



스터럽 보강 선설치 앵커의 지진모의실험에 의한 동적 전단 저항강도 평가

김태형¹ · 박용명^{2*} · 강충현³ · 이종한⁴

¹박사과정, 부산대학교, 토목공학과, ²교수, 부산대학교, 토목공학과
³공학박사, 전남대학교, 해양토목공학과, ⁴조교수, 대구대학교, 토목공학과

Dynamic Shear Strength of Stirrup-reinforced Cast-in Anchors by Seismic Qualification Tests

Kim, Tae Hyung¹, Park, Yong Myung^{2*}, Kang, Choong Hyun³, Lee, Jong Han⁴

¹Ph.D. student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

²Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

³Ph.D., ChonNam National University, Dept. of Marine and Civil Engineering, Yeosu, 59626, Korea

⁴Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongbuk, 38453, Korea

Abstract - An experimental study was conducted to evaluate the breakout strength of stirrup-reinforced cast-in anchors under dynamic shear loadings. The shear loadings were applied in the manner specified in the ACI 355.2 and ETAG 001 for the seismic qualification tests. Test specimens were fabricated with M36 anchor (edge distance, 180mm) reinforced with D10 stirrups (spacing, 100mm). The specimens reached almost the breakout strength and thereafter fracture of anchor occurred. Additional tests with M42 anchor (edge distance, 160mm) reinforced with D6 bars (spacing, 100mm) were also conducted. The experimental results showed that the dynamic shear strength was not less than the static resistance. Based on the test results, it was shown that ACI 318 and ETAG 001 specifications estimate the breakout strength of stirrup-reinforced anchors conservatively as more reinforcement is provided.

Keywords - Cast-in anchor, Stirrup reinforcement, Seismic qualification tests, Shear loading, Dynamic breakout strength

1. 서론

강재 앵커는 강재 기둥이나 플랜트의 기기 등을 콘크리트 기초에 정착시키는데 중요한 연결 수단이며, 특히 대형 강재 기둥이나 기기의 정착은 선설치 앵커(cast-in anchor)가 대체로 사용된다. 설계기준^{[1],[2],[3],[4]}에서 제시하고 있는 바와 같이 인장하중 또는 전단하중을 받는 앵커의 대표적인 파괴

모드는 강재 앵커 본체의 연성파괴(ductile failure)와 콘(cone) 형태의 콘크리트 소성파괴(plastic failure), 즉 파열파괴(breakout failure)이다. 콘크리트 파열파괴강도는 2000년 전후 파괴콘을 35°의 피라미드 형상(전단의 경우 half-pyramid 형상, Fig. 1 참조)으로 이상화한 CCD(Concrete Capacity Design) 방법이 미국에서는 ACI 318-02^[1]에, 유럽에서는 ETAG 001 Annex C^[4]에 각각 채택되었다.

이후 ACI 318-08^[2]에 스템(stirrup) 보강(Fig. 2 참조, ACI 기준에서는 Edge and Anchor Reinforcement로 칭함) 앵커에 대한 규정이 처음으로 제시되었다. 이 때 앵커의 저항강도는 무근 콘크리트의 파열파괴강도 또는 철근만의 저항강도(콘크리트의 저항을 무시)로 고려토록 하고 있다. 반면, ETAG 001 Annex C에서는 철근 보강 앵커의 전단하중에 대한 저항강도를 무근 콘크리트의 파열파괴강도를 기본으로

Note.-Discussion open until October 31, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 18, 2017; revised February 13, 2018; approved on February 20, 2018.

Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-510-2350 Fax. +82-51-513-9596

E-mail. ympk@pusan.ac.kr

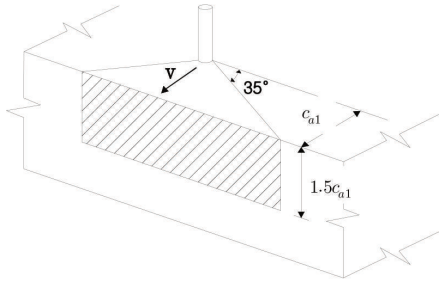


Fig. 1. Idealized breakout model for shear loading in CCD method

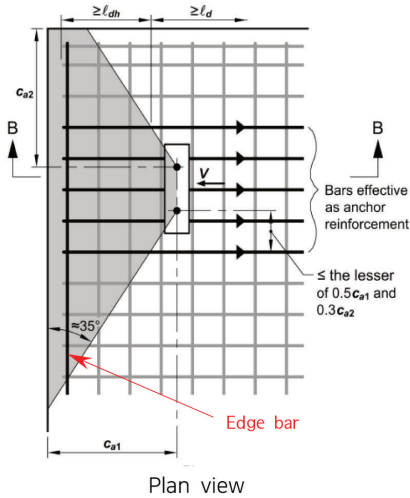


Fig. 2. Edge and anchor reinforcement^[3]

하고 있다. 각 기준별 스테럽 보강 앵커의 전단 저항강도에 대해서는 2.2절에 요약하였다.

한편 지진 시 콘크리트 파열파괴강도에 대해 미국에서는 1994년 Northridge 지진 이전에는 지진하중을 단기하중으로 간주하여 인장하중 및 전단하중에 대한 동적 저항강도를 33% 증가시키는 것을 허용하였으나, Northridge 지진 시 앵커의 파괴가 많이 발생됨에 따라 ACI 318-02부터 ACI 318-08 기준까지는 정적 강도의 75%로 저감하였다. 이후 ACI 318-11^[3]에서는 인장하중에 대해서는 여전히 정적 강도의 75% 강도를 적용하도록 한 반면, 전단하중에 대해서는 별도의 설명 없이 75% 강도로 저감하는 규정을 삭제하였다. 참고로 현재 국내 기준^[5]은 ACI 318-08을 바탕으로 하였기 때문에 75% 저감을 적용하고 있다. 한편, 철근보강 앵커의 동적 저항강도에 대해서는 ACI 318 기준과 ETAG 001 Annex C에서 별도의 언급은 없고, 동적 강도 평가 방안으로 미국 ACI 355.2^[6]와 유럽 ETAG 001 Annex E^[4]에서는 반복하중에 의한 지진모의실험(seismic qualification test) 방법을 제시하고 있다.

