

# 철근콘크리트 교량의 충격전달장치 앵커시스템의 전단파괴거동

## Shear Fracture Behavior of Anchor Systems for Shock Transmission Unit in RC Bridge

김 태 상\*      송 하 원\*\*      변 근 주\*\*\*      안 창 모\*\*\*\*  
Kim, Tae Sang      Song, Ha Won      Byun, Keun Joo      Ahn, Chang Mo

### ABSTRACT

Seismic safety of continuous span concrete bridge can be enhanced by distributing a large seismic lateral load to each supporting pier. A new viscoelastic device called Shock Transmission Unit(STU), which is a simple cylinder-piston assembly packed with a so-called silicone putty compound, enables the lateral seismic load to be transmitted to the pier by installation of the device to movable bearings of the bridge. The seismic safety of concrete bridges having the STU depends on not only safety of the bridges globally but also safety of anchor systems which anchors the STU to concrete pier.

An experimental investigation is performed to study the behavior of cast-in-place anchor and post-installed anchor subjected to shear load statically and cyclically according to different edge distance, embedment length, and anchor spacing. Finally, the experimental results are compared with results by design methods of ACI and CCD, and results by FEM analysis.

### 1. 서 론

내진 설계가 되지 않은 기존 콘크리트교량 연속교에서 내진보강을 할 때 특수 내진장치를 이용하여 평시에는 가동단이 지진시 고정단화 되어 지진력을 분담시키도록 하는 성능이 검증된 충격전달장치(STU)를 사용하는 방법이 있다<sup>1)</sup>. 이때, 국부적인 관점에서 충격전달장치를 보면 콘크리트 교각부에 정착시키는 방법으로 앵커시스템을 사용하고 있고, 앵커의 설계는 현재까지는 강재 관입물 설계에 관한 ACI 349 코드를 근간으로 설계되어 오고 있으나<sup>2)</sup> 정적인 하중에 대한 설계만 이루어지고 있으며 동적거동에 대한 안전성을 파악하기에는 미약한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 STU를 콘크리트 교각에 정착시킨 앵커시스템에서 앵커의 콘크리트 정착부에서의 전단에 대한 정·동적하중 실험을 수행하여 cast-in-placed 앵커와 post-installed 앵커 설치에 따라 콘크리트의 연단거리, 관입깊이, 앵커 상호간격등에 따른 콘크리트 정착부에서의 파괴거동을 규명하였다. 실험결과는 현재 사용되고 있는 설계방법인 ACI방법과 CCD방법, 그리고 FEM해석과도 비교 분석하였다.

- \* 정회원, 연세대학교 토목공학과, 석사과정
- \*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과, 부교수
- \*\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과, 교수
- \*\*\*\* 정회원, 에스코테크놀로지, 부사장

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험체 제작

기존의 교각에 주로 사용되는 압축강도  $240 \text{ kgf/cm}^2$ 인 레디믹스트 콘크리트를 사용하여 미리 제작된 거푸집을 이용하여 실험체를 타설하였고, 타설시 대기 온도는  $23^\circ\text{C}$ 였으며 다짐불량을 방지하기 위하여 진동다짐기를 이용하여 충분한 다짐을 실시하였다. 콘크리트 타설후 양생포를 덮고 충분한 살수를 하였으며, 7일 후 거푸집을 제거하고, 28일까지 현장 양생을 실시하였다. 표 1은 표준 공시체에 의한 압축강도 측정결과이다. 실험체의 명칭은 표 2와 같이 고려된 변수에 대한 기호로 나타내며 각 실험체에 대한 명칭 및 치수는 표 3과 같다. 시편은 연단거리, 관입깊이, 앵커간격에 따라 기준을 선정하였으며 각 시편의 기호를 결정하였다.

