

지진모의실험에 의한 비균열 및 균열콘크리트에 매입된 비보강 선설치앵커의 전단 저항강도 평가

박용명¹ · 김태형^{2*} · 김동현² · 조성훈³ · 이종한⁴

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

Shear Resistance of Unreinforced Cast-In-Place Anchors in Uncracked and Cracked Concrete by Seismic Qualification Tests

Park, Yong Myung¹, Kim, Tae Hyung^{2*}, Kim, Dong Hyun², Jo, Sung Hoon³, Lee, Jong Han⁴

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

³M.Sc., 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 unreinforced cast-in-place anchors by seismic qualification test under shear loading. The CIP anchors tested herein were 30mm in diameter with an edge distance of 150mm and an embedment depth of 240mm in uncracked and cracked concrete. The cracked specimen consisted of orthogonal and parallel crack to the loading direction, respectively. The dynamic loading sequence during the seismic qualification test was determined based on CSA N287.2, ACI 355.2 and ETAG 001 codes. After the dynamic loading, the static loading was applied until failure occurs. The shear resistance by seismic qualification tests showed almost the same strength as that obtained from the static tests in uncracked and cracked concrete, respectively. Meanwhile, the breakout depth did not reach $8d_o$, therefore the modified strength equation of ACI 318-11 could estimate properly the concrete breakout strength, which does not consider effective bearing length.

Keywords - Cast-in-place anchor, Seismic qualification test, Uncracked concrete, Cracked concrete, Shear resistance, Effective bearing length

1. 서론

강재앵커는 선설치앵커와 후설치앵커가 있으며 대형 강재기둥이나 기둥 등은 선설치앵커로 콘크리트 기초에 정착시키는 것이 일반적이다. 인장 또는 전단하중을 받는 강재앵커의 파괴는 앵커 자체의 연성파괴(ductile failure)와 콘크리트

리트 소성파괴(plastic failure)로 구분할 수 있으며, 콘크리트의 파괴모드 중 앵커의 저항강도를 결정짓는 주요 파괴는 콘(cone) 형상으로 파괴되는 파열파괴(breakout failure)이다.

인장 및 전단하중을 받는 앵커의 콘크리트 파열파괴강도 기준으로 2000년대부터 CCD(Concrete Capacity Design) 방법이 미국의 ACI 349-01^[1] 및 ACI 318-02^[2] 기준에 채택되었는데(2.1절 참조), 당시 앵커직경 50mm 이하로 적용을 제한하였다. 한편 유럽의 ETAG 001^[3] 기준에서도 CCD 방법을 채택하였는데, 전단하중에 대한 저항강도에 대해서는 ACI 318 기준과는 앵커의 직경과 유효지압길이의 효과를 조금 다르게 제시하고(2.1절 참조) 적용을 직경 30mm로 제한하였다. 이후 ACI 318-11^[4] 기준에서는 Lee 등^[5]이 수행한

Note.-Discussion open until December 31, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 3, 2015; revised June 8, 2015; approved on June 15, 2015.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-051-510-1460 Fax. +81-51-513-9596

E-mail. howeng@hanmail.net

직경 50mm 이상의 대형 앵커에 대한 실험 결과를 바탕으로 당초 CCD 식이 저항강도를 과다 평가하는 문제점을 인정하여 Lee 등이 제안한 수정강도식을 추가로 채택하였다. 정적 전단하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도 기준의 변천 과정에 대해서는 선행 논문들^{[6],[7],[8]}에서 제시하였으므로 상세한 설명은 생략하기로 한다.

한편, 동적 전단하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도의 기준에 대해서도 기존 논문^[7]에서 제시하였는데, 본 논문의 전개 상 간략히 요약하기로 한다. ACI 318-02에서 ACI 318-08^[9]까지 선설치앵커의 지진 시 동적 인장 및 전단하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도는 정적 강도의 75%로 각각 저감하고, 후설치앵커는 지진모의실험(seismic qualification test)을 통해 동적 저항강도를 결정하도록 제시하였다. 이러한 배경은 1994년 Northridge 지진 시 앵커 파괴가 많이 발생한 점과 실험 데이터의 부족으로 콘크리트 파괴보다는 앵커의 연성파괴를 유도하고자 한 것이다. 반면 ACI 318-11 기준에서는 선설치앵커에 대해 지진 시 인장하중에 대해서는 여전히 정적 강도의 75%로 감소시키지만 전단하중에 대해서는 감소 규정을 삭제하였다. 참고로 국내 콘크리트구조 설계기준^[10]은 ACI 318-08에 근거하였으며, 따라서 동적 전단하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도를 정적 강도의 75%로 저감하고 있다.

