

선설치앵커의 동적 전단하중에 대한 저항강도: 비보강 앵커

박용명¹ · 강문기^{2*} · 김동현³ · 이종한⁴ · 강충현⁵

¹교수, 부산대학교, 토목공학과 ²박사과정, 부산대학교, 토목공학과 ³박사과정, 부산대학교, 토목공학과
⁴조교수, 대구대학교, 토목공학과 ⁵연구원, 경북대학교, 건축토목공학부

Shear Resistance of CIP Anchors under Dynamic Loading: Unreinforced Anchor

Park, Yong Myung¹, Kang, Moon Ki^{2*}, Kim, Dong Hyun³, Lee, Jong Han⁴, Kang, Choong Hyun⁵

¹Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

²Ph.D. student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

³Ph.D. student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

⁴Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan, Gyeongbuk, 712-714, Korea

⁵Researcher, School of Architectural and Civil Engineering, Kyungpook National University, Gyeongbuk, 702-701, Korea

Abstract - The Concrete Capacity Design(CCD) method has been used in the design of anchor since 2001 and Korean design code specify that concrete breakout capacity of CIP anchor under seismic load shall be taken as 75% of static capacity. In this study, an experimental study was performed to evaluate the concrete breakout capacity of unreinforced CIP anchors under dynamic shear force. For the purpose, three static and dynamic shear-loading tests were conducted using 20mm diameter anchors, respectively. The edge distance of 120mm was considered in the tests. In the dynamic tests, 15 cycles pulsating load with 1Hz speed was applied and the magnitude of loading step was increased until concrete breakout failure occurs. From the tests, the concrete breakout capacity under dynamic shear loading showed nearly same capacity by static loading.

Keywords - Cast-in-place anchor, Unreinforced anchor, Dynamic shear loading, Concrete breakout capacity, CCD method

1. 서론

강재 앵커는 강재 기둥이나 플랜트의 기기, 배관 등을 콘크리트에 정착하기 위해 필수적인 연결 수단으로서 크게 선설치앵커(cast-in-place anchor)와 후설치앵커(post-installed anchor)로 분류된다. 인장하중이나 전단하중을 받는 앵커의 주요 파괴 모드는 강재앵커 본체가 파괴되는 연성파괴(ductile failure)와 콘크리트가 콘 형상으로 파열

파괴(breakout failure)되는 소성파괴(plastic failure)이며 파괴강도는 이들 중 작은 값으로 결정된다.

인장하중 및 전단하중을 받는 앵커의 콘크리트 파열파괴강도(concrete breakout capacity)는 2000년까지는 ACI 349-90^[1]에서 제시된 45° 콘파괴 이론이 적용되어 왔다. 그러나, 인장하중의 경우 매입깊이가 깊어질수록, 전단하중의 경우 연단거리가 증가할수록 45° 콘파괴 이론은 실제보다 콘크리트 파열파괴강도를 과다 평가하는 문제점이 Fuchs 등^[2], Muratli 등^[3], Eligehausen 등^[4]의 실험 연구로부터 밝혀졌다. 이에 따라 이들은 인장 및 전단하중에 의한 콘크리트 파열파괴에 대한 새로운 강도식인 CCD(Concrete Capacity Design) 방법을 제안하였으며, 2001년 이후 ACI 349-01^[5] 및 ACI 318-02^[6]에 CCD 방법이 새로운 기준으로 채택되었고 국내에서도 콘크리트구조설계기준해설 부록편^[7]에 본 방법이 채택되었다.

Note.-Discussion open until August 31, 2014. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 13, 2013; revised December 6, 2013; approved on December 16, 2013.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-510-1460 Fax. +82-51-513-9596

E-mail. han4770@chol.com

1994년 미국 Northridge 지진 이전에는 지진하중을 단기하중으로 간주하여 지진 시 콘크리트 파열파괴강도를 정적파괴강도에 비해 33% 증가시키는 것을 인정하였다. 그러나, Northridge 지진 시 많은 앵커가 파괴됨에 따라, 이후 ACI 318-02^[6], ACI 318-08^[8]과 국내 콘크리트구조기준해설^[9]에서는 지진하중에 대해 선설치앵커의 인장 및 전단력에 대한 콘크리트 파열파괴강도를 정적파괴강도의 75%로 저감하였다. 그 이유는 동적 하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도 평가에 대한 실험 연구가 극히 제한적이고, 따라서 콘크리트 소성파괴를 방지하고 앵커의 연성파괴를 유도하기 위해 안전 측으로 설정한 것이라고 기술하고 있다. 한편, 최근 ACI 318-11^[10]에서는 인장하중에 대해서는 지진 시 콘크리트 파열파괴강도를 여전히 정적파괴강도의 75%로 규정한 반면, 전단하중에 대해서는 동적파괴강도를 저감하는 규정을 삭제하였는데 이에 대한 설명은 제시하지 않았다.

본 연구에서는 무근콘크리트에 매입된 비보강 단일 선설치앵커의 정적 전단하중 대비 동적 전단하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도 평가를 위한 실험 연구를 수행하였다. 실험에 사용한 앵커의 직경은 M20이고 연단거리는 120mm로 하였으며, 250kN 액츄에이터를 사용하여 정적시험 3편과 동적시험 3편을 각각 수행하고 정적하중 대비 동적하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도를 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1 전단하중을 받는 앵커의 콘크리트 파열파괴강도