근래 들어 지진이 빈번해지고 그 규모도 커짐에 따라 지진 하중에 대한 앵커의 저항강도를 적절히 평가하는 것이 필요한 실정이다. 지진모의실험에 의한 비보강 및 헤어핀 형상 철근 보강 앵커의 동적강도 평가를 위한 연구는 Park *et al.*^{[7],[8]}에 의해 수행된 바 있다. 반면, 스테럽 보강은 실제 실무에서 흔히 사용되고 있음에도 불구하고 동적 저항강도 평가를 위한 연구 사례가 극히 제한적이다.

본 연구의 목적은 스테럽 보강 앵커의 정적 강도 평가를 위한 선행 연구^[9]에 이어 지진모의실험^{[4],[6]} 방식의 동적 반복 전단하중에 의해 동적 파열파괴강도를 평가하는 것이다. 이를 위해 M36(직경 36mm) 강재 앵커를 사용하여 연단거리(c_{a1})를 180mm, 스테럽 철근은 D10, 스테럽 간격은 100mm인 콘크리트 시험체를 제작하고 동적 전단 저항강도의 평가를 위한 실험을 수행하였다. M36 앵커 실험에서 모두 앵커의 파단이 최종 발생하였으며, 이에 M42 앵커를 사용하여 연단거리 160mm, 스테럽 철근 D6, 스테럽 간격 100mm로 추가 실험을 수행하였다.

2. 기존 연구 및 설계 기준

2.1 기존 연구

스터럽 보강 앵커에 대한 연구 사례는 정적 및 동적하중에 대한 실험 모두 매우 부족한 실정이다. 정적하중에 대한 전단 저항강도에 대한 기존 연구 사례는 선행 논문^[9]에 제시하였으며, 실험 연구의 부족으로 현재 기준들이 스테럽 보강 앵커의 전단 저항강도를 매우 안전 측으로 설정하고 있음을 알 수 있었다.

지진 시 저항강도 평가를 위한 동적 실험 사례는 더욱 드문 실정이다. Petersen *et al.*^[10]은 스테럽 보강 M19 및 M25 앵커에 대해 동적 전단 저항강도의 간접적인 평가 방안으로 Fig. 3에 보인 바와 같이 변위제어 방식으로 정적 반복하중에 의한 실험을 수행하였다. 이들이 수행한 실험 결과를 Table 1에 정적 단조하중 실험 결과와 함께 요약하였다. 이들의 실험에 의하면 스테럽 보강 상재에 따라 차이는 있지만 반복하중에 의한 저항강도가 단조하중에 비해 M19 앵커에서는 72%, M25 앵커에서는 87~93% 수준의 강도를 보였다. 단, 이들의 실험에서는 모든 시험체에서 앵커의 파단으로 실험이 종료되었는데, 단조하중 실험에서는 최대하중에 거의 도달한 후 앵커가 휨인장 형태로 파괴된 반면, 반복하중 실험에서는 전

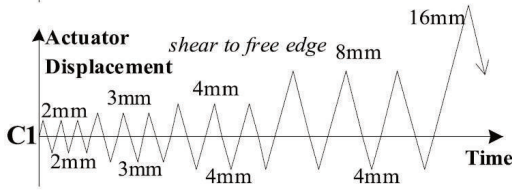


Fig. 3. Reversed cyclic loading profile by Petersen et al.^[10]

Table 1. Test results of stirrup-reinforced anchors by Petersen et al.^[10]

Anchor diameter	Reinf. type (No. of bars and spacing)	Loading type	Peak load (kN)	P _{mean} (kN)
M19	2-D10@51mm	Monotonic	98.7 100.0	99.4
		Cyclic	74.2 68.9	71.6
M25	4-D13@51mm	Monotonic	174.2 196.1	185.1
		Cyclic	172.2 159.8 152.8	161.6
M25	2#4+4#3 @76mm	Monotonic	170.8 154.4 148.6	158.0
		Cyclic	149.5 141.3 150.7	147.2

단 형태의 피로 파괴가 발생하였다. 이에 이들은 스티럽 보강 앵커에서는 파열파괴보다 앵커파괴가 설계를 지배한다고 제안하였다. 그러나 이들의 결과를 파열파괴강도로 간주하기는 곤란하다고 판단된다.

한편 Park et al.^[11]은 M20 앵커, 연단거리 120mm, 스티럽 철근은 D6, 스티럽 간격은 100mm인 시험체에 대해 1Hz의 편진하중(pulsating load)으로 정적 대비 동적 전단 저항강도를 평가하였다. 편진하중은 정적 저항강도의 60% 하중으로 시작하여 하중을 키워가면서 파괴 시까지 가력하였다. 하중 스텝별 반복회수는 15 cycle로 하였으며, 3개 시험체에 대한 평균 동적 전단 저항강도(39.0kN)는 정적 저항강도(39.2kN)와 거의 동등한 결과를 얻었다.

2.2 설계 기준

스티럽 보강 앵커의 저항강도는 철근 및 콘크리트의 파열 파괴 저항강도와 앵커 본체의 파괴 강도로부터 결정된다. 본

논문에서는 전자의 강도를 평가하는 것이 목적이므로 이에 대해 주요 기준을 요약하기로 한다.

2.2.1 ACI 318

ACI 318 기준에서는 철근으로 보강한 앵커의 파열파괴에 대한 저항강도를 무근 콘크리트의 저항강도 또는 철근만의 저항강도 중 큰 값을 적용토록 하고 있다. 먼저, 콘크리트 파열파괴강도는 ACI 318-02와 ACI 318-11 강도식 중 작은 값을 취하며, 비균열 콘크리트(사용하중조합에 대해 콘크리트 균열 발생이 예상되지 않는 경우)의 평균 파열파괴강도는 다음 식과 같다.

$$ACI\ 318-02 : V_c = 1.1 \left(\frac{l_e}{d_o}\right)^{0.2} \sqrt{d_o} \sqrt{f_{ck}} c_{al}^{1.5} (N) \quad (1a)$$

$$ACI\ 318-11 : V_c = 7.0 \sqrt{f_{ck}} c_{al}^{1.5} (N) \quad (1b)$$

여기서, c_{al} : 앵커 연단거리(mm), d_o : 앵커 외경(mm), l_e : 유효지압길이(mm)로서 최대 $8d_o$ 로 제한, f_{ck} : 원통형 표준 공시체의 압축강도(MPa)이다.

