



균열콘크리트에 매입된 선설치앵커의 정적 전단하중에 대한 저항강도

박용명¹ · 주호중^{2*} · 김동현³ · 강문기³ · 이종한⁴

¹교수, 부산대학교, 토목공학과, ²석사과정, 부산대학교, 토목공학과,
³박사과정, 부산대학교, 토목공학과, ⁴조교수, 대구대학교, 토목공학과

Static Shear Resistance of Cast-In-Place Anchors in Cracked Concrete

Park, Yong Myung¹, Ju, Ho Jung^{2*}, Kim, Dong Hyun³, Kang, Moon Ki³, Lee, Jong Han⁴

¹Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea
²M. Sc. 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, Gyeongbuk, 712-714, Korea

Abstract - In this study, an experimental study was performed to evaluate the concrete breakout strength of cast-in-place(CIP) anchors in cracked concrete under static shear loading. The CIP anchors involved in this study were 30mm in diameter with an edge distance of 150mm and an embedment length of 240mm. The experiment was carried out for two specimens in uncracked concrete and three specimens in cracked concrete orthogonal and parallel to the direction of shear loading, respectively. Compared to the uncracked concrete specimen, cracked specimen orthogonal to the direction of shear loading showed no reduction in the concrete breakout strength and that parallel to the load direction about 91% strength which corresponds to 84% of uncracked concrete strength defined in ACI 318-11. Therefore, the experimental results showed smaller decrease in the shear resistance of CIP anchors in cracked concrete than that specified in ACI code which account for 71% strength of uncracked concrete in cracked concrete.

Keywords - Cast-in-place anchor, Cracked concrete, Crack direction, Static shear loading, Concrete breakout strength

1. 서론

강재앵커는 강재 기둥, 파이프라인, 플랜트 기기 등과 같은 다양한 강재 구조물을 콘크리트 구조에 정착시키는 중요한 연결체이다. 강재앵커의 주요 파괴모드(failure mode)는 앵커 본체의 연성파괴(ductile failure)와 콘크리트의 소성 파괴(plastic failure)로 구분할 수 있는데, 특히 콘크리트의 파괴는 취성적 재료 특성으로 급작스러운 파괴로 나타나기

때문에 콘크리트의 파괴강도에 대한 합리적인 예측이 필요하다.

인장하중 및 전단하중을 받는 앵커의 콘크리트 파열파괴 강도(concrete breakout strength)는 2000년대 이후 미국 콘크리트학회의 ACI 349 및 ACI 318 위원회에서 CCD (Concrete Capacity Design) 방법에 근거한 파괴강도식을 ACI 349-01^[1] 및 ACI 318-02^[2] 기준에 처음으로 채택한 이후 현재까지 적용되고 있다. 한편, 유럽의 앵커 설계기준은 EOTA(European Organization for Technical Assessment)에서 제정한 ETAG 001^[3]에 제시되었다. ETAG 001 기준도 미국의 앵커 설계기준과 동일하게 CCD 방법에 근거하고 있지만, 앵커의 직경과 유효지압길이의 영향을 조금 다르게 제시하고 있다.

한편, 미국에서는 ACI 318-08^[4]까지 적용기준을 앵커 직

Note.-Discussion open until August 31, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 19, 2014; revised January 8, 2015; approved on January 19, 2015.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

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

E-mail. grangdash@naver.com

경 50mm 이하로 제한하였으나, 최근 ACI 318-11^[5]에서 Lee *et al.*^[6]의 대형 앵커에 대한 실험 결과를 바탕으로 추가적인 콘크리트 파열파괴강도 설계식의 제시와 함께 앵커 직경을 100mm까지 확대시켰다. 반면에 ETAG 001 기준은 현재까지 직경 30mm 이하로 적용을 제한하고 있다. 이는 유럽에서 처음으로 제안된 CCD 방법이 대부분 직경 30mm 이하의 소형 앵커에 대한 실험 결과에 근거하였기 때문이다. 한편, 국내에서는 2007년 콘크리트구조설계기준해설 부록편^[7]에 CCD 방법에 근거한 앵커설계법이 처음으로 도입되었으며, 2012년 기준^[8]에서는 ACI 318-08에서 제시된 설계기준을 바탕으로 개정되었다.

상기 각국의 기준에서는 앵커가 매입된 콘크리트의 균열 발생 유무에 따라 파열파괴강도를 제시하고 있다. ACI 318 기준에서는 인장하중을 받는 선설치앵커의 경우 비균열(uncracked) 대비 균열콘크리트(cracked concrete)에서의 파열파괴강도를 1.25배 감소시키며, 전단하중에 대해서는 1.4배 저감하도록 규정하고 있다. 즉, 비균열콘크리트에 비해 균열콘크리트의 인장하중에 대한 파열파괴강도는 80%로 저감하는 반면, 전단하중에 대해서는 71%로 저감하고 있다. 전단하중에 대한 균열콘크리트의 파열파괴강도에 대한 ACI 기준은 직경 3/4inch(19mm)의 소형앵커를 사용한 Hollowell^[9]과 Klingner *et al.*^[10]의 실험 데이터로부터 결정된 것이다. Hollowell은 연단거리 101.6mm의 비균열 및 균열 시험체 5개에 대해 실험을 수행하였으며, Klingner 등은 연단거리 50.8~203.2mm의 균열 시험체 7개에 대해 수행하였다. 이들의 실험 결과는 2장에서 제시하였는데, Klingner 등의 실험은 균열콘크리트에 대한 결과로 보기에 문제가 있다고 판단된다. 한편, 유럽에서는 Eligenhausen *et al.*^[11]이 전단하중을 받는 선설치앵커의 균열콘크리트에서의 파열파괴강도 평가를 위한 실험을 일부 수행하였는데, 이에 대한 내용은 2장에서 제시하였다. 하지만, 현재까지 국내외적으로 균열콘크리트에 매입된 선설치앵커의 전단하중에 대한 실험 결과는 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 직경 30mm의 선설치앵커에 대해서 전단하중에 대한 비균열 및 균열콘크리트의 파열파괴강도를 실험적으로 평가하였다. 균열방향에 따른 저항강도를 평가하기 위하여 전단하중에 수직인 방향과 평행한 방향의 균열을 고려하였으며, 실험 결과를 바탕으로 현재 미국과 유럽의 강도 기준식과 비교 평가하였다.