전술한 바와 같이 Fuchs 등^[2]과 Muratli 등^[3]은 정적 전

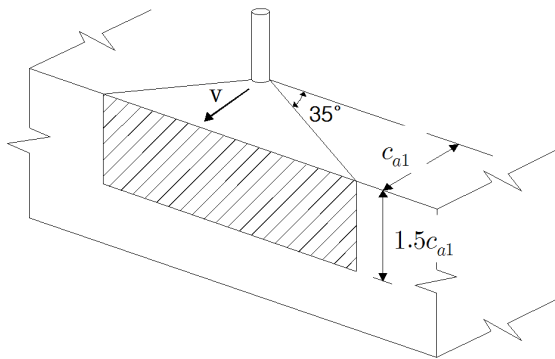


Fig. 1. Idealized breakout model for CCD method

단하중을 받는 앵커볼트에 대한 실험 연구로부터 연단거리가 증가할수록 종래의 45° 콘파괴 이론이 비안전측임을 밝히고 보다 합리적인 방법인 CCD 방법을 제안하였다. 즉, 종래의 45° 하프 콘(half-cone) 파괴 이론에서는 콘크리트 파열파괴강도가 연단거리의 2승에 비례하는 반면, CCD 방법에서는 Fig. 1에 보인 바와 같이 콘크리트 파괴블록의 형상을 35° 각도의 하프 피라미드(half-pyramid) 형상으로 이상화하고 파열파괴강도는 연단거리의 1.5승에 비례하는 것으로 제안되었다. CCD 이론에서는 종래의 45° 콘파괴 이론에 비해 앵커볼트의 직경과 지압길이를 추가로 고려하였으며, 비균열 콘크리트(uncracked concrete)에서 정적 전단력을 받는 단일 앵커의 평균 파열파괴강도(mean breakout capacity)는 다음 식으로 제안되었다.

$$V_{m} = 1.0 \left(\frac{l_c}{d_o} \right)^{0.2} \sqrt{d_o} \sqrt{f_{ck}} c_{a1}^{1.5} (N) \quad (1)$$

여기서, f_{ck} = 콘크리트 설계기준압축강도(MPa), c_{a1} = 전단하중 방향의 연단거리(mm), d_o = 앵커의 직경(mm), l_c = 앵커의 지압길이 = $\min(h_{ef}, 8d_o)$, h_{ef} = 앵커의 유효매입깊이이다.

2.2 앵커 콘크리트의 동적 파괴강도 평가 실험 기준

2.2.1 ASTM E488-96 기준

ASTM E488-96^[11]에서는 선설치 및 후설치앵커의 정·동적 전단하중에 대한 실험 방법을 제시하고 있다. 본 기준에서는 지진 시 전단하중에 대해서 액츄에이터에 의한 직접가력(direct loading) 및 진동대를 이용한 간접가력(indirect loading) 방식을 제시하고 있다. 직접가력 및 간접가력 방식 모두 반복하중(cyclic load)을 적용하되 상세한 절차는 제시하지 않고 각 테스트 프로그램(specified program)에 따른다고만 기술하고 있다.

2.2.2 ACI 355.2 기준

ACI 318^{[6],[8],[10]}에서 후설치앵커는 지진 시 콘크리트의 균열 발생으로 인한 뿔힘파괴의 우려가 있어 ACI 355.2^[12] 기준에 따라 균열 콘크리트(cracked concrete)에 대한 모의지진실험(seismic qualification test)으로부터 콘크리트 파열파괴강도를 결정하도록 명시하고 있다. 실험절차는

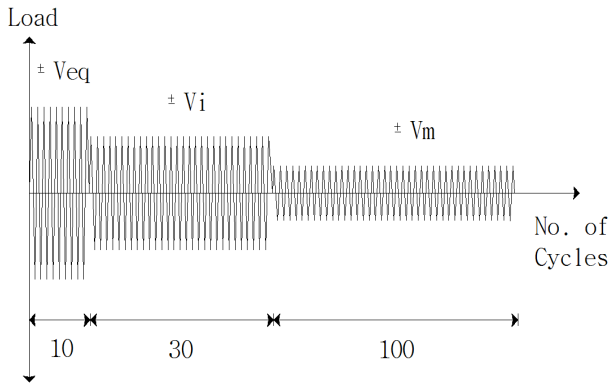


Fig. 2. Cyclic loading pattern for simulated Seismic-shear test^[12]

Fig. 2에 보인 바와 같이 0.1~2Hz의 속도로 V_{eq} 크기의 교번하중(alternating force)을 10cycle, V_i 크기의 반복하중을 30cycle, 이후 V_m 크기의 반복하중을 100cycle 가력한 후 정적 가력을 실시하고 이 때 구해진 강도를 최종 동적 파괴강도로 한다. 여기서, V_{eq} 는 콘크리트 파열파괴강도의 50%, V_m 은 25%, $V_i = (V_{eq} + V_m)/2$ 이다. 만약, Fig. 2의 절차로 반복가력 중에 파괴가 발생하면 반복하중의 크기를 낮추어 실험을 실시하고 그 비율만큼 파괴강도를 감소시킨다.

2.2.3 그 외의 실험 기준

캐나다 CSA N287.2^[13] 기준도 후설치앵커 실험기준으로 ACI 355.2^[12]의 방법과 유사하나 전단하중의 크기와 반복회수에 차이가 있으며 가력속도는 5Hz를 적용하고 있다. 이러한 차이는 ACI 355.2가 콘크리트의 파괴강도를 평가하는데 목적이 있는 반면, CSA N287.2 기준은 주로 앵커 본체의 피로강도 평가를 목표로 하기 때문이다.

이외에도 각 국가 및 기관에서 제시한 실험 기준들이 있는데, 앞에서 기술한 기준들을 포함하여 각 기준마다 반복회수, 하중크기, 가력속도 등에 차이가 있다. 참고문헌^[14]에 각 실험 기준의 개요가 정리되어 있으며, 각 기준마다 차이점은 지역별 지진 규모의 크기, 파괴 대상 관점(앵커 또는 콘크리트) 등의 차이에 기인하는 것으로 기술하고 있다.