표 1 콘크리트 압축강도 측정 결과

측정일	압축강도 ( $\text{kgf/cm}^2$ )
7일	214.3
16일	220.3
28일	241.8

표 2 기호의 의미

기호	의미	기호	의미
d10	연단거리 10cm	d30	연단거리 30cm
h10	관입깊이 10cm	h15	관입깊이 15cm
C	cast-in-placed anchor	P	post-installed anchor
S	static load	D	dynamic load
GN	narrow group anchor	GW	wide group anchor

표 3 시편의 명칭 및 치수

형태	명칭	시편크기 $B \times C \times H(\text{m})$	갯수	연단거리 $d_e(\text{cm})$	관입깊이 $h_{ef}(\text{cm})$	하중 형태	앵커간격 $s_1(\text{cm})$
post-installed anchor	d10-h15-P-S	$0.6 \times 0.5 \times 0.3$ (0.1m <sup>3</sup> )	3	10	15	전단	단일
	d10-h15-P-D		3	10	15	반복	단일
	d10-h10-P-S		3	10	10	전단	단일
	d10-h10-P-D		3	10	10	반복	단일
	GN-h15-P-S		3	10	15	전단	15
	GN-h15-P-D	3	10	15	반복	15	
	d30-h15-P-S	$1.2 \times 0.9 \times 0.3$ (0.324m <sup>3</sup> )	3	30	15	전단	단일
	d30-h15-P-D		3	30	15	반복	단일
	d30-h10-P-S		3	30	10	전단	단일
	d30-h10-P-D		3	30	10	반복	단일
cast-in-placed anchor	GW-h15-P-S	$0.6 \times 0.7 \times 0.3$ (0.126m <sup>3</sup> )	3	10	15	전단	30
	GW-h15-P-D		3	10	15	반복	30
	d10-h15-C-S	$0.6 \times 0.5 \times 0.3$ (0.1m <sup>3</sup> )	3	10	15	전단	단일
	d10-h15-C-D		3	10	15	반복	단일
	d30-h15-C-S		3	30	15	전단	단일
	d30-h15-C-D		3	30	15	반복	단일

시편은 앵커의 거동에 영향을 미치지 않게 콘크리트 구체를 고정시키기 위해서 그림 1, 2와 같이 중앙에 고정용 강봉을 삽입하여 볼팅을 하기 위한 강관을 위치시켰으며 하중 적용방향으로 밑면에 브라켓을 두어 구체의 흔들림을 방지하였다. 또한 그림 3의 볼트형 앵커는 직경이 16mm이며, CIP와 PI를 구별하여 비교하기 위하여 타설시에 CIP 볼트형 앵커를 미리 위치시킨 시편을 12개 제작하였으며 PI 볼트형 앵커를 위해 36개의 시편을 제작하였다.

각 실험체는 관입깊이의 2배 이상으로 제작되었으며 이는 두께가 파괴에 영향을 미치지 않도록 하기 위한 것이며, 또한 ACI<sup>3)</sup> 및 CCD 방법<sup>4)</sup>에 의한 영향면보다 크도록 제작하였다. 사용된 앵커는 볼트형 앵커이며 그레이드 10.9 인 고강도 앵커를 사용하여 실제 시공되는 앵커를 적용하였다. 최소연단 거리는 앵커 자체의 파괴가 발생되도록 하는데 필요한 최소한의 연단거리를 의미하며 다음의 식 (1)에 의해서 구할 수 있으며, 최소정착깊이는 도로교 및 고속철도 시방서에 나와 있는 10d를 기준으로 하였다.