2. 기존 연구 및 균열콘크리트 파열파괴강도 기준

2.1 기존 연구

비균열콘크리트에 매입된 선설치앵커의 전단하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도는 주로 연단거리 300mm 이하에서 수행된 데이터에 근거하고 있다. 이로부터 파괴형상을 Fig. 1로 이상화한 CCD 방법이 제안되었으며, 비균열콘크리트의 평균 파열파괴강도는 다음 식 (1)로 제시되었다.

$$V_{u,mean} = 1.1 \left(\frac{l_e}{d_o} \right)^{0.2} \sqrt{d_o} \sqrt{f_{ck}} c_{a1}^{1.5} (N) \quad (1)$$

여기서, d_o : 앵커 직경(mm), l_e : 유효지압길이(mm)로서 최대 $8d_o$ 로 제한, c_{a1} : 연단거리(mm), f_{ck} : 원통형 공시체의 압축강도(MPa)이다.

전술한 바와 같이 균열콘크리트에서 선설치앵커의 전단하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도에 대한 ACI 318 기준은 Hollowell^[9]과 Klingner *et al.*^[10]의 실험 결과에 근거한 것이다. Hollowell은 비균열콘크리트와 균열콘크리트에서 앵커 직경 19.05mm, 매입깊이 101.6mm, 연단거리 101.6mm, 콘크리트 압축강도 32.4MPa에 대해 각각 5개의 실험을 수행하였다. 균열콘크리트에 대한 실험에서 균열의 방향은 전단하중에 평행한 방향으로 0.3mm의 균열을 생성하였으며, 실험 결과를 Table 1에 제시하였다. 콘크리트 파열파괴강도는 비균열콘크리트에서 평균 39.0kN, 균열콘크리트에서는 평균 32.1kN으로 비균열 대비 균열 존재시 파괴강도는 82%에 해당된다.

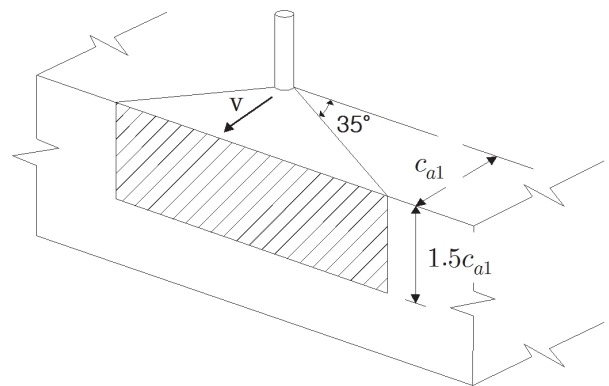


Fig. 1. Idealized breakout model for CCD method

한편, Klingner *et al.*^[10]은 비균열콘크리트 블록 1개 당 여러 개의 앵커를 설치하여 실험을 하였는데, 앵커의 실험 중에 콘크리트 블록에 균열이 발생하거나 손상이 발생하였고 이후 수행한 앵커 실험 결과를 균열콘크리트에 대한 실험 결과로 간주하였다. 이들은 콘크리트 압축강도 29MPa에 대해 앵커 직경 19.05mm, 매입깊이 203.2mm, 연단거리 50.8~203.2mm에 대해 수행하였으며 이들의 실험 결과는 Table 2에 제시하였다. 이로부터 식 (1) 대비 비균열 시험체의 평균 강도는 94%, 균열 시험체의 평균 강도는 59% 수준에 해당된다.

Table 1. Test results by Hallowell^[9]

Concrete condition	c_{al} (mm)	V_{test} (kN)	$\frac{V_{test}}{V_{u,mean}^{Eq.(1)}}$
Uncracked	101.6	40.47	1.03
		37.36	0.96
		33.35	0.85
		43.14	1.10
		40.47	1.03
	Avg. : 39.0	Avg. : 1.00	
Cracked	101.6	33.36	0.85
		27.13	0.69
		32.02	0.82
		36.91	0.94
		31.13	0.80
	Avg. : 32.1	Avg. : 0.82	

Note) $V_{u,mean}^{Eq.(1)} = 39.12$ kN

Table 2. Test results by Klingner *et al.*^[10]

Concrete condition	c_{al} (mm)	V_{test} (kN)	$\frac{V_{test}}{V_{u,mean}^{Eq.(1)}}$
Uncracked	50.8	17.12	1.14
	50.8	17.79	1.19
	50.8	18.24	1.21
	101.6	30.02	0.71
	101.6	33.36	0.79
	152.4	64.50	0.83
	203.2	86.74	0.72
		Avg.: 0.94	
Cracked	50.8	6.67	0.44
	101.6	26.69	0.63
	101.6	26.69	0.63
	152.4	44.48	0.57
	152.4	41.37	0.53
	203.2	84.51	0.70
	203.2	74.28	0.62
		Avg.: 0.59	

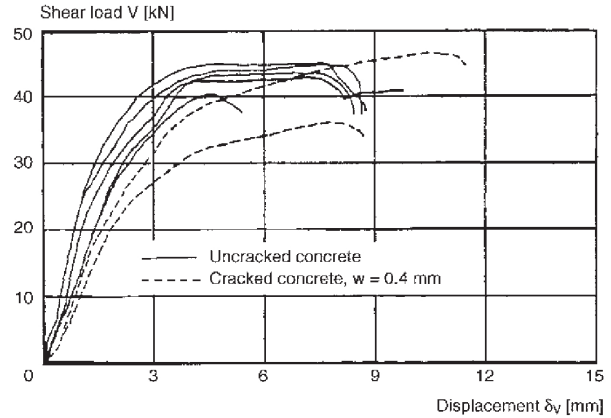


Fig. 2. Load-displacement behavior of headed studs in cracked and uncracked concrete-shear load in direction of crack^[11]

ACI 318 기준^[4]에서 비균열 대비 균열콘크리트의 전단하중에 대한 콘크리트 파괴강도를 1.4배 저감, 즉 71%로 고려하는 기준은 Klingner 등의 실험 결과를 균열콘크리트에 대한 데이터에 포함시켜 결정된 것이다. 즉, Table 1과 Table 2의 각 시험체별 균열콘크리트 실험 강도와 식 (1)의 비균열 콘크리트의 파열파괴강도의 비를 산정하고 이들의 평균값인 $(0.82+0.59)/2=0.71$ 로부터 결정되었다. 하지만, Klingner *et al.*^[10]의 논문에서 균열이나 손상 정도에 대한 데이터가 제시되지 않아 균열콘크리트에 대한 실험 결과로 간주하기에는 다소 모호한 측면이 있다.

한편, Eligenhausen *et al.*^[11]은 균열 방향에 따른 거동의 차이성을 언급하였는데, 균열방향이 전단하중과 수직인 경우에는 비균열콘크리트와 하중-변위 거동의 차이가 크지 않으며, 평행한 경우에는 하중-변위 선도가 완만해졌다고 제시하였다. 이들이 제시한 비균열 및 하중 평행방향 균열콘크리트(균열폭 0.4mm)에 대한 실험 결과를 Fig. 2에 나타내었는데, 중국파괴는 모두 앵커의 파괴이었다. 유럽 역시 선 설치앵커의 균열콘크리트에 대한 실험 데이터가 매우 부족한 실정이다.