2.3 동적 전단하중에 대한 기존 연구

동적 전단하중을 받는 앵커의 콘크리트 파열파괴강도 평가 연구사례는 극히 제한적이다. 먼저, Gross 등^[15]은 균열 및 비균열콘크리트 블록에 매입된 선설치앵커(직경 3/4in,

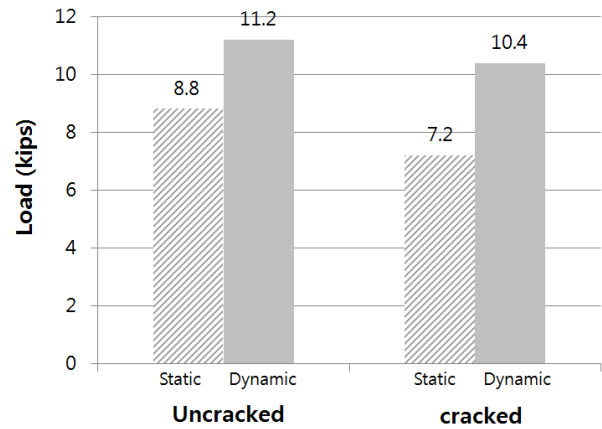


Fig. 3. Dynamic test results by Gross *et al.*^[15]
(1 kips=4.4482kN)

M19급)에 대해 rise time 0.1초의 점증하중(ramp loading) 방식으로 동적실험을 수행하였다. 그 결과는 Fig. 3과 같으며 비균열콘크리트에서 동적파괴강도/정적파괴강도의 비 = 11.2/ 8.8 = 1.27배가 얻어졌으며, 균열콘크리트에서는 동적파괴강도/정적파괴강도 비 = 10.4/7.2 = 1.44배가 얻어졌다. 이들은 동적파괴강도가 정적파괴강도에 비해 큰 결과는 변형률속도효과(strain-rate effect)에 기인하는 것으로 제안하고 있다.

그러나, 이들이 적용한 ramp loading은 1회성 충격하중 형태로서 실제 지진 시 반복하중에 의해 콘크리트 균열의 발생 및 진전으로 인한 강도의 저하가 발생하고, 이로 인해 최종 콘크리트 파괴강도에 미치는 영향이 고려되지 못하는 문제점이 있어 지진 시 하중에 대한 앵커의 콘크리트 파괴강도로 적용하기에는 문제가 있다고 생각된다.

한편, Ghobarah 등^[16]은 균열콘크리트에 매입한 Hilti社의 HSLG-M16(확장형 후설치앵커)에 대해 인장하중 및 전단하중에 대한 파괴강도 평가 실험을 수행하였다. 이들은 정적하중에 의한 실험과 캐나다 CSA N287.2^[13] 기준에 따라 5Hz의 속도로 일련의 교번하중을 재하한 후 파괴 시까지 정적 하중을 재하하는 모의지진 실험을 수행하였다. 이들의 실험에 의한 정적 및 동적파괴강도는 Fig. 4에 제시하였다. 이 그림으로부터 알 수 있듯이 정적파괴강도와 교번하중 재하 후 정적재하에 의한 동적파괴강도에는 차이가 없는 것으로 제시되었다.

최근 Petersen 등^[17]은 무근콘크리트($f_{ck} = 5,650 \text{ psi} = 39\text{MPa}$)에 매입된 직경 3/4inch(19mm)의 선설치앵커에

대해 단조하중(monotonic loading), 편측반복하중(uni-cyclic) 및 반복하중(reversed cyclic)으로 실험을 수행하였다. 단, 이들은 편측 및 반복하중 실험을 유사정적실험으로 수행하였으며, 하중은 변위제어방식으로 Fig. 5에 보인 바와 같이 3cycle의 하중단계를 키워가면서 파괴 시까지 수행하였다.

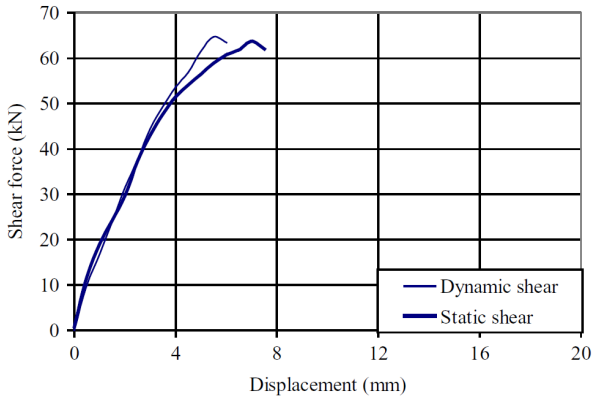


Fig. 4. Comparison between average static tests before and after dynamic shear load on hilti HSLG M16 anchor (Ghobarah *et al.*^[16])

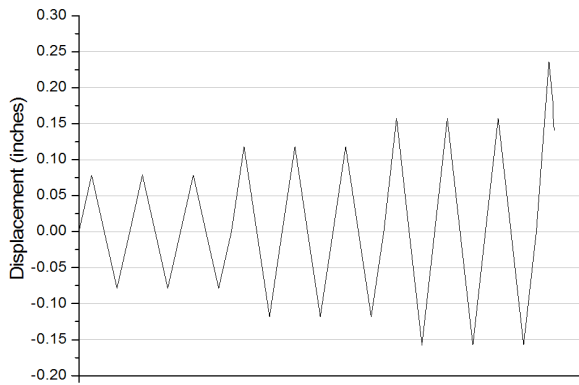


Fig. 5. Reversed cyclic loading profile^[17]

Table 1. Shear test results (Petersen *et al.*^[17])

Embed. depth (in.)	Load type	Failure load (kips)
4.0	Monotonic	14.18, 14.46
	Uni-cyclic	13.44, 14.28
	Reversed Cyclic	14.13, 14.76
6.0	Monotonic	13.41, 15.82
	Uni-cyclic	14.84, 15.18
	Reversed Cyclic	14.33, 14.57

Note) 1inch=25.4mm, 1kips=4.4482kN

이들 실험 중 콘크리트 파괴(연단거리 $c_{al} = 4\text{inch} = 102\text{mm}$)와 관계된 결과를 Table 1에 제시하였다. 이로부터 편측반복하중과 반복하중 간에 최종 콘크리트 파괴강도는 거의 차이가 없었으며, 또한 단조하중에 비해 유사정적실험에서의 강도 저하도 거의 없었다고 제시하였다.

