 수직균열의 진전이 극대를 이루다가 그 이후로는 더 이상의 진전을 보이지 않는 사실과 일치한다. 전형적인 휨파괴의 특성을 보여주는 피복 콘크리트의 박리나 주철근의 좌굴은 관찰되지 않았다.(그림 4(b))

최대 수평력은 변위가 51(mm)일 때, 250(kN)으로 이는 P_f 의 94.39(%)이다. 이때, 최대 연성도는 $\mu_m=1.5$ 이었으며 파괴 연성도도 $\mu_f=1.5$ 이었다(표2).

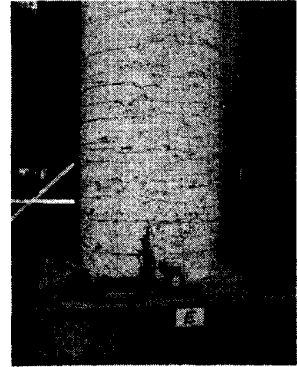
2) 강판 보강교각

그림 5(a)에서 볼 수 있는 것처럼 전체적으로 매우 안정적인 이력곡선(hysteresis loop)의 특성($\mu_f/\mu_m=1.50$)을 보이고 있다. 강판에 의한 주철근 겹침이음부의 충분한 횡구속으로 주철근의 파단에 의한 파괴가 발생하였다(그림 5(b)). 최대 수평력은 변위가 174(mm)일 때, 279(kN)으로 이는

P_1 의 105.28%의 성능을 발휘하고 있다. 또한, 최대하중시 연성도는 $\mu_m=4.0$ 이었으며 파괴 연성도도 $\mu_f=6.0$ 으로 연성도의 현저한 증가로 내진성능이 크게 향상되는 것을 알 수 있다(그림 6). 다만, 강판보강의 경우 연성도의 향상뿐만 아니라 휨 강도도 다소 증가하게 되어 기초부에 다소 큰 하중이 전달되게 된다. 기존 교량의 취약한 기초부의 여건을 고려한다면 휨강도의 향상에 따른 기초부의 안전성 검토 및 보강도 함께 고려하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

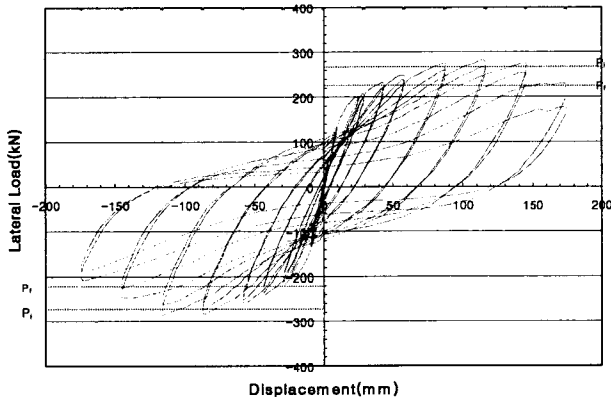


(a) 하중-변위 이력곡선



(b) 파괴패턴

그림 4 비보강 교각의 하중-변위 이력곡선



(a) 하중-변위곡선



(b) 파괴패턴
(주철근의 파단)

그림 5 보강 교각의 하중-변위 이력곡선

3.2 보강강판의 변형률

그림 11 (a), (b)에서 볼 수 있는 것처럼 연성도의 증가에 따른 보강강판의 횡구속효과의 증가로 횡방향 변형률이 연성도에 따라 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 아래 쪽(200mm)에 위치한 횡방향 변형률계의 값이 더 크게 나온 것은 교각의 하단에 더 큰 휨모멘트가 걸려 콘크리트가 팽창하여 구

속력이 증가하기 때문이다.

중방향 변형률의 경우 아래쪽에 설치된 변형률계에 비해 위에 설치된 변형률계의 값이 크다. Full Composition Action의 경우 휨모멘트가 아래가 더 크므로 아래의 변형률이 더 커야 하지만 아래의 보강 강판의 팽창으로 강판과 콘크리트간의 마찰력이 작아져서 위쪽에 비해 상대적으로 더 큰 슬립이 생겨 나타나는 현상으로 판단된다.

표 2 실험결과와의 비교

항 목	비보강	보강
Δ_y	34(mm)	29(mm)
Δ_m	51(mm)	116(mm)
Δ_f	51(mm)	174(mm)
μ_m	1.5	4.0
μ_f	1.5	6.0
μ_f/μ_m	1.00	1.50
P_m/P_i	94.39(%)	105.28(%)
Δ_f/L (Drift Ratio)	1.02(%)	3.48(%)