2.2 전단하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도 기준

2.2.1 ACI 318-08 기준^[4]

본 기준에서는 앞의 2.1절에서 기술한 근거에 따라 균열 콘크리트의 평균 파열파괴강도를 식 (1)의 비균열콘크리트의 평균 파괴강도 대비 약 71%로 저감하여 다음과 같이 고려하고 있다.

균열콘크리트에 매입된 선설치앵커의 정적 전단하중에 대한 저항강도

$$V_{c,mean} = 0.8 \left(\frac{l_e}{d_o} \right)^{0.2} \sqrt{d_o} \sqrt{f_{ck}} (c_{al})^{1.5} (N) \quad (2)$$

여기서, 각 기호에 대한 설명은 식 (1)과 같다.

2.2.2 ACI 318-11 기준^[5]

Lee *et al.*^[6]은 비균열콘크리트에 매입된 대형 선설치앵커에 대한 실험을 수행하고 식 (1)은 연단거리가 증가할수록 파열파괴강도를 실제보다 과다 평가한다고 제안하였다. 이에 따라 앵커의 직경과 유효지압길이의 영향을 제외하고 비균열 콘크리트의 평균 파열파괴강도를 다음 식으로 제안하였다.

$$V_{u,mean} = 7.0 \sqrt{f_{ck}} c_{al}^{1.5} (N) \quad (3)$$

ACI 318-11 기준에서는 이들의 연구를 수용하여 비균열 콘크리트의 평균 파열파괴강도를 식 (1)과 식 (3) 중 작은 강도를 적용하도록 개정하였다.

한편, 균열콘크리트에서는 여전히 비균열콘크리트 강도의 71%로 저감하여 다음 식을 평균 파열파괴강도로 설정하였다.

$$V_{c,mean} = 5.0 \sqrt{f_{ck}} c_{al}^{1.5} (N) \quad (4)$$

2.2.3 ETAG 001 기준^[3]

유럽의 ETAG 001 기준에서 비균열콘크리트의 파열파괴 강도는 Eligehausen and Hofmann^[12]의 연구 결과를 근거로 하고 있으며, 평균 강도는 다음과 같다.

$$V_{u,mean} = 3.0 d_o^\alpha l_e^\beta \sqrt{f_{cc}} c_{al}^{1.5} (N) \quad (5)$$

여기서, $\alpha = 0.1 \left(\frac{l_e}{c_{al}} \right)^{0.5}$, $\beta = 0.1 \left(\frac{d_o}{c_{al}} \right)^{0.2}$, f_{cc} : 입방형 공시체 압축강도(MPa)이다. 유럽 기준 역시 콘크리트 파열파괴 강도는 CCD 방법에 근거하고 있지만, 식 (1)과 식 (5)로부터 알 수 있듯이 앵커 직경과 유효지압길이의 영향을 다르게 고려하고 있다. 또한 미국 기준은 원통형 공시체를 기준으로 하지만 ETAG 001은 입방체 공시체의 압축강도를 적용하고 있으며 $f_{cc} \approx 1.18 f_{ck}$ 이다.

유럽 역시 균열콘크리트에서의 실험데이터 부족으로 미

국과 동일하게 비균열 대비 균열콘크리트의 평균 파열파괴 강도를 71% 수준으로 저감하는 다음 식을 적용하고 있다.

$$V_{c,mean} = 2.1 d_o^\alpha l_e^\beta \sqrt{f_{cc}} c_{al}^{1.5} (N) \quad (6)$$

3. 실험 방법

3.1 시험체 설계 및 제작

본 연구에서 앵커는 직경 30mm의 M30-S45C($F_y = 490$ MPa)를 사용하고 콘크리트 설계기준강도는 $f_{ck} = 27$ MPa로

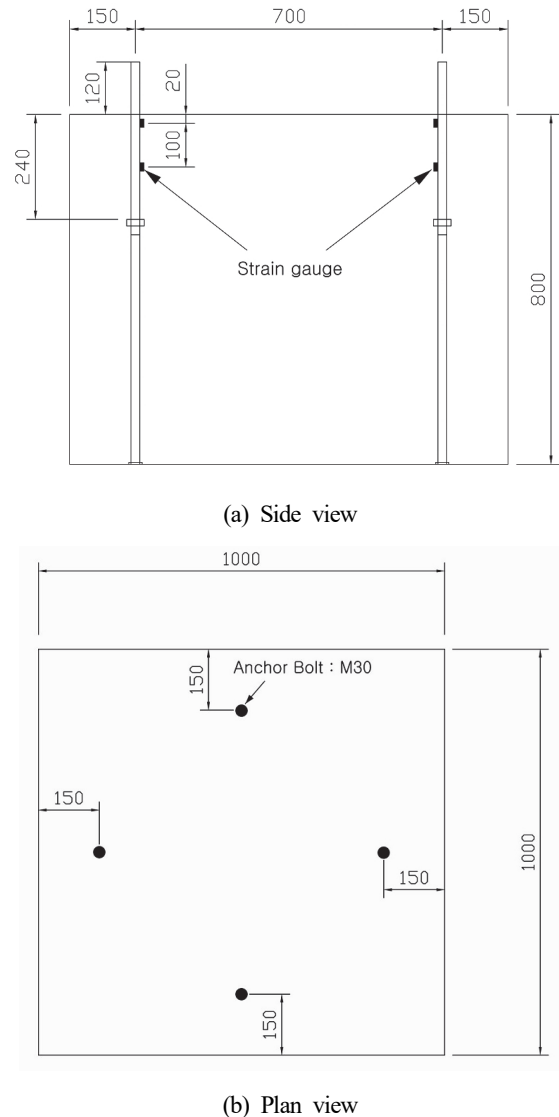
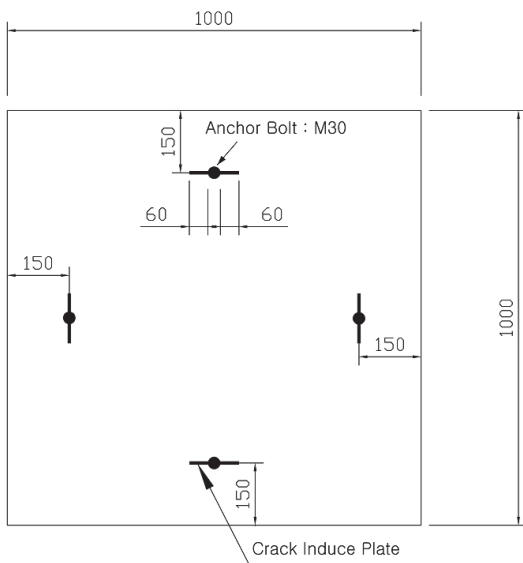