3. 실험 방법

3.1 시험체 제원

본 연구에서 실험을 위해 제작한 콘크리트 블록형상은 Fig. 6과 같다. 앵커볼트는 M20-S45C(항복강도 $f_y = 490\text{MPa}$)를 사용하였다. 앵커의 매입깊이는 $160\text{mm}(=8 d_o)$ 로 하였고 연단거리(c_{al})는 통상 최소연단거리로 간주되는 앵커 직경의 6배인 120mm 로 하였다. 콘크리트 블록은 2개를 제작하였는데 블록-1(이하 B1)에서는 1개의 정적실험과 3개의 동적실험을 위한 앵커를, 블록-2(이하 B2)에서는 2개의 정적실험을 위한 앵커를 설치하였다. 2개 블록의 콘크리트 설계압축강도는 $f_{ck} = 24\text{MPa}$ 로 설정하였으며, 여건상 제작시점은 다르다. 선설치앵커는 Fig. 6(b)에 보인 바와 같이 거푸집 바닥판에 앵커채어를 설치하고, 앵커채어의 구멍에 앵커를 끼운 후 콘크리트 타설 시 수직도의 유지를 위해 앵커의 상부를 2방향으로 철근으로 묶어 임시로 지지하였다.

3.2 시험체의 설치

정·동적 전단하중의 가력을 위한 시험체의 설치는 Fig. 7에 보인 바와 같다. 가력 시 콘크리트 블록의 움직임을 방지하기 위해 4개의 기둥을 시험체의 앞뒤에 2개씩 대칭으로 설치하고 시험체의 회전을 구속하기 위해 콘크리트 블록

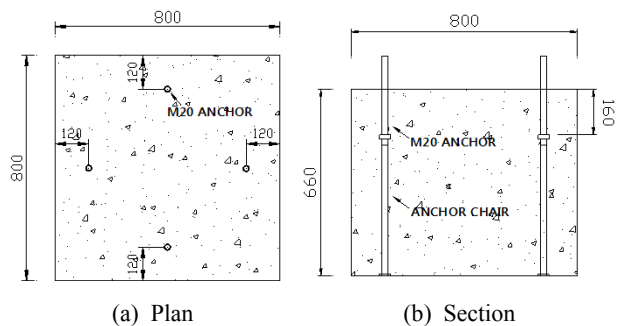


Fig. 6. Configuration of test block

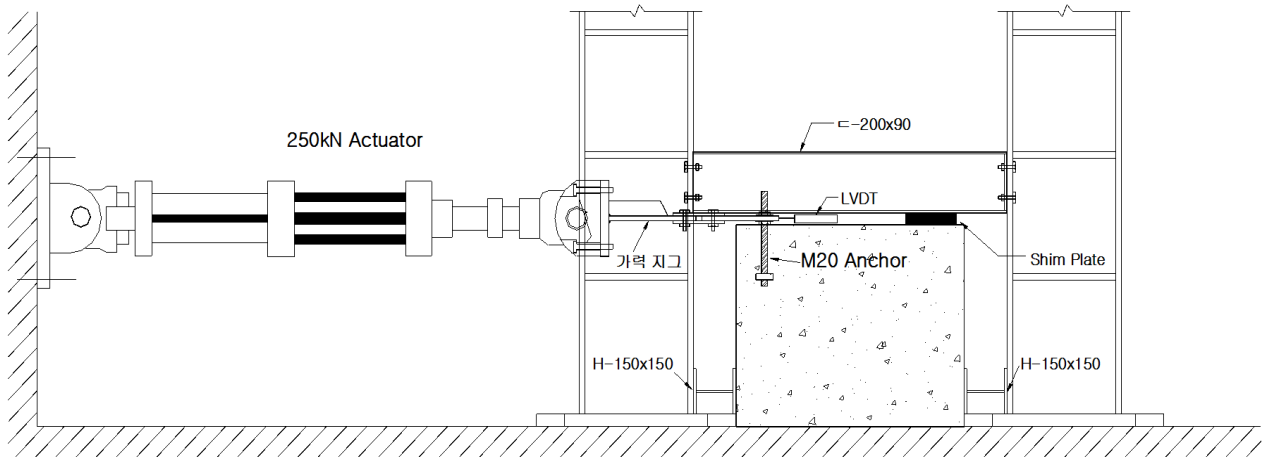


Fig. 7. Configuration of test setup

의 윗면에 2개의 C-채널을 각각 앞뒤 기둥에 연결하여 설치하였다. 또한 콘크리트 블록의 수평이동을 구속하기 위해 전·후면 하단부에 H-150×150 형강을 설치하였다.

전단하중의 가력은 Fig. 7에 보인 바와 같이 앵커에 가력 지그를 설치한 후 액츄에이터 헤드에 부착한 가력용 강제 지그와 6개의 M20 고장력볼트로 연결하였다. Fig. 8은 시험체 설치 후의 장면이다.

3.3 정동적 하중 재하 방법

본 연구에서 정적 전단하중에 의한 콘크리트의 파열파괴 강도 평가 실험에서는 수평하중을 200N/sec의 속도로 콘크리트 파괴가 일어날 때까지 가력하였다. 동적 전단하중의 재하는 Petersen 등^[17]의 연구에서 교번하중과 편진하

중에 의한 파괴강도의 차이가 거의 없었던 점과 본 연구의 실험여건을 감안하여 편진하중(pulsating force)을 적용하였다. 최초 편진하중 크기는 예상 콘크리트 정적 파열파괴 강도의 약 60%에 해당하는 값인 25.0kN으로 하였으며, 이후 스텝에서는 2.5kN씩 증가하면서 파괴 시까지 가력하였다. 매 스텝별 하중반복회수는 15cycle로 하였으며, 가력 속도는 ACI 355.2^[12]를 참조하여 1Hz로 하였다. 본 실험에서는 하중제어를 적용하였으며, 실제 편진하중의 가력 예는 Fig. 9에 제시하였다.