한편, 스티럽 철근에 의한 전단 저항강도는 Fig. 2에 보인 바와 같이 $0.5c_{al}$ 범위 내의 철근만이 항복까지 저항하는 것으로 한다. 즉,

$$V_u = A_s f_y (N) \quad (2)$$

여기서, A_s : $0.5c_{al}$ 이내의 스티럽 철근 단면적(mm²), f_y : 철근의 항복강도(N/mm²)이다.

2.2.2 ETAG 001

유럽에서는 앵커의 저항강도를 ETAG 001 Annex C 기준에 따르고 있으며, 철근 보강 시에도 무근 콘크리트의 저항강도를 적용하고 있다. 여기서 비균열 콘크리트의 평균 파열 파괴 강도는 다음 식과 같다.

$$V_c = 3.0 d_o^\alpha h_{ef}^\beta \sqrt{f_{cx}} c_{al}^{1.5} (N) \quad (3)$$

여기서, c_{al} : 앵커 연단거리(mm), d_o : 앵커 외경(mm), h_{ef} : 앵커 매입깊이(mm), $\alpha = 0.1(h_{ef}/c_{al})^{0.5}$, $\beta = 0.1(d_o/c_{al})^{0.2}$, f_{cx} : 입방형 공시체 압축강도($\approx 1.18f_{ck}$ MPa)이다.

3. 실험 방법

3.1 시험체 제원

본 연구에서는 동적 저항강도를 평가하기 위해 앵커 직경 36mm(M36), 연단거리(c_{dl}) 180mm, 매입깊이(h_{ef}) 280mm 인 콘크리트 시험체 블록(1200×1200×900mm) 2개를 Fig. 4에 보인 바와 같이 제작하였다. 콘크리트 압축강도(f_{ck})는 27MPa로 설정하였으며, 스테럽 및 단부철근은 D10 ($A_s = 71.33 \text{ mm}^2$) 이형철근을 사용하였다. 스테럽의 간격은 100mm로 하였으며 1개의 콘크리트 블록에 4개의 앵커를 설치하기 위해 스테럽은 동일 블록에서 상·하 직각으로 교차 설치하였다. 이 때 스테럽의 위치에 따라 순뿔개는 20~30mm로 계획하였다(Fig. 4(b), (c) 참조). 각 스테럽 철근의 변형률 측정을

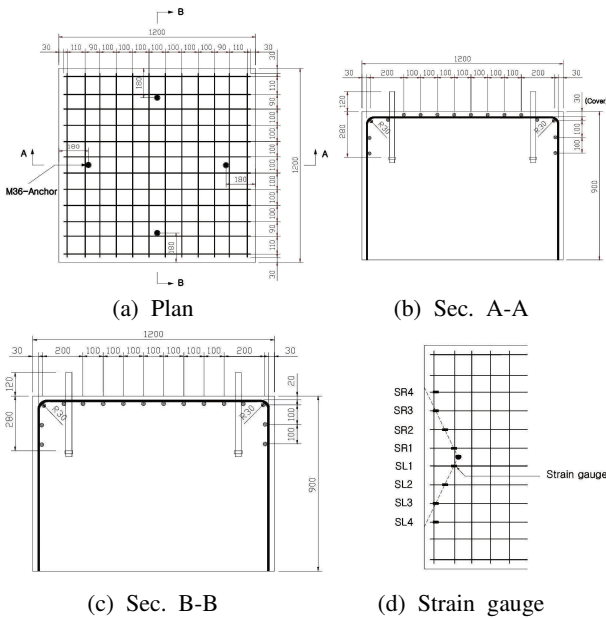


Fig. 4. Configuration of test block: M36 anchor, D10 stirrup

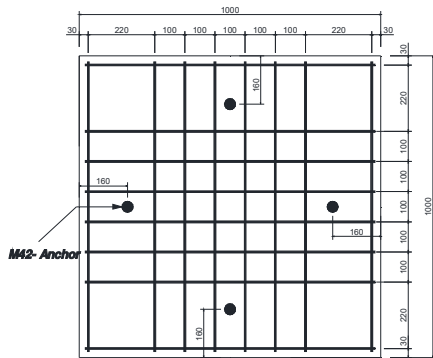


Fig. 5. Configuration of test block: M42 anchor, D6 stirrup

위해 Fig. 4(d)에 보인 바와 같이 앵커 좌우 4개 철근에 변형률게이지를 부착하였다.

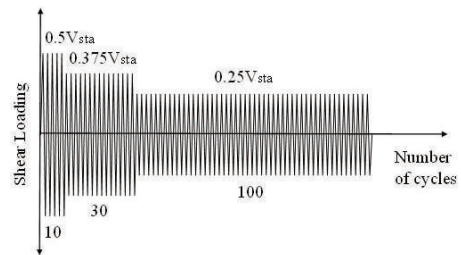
뒤의 4장에서 제시하겠지만, M36 앵커에 대한 실험에서 콘크리트 파열파괴가 상당히 진전은 되었으나 앵커 본체의 파단으로 실험이 모두 종료되었다. 이에 Fig. 5에 보인 바와 같이 M42 앵커, 연단거리(c_{dl}) 160mm, 매입깊이(h_{ef}) 280mm인 시험체 블록(1000×1000×700mm) 2개를 추가로 제작하였다.

3.2 재료 강도

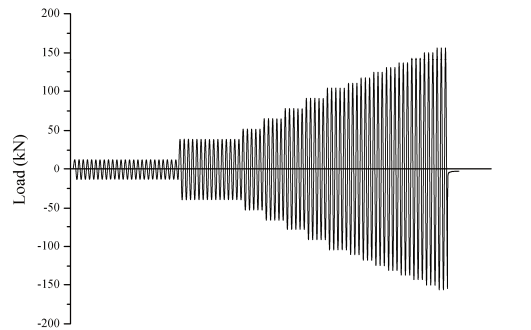
M36 앵커와 M42 앵커 시험체의 콘크리트 압축강도(실험 시점), 철근과 앵커의 항복강도(f_y, F_y)와 인장강도(f_u, F_u)를 각각 Table 2에 제시하였다. M36 앵커의 인장실험에서는 선형 상태에서 응력 640 MPa일 때 파단이 발생하여 항복강도를 이 값으로 제시하였다.