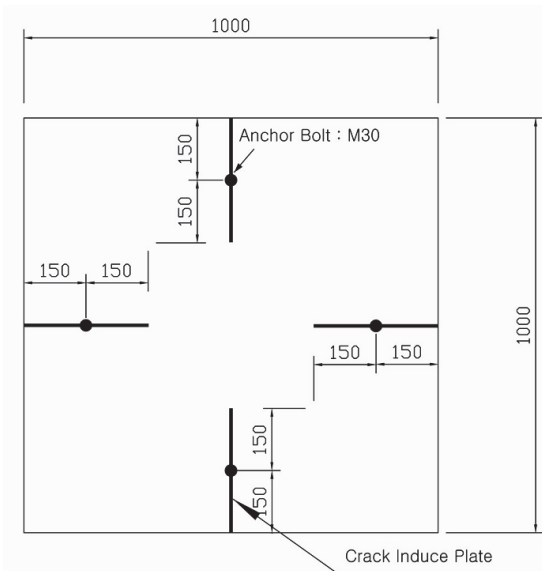
Fig. 3. Uncracked concrete specimen (Units: mm)

설정하였다. 앵커 매입깊이는 240mm($8d_o$)로 하였고 연단 거리는 전단하중에 대해 앵커의 파괴보다 콘크리트 파열파괴가 선행되도록 150mm($5d_o$)로 결정하였다.

비균열 및 균열콘크리트의 앵커 시험체 형상은 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. 균열콘크리트 시험체는 0.5mm 두께의 스테인리스 강판에 그리스를 충분히 바른 후 콘크리트를 타설함으로써 균열을 모사하였다. 균열 방향에 따른 콘크리트 파열 파괴강도의 평가를 위하여 스테인리스 판을 하중에 수직한



(a) Orthogonal crack



(b) Parallel crack

Fig. 4. Plan view of cracked concrete specimen (Units: mm)

방향과 평행한 방향으로 각각 설치하였다. 하중 직각방향 균열은 Fig. 4(a)와 같이 앵커 양측에 각각 폭 60mm의 스테인리스 판을 설치하였고, 하중 평행방향 균열은 Fig. 4(b)와 같이 앵커 전후에 연단거리에 해당하는 폭 150mm의 강판을 설치하였다. 깊이 방향으로 관통균열을 모사하기 위해 스테인리스 판의 깊이는 모두 240mm로 하였다. 한편, 전단하중에 대한 앵커의 거동을 분석하기 위해 Fig. 3(a)에 보인 바와 같이 앵커의 후면에 콘크리트 표면으로부터 20mm와 120mm 위치에 변형률게이지를 설치하였다. 본 연구에서는 비균열 콘크리트 시험체 2편, 하중 직각방향과 평행방향 균열콘크리트 시험체는 각각 3편에 대해 실험을 수행하였다.

3.2 실험 방법

전단하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도 평가실험은 Fig. 5에 보인 바와 같이 앵커가 매입된 콘크리트 블록을 형강과 강봉으로 적절히 고정된 후 UTM으로 가력하였다. 이 때 두꺼운 강판을 형강과 콘크리트 블록 중하단부 사이에 설치하여 콘크리트 파괴면이 형강과 간섭되지 않도록 하였다. 가력 속도는 1 mm/min의 속도로 하였으며, 앵커 두부의 변위 측정을 위해 전단지그(shear jig) 하부에 LVDT를 설치하였다.

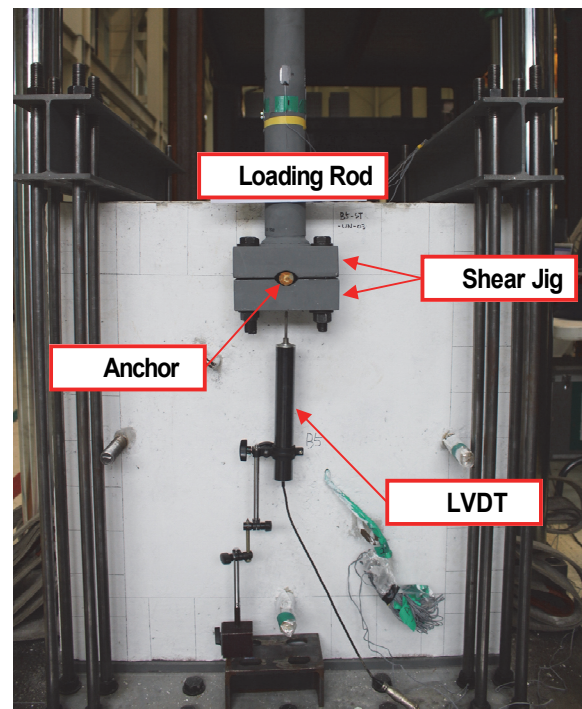


Fig. 5. A view of static shear test

4. 실험 결과 및 분석

4.1 실험 결과 요약

비균열 및 균열콘크리트에 매입된 앵커의 전단하중에 대한 실험에서 모든 시험체는 콘크리트 파열파괴로 종료되었으며 실험 결과는 Table 3에 제시하였다. 비균열콘크리트(UN-시험체)와 하중 직각방향 균열콘크리트(CO-시험체) 블록은 동일 레미콘으로 타설하였으며, 하중 평행방향 균열콘크리트(CP-시험체) 블록은 제작 및 실험 시점이 다르다. 실험 전에 각각 실시한 공시체의 평균 압축강도와 실험 후 콘크리트블록 상부에서 채취한 코어의 평균 압축강도를 Table 3에 제시하였다. 공시체와 코어의 강도 차이는 크지 않으나 콘크리트 블록의 높이가 80cm로 비교적 높아 레이턴스 등에 의한 강도 감소를 감안하여 결과 분석은 코어강도를 기준으로 하기로 한다. 한편, 실험 전에 각 앵커의 연단거리 측정치를 Table 3에 제시하였는데, 비균열 및 균열 시험체의 평균 연단거리는 설정치 150mm와 거의 일치하였다.

Table 3으로부터 비균열콘크리트 앵커 시험체는 평균 60.0 kN, 하중과 직각 및 평행방향 균열 시험체는 각각 60.1 kN, 57.1 kN의 파괴강도를 보였다.