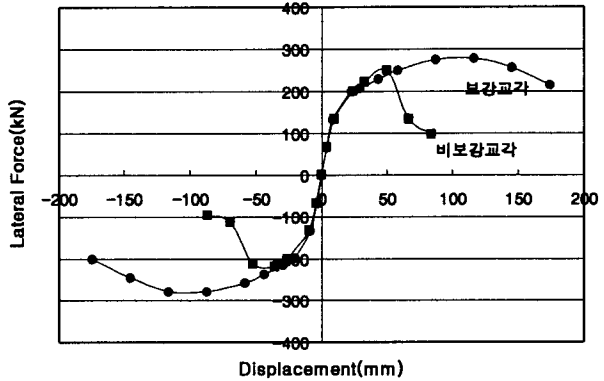
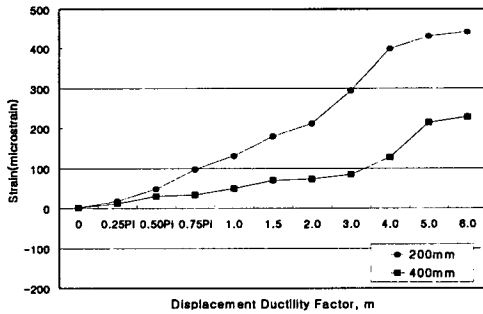
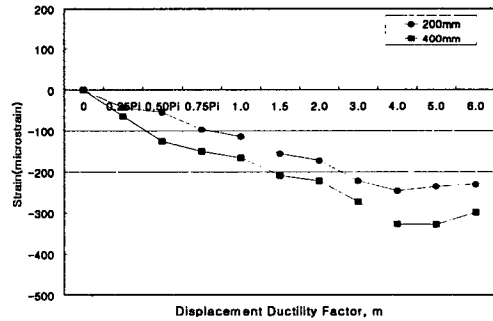


그림 6. 하중-변위 포락곡선의 비교



(a) Hoop Strain(Push Dir.)



(b) Vertical Strain(Push Dir.)

그림 7 보강강판의 변형률

3.3 에너지 흡수능력

에너지 흡수 능력이란 교각이 비탄성거동을 통해 지진 에너지를 소산시키는 교각의 내진 능력으로 교각의 하중-변위의 비선형 이력곡선이 에워싸고 있는 면적을 나타낸다⁽³⁾. 이것은 i) 각 스텝별 단일 하중-이력곡선의 Loop 면적이거나 ii) 에너지 소산 능력이라는 관점에서 파괴시까지의 각 스텝별 단일-하중-이력곡선의 Loop 면적의 합으로 내진성능을 측정할 수 있다.

그림 8에서 볼 수 있는 것처럼 에너지 흡수능력은 비보강 기존교각에 비해 강판보강 교각이 훨

췁 에너지 흡수능력이 향상되었다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 파괴가 일어나기 전까지의 에너지 흡수능력(흡수 에너지의 누계)을 비교하면 더욱 뚜렷해지는데, 비보강교각이 15.25kN, 보강교각이 203.81kN로 큰 차이를 보이고 있다.

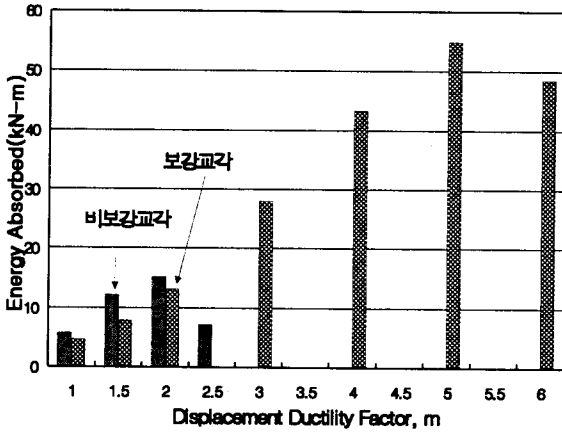


그림 8 μ_d 에 따른 에너지 흡수 그래프

을 갖는 8경간 연속 PC Box 거더교(상부구조물의 총중량: 8965.10tf)를 교장에 비례시켜 4경간 연속교와 단경간교로 각각 변환하고 이러한 단경간교, 4경간 연속교, 8경간 연속교를 지진구역 I지역에 위치한 내진 I등급 구조물로 단단한 토사지반(S_D)상에 위치한다고 가정하여 교량의 내진성을 평가하였다.

표 3과 그림 9는 역량스펙트럼에 의한 교량의 내진성능 평가 결과이다. 기존교각의 경우 연성도의 부족으로 다경간교량에서 붕괴방지수준의 성능을 만족하고 있지 않다. 강판보강에 의한 주철근 겹침이음부의 횡구속으로 연성도가 증가되어 보강교각의 경우는 모두 붕괴방지수준의 내진성능을 만족하고 있다. 4경간 연속교의 경우 횡구속에 의한 휨강도의 증가로 기존교각에서 만족하지 않는 기능수행수준도 만족함을 알 수 있다. 8경간연속교와 같이 상부관성력이 고정교각에만 크게 작용하는 교량시스템에서는 상당한 강도의 향상이 필요하게 된다. 이를 위해서는 기초부의 충분한 보강도 필수적이다. 이러한 교량시스템의 경우는 고정교각의 연성도는 본 연구와 같은 횡구속으로 확보하고 상부관성력을 가동단 교각으로 분산시키는 장치(예, 전단키 등)를 도입하여 전체시스템의 강성을 향상시켜 소요성능을 확보하는 것이 합리적인 대안이 될 수 있다.