Table 2. Strength of materials (unit: MPa)

Conc.	M36 anchor				M42 anchor				
	D10	Anchor			Conc.	D6	Anchor		
f_{ck}	f_y	f_u	F_y	F_u	f_{ck}	f_y	f_u	F_y	F_u
30.8	445	542	640	-	28.6	339	560	505	641



(a) Loading pattern specified in ACI 355.2 and ETAG 001-C1 Zone



(b) An example for simulated loading for C2 Zone

Fig. 6. Alternate loading patterns

3.3 지진모의실험 기준에 의한 가력 절차

본 연구에서는 앵커의 동적 저항강도의 평가를 위해 미국 ACI 355.2^[6]와 유럽의 ETAG 001 Annex E^[4] 기준에서 제시한 지진모의실험(seismic qualification test) 방법을 채택하였다. ACI 355.2 기준은 Fig. 6(a)에 보인 바와 같이 0.2~2.0Hz 주기로 반복하중을 가력한 후 정적재하를 통해 중국 저항강도를 평가하는 방식이다. 한편, ETAG 001 기준은 지진모의실험에 의한 강도 평가를 중·약진 지역(C1 지역)과 강진 지역(C2 지역)에 대해 구분하여 제시하고 있다. C1 지역에 대한 가력 방법은 ACI 355.2와 동일하며, C2 지역에 대해서는 정적 저항강도의 10%하중 25회, 30%하중 15회, 40%하중 5회, 50%하중 5회, 60%하중 5회, 70%하중 5회,

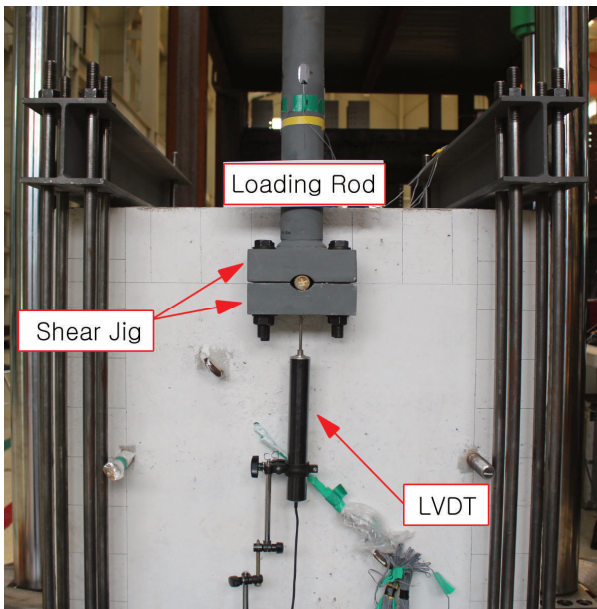


Fig. 7. Setup of dynamic shear test

80%하중 5회, 이후 5%씩 하중을 증가시켜 3회씩 파괴 시까지 점증 가력하는 방식이다. 본 연구에서의 실제 가력 예(C2 지역 방식)를 Fig. 6(b)에 예시하였다.

M36 앵커 실험은 C1 및 C2 방식 모두 수행하였으며, M42 앵커에서는 여건 상 C2 방식만 수행하였다. 시험체의 설치는 Fig. 7에 제시하였으며, 동적 가력 시 주파수는 모두 0.2Hz를 적용하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 하중-변위 선도 및 파괴 형상

정적 실험에 의한 M36 및 M42 앵커 시험체의 하중-변위 선도를 Fig. 8(a), (b)에 예시하였다. M36 앵커 시험체는 콘크리트의 파열파괴가 육안으로 확인될 정도로 이루어진 이후 앵커 본체의 파단이 발생하였다. 앵커 본체 파단 원인에 대해서는 선행논문^[9]에 제시하였는데, 연성 부족으로 인한 휨인장 파괴로 분석되었다. 반면, 스테럽 직경 및 연단거리가 상대적으로 작은 M42 앵커 시험체는 앵커의 파단은 발생하지 않고 콘크리트 파열파괴로 실험이 종료되었다. 따라서 Fig. 8(a)에 비해 Fig. 8(b)에서는 소성구간까지 도달한 이후 철근이 파단될 때까지 연성 거동을 보였다.

한편 M36 앵커에 대해 Fig. 6(a)의 C1 방식 실험에서는 반복하중 재하 종료 후 콘크리트의 균열은 거의 발생하지 않았으며, 이후 정적 가력에 의한 하중-변위 선도는 Fig. 8(c)에 보인 바와 같다. 즉, 정적 실험과 유사한 형상을 보였으며 역시 앵커의 파단으로 실험이 종료되었다.

M36 및 M42 앵커에 대해 C2 방식 가력(Fig. 6(b))에 의한 하중-변위 선도들을 Fig. 9에 제시하였다. Fig. 9에서 (+)