4. 실험 결과

4.1 공시체 강도

본 실험 직후 실시한 각 블록별 공시체 3개의 강도 및 콘

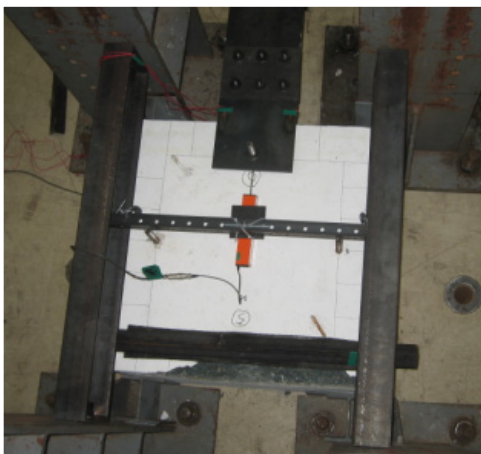


Fig. 8. Test scene

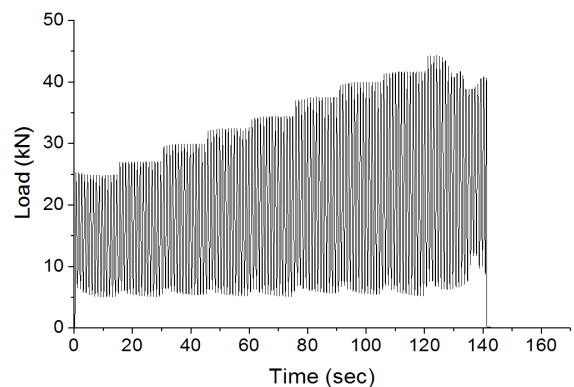


Fig. 9. Example of dynamic loading pattern

크리트 블록에서 채취한 2개의 코어($\phi 100\text{mm}$) 강도는 Table 2와 같다. B1 블록에서 공시체 강도는 코어 강도보다 1.9% 크게 얻었으며, B2 블록에서는 3.8% 크게 얻어졌다. 이로부터 콘크리트 블록이 적절하게 제작되었음을 확인하였으며, 이후 결과 분석에서는 공시체 강도를 기준으로 하여 B1 블록의 콘크리트 압축강도는 32.3MPa, B2 블록은 35.1MPa를 적용하기로 한다.

4.2 콘크리트 파열파괴강도 결과

무근콘크리트에 매입된 앵커의 정적 및 동적 전단하중에 대한 실험으로부터 최대하중 및 대응 변위를 Table 3에 제시하였으며, 하중-변위선도를 Fig. 10과 Fig. 11에 제시하였다.

정적실험과 동적실험 모두 앵커 주위에서 최초 균열이 발생한 시점에 거의 최대강도에 도달하였으며, 이후 균열의進展은 급속도로 진행되었고 더 이상의 하중 증가는 없

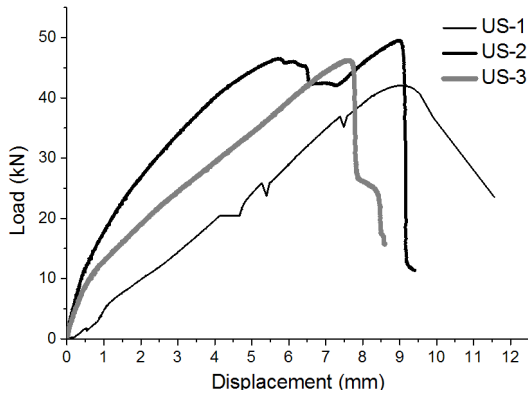
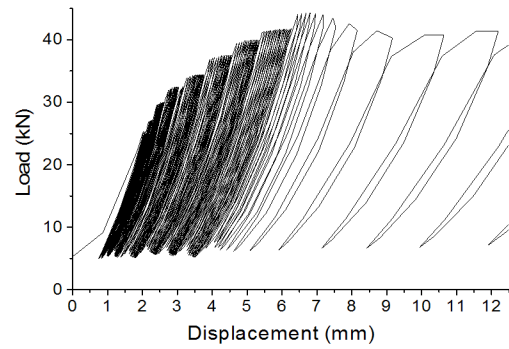


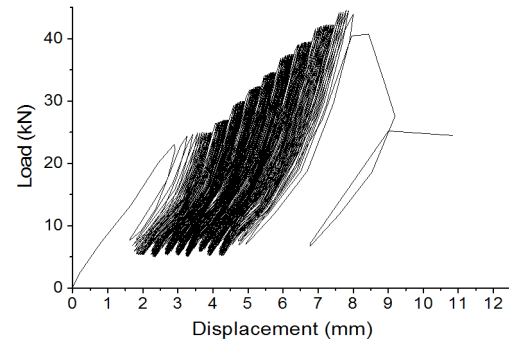
Fig. 10. Load-displacement curve (static tests)

Table 2. Compressive strength of cylinder and core

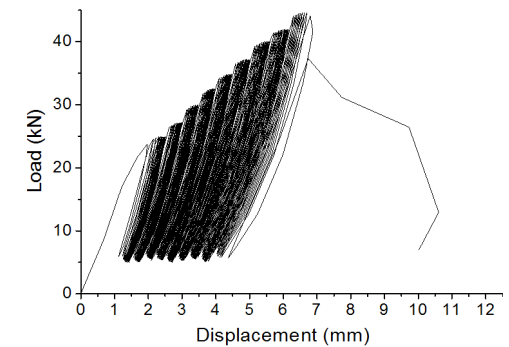
Block		Compressive strength (MPa)	Mean (MPa)
B1	Cylinder	31.5	32.3
		32.8	
B1	Core	32.6	31.7
		30.2	
B2	Cylinder	33.3	35.1
		34.7	
B2	Core	34.7	33.8
		35.8	
B2	Core	32.8	33.8
		34.8	



(a) UD-1



(b) UD-2



(c) UD-3

Fig. 11. Load-displacement curve (dynamic tests)