$$d_{cr} = d \sqrt{\frac{f_{ut}}{8 \phi \sqrt{f_{ck}}}} \quad (1)$$

여기서,

$d$  : 앵커 지름,  $f_{ut}$  : 앵커의 허용인장응력,  $f_{ck}$  : 콘크리트 압축강도  $\phi$  : 강도감소계수

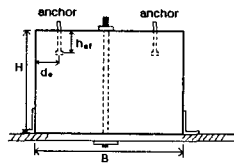


그림 1 입면

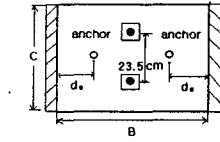


그림 2 평면

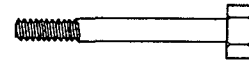


그림 3 볼트형 앵커

## 2.2 앵커 시스템의 전단에 대한 정·동적하중 재하실험

제작된 콘크리트 구체가 재하 실험중 예기치 못한 편심 및 들림을 방지하기 위하여 미리 삽입한 강관을 통해 강봉을 설치하여 구체를 바닥프레임에 고정시키고 25ton 용량의 actuator를 사용하여 그림 4, 5와 같이 반력벽을 사용하여 설치하였으며, 그림 6, 7과 같이 단일앵커 및 다중앵커에 대하여 전단에 대한 정적 및 동적하중을 재하하여 콘크리트 및 앵커의 파괴하중을 구하였다. 24개의 콘크리트 시편을 만들어 실험을 하였으며, 각각의 시편에는 2개의 앵커가 고정되어져 있어 총 48개 앵커의 실험을 실시하여 비교하였다. 이중 24개는 전단하중을 재하하였으며, 나머지 24개는 전단 반복하중을 재하하였다. 관입깊이는 10cm과 15cm 두 종류에 대해서 이루어졌으며, 연단거리는 10cm와 30cm 두 종류에 대해서 이루어 졌다. 10cm는 콘크리트의 파괴를 유도하기 위한 거리이며, 30cm는 앵커의 파괴를 유도하기 위한 거리이다. 모든 고정용 볼트는 실험전에 렌치에 의해 완전히 고정되어 구체는 변형을 일으키지 않게 하였다.

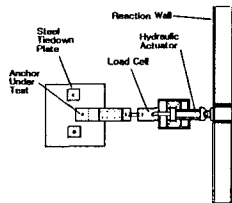


그림 4 Actuator 설치도



그림 5 재하실험전경

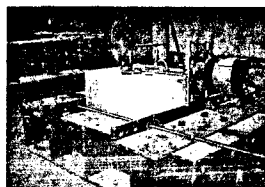


그림 6 단일앵커

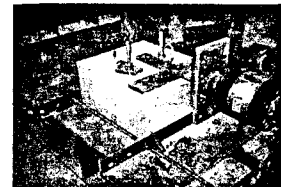


그림 7 다중앵커

### 3. 실험결과 및 분석

정적하중 및 동적하중 실험결과는 표 4와 같으며 연단거리 10cm인 실험체에서 콘크리트파괴가 일어날 경우에는 반원추형의 파괴 형상이 일어나며 이때의 균열형상은 단일앵커나 다중앵커 모두 ACI에서 가정한 45°의 균열진행 방향보다는 30° ~ 35°의 파괴 진행 방향이나 거의 옆으로 파괴되는 각도인 10° 등이 나타났으며, 하중 재하시 편심에 의한 영향으로 양쪽의 균열 진행방향이 대칭성이 없는 시편이 있었다. 연단거리에 따른 결과를 보면 설계값은 ACI 방법에 의하여 구하였으며 연단거리 10cm은 콘크리트파괴가 일어나며, 연단거리 30cm은 앵커의 파괴가 발생했다. 실험결과 콘크리트 파괴는 안전측으로 나타나지만 앵커부 파괴에서는 관입깊이  $h_{ef}$ 가 규정치인 10d 이하인 경우에는 안전율이 0.76이어서 불안정한 경우가 있음을 알 수 있다. 따라서 관입깊이에 따른 파괴강도는 전단파괴에서는 영향이 없을 것으로 예상했으나 해석결과 관입깊이가 10d이상인 경우 파괴하중이 증가하였으며, 관입깊이가 10 d 이하인 경우는 안전율이 1보다 작아 불안정 측임을 알 수 있다. 앵커의 간격이 좁은 경우의 설계에서는 중복에 의한 강도감소 효과를 충분히 고려하고 있어 안전율이 간격이 넓은 경우보다 높은 값을 나타내었으며 이때 시편의 파괴형상으로 보았을 때 예상한 파괴영향 범위보다 더 넓게 영향이 있기 때문에 콘크리트 파괴시 ACI 방법에서의 가정인  $2h_{ef}$ 나 CCD방법에서의  $3h_{ef}$ 보다 간섭 범위가 더 넓을 것이라고 판단된다. 동적 하중이 적용되었을 경우는 파괴하중을 구하기가 어려워 정적 실험에서 구한 파괴하중에 대하여 65%, 85%, 100%의 하중을 30회 주었으며 이때 파괴가 생기지 않았을 때에는 정적하중에 의하여 파괴하중을 구하였다. 실험시편 중 1개가 양생중의 힘에 의해 실험판에 고정되어 안되어 파괴실험에 실패하였다.