4.2 하중-변위선도

실험으로부터 구해진 하중-변위 선도를 Fig. 6에 제시하였다. 최대강도에 도달하기 직전 UN-시험체와 CP-시험체는 앵커의 좌우에서, CO-시험체는 균열 모사를 위한 스테인리스 판의 끝단에서 최초 균열이 발생하였고 이후 균열이 빠르게 진전되면서 저항능력이 감소하였다. 한편, Fig. 6으로부터 UN-시험체와 CP-시험체에서는 최대하중 도달 이

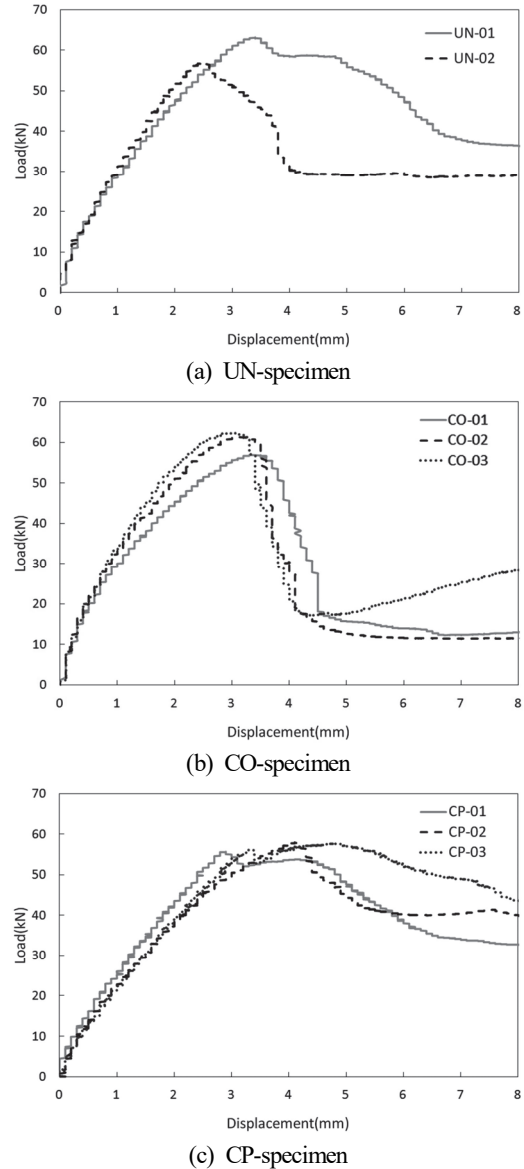


Fig. 6. Load-displacement curves

Table 3. Summary of test results

Specimen		Cylinder compressive strength	Core compressive strength	Edge distance		Ultimate load(kN)		Displacement(mm)	
				c_{a1} (mm)	Mean	V_{test}	Mean	Disp.	Mean
UN-01	Uncracked	27.6MPa	25.3MPa	155	151.5	63.1	60.0	3.3	2.9
UN-02				148		56.8		2.5	
CO-01	Cracked-Orthogonal			155	150.3	56.8	60.1	3.2	3.0
CO-02				149		61.3		3.0	
CO-03				147		62.3		2.8	
CP-01	Cracked-Parallel			28.7MPa	27.7MPa	151	151.0	55.6	57.1
CP-02		151	57.6			4.6			
CP-03		151	58.0			4.0			

후 하중의 감소가 비교적 완만하게 발생하였으나, CO-시험체에서는 최대하중 도달 이후 저항능력이 급격히 감소하였다. 그리고, CP-시험체는 최대하중 도달 시까지의 하중-변위선도 기울기가 다른 시험체들에 비해 다소 완만하게 증가하는 경향을 보였다. 즉, 최대강도 도달 시 앵커의 변위는 Table 3에 보인 바와 같이 UN-시험체와 CO-시험체는 평균 2.9mm와 3.0mm이었으며, CP-시험체는 3.8mm로 기울기가 조금 완만해지는 경향을 보였다. CP-시험체가 CO-시험체에 비해 하중-변위 기울기가 완만하고 저항강도가 낮은 이유는 앵커의 전면부 콘크리트에서 전단하중에 직각방향으로 인장력이 발생하는데 미리 생성된 균열로 인해 인장 저항능력이 상실되었기 때문으로 판단된다.

4.3 파괴 형상

실험 종료 후 콘크리트 블록의 상부 표면과 앵커 위치 단면에서 측면 파괴형상을 측정하였으며 Fig. 7에 예시하였다. 각 시험체별 상부의 앵커 좌우 파괴각과 측면 파괴각은 Table 4에 정리하였다. 상부 파괴면의 각도는 CCD 이론의 35°와 비교 시 다소 완만한 기울기를 보였으며, 이는 비균열 콘크리트에서 전단하중에 대한 기존 연구 결과^{[13], [14]}와 유사한 경향을 보였다.

한편, Fig. 8에 예시한 바와 같이 앵커 위치에서 파괴단면의 깊이(breakout depth)를 측정하고 이를 Table 4에 제시하였다. CO-시험체는 모두 관통균열 깊이(240mm)에서 파열파괴가 발생하였다. 이에 비해 UN-시험체의 평균 파괴 깊이는 143mm로서 앵커 직경의 4.8배, CP-시험체는 평균 189mm로서 앵커 직경의 6.3배의 깊이를 보였다. 파괴단면의 깊이(이하 l_b)는 전단하중에 대한 유효지압길이의 척도로