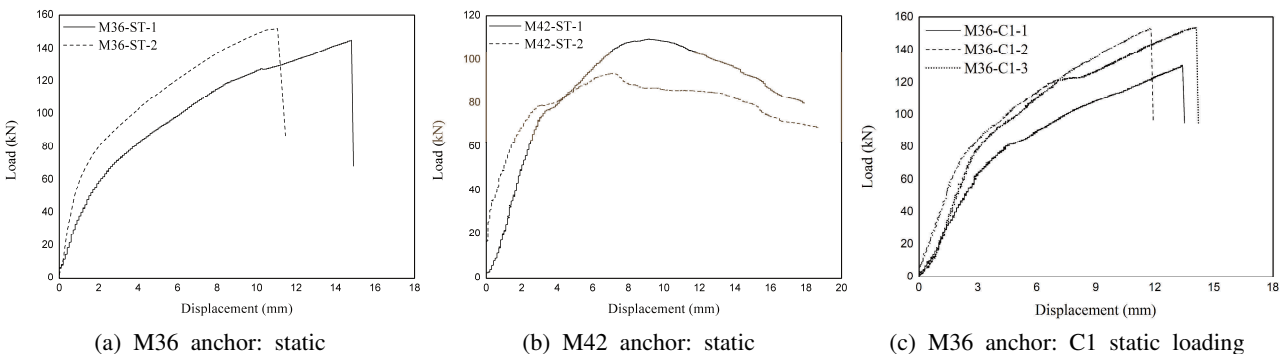


Fig. 8. Load-displacement curve: static and C1 loading tests

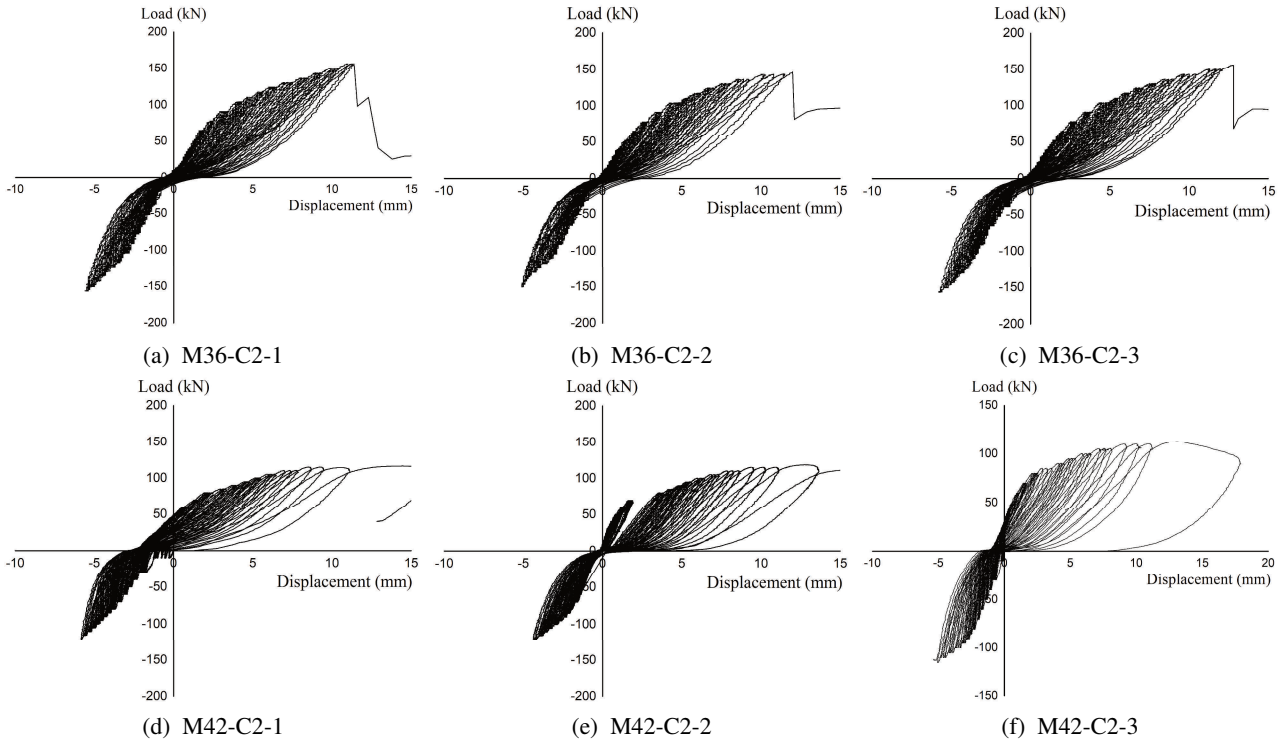


Fig. 9. Load-displacement curve: C2 type loading

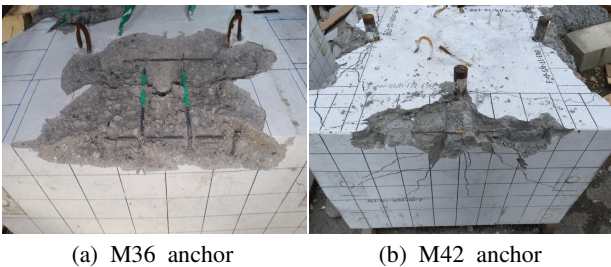


Fig. 10. Fracture shapes of specimens: C2 type loading

하중과 변위는 콘크리트 블록의 단부 방향에 해당된다. C2 방식 가력 실험에서도 M36 앵커 시험체는 파열파괴가 상당히 발생한 후 앵커의 파단으로 실험이 종료되었다. M36 및 M42 앵커의 실험에서 최종 파괴 예를 Fig. 10에 제시하였으며, 정적 및 C1 방식에서도 파괴 형상은 대체로 유사하였다. 최대 하중에 도달한 시점에서 스테럽 하부 콘크리트는 비교적 건전한 상태를 유지하였는데(특히 M36 시험체), 이는 D10 철근의 스테럽과 단부 철근(edge bar)이 하부 콘크리트를 적절히 구속하였기 때문으로 판단되었다.

4.2 정·동적 파열 파괴강도

M36 및 M42 앵커 시험체의 정·동적 실험에 의한 파열파

괴강도를 Table 3에 정리하였다. Table 3에 제시된 강도는 단부 방향으로의 최대하중을 기준으로 하였다. M36 앵커 시험체는 정·동적시험 모두 앵커 본체의 파단으로 실험이 종료되었으나, 파열파괴가 상당히 진전된 것으로 확인되어 앵커 파단 시 하중을 파열파괴강도로 간주하였다. 한편 M36 앵커 시험체들(스터립 철근 : D10, $f_y=445\text{MPa}$, 연단거리 180 mm)에 비해 M42 앵커 시험체들이 낮은 파열파괴강도를 보이는 것은 상대적으로 작은 단면적의 스테럽 철근(D6) 사용, 철근 항복강도(339MPa)의 차이 그리고 연단거리(160mm)가 짧은 것에 기인하는 것으로 평가되었다.