표 4 정적하중 및 동적하중 실험결과

시편	실험값 (tonf)			실험값 설계값	시편	파괴시 하중 (tonf)			실험값 설계값
d10-h15-C-S	①	2.31	평균: 2.62 (표준편차 : 0.37)	1.14	d10-h15-C-D	①	3.55(S)	평균: 3.07 (표준편차 : 0.69)	1.34
	②	3.03				②	2.58(D)		
	③	2.53				③	실패		
d10-h15-P-S	①	2.92	평균: 2.99 (표준편차 : 0.25)	1.31	d10-h15-P-D	①	2.76(D)	평균: 3.22 (표준편차 : 0.69)	1.41
	②	3.28				②	4.01(S)		
	③	2.79				③	2.89(S)		
d10-h10-P-S	①	2.68	평균: 2.54 (표준편차 : 0.09)	1.11	d10-h10-P-D	①	2.64(S)	평균: 2.83 (표준편차 : 0.17)	1.24
	②	2.56				②	2.93(S)		
	③	2.50				③	2.93(S)		
d30-h15-C-S	①	10.66	평균: 11.71 (표준편차 : 1.16)	1.05	d30-h15-C-D	①	6.75	평균: 6.39 (표준편차 : 0.78)	0.57
	②	12.96				②	5.50		
	③	11.50				③	6.92		
d30-h15-P-S	①	11.81	평균: 11.70 (표준편차 : 0.44)	1.05	d30-h15-P-D	①	실패	평균: 8.50 (표준편차 : 0)	0.76
	②	12.07				②	8.50		
	③	11.21				③	8.50		
d30-h10-P-S	①	8.40	평균: 8.48 (표준편차 : 0.12)	0.76	d30-h10-P-D	①	실패	시편의 힘에 의한 재하불가	-
	②	8.56				②	실패		
	③	실패				③	실패		
GN-h15-P-S	①	3.23	평균: 3.49 (표준편차 : 0.23)	1.31	GN-h15-P-D	①	3.71(D)	평균: 3.51 (표준편차 : 0.17)	1.31
	②	3.68				②	3.40(D)		
	③	3.56				③	3.40(D)		
GW-h15-P-S	①	4.50	평균: 4.68 (표준편차 : 0.52)	1.09	GW-h15-P-D	①	5.20(D)	평균: 4.70 (표준편차 : 0.61)	1.09
	②	4.27				②	4.02(D)		
	③	5.28				③	4.88(S)		

그림 8, 9의 정적하중 실험에서 하중-변위 곡선은 cast-in-place 앵커가 post-installed 앵커보다 파

파괴하중에서의 변위가 더 높으나 많은 차이는 보이지 않음을 알 수 있고, 미끌림 현상이나 뿔힘 현상이 없음을 알 수 있다. 그림 10, 11의 동적하중 하에서는 파괴가 일어나지 않을 때에는 정적하중 때의 파괴강도나 약간 높은 경우에도 반복하중을 받고 견디지만, 파괴시에는 변위가 급격히 늘어나면서 하중이 떨어짐을 알 수 있으며 최종 파괴에까지 이르는 동안 계속 하중을 견딜 수 있음을 보여주고 있다.