4. 결론 및 향후연구과제

본 연구에서는 주철근 '겹침이음 비내진 상세 철근콘크리트 교각의 1/3.5 축소모형과 이의 강판보강 교각을 제작하여 준정적 반복하중재하 실험을 실시하여 비선형 거동특성을 조사, 분석하고 연성도와 흡수에너지, 역량 스펙트럼 방법 등을 이용하여 내진성능을 살펴보았다.

기존교각의 경우 주철근겹침이음부의 조기 부차파괴로 인한 연성도의 부족(파괴연성도가 1.5)으로 충분한 내진성능을 보유하고 있지 못하다. 따라서, 주철근겹침이음의 효과적인 횡구속으로 내진성능을 확보하는 것이 필요하다.

강판보강으로 주철근 겹침이음을 보강하는 경우 파괴연성도가 1.5→6.0으로 향상되어 다경간연속교인 경우에도 붕괴방지수준의 내진성능을 가질 정도로 만족할만한 보강효과를 나타내었다. 즉, 보강 강판이 충분한 횡구속 효과를 발휘하는 것으로 파악된다.

3.4 역량 스펙트럼 방법에 의한 교각의 내진성능평가

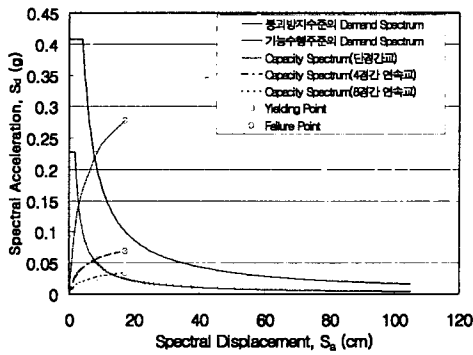
기존 구조물의 내진성능 평가는 설계지진에 저항하기 위하여 구조물에 요구되는 소요역량(Demand)과 구조물이 보유하고 있는 공급역량(Capacity)을 서로 비교함으로써 내진성능(Performance)을 평가할 수 있다. 내진성능기준⁽¹⁾의 설계지진레벨에 대해 Demand Spectrum을 결정하고 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대해 교각의 내진성을 평가하였다.

본 연구의 내진성능평가에서는 단위길이당 상부구조가 중량 24.23 tf/m로 370 m의 교장

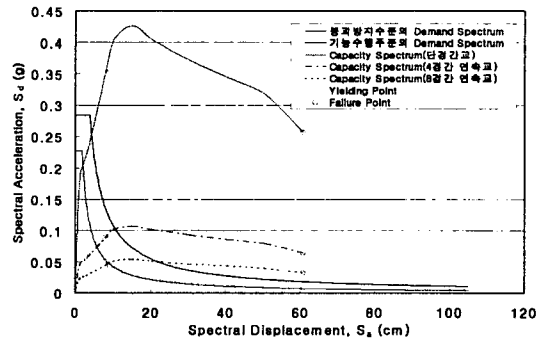
본 연구에서는 주철근 겹침이음부의 조기 부착파괴를 방지하고 소요연성도를 확보하기 위하여 강판보강을 도입하는 경우 그 타당성에 대하여 검토하였다. 구조시스템의 파괴패턴에 따라 여러 형태의 보강항목이 필요하고 이에 적절한 보강방안을 수립하기 위해서는 추후 보다 체계적이고 다양한 연구가 필요하다고 판단된다.

표 3 역량 스펙트럼 방법에 의한 교각의 내진성능평가

시험체	단경간		4경간		8경간	
	기능수행수준	붕괴방지수준	기능수행수준	붕괴방지수준	기능수행수준	붕괴방지수준
비보강	○	○	○	×	×	×
보강	○	○	○	○	×	○
효과				강도증가		연성도 증가



(a) 기존교각(비보강)



(b)보강교각

그림 9 역량 스펙트럼 방법에 의한 교각의 내진성능평가

감사의 글

본 연구는 시설안전기술공단의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다. 또한, 실험에 많은 도움을 주신 현대건설기술연구소 관계자 여러분께도 감사드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부, 내진설계기준연구(Ⅱ): 내진설계성능기준과 경제성평가, 서울, 1997, 493 pp.
2. Priestley, M.J.N., Seible, F., and Calvi, G.M., Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons, Inc., 1996, 686 pp.
3. Stone, W.C., and Cheok, G.S., Inelastic Behavior of Full-Scale Bridge Columns Subjected to Cyclic Loading, NIST-BSS-166, U.S. Department of Commerce, Washington, Jan. 1989, 252 pp.