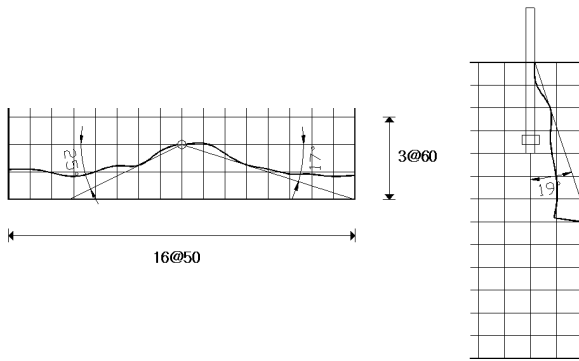
Table 3. Test results for shear loading

Loading	Specimen	Block	Ultimate loading (kN)	Displacement (mm)
Static	US-1	B1	42.0	9.0
	US-2	B2	49.5	8.9
	US-3		46.2	7.6
Dynamic	UD-1	B1	44.3	6.8
	UD-2		44.5	7.8
	UD-3		44.6	6.6

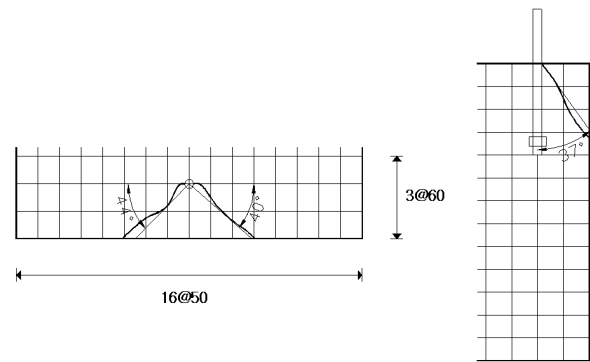
었다. Table 3으로부터 최대 정적하중에서의 변위는 최대 동적하중에서의 변위에 비해 조금 큰 변위를 보였다. 이러한 결과는 Fig. 4(Ghobarah 등⁽¹⁶⁾)의 결과와 유사성이 있는 것으로 판단되며, 동적 반복하중에서는 균열의 발생 및 진전에 그 이유가 있는 것으로 판단된다.

한편, 실험 후에 각 시험체의 콘크리트 파열파괴 형상을 측정하였으며, 평면 및 단면 기준의 파괴면 형상 및 파괴각을 Fig. 12와 Fig. 13에 제시하였다. 파괴각은 앵커를 중심

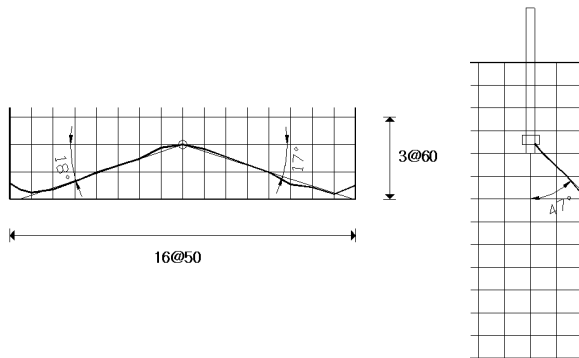
으로 파괴면이 처음 접하는 각도로 고려하였다. 이로부터 평면 기준 파괴각은 정적실험에서는 17°~37°, 동적실험에서는 11°~44°의 범위를, 단면 기준 파괴각은 정적실험에서는 19°~41°, 동적실험에서는 11°~37°의 범위를 보였다. 이로부터 CCD 방법에서 이상화한 파괴각 35° 보다는 대체로 완만한 파괴각을 보인 경우가 많았으나, UD-1과 UD-2/UD-3 시험체에서 알 수 있듯이 파괴각과 콘크리트 파괴각도 간에 상관성은 크지 않은 것으로 판단되었다.



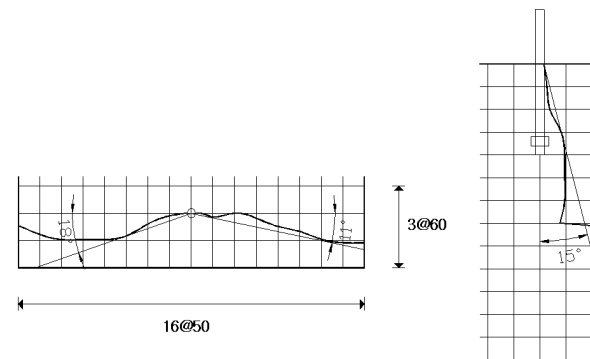
(a) US-1



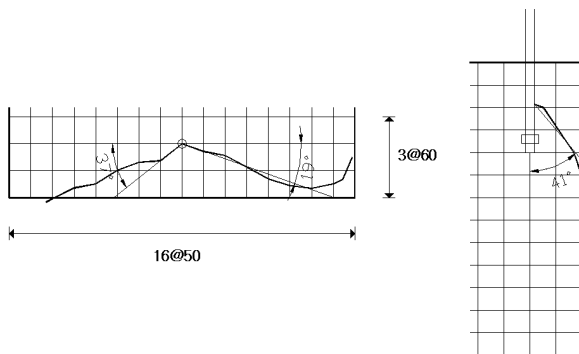
(a) UD-1



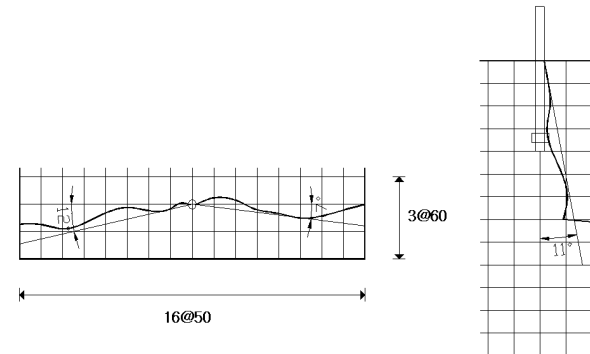
(b) US-2



(b) UD-2



(c) US-3



(c) UD-3

Fig. 12. Shape of breakout failure (static loading)

Fig. 13. Shape of breakout failure (dynamic loading)

4.3 실험 결과 분석

4.3.1 CCD 강도식 대비 파괴강도

본 연구에서는 설계압축강도 $f_{ck} = 24\text{MPa}$ 를 목표로 2개의 블록을 제작하였으나, 제작 시기가 다르고 또한 앞의 Table 2에서 보인 바와 같이 2개 블록의 콘크리트 압축강도에 차이가 있다. 따라서, 결과의 분석을 위해서 설계기준 압축강도 24MPa로 정규화하여 결과를 분석하기로 한다. Table 4에 실험에서 얻어진 최대 하중 ($V_{u, Test}$)과 이를 설계기준압축강도로 정규화한 파괴하중 ($V_{u, Test}^{norm}$)을 제시하였다. 식 (1)로부터 파열파괴강도는 $\sqrt{f_{ck}}$ 에 비례하므로 정규화 강도는 $\sqrt{24/f_{ck}}$ 로부터 산정된다.