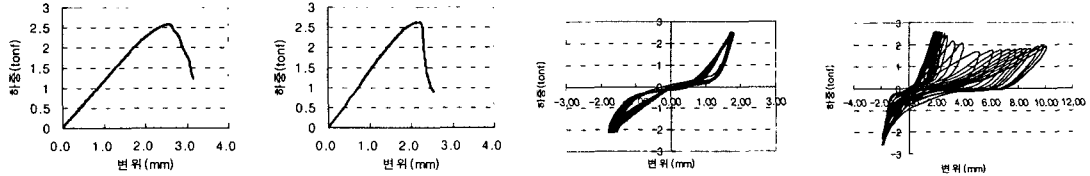


그림 8 Cast-in-place 앵커 그림 9 Post-installed 앵커 그림 10 파괴전 거동 그림 11 파괴시의 거동

동적하중을 적용한 실험결과와 정적하중을 적용한 실험결과를 비교 분석하면 연단거리 10cm인 콘크리트 파괴시에는 동적하중에 대해 더 높은 파괴강도를 나타내고 있으나 연단거리 30cm인 앵커파괴시에는 파괴강도가 급격히 저하됨을 알 수 있다.

#### 4. 앵커시스템의 유한요소해석

앵커 시스템의 해석은 콘크리트에 관한 파괴역학을 도입하여 진행성 파괴해석<sup>5),6)</sup>을 통하여 유용하게 수행할 수 있으며 본 논문에서는 3차원 범용 프로그램인 DIANA<sup>7)</sup>를 이용해서 모델링 하였으며<sup>5)</sup> 앵커에 전단하중이 가해졌을 때 콘크리트구체 부분과 앵커부분의 파괴거동과 극한전단력을 예측하는 것을 목적으로 한다. 해석에 사용된 유한요소는 8절점 solid element (HX24L)를 사용하였으며 실험체와 동일한 치수의 3차원 반 모델링을 하였으며 경계조건은 실험체와 동일하게 하였다. 콘크리트와 앵커에 대해 표 5 및 표 6의 제원을 입력하였으며, 모델의 하중조건은 각각의 실험체에 따라 ACI 및 CCD방법으로 파괴예상강도를 계산하고 하중제어 방법으로 예측 파괴 강도값에 따른 범위내에서 10kg씩 증가시키면서 비선형 해석을 수행하였다.

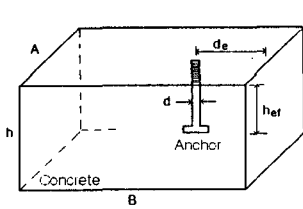


그림 12 시편형상

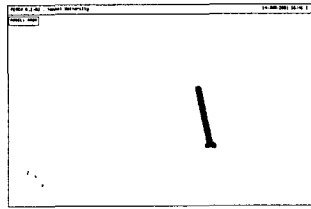


그림 13 앵커부 모델링

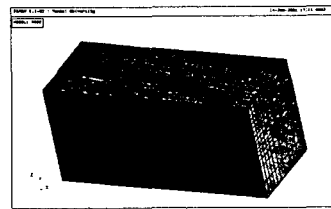


그림 14 해석 모델링의 메쉬

표 5 콘크리트의 물성치

구분	콘크리트
강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	240
탄성계수(kgf/cm <sup>2</sup> )	257829.70
포아송비	0.18
단위중량(kgf/cm <sup>3</sup> )	0.0025

표 6 앵커의 물성치

구분		Grade 10.9
1차 항복	응력(kgf/cm <sup>2</sup> )	9590
	변형률(%)	0.0047
극한	응력(kgf/cm <sup>2</sup> )	10600
	변형률(%)	9.0000

그림 15~16은 d10-h15-C-S 모델링에 대하여 최대하중이 작용할 때의 응력분포, 균열분포, 변형

형상을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 응력분포는 표면의 연단쪽과 앵커의 머리부분의 연단반대쪽에 압축력이 작용함을 보이고 있으며 반원추형으로 균열이 진전됨을 보여주고 있다. 콘크리트 파괴에 있어서의 해석결과를 이번 실험의 결과 및 기존의 실험값<sup>8)</sup>과 비교해 보면 연단거리가 짧을 때는 ACI, CCD, FEM이 모두 기존의 실험값보다 안전측이지만 연단길이가 길어질수록 불안전측임을 알 수 있다.