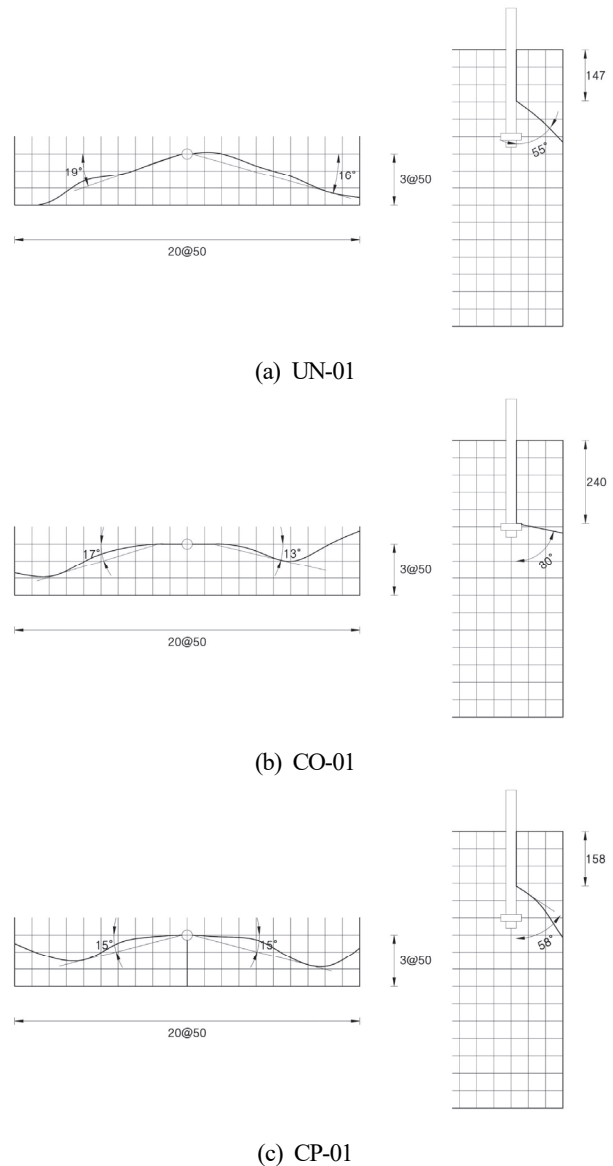


Fig. 7. Top surface and side fracture angle

Table 4. Fracture angle and breakout depth

Specimen	Top surface			Side		Breakout depth (mm)
	Left	Right	Mean	Angle	Mean	
UN-01	19°	16°	19.3°	55°	49.5°	147
UN-02	10°	32°		44°		139
CO-01	17°	13°	15.5°	80°	60.7°	240
CO-02	13°	17°		63°		240
CO-03	18°	15°		39°		240
CP-01	15°	15°	19.7°	58°	50.3°	158
CP-02	12°	47°		46°		169
CP-03	14°	15°		47°		240

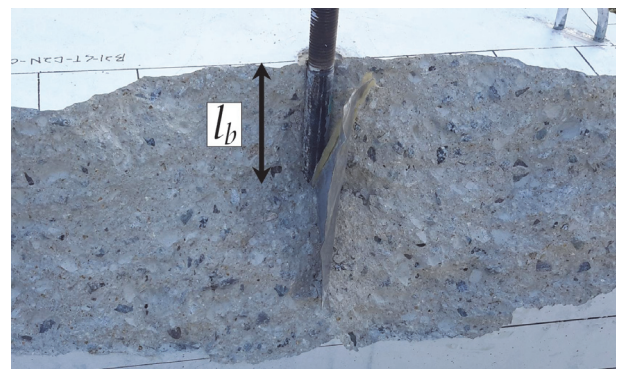


Fig. 8. Breakout depth(specimen CP-01)

생각할 수 있을 것이다. 따라서, 식 (1)~(2) 및 식 (5)~(6)에서 콘크리트 파열파괴강도 산정 시 유효지압길이(l_e)를 $8d_o$ 까지 고려하는데 비해 본 실험의 UN- 및 CP-시험체에서 측정된 파괴단면 깊이는 이에 미치지 못하였다. 이러한 경향은 비균열콘크리트에서 직경 20mm의 앵커에 대해 수행한 기존 연구^{[13], [14]}에서도 나타났으며, 이에 대해서는 4.5절에서 다시 논의하기로 한다.

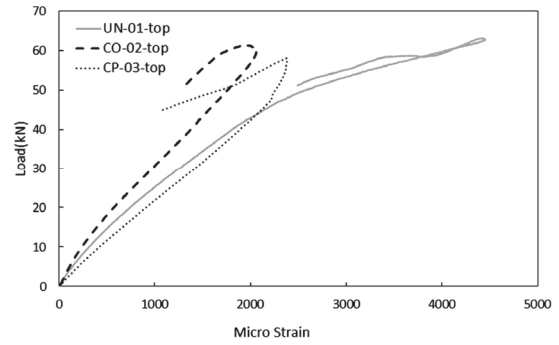
4.4 앵커 변형률 분석

앵커의 상부 및 중간 높이에 설치한 변형률계이지로부터 측정된 변형률을 Fig. 9에 예시하였다. Fig. 9(a)로부터 앵커 상부에서 UN-시험체는 균열 시험체들에 비해 최대하중 도달 시 변형률이 급격하게 증가하였다. 반면에, Fig. 9(b)로부터 중간부에서는 CP-시험체, CO-시험체, UN-시험체 순으로 큰 값을 보였다. 이는 균열 시험체에 비해 비균열 시험체에서 앵커 상부의 휨변형이 상대적으로 크게 발생하였음을 의미한다. 따라서 비균열콘크리트에서는 앵커 상부의 콘크리트가 주로 하중에 저항한 반면, 균열콘크리트에서는 상대적으로 깊은 깊이까지 콘크리트가 하중에 저항하였을 것으로 판단된다. 이는 Table 4에 제시한 파괴단면 깊이(l_b)가 비균열콘크리트에서 가장 작은 값을 보인 것과도 일치한다. 이러한 현상으로 인해 전단하중을 받는 앵커의 균열콘크리트에서의 저항강도가 비균열콘크리트에 비해 큰 폭으로 감소하지는 않았던 것으로 판단된다.

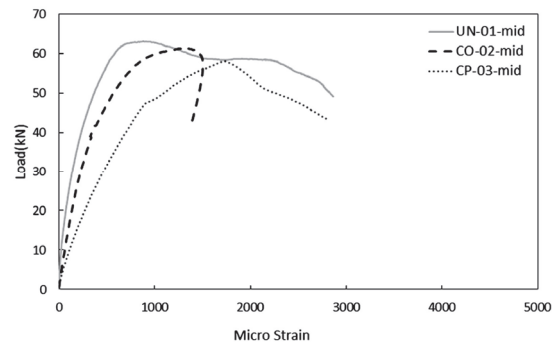
4.5 파열파괴강도 평가

4.5.1 정규화 강도 및 설계기준 강도

본 연구의 실험 결과와 설계기준들에 제시된 비균열 및 균열콘크리트의 파괴강도를 Table 5에 정리하였다. 결과의 분



(a) at top



(b) at mid-depth

Fig. 9. Strain distribution of anchors

석에서 균열콘크리트는 CO-시험체에 비해 작은 강도를 보인 CP-시험체에 대해서만 고려하였으며, 콘크리트 강도는 Table 3에 제시한 코어 강도를 기준으로 하되 압축강도 27 MPa로 정규화한 극한하중($V_{test}^n = V_{test} \times \sqrt{27/f_{ck}}$)으로 비교하였다. 이 때 ACI 318-08 및 ETAG 001 기준의 강도 산정 시 $l_e = 8d_o$ 로 고려하였다. 한편, 지압길이가 콘크리트 파열파괴강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 실험 종료 후 측정된 평균 파괴단면 깊이 l_b (Table 4 참조)를 ACI 318-08 및

Table 5. Comparison of normalized(27MPa) static shear strength in uncracked and cracked concrete

Specimen	Test		$l_{b,mean}$ (mm)	ACI 318-08		ACI 318-11	ETAG 001	
	V_{test}^n (kN)	Mean		$V_{ACI,8d_o}$ (kN)	V_{ACI,l_b} (kN)	V_{ACI} (kN)	$V_{ETAG,8d_o}$ (kN)	V_{ETAG,l_b} (kN)
UN-01	65.2	61.9	143 ($4.8d_o$)	87.2 (0.71)	78.6 (0.79)	66.8 (0.93)	71.2 (0.86)	62.1 (0.997)
UN-02	58.7							
CP-01	54.9	56.3	189 ($6.3d_o$)	63.4 (0.89)	60.4 (0.93)	47.7 (1.18)	50.5 (1.11)	47.3 (1.19)
CP-02	56.9							
CP-03	57.3							

Note) Values in parenthesis are V_{test}^n / V_{Code}

ETAG 001 기준에 적용하여 계산한 강도 V_{ACI, l_b} 및 V_{ETAG, l_b} 를 함께 제시하였다.