한편, 지압길이가 콘크리트 파열파괴강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 실험 종료 후 앵커가 드러난 길이를 파괴면에서 측정하였으며(Fig. 14 참조), 이를 Table 4에 l_e 로 제시하였다. 이 길이를 지압길이(load-bearing depth)로 간주하였을 때, 식 (1)의 CCD 이론으로 계산한 콘크리트 파열파괴강도 $V_{cn, CCD}^{norm}$ ($f_{ck} = 24\text{MPa}$ 로 정규화한 파괴강도)를 동 표에 나타내었다. 이로부터 정적 실험 강도는 CCD 이론 강도의 96.5% 수준(=38.4kN/39.8kN), 동적 실험 강도는 CCD 이론의 강도와 비슷하게 평가되었다.

그러나 Table 4에서 알 수 있듯이 정적 및 동적 실험 모두 지압길이 l_e 가 콘크리트 파열파괴강도에 미치는 영향의 정도는 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 이에 대해 좀 더 명확히 분석하고자 지압길이에 따른 정·동적 콘크리트 파괴강도($V_{u, test}^{norm}$)를 Fig. 15에 제시하였다. 이로부터 결정계수(R^2)는 0.1488로서 지압길이에 대한 상관성이 크지 않은 것으로 판단된다.

한편, Muratli 등^[3]은 연단거리 300mm까지의 정적 전단하중에 대한 실험데이터로부터 콘크리트 파열파괴의 수

정강도식을 제안하였는데, 이들은 지압길이의 영향을 $l_e^{0.1}$, 연단거리의 영향을 $c_1^{1.4}$ 으로 제안하였다. 또한, 박용명 등^[18]은 연단거리가 큰 경우(최대 800mm까지)에 대해 지압길이의 영향을 $l_e^{0.05}$, 연단거리의 영향을 $c_1^{1.3}$ 으로 제안하였다. 즉, 식 (1)의 CCD 강도식이 $l_e^{0.2}$, $c_1^{1.5}$ 에 비례하는 것에 비해



Fig. 14. Definition of bearing depth

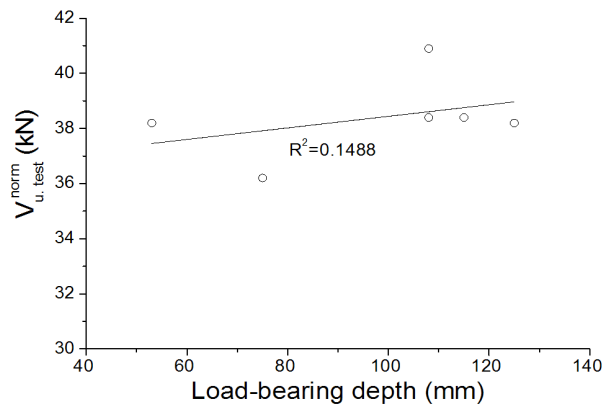


Fig. 15. Relationship between Load-bearing depth and concrete breakout capacity

Table 4. Normalized breakout capacity

Specimen	Block	l_e (mm)	$V_{u, test}$ (kN)	$V_{u, test}^{norm}$ (kN)	Mean (kN)	$V_{cn, CCD}^{norm}$ (kN)	Mean (kN)
US-1	B1	75	42.0	36.2	38.4	37.5	39.8
US-2	B2	108	49.5	40.9		40.4	
US-3		125	46.2	38.2		41.5	
UD-1	B1	53	44.3	38.2	38.3	35.0	38.8
UD-2		115	44.5	38.4		40.9	
UD-3		108	44.6	38.4		40.4	

상기 연구자들의 제안식은 지압길이와 연단거리가 콘크리트 파열파괴강도에 미치는 영향이 현재의 CCD 강도식보다 상대적으로 적음을 의미한다. 따라서, 현재의 CCD 강도식에서 지압길이와 연단거리가 장·동적 콘크리트 파열파괴강도에 미치는 정도는 재고되어야 할 것으로 판단된다.

4.3.2 정적 하중 대비 동적 파괴강도

Table 4로부터 정적 전단하중에 대한 평균 파열파괴강도는 38.4kN, 동적 하중에 대한 평균 파열파괴강도는 38.3kN으로서 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

앞의 Fig. 3에서 제시한 Gross 등^[15]의 1회성 충격하중 형태의 동적하중에 의한 파괴강도가 정적하중에 비해 1.27(비균열 콘크리트)~1.44(균열콘크리트) 배로 크게 나온 것에 비하면, 본 연구에서 적용한 1Hz 속도의 교번하중에서는 파괴강도의 증가가 거의 없는 결과를 보였다. 제한된 실험 결과로부터 단정할 수는 없으나, 이상의 결과를 비교해보면 동적 전단하중에 의한 콘크리트 파괴강도는 변형률속도효과와 관계가 있고, 반복하중에 의한 콘크리트 균열의 발생 및 진전이 동적 파괴강도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 무근콘크리트에 매입된 선설치앵커의 동적 전단하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도를 평가하기 위한 실험 연구를 수행하였으며, 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 편진 동하중(pulsating force)에 의한 콘크리트 파열파괴강도는 정적 하중과 동일한 수준의 파열파괴강도를 보였다.
- (2) 제한된 시험체 개수로부터 단정할 수는 없지만 최근 ACI 318-11에서 전단에 대해서는 동적하중에 의한 파괴강도를 정적파괴강도에 비해 75%로 저감하는 것을 삭제하였는데, 본 실험 결과는 이에 부합하는 것으로 나타났다.
- (3) 본 연구의 실험으로부터 지압길이가 전단하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도에 미치는 영향은 현재의 CCD 강도식에서 고려되는 정도보다 작은 것으로 나타났으

며, 이는 기존의 연구^{[3],[18]}에서도 지적된 바와 일치하는 결과를 보였다.