Table 3 및 Fig. 8로부터 시험체들 중 M36-C1-1은 M36-C1-2 및 -3에 비해 최대하중이 18%, M42-ST-1은 M42-ST-2에 비해 17% 낮은 값을 보인다. 이는 실험 방법에 의한 차이보다는 콘크리트 재료 특성 상 인장 강도의 변동성, 제작 오차에 의한 스테럽의 덮개 차이 등에 의한 것으로 판단되며, M36 시험체는 앵커의 휨인장 파괴 발생도 이러한 차이를 보이는 원인으로 판단된다.

Table 3으로부터 M36 앵커 시험체의 C1 방식에 의한 저항강도는 정적 강도의 0.98배로서 거의 유사한 강도를, C2 방식에 의한 저항강도는 1.03배로 역시 거의 유사한 강도를 보인다. 한편, M42 앵커에서는 C2 방식에 의한 저항강도가

Table 3. Summary of static and seismic qualification test results

Anchor	Specimen	Loading	f_{ck} (MPa)	Stirrup	c_{a1} (mm)	V_u (kN)	Mean V_u (kN)
M36	M36-ST-1	Static	30.8	D10@100	180	145.1	148.6
	M36-ST-2					152.1	
	M36-C1-1	Dynamic (C1 type)				130.3	145.6
	M36-C1-2					153.1	
	M36-C1-3					153.4	
	M36-C2-1	Dynamic (C2 type)				156.5	152.9
M36-C2-2	146.2						
M36-C2-3	155.9						
M42	M42-ST-1	Static	28.6	D6@100	160	109.4	101.6
	M42-ST-2					93.8	
	M42-C2-1	Dynamic (C2 type)				116.5	116.0
	M42-C2-2					118.6	
	M42-C2-3					112.9	

Table 4. Measured strain of stirrups

Specimen ID	Load (kN)	Strain ($\times 10^{-6}$)							
		SR1	SL1	SR2	SL2	SR3	SL3	SR4	SL4
M36-ST-1	145.1	4,571	4,114	1,847	1,767	131	769	-142	-184
M36-ST-2	152.1	3,770	2,230	1,394	1,249	161	85	237	-62
Average	148.6	3,671		1,564		287		-38	
M36-C2-1	156.5	2,519	3,271	1,424	1,597	514	638	224	8
M36-C2-2	146.2	2,365	2,269	1,507	862	664	474	41	-274
M36-C2-3	155.9	3,725	5,502	1,578	1,779	369	698	55	56
Average	152.9	3,275		1,458		560		18	
M42-ST-1	90.0 ¹⁾	1,790	2,091	1,477	1,001	-1,850	-2,277	N/A	N/A
M42-ST-2		3,256	3,143	642	1,230	-3,249	-2,045		
Average		2570		1088		-2355		-	
M42-C2-1	90.0 ²⁾	1,648	2,215	792	728	-1,581	-2,394	N/A	N/A
M42-C2-2		3,965	2,115	1,104	1,264	-1,811	-2,503		
M42-C2-3		1,964	2,756	1,295	1,142	-1,683	-1,534		
Average		2,444		1,054		-1,918		-	

Note: 1) Average maximum load is 101.6kN, 2) Average maximum load is 116.0kN

정적 강도 대비 1.14배 큰 값을 보였다. 시험체 개수가 제한적이지만, 동적 강도가 정적 강도에 비해 낮지는 않고 동등 또는 조금 큰 수준의 강도를 갖는 것으로 평가되었다. 따라서 스티럽 보강 앵커의 동적 파열과괴강도는 정적 강도로 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 스티럽 철근 변형률 분석

M36 및 M42 앵커 시험체의 정적 및 C2 가력 방식 실험으로부터 측정된 스티럽 철근의 변형률을 Table 4에 제시하였다. D6 철근으로 보강한 M42 앵커 시험체에서는 최대하중에

서 철근의 변형률이 매우 커서 정적 최대 하중의 약 90% 수준인 90kN에서의 변형률로 분석하기로 한다.

앵커 좌우 스티럽의 평균 변형률을 Fig. 11에 도시하였다. 스티럽 철근의 항복변형률은 M36 앵커 시험체에서는 $\epsilon_y = 2,235 \times 10^{-6}$, M42 시험체에서는 $\epsilon_y = 1,700 \times 10^{-6}$ 이다. Fig. 11에서 앵커로부터 $0.5c_{a1}$ 이내의 스티럽은 항복에 이르고 앵커로부터 거리가 증가함에 따라 변형률은 선형적으로 감소하는 것을 보인다. 따라서 ACI 318 기준에서 철근의 저항강도로 고려할 때 $0.5c_{a1}$ 이내의 스티럽만을 고려하는 것은 안전측의 접근이 됨을 알 수 있다.

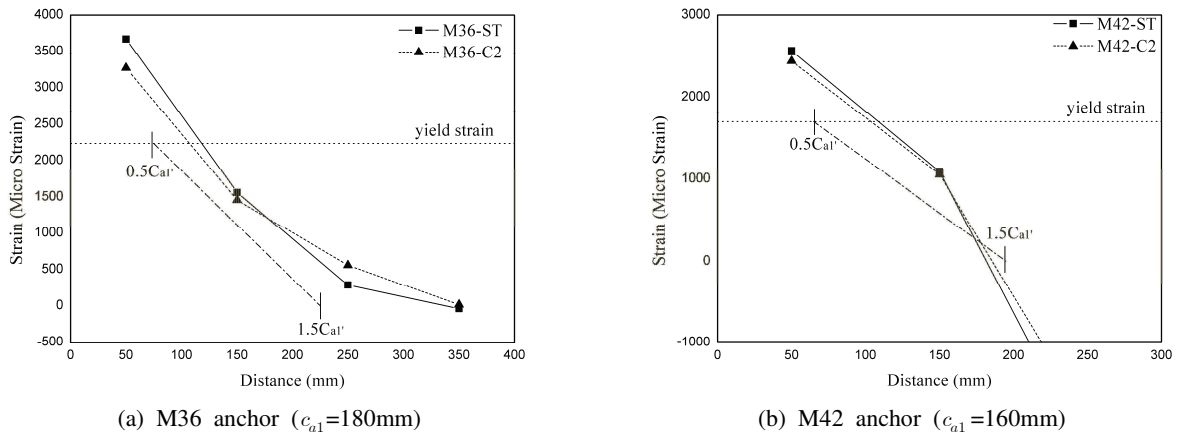


Fig. 11. Strains of the stirrups

Table 5. Comparison of the shear strength

(unit of V : kN)