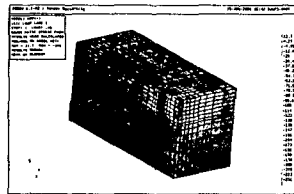


그림 15 응력분포

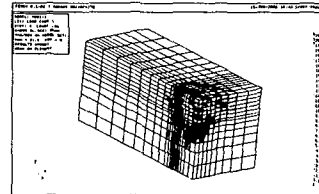


그림 16 균열분포

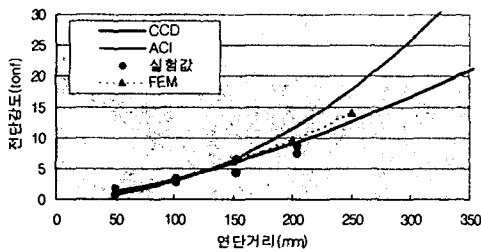


그림 17 연단거리에 따른 전단파괴강도

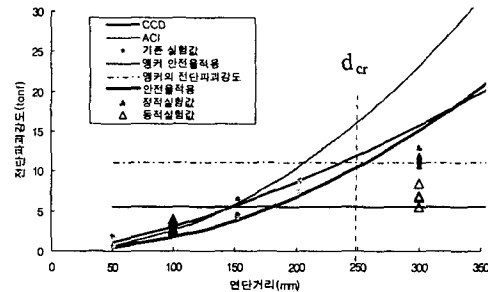


그림 18 강도감소율과 연단거리에 따른 전단파괴강도

## 5. 결론

현재 앵커의 설계에 있어서는 ACI에 의한 방법과 CCD에 의한 방법이 있으며 이에 따른 앵커의 설계하중은 연단거리가 작아서 콘크리트파괴를 일으키는 경우에는 안전측이지만 연단거리를 길게하여 앵커의 파괴를 유도할 때는 매우 불안전측임을 알 수 있으며 STU와 같은 특수한 내진장치를 콘크리트 구조물에 정착시키는 앵커시스템의 설계에 있어서 콘크리트파괴시에는 기존의 강도감소계수인 0.65를 사용해도 안전측이 될 수 있지만, 연단거리가 길어져 앵커의 파괴를 유도하는 경우에 있어서는 강도감소계수를 0.5 수준으로 낮추어 적용해야 안전측이 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. Tanzo, W. and Tsuzuki, A., "Enhanced Seismic Lateral Load Distribution in Continuous Span Bridges Fitted with Viscoelastic Devices," 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, 23-28 June, Paper No. 1528, 1996.
2. 박성관, 김호섭, 윤영수, 김상운, "콘크리트 CIP(cast-in-place) 앵커시스템의 파괴거동에 관한 연구," 콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제12권, 1호, pp. 491-496, 2000.
3. ACI Committee 349, "Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures," ACI Journal, 75, 1978, pp. 329-347., 1978.
4. Comite Euro-International du Beton, Design of Fastenings in Concrete, Bulletin d'Information, No. 226, Thomas Telford Services Ltd., 1997.
5. 송하원, 조영혁, 김인순, 변근주, "앵커볼트 인발거동의 파괴역학적 해석," 산업기술연구소 논문집, 제 28집, 제 2권, 45호, pp. 173-184., 1996.
6. Song, H.-W., Shim, B., Woo, S.-M. and Koo., J.-C. "Progressive Fracture Analysis of Concrete using Finite Elements with Embedded Displacement Discontinuity," Str. Eng. and Mechanics, Vol. 11, No. 6, pp. 591-604, 2001.
7. TNO Building and Construction Research, DIANA Finite Element Analysis; User's Manual, Release7, Delft, Netherlands, 1988.
8. Klingner, R. E. and Mendonca, J. A., "Shear Capacity of Short Anchor Bolts and Welded Stud : A Literature Review," ACI Journal . Vol. 79, No. 5, pp. 339-349, 1983.