향후 과제로서는 동적하중의 가력속도에 따른 파괴강도의 평가, 교번하중(alternating force)에 대한 파괴강도 평가 및 실제 지진하중을 모사하기 위한 진동대에 의한 실험 등을 수행하고 본 연구의 편진하중에 의한 파괴강도와의 차이를 비교할 필요가 있다. 또한 본 연구에서는 M20 앵커에 대한 실험을 수행하였으나, 향후 M50 이상의 대형 앵커에 대한 실험을 수행함으로써 소형 앵커 대비 대형 앵커의 동적 전단하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도를 평가할 필요가 있다.

감사의 글

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

참고문헌(References)

- [1] ACI Committee 349 (1990) Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures, ACI 349-90, Appendix B Steel Embedments, American Concrete Institute.
- [2] Fuchs, W., Eligehausen, R., and Breen, J.E. (1995) Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastenings to Concrete, *ACI Structural Journal*, Vol.92, No.6, pp.794-802.
- [3] Muratli, H., Klingner, R.E., and Graves III, H.L. (2004) Breakout Capacity of Anchors in Concrete-Part 2: Shear, *ACI Structural Journal*, Vol.101, No.6, pp. 821-829.
- [4] Eligehausen, R., Mallee, R., and Silva, J.F. (2006) *Anchorage in Concrete Construction*, Ernst & Sohn, Germany.
- [5] ACI Committee 349 (2001) Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures, ACI 349-01, Appendix B Anchoring to Concrete, American Concrete Institute.
- [6] ACI Committee 318(2002) Building Code Requirements

- for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-02, Appendix D Anchoring to Concrete, American Concrete Institute.
- [7] 한국콘크리트학회(2007) 콘크리트구조설계기준해설, 부록 IV 콘크리트용 앵커. Korean Concrete Institute (2007) *Concrete Structure Design Code and Commentary*, Appendix IV Anchoring to Concrete (in Korean).
- [8] ACI Committee 318 (2008) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 381-08, Appendix D Anchoring to Concrete, American Concrete Institute.
- [9] 한국콘크리트학회(2012) 콘크리트구조기준해설, 부록 II 콘크리트용 앵커. Korean Concrete Institute (2012) *Concrete Structure Design Code and Commentary*, Appendix II Anchoring to Concrete (in Korean).
- [10] ACI Committee 318 (2011) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-11, Appendix D Anchoring to Concrete, American Concrete Institute.
- [11] ASTM E 488-96 (Reapproved 2003) *Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete and Masonry Elements*, An American National Standards.
- [12] ACI 355.2 (2000) *Evaluating the Performance of Post-installed Mechanical Anchors in Concrete*, Reported by ACI Committee 355.
- [13] CSA N287.2 (1998) *Material Requirements for Concrete Containment Structures for CANDU Nuclear Power Plants*, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario.
- [14] Silva, J.F. (2001) Test Methods for Seismic Qualification of Post-Installed Anchors, *Connections between Steel and Concrete*, Proc. Int. Conference organized by University of Stuttgart, Co-sponsored by ACI, fib, IABSE, edited by R. Eligehausen, RILEM Publications S.A.R.L., pp.551-563.
- [15] Gross, J.H., Klingner, R.E., and Graves III, H.L. (2001) Dynamic anchor behavior of single and double near-edge anchors loaded in shear, *Connections between Steel and Concrete*, Proc. Int. Conference organized by University of Stuttgart, Co-sponsored by ACI, fib, IABSE, edited by R. Eligehausen, RILEM Publications S.A.R.L., pp.498-508.
- [16] Ghobarah, A., and Aziz, T.S. (2004) Seismic qualification of expansion anchors to Canadian nuclear standards, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.228, pp.377-392.
- [17] Petersen, D., Lin, Z., and Zhao, J. (2013) Behavior and Design of Cast-in-Place Anchors under Simulated Seismic Loading, Draft Final Report, Vol. I, Cyclic Behavior of Single Headed Anchors, Dept. of Civil Eng., University of Wisconsin, Milwaukee.
- [18] 박용명, 전명희, 최명국, 김철환, 김인기(2012) 전단력을 받는 선설치 앵커볼트의 콘크리트 파열파괴강도 평가 연구, 한국강구조학회논문집, 제24권, 제2호, pp.207-215. Park, Y.M., Jeon, M.H., Choi, M.K., Kim, C.H., and Kim, I.G. (2012) A Study on the Concrete Breakout Capacity of CIP Anchor Bolts under Shear Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.2, pp.207-215 (in Korean).

요 약 : 2001년 이후 앵커의 설계는 Concrete Capacity Design(CCD) 방법이 적용되고 있는데, 국내 기준에서는 지진하중에 대한 콘크리트의 파열파괴강도를 정적 파괴강도의 75%로 제한하고 있다. 본 연구에서는 무근콘크리트에 매입된 선설치앵커의 동적 전단하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 이를 위해 직경 20 mm의 앵커에 대해 정적 하중과 동적 편진하중에 대한 실험을 각각 3개의 시험체에 대해 수행하였으며, 앵커의 연단거리는 120 mm를 적용하였다. 동적 실험은 15 cycle의 편진하중을 1 Hz의 속도로 재하하였으며 반복하중단계의 크기를 키워가면서 최종 파괴 시까지 가력하였다. 실험으로부터 동적 전단하중에 의한 콘크리트 파열파괴강도는 정적하중에 의한 것과 거의 같은 파괴강도를 보였다.

핵심용어 : 선설치앵커, 비보강 앵커, 동적 전단하중, 콘크리트 파열파괴강도, CCD 방법