Test specimen	Stirrup reinf.	f_{ck} (MPa)	c_{a1} (mm)	c_{a1}' (mm)	f_y (MPa)	V_{test}	ACI 318-11			ETAG 001		Method-2	
							V_c	V_u	$\frac{V_{test}}{V_{ACI}}$	V_c	$\frac{V_{test}}{V_{ETAG}}$	V_u	$\frac{V_{test}}{V_u}$
							Eq. (1b)	Eq. (2)		Eq. (3)		Eq. (4)	
M36 anchor	8-D10 @100mm	30.8	180	150	445	148.6	93.8	63.5	1.48	102.7	1.45	136.1	1.09
M42 anchor	6-D6 @100mm	28.6	160	130	339	101.6	75.8	21.5	1.34	92.4	1.10	89.0	1.14

4.4 스테럽 보강 앵커의 파열파괴강도 평가 방안

앞에서 제시된 바와 같이 스테럽 보강 앵커의 동적 전단 저항강도는 정적강도로 고려할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, ACI 318 및 ETAG 001 기준에 의한 정적 저항강도를 Table 5에 제시하였다. 이로부터 콘크리트의 파열파괴강도(식 (1)) 또는 $0.5c_{a1}$ 이내의 스테럽의 항복강도(식 (2))로 고려하는 ACI 318 및 콘크리트의 파열파괴강도(식 (3))로 고려하는 ETAG 001은 실제 저항강도에 비해 다소 안전측으로 고려하고 있다. 참고로 선행 논문^[9]에서 Petersen *et al.*^[10]의 실험 결과들(Table 1 참조)과 현재 기준들에 의한 강도를 비교하여 제시하였는데, 현재 기준들은 스테럽 보강 정도에 따라 최대 2배 이상 안전측으로 평가하였다.

Table 5에서 M36-D10에 비해 M42-D6 시험체에서 안전측으로 평가하는 정도가 감소하는데, 이는 스테럽 철근의 제원이 주요 변수가 됨을 의미한다. 따라서, 스테럽 철근이 하부 콘크리트를 적절히 구속함으로써 보강에 따른 저항강도 향상을 위해서는 스테럽 제원, 즉 소정의 직경과 최대 간격의 제한이 필요함을 의미한다. 이에 대한 정량적 기준을 수립하기 위해서는 보다 더 많은 실험데이터가 축적되어야

할 것이나, 본 연구에 의하면 스테럽 철근의 최소 직경은 D10, 간격은 100mm 이하로 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

선행 논문^[9]에서 제시한 스테럽 보강 앵커의 전단력에 대한 저항강도 평가 방안(Method-2)을 적용하여 평가한 결과를 Table 5에 함께 제시하였다. 본 방법은 콘크리트의 파열파괴강도와 스테럽의 기여를 함께 고려하는 개념이다. 이는 최대 하중에 도달한 시점에서 스테럽 하부의 콘크리트가 비교적 건전한 상태인 점과 철근이 CCD 이론의 35° 콘크리트 파괴면(Fig. 1)에서 전단으로 저항하되 Fig. 11에 보인 바와 같이 앵커로부터 $1.5c_{a1}'$ (c_{a1}' 은 c_{a1} 에서 단부철근의 뒷개를 뺀 거리) 이내의 스테럽은 거리에 반비례하여 저항하는 것에 근거한 것이다. 이로부터 본 방법에 의한 저항강도는 다음 식^[9]과 같다.

$$V_u = V_c + \sum V_{ui} = V_c + \sum \frac{1.5c_{a1}' - s_i}{1.5c_{a1}'} 0.6f_y A_s \quad (4)$$

여기서, V_c : 식 (1)의 콘크리트 파열파괴강도

V_{ui} : 각 스테럽의 저항강도

s_i : 앵커 중심에서 스테럽까지의 거리(mm)

Table 6. Summary of breakout shear strength for unreinforced and reinforced anchors

Specimens	Loading	Anchor	f_{ck} (MPa)	c_{a1} (mm)	Rebar (F_y)	V_{test} (kN)	$V_{dyn.}/V_{sta.}$
Unreinforced ^[7]	Static dynamic	M30	27.0	150	none	61.9	1.008
						62.4	
Hairpin reinforced	Static dynamic	M30	25.7	150	D10 (502MPa)	81.0	0.963
						78.0	
Stirrup reinforced (C2 type)	Static dynamic	M36	30.8	180	D10 (445MPa)	148.6	1.029
						152.9	
	Static dynamic	M42	28.6	160	D6 (339MPa)	101.6	1.142
						116.0	

5. 비보강 앵커 및 철근보강 앵커의 동적 저항강도에 대한 종합 분석

본 연구진이 그 동안 수행한 비균열콘크리트에 매입된 선 설치 비보강 앵커^[7], 헤어핀 형상 철근보강 앵커^[8] 그리고 본 논문의 스티럽 보강앵커의 정적 강도 대비 지진모의실험에 의한 동적 전단 파열파괴강도에 대한 결과를 Table 6에 요약하였다. 이로부터 비보강 및 철근 보강 앵커의 동적 파열파괴 강도는 정적 강도와 동등하게 설정할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 국내 기준^[5]에서 제시하고 있는 정적 강도 대비 동적 강도를 75%로 저감하는 규정은 향후 삭제 가능한 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 ACI 355.2 및 ETAG 001 (Annex E)에 제시된 지진모의실험 방식에 의한 스티럽 보강 앵커의 동적 전단하중에 대한 저항 강도를 평가하기 위한 실험 연구를 수행하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 스티럽 보강 앵커의 동적 전단 저항강도는 정적 강도와 최소 동등한 수준의 강도를 보였다. 이로부터 동적 강도는 정적 강도로 고려할 수 있을 것으로 나타났다.
- (2) 스티럽 보강 앵커는 최대 하중에 도달하였을 때 스티럽과 단부철근에 의한 구속 효과로 하부의 콘크리트는 비교적 건전한 상태를 보였다. 또한 스티럽 변형률의 측정으로부터 앵커 중심으로부터 거리에 반비례하여 전단하중에 저항하는 것으로 분석되었다.
- (3) 스티럽 보강 앵커의 저항강도를 무근 콘크리트의 파열 파괴강도 또는 $0.5c_{a1}$ (c_{a1} : 앵커 연단거리) 이내의 철근의 저항강도로 고려하는 ACI 318 기준은 실제 저항강도를