4.5.2 비균열콘크리트의 파열파괴강도

Table 5에서 압축강도 27MPa로 정규화한 비균열 시험체의 평균 파열파괴강도는 61.9kN으로 ACI 318-08 기준강도의 71%, ACI 318-11 기준의 93% 그리고 ETAG 001 기준의 86%로 ACI 318-11 기준과는 대체로 부합하지만, 앵커의 직경과 유효지압길이를 $8d_o$ 까지 고려하는 ACI 318-08 및 ETAG 001 기준에는 못 미치는 결과가 얻어졌다. 참고로 연단거리에 따른 각 기준별 강도 곡선을 Fig. 10(a)에 도시하였는데, 여기서 $l_e = 8d_o$, $c_{a1} = 5d_o$, $f_{ck} = 27\text{MPa}$ 로 고려한 것이다. 이로부터 ACI 318-08과 ACI 318-11의 강도식은 연단거리 약 100mm를 기점으로 ACI 318-08 식이 가장 큰

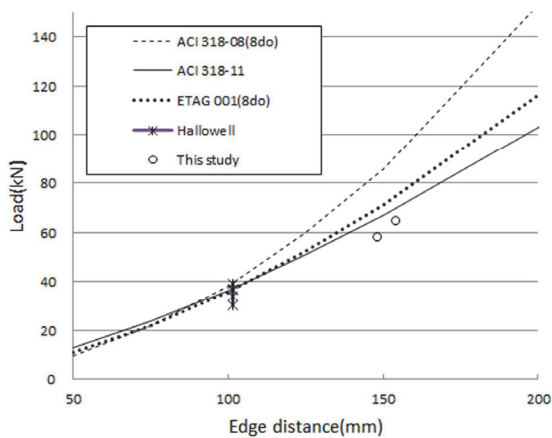
강도를 보이며, 연단거리 101.6mm에 대한 Hallowell^[9]의 실험 결과는 기준 식들과 잘 일치하고 있다.

한편, Table 5로부터 유효지압길이를 $8d_o$ 로 고려한 경우에 비해 파괴단면 깊이($l_b=4.8d_o$)로 적용한 경우 ACI 318-08은 8%, ETAG 001은 14%의 차이를 보여 이들 기준은 유효지압길이가 파열파괴강도에 민감하게 작용함을 알 수 있다. 기존 연구^{[13],[14]}에서 제시한 바와 같이 파괴단면의 깊이와 콘크리트 파열파괴강도 간에 상관성이 적었음을 감안하면 유효지압길이를 고려하지 않는 ACI 318-11 기준(식 (3))이 보다 타당한 것으로 판단된다.

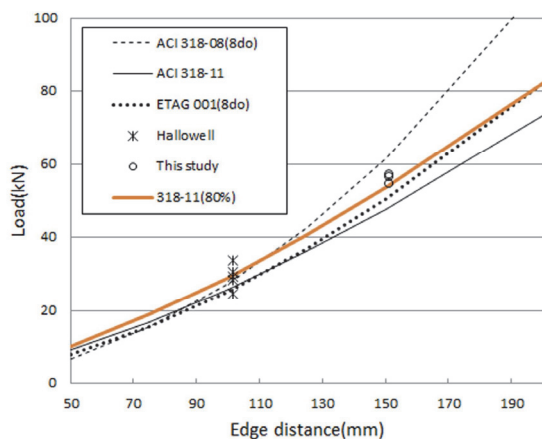
4.5.3 균열콘크리트의 파열파괴강도

Table 5에서 균열 시험체의 정규화한 평균 파열파괴강도는 56.3kN으로 비균열 시험체의 61.9kN에 비해 91%의 강도를 보였다. 또한, 이는 ACI 318-08의 균열 강도에 비해서는 89%에 해당하나, ACI 318-11과 ETAG 001에 비해서는 각각 18%와 11% 큰 강도에 해당된다. 한편, 균열콘크리트에서의 설계기준 강도를 앞의 조건($l_e = 8d_o$, $c_{a1} = 5d_o$, $f_{ck} = 27\text{MPa}$)에 대해 평가하고 본 연구와 Hallowell^[9]의 실험 결과와 함께 Fig. 10(b)에 도시하였다. 그리고, 100mm 이상의 연단거리에서 기준강도가 되는 ACI 318-11의 비균열 강도(식 (3)) 대비 균열 시험체에 대한 Hallowell과 본 연구의 강도비를 Table 6에 제시하였다.

이로부터 식 (3)의 비균열 강도 대비 균열콘크리트에서의 평균 파열파괴강도는 Hallowell의 실험은 78%, 본 연구는 84%로서 평균 81%이다. 이에 비해 Table 2의 Klingner *et al.*^[10]의 데이터를 포함하여 균열 콘크리트의 파열파괴강도를 식 (1) 대비 71%로 설정한 것은 재고가 필요하다고 판단



(a) uncracked concrete



(b) cracked concrete

Fig. 10. Comparison of test results with ACI 318 and ETAG 001

Table 6. Strength ratio in cracked concrete

Researcher	c_{a1} (mm)	V_{test} (kN)	$\frac{V_{test}}{V_{u,mean}^{Eq.(3)}}$
Hallowell ($V_{u,mean}^{Eq.(3)} = 40.8 \text{ kN}$)	101.6	33.36	0.81
		27.13	0.66
		32.02	0.78
		36.91	0.90
		31.13	0.76
		Avg. : 32.1	Avg. : 0.78
This study ($V_{u,mean}^{Eq.(3)} = 66.8 \text{ kN}$)	151	54.9	0.82
		56.9	0.85
		57.3	0.86
			Avg. : 56.3

된다. 제한적인 실험 데이터로 단정하기에는 무리가 있지만, 비균열콘크리트의 강도를 ACI 318-11(식 (3))의 강도를 기준으로 하고 균열콘크리트의 강도는 인장하중에 대한 감소율과 같이 80%를 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 이를 Fig. 10(b)에 예시하였으며, Hallowell과 본 연구의 결과가 이러한 제안에 부합하는 것을 알 수 있다. 하지만, 균열콘크리트에서 신뢰성 있는 강도식의 도출을 위해서는 보다 많은 실험 데이터가 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 전단하중을 받는 선설치앵커의 콘크리트 균열 유무에 따른 정적 파열파괴강도 평가를 위한 실험 연구를 수행하였으며, 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 균열콘크리트에 대한 실험 결과, 전단하중에 직각방향의 균열을 갖는 CO-시험체의 파열파괴강도는 비균열콘크리트(UN-시험체)에 비해 저항강도의 감소가 없었으며, 평행방향 균열을 갖는 CP-시험체에서는 9% 감소하였다. 균열콘크리트에서 강도의 감소가 비교적 작은 이유는 비균열 콘크리트에서는 앵커 상부의 콘크리트가 집중적으로 저항하는 반면, 균열콘크리트에서는 저항 깊이가 상대적으로 깊어지기 때문으로 판단된다.
- (2) ACI 318-08과 ETAG 001의 비균열콘크리트의 파열파괴강도 식은 지압길이에 매우 민감한 점, 유효지압길이를 최대 $8d_o$ 까지 고려하지만 실제 파괴단면에서 측정된 깊이는 이보다 짧았던 점을 감안할 때 유효지압길이를 단순히 앵커의 직경과 매입깊이로부터 결정하는 것은 실제보다 강도를 과다 평가할 소지가 있는 것으로 판단된다. 반면에 유효지압길이를 고려하지 않는 ACI 318-11 기준(식 (3))이 보다 타당한 것으로 판단된다.
- (3) ACI 318-11의 비균열 강도(식 (3)) 대비 균열콘크리트에 대한 Hallowell의 결과는 78%, 본 연구는 84%의 강도를 보여 평균 81%의 강도를 보였다. 한정된 실험 결과로 단정할 수는 없으나, 전단하중을 받는 선설치앵커에 대해 ACI 318-11의 식(3)을 비균열콘크리트의 기준강도로 하고 균열콘크리트의 강도는 80% 수준으로 저감하는 것이 적절할 것으로 분석되었다.

향후 균열콘크리트에서 전단하중을 받는 선설치앵커의 파열파괴강도식의 신뢰도 향상을 위해서는 균열폭, 앵커 직경, 매입깊이, 연단거리, 앵커 간격 등의 기하학적 변수와 콘크리트강도 및 앵커소재의 재료변수를 고려한 보다 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) *Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures* (ACI 349-01), Appendix B: Anchoring to Concrete, USA.
- [2] American Concrete Institute (2001) *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI 318-02) and *Commentary* (ACI 318R-02), Appendix D: Anchoring to Concrete, USA.
- [3] European Organization for Technical Approvals (2013) *Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete* (ETAG 001, 2nd Ed.), Belgium.
- [4] American Concrete Institute (2007) *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI 318-08) and *Commentary*, Appendix D: Anchoring to Concrete, USA.
- [5] American Concrete Institute (2011) *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary* (ACI 318-11), Appendix D: Anchoring to Concrete, USA.
- [6] Lee, N.H., Park, K.R., and Suh, Y.P. (2010) Shear Behavior of Headed Anchors with Large Diameters and Deep Embedments, *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute, Vol.107, No.2, pp.146-156.
- [7] 한국콘크리트학회(2008) 콘크리트구조설계기준 해설, 부록 IV: 콘크리트용 앵커, 기문당.
Korean Concrete Institute (2008) *Concrete Structure Design Code and Commentary*, Appendix IV: Anchoring to Concrete, Kimoon dang, Korea (in Korean).
- [8] 한국콘크리트학회(2012) 콘크리트구조설계기준 해설, 부록 II: 콘크리트용 앵커, 기문당.
Korean Concrete Institute (2012) *Concrete Structure De-*

- sign Code and Commentary*, Appendix II: Anchoring to Concrete, Kimoondang, Korea (in Korean).
- [9] Hollowell, J.M. (1996) *Tensile and Shear Behavior of Anchors in Uncracked Concrete Under Static and Dynamic Loading*, Master's Thesis, University of Texas at Austin, USA.
- [10] Klingner, R.E., Mendonca, J.A., and Malik, J.B. (1982) Effect of Reinforcing Details on the Shear Resistance of Short Anchor Bolts Under Reversed Cyclic Loading, *ACI Journal*, American Concrete Institute, Vol.79, No.1, pp. 3-12.
- [11] Eligehausen, R., Mallée, R., and Silva, J.F. (2006) *Anchor- age in Concrete Construction*, Ernst & Sohn, Germany.
- [12] Eligehausen, R., and Hofmann, J. (2003) *Experimental and Numerical Investigation on Fixings Under Shear Loading Close to an Edge*, Report, Institute of Construction Materials (University of Stuttgart), Germany (in German).
- [13] 박용명, 전명희, 최명국, 김철환, 김인기(2012) 전단력을 받는 선설치 앵커볼트의 콘크리트 파열파괴강도 평가 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 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).
- [14] 박용명, 강문기, 김동현, 이종한, 강충현(2014) 선설치앵커의 동적 전단하중에 대한 저항강도: 비보강 앵커, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제1호, pp.11-20.
Park, Y.M., Kang, M.K., Kim, D.H., Lee, J.H., and Kang, C.H. (2014) Shear Resistance of CIP Anchors Under Dynamic Loading: Unreinforced Concrete, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.1, pp.11-20 (in Korean).

요 약 : 본 연구에서는 균열콘크리트에 매입된 선설치앵커의 정적 전단하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도 평가 실험을 수행하였다. 이를 위해 앵커 직경 30mm, 연단거리 150mm, 매입깊이 240mm인 비균열 시험체 2개와 전단하중에 수직인 방향과 평행한 방향의 균열을 모사한 시험체 각각 3개씩에 대해 실험을 수행하였다. 실험으로부터 하중 직각방향 균열 시험체는 비균열 시험체에 비해 강도의 저하가 없었으며 하중 평행 방향 균열 시험체는 91%의 강도를 보였는데, 이는 ACI 318-11의 비균열콘크리트의 저항강도의 84%에 해당하였다. 따라서 현재 ACI 318 기준에서 균열콘크리트의 저항강도를 비균열콘크리트 강도의 71%로 고려하는 것에 비해 작은 감소율을 보였다.

핵심용어 : 선설치앵커, 균열콘크리트, 균열 방향, 정적 전단하중, 콘크리트 파열파괴강도