안전측으로 평가하는 것으로 나타났다. 이는 실험으로부터 확인된 콘크리트와 철근이 함께 전단하중에 저항하는 현상을 고려하지 않았기 때문으로 분석되었다.

- (4) M42 앵커 시험체는 D6 철근을 사용함에 따라 D10 철근을 사용한 M36 앵커 시험체에 비해 스티럽의 저항 기여가 낮은 결과를 보였다. 따라서, 실제 적용에서는 스티럽 철근의 최소 직경과 최대 간격에 대한 제한이 필요하며, 본 연구에 의하면 최소 D10 이상, 간격은 100mm 이하가 필요할 것으로 판단된다.

본문에서 언급한 바와 같이 현재 ACI 318 및 ETAG 001 기준이 스티럽 보강 앵커의 저항강도를 다소 안전측으로 설정하고 있는 것은 실험 데이터의 부족에 기인한다. 따라서, 스티럽 보강 앵커의 콘크리트와 철근에 의한 저항강도를 보다 합리적으로 설정하기 위해서는 콘크리트와 앵커의 강성비 (c_{a1}/d_o), 스티럽의 상세(직경 및 간격) 등의 변수에 대해 더욱 많은 실험데이터가 필요한 실정이다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 중견연구자지원사업(핵심연구: 개인)(과제번호: 2013R1A2A2A01013872)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

[1] American Concrete Institute (2001) *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)*, Appendix D: Anchoring to Concrete,

- USA.
- [2] American Concrete Institute (2007) *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary, Appendix D: Anchoring to Concrete*, USA.
- [3] American Concrete Institute (2011) *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary, Appendix D: Anchoring to Concrete*, USA.
- [4] European Organization for Technical Approvals (2013) *Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete (ETAG 001, 2nd Ed.)*, Belgium.
- [5] 한국콘크리트학회(2012) 콘크리트구조기준 해설, 부록 II: 콘크리트용 앵커, 기문당.
Korean Concrete Institute (2012) *Concrete Structure Design Code and Commentary, Appendix II: Anchoring to Concrete*, Kimoondang, Korea (in Korean).
- [6] American Concrete Institute (2000) *Evaluating the Performance of Post-Installed Mechanical Anchors in Concrete (ACI 355.2-00)*, USA.
- [7] 박용명, 김태형, 김동현, 조성훈, 이종한(2015) 지진모의실험에 의한 비균열 및 균열콘크리트에 매입된 비보강 선설치 앵커의 전단 저항강도 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제3호, pp.347-357.
Park, Y.M., Kim, T.H., Kim, D.H., Jo, S.H., and Lee, J.H. (2015) Shear Resistance of Unreinforced Cast-in-Place Anchors in Uncracked and Cracked Concrete by Seismic Qualification Tests, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.3, pp.347-357 (in Korean).
- [8] 김동현, 박용명, 김태형, 조성훈, 강충현(2015) 헤어핀 보강 선설치앵커의 정적 및 지진모의실험에 의한 전단 저항강도 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제3호, pp.333-345.
Kim, D.H., Park, Y.M., Kim, T.H., Jo, S.H., and Kang, C.H. (2015) Shear Strength of Hairpin Reinforced Cast-in-Place Anchors by Static and Seismic Qualification Tests, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.3, pp.333-345 (in Korean).
- [9] 박용명, 조성훈, 김태형, 강충현, 김재봉(2016) 스테럽 보강 선설치 앵커의 정적 전단하중에 대한 저항 강도, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제28권, 제1호, pp.1-12.
Park, Y.M., Jo, S.H., Kim, T.H., Kang, C.H., and Kim, J.B. (2016) Static Shear Strength of Cast-in Anchors with Stirrup Reinforcements, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.1, pp.1-12 (in Korean).
- [10] Petersen, D., and Zhao, J. (2013) Design of Anchor Reinforcement for Seismic Shear Loads, *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute, Vol.110, No.1, pp.53-62.
- [11] 박용명, 강문기, 노진경, 주호중, 강충현(2014) 선설치앵커의 동적 전단하중에 대한 저항강도: 철근보강 앵커, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제1호, pp.21-30.
Park, Y.M., Kang, M.K., Roh, J.K., Ju, H.J., and Kang, C.H. (2014) Shear Resistance of CIP Anchors Under Dynamic Loading: Reinforced Anchor, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.1, pp.21-30 (in Korean).

요 약 : 스테럽 보강 선설치 앵커의 동적 전단하중 하의 파열파괴강도를 평가하기 위한 실험 연구를 수행하였다. 전단 하중은 ACI 355.2 및 ETAG 001에 제시된 지진모의실험 방식으로 재하하였다. 시험체는 M36 앵커(연단거리 180mm)를 D10 스테럽(간격 100mm)으로 보강하였다. 이들 시험체는 거의 극한 파열파괴 강도에 도달한 후 앵커의 파단이 발생하였다. 이에 M42 앵커(연단거리 160mm)를 D6 스테럽(간격 100mm)으로 보강한 시험체에 대한 실험을 추가로 수행하였다. 실험 결과, 동적 전단강도는 정적 강도에 비해 낮은 값을 보이지 않았다. 또한, ACI 318 및 ETAG 001 기준은 스테럽 보강이 많을수록 파열파괴강도를 안전측으로 평가하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 선설치 앵커, 스테럽 보강, 지진모의실험, 전단하중, 동적 파열파괴강도