한편, ACI 318 및 국내 콘크리트구조 설계기준에서 전단하중을 받는 앵커의 균열콘크리트에서의 콘크리트 파열파괴강도는 비균열콘크리트의 강도에 비해 1.4배 저감, 즉 71%로 고려토록 제시하고 있다. 이는 선행 논문^[8]에서 제시한 바와 같이 Hollowell^[11]과 Klingner 등^[12]의 두 실험 데이터로부터 결정된 것이며, 향후 균열콘크리트에서의 전단 저항강도에 대해서는 보다 많은 실험 데이터가 필요하다.

이상으로부터 선설치앵커의 전단하중에 대한 저항강도에 대해 요약하면 현재 ACI 318 기준^[4]은 균열콘크리트의 정적 전단 저항강도는 비균열콘크리트 강도의 71%로 저감하되, 동적 전단하중에 대한 저항강도는 각각 균열 및 비균열콘크리트의 정적 강도와 동일한 것으로 규정하고 있다.

한편, 동적하중에 대한 앵커의 저항강도는 지진모의실험에 의해 평가하도록 규정하고 있다. 이 실험은 주로 후설치 앵커가 지진을 겪은 이후에 보유하고 있는 저항강도를 평가하기 위한 것으로 캐나다는 CSA N287.2^[13], 미국은 ACI 355.2^[14], 유럽은 ETAG 001^[3]에 각각 상세한 가력방안을 제시하고 있다. 이에 대해서는 2장에서 설명하기로 한다.

본 연구의 목적은 비균열 및 균열콘크리트에 매입된 비보강 선설치앵커의 지진 시 또는 지진 후 전단저항강도 평가를 위한 것이다. 이를 위해 직경 30mm의 앵커를 사용하여 매입깊이 240mm, 연단거리 150mm로 제작한 시험체에 대해 지진모의실험을 수행하였다. 콘크리트의 설계압축강도는 27MPa로 하였으며 균열콘크리트의 경우 전단하중에 수직 한 방향과 수평 방향 균열에 대한 실험을 수행함으로써 균열 방향에 대한 영향을 고려하였다. 본 실험결과를 바탕으로 미국과 유럽의 동적 전단하중에 대한 설계기준 강도와 비교 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1 전단하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도 기준

전단하중을 받는 앵커의 콘크리트 파열파괴 형상을 Fig. 1과 같이 이상화한 CCD 법으로부터 제시된 콘크리트 평균 파열파괴강도(mean breakout strength)는 선행 논문^[8]에서 기술하였으며, 이들을 요약하면 다음과 같다. 단, ACI 318-11 기준은 비균열콘크리트는 식 (1)과 (3) 중에, 균열콘크리트는 식 (2)와 (4) 중에 작은 값을 적용한다.

- ACI 318-08(당초 CCD 강도식) : 비균열콘크리트

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

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

- ACI 318-08(당초 CCD 강도식) : 균열콘크리트

$$V_{c,mean} = 0.8 \left(\frac{l_e}{d_o} \right)^{0.2} \sqrt{d_o} \sqrt{f_{ck}} c_{a1}^{1.5} (N) \quad (2)$$

- ACI 318-11(수정 CCD 강도식) : 비균열콘크리트

$$V_{u,mean} = 7.0 \sqrt{f_{ck}} c_{a1}^{1.5} (N) \quad (3)$$

- ACI 318-11(수정 CCD 강도식) : 균열콘크리트

$$V_{c,mean} = 5.0 \sqrt{f_{ck}} c_{a1}^{1.5} (N) \quad (4)$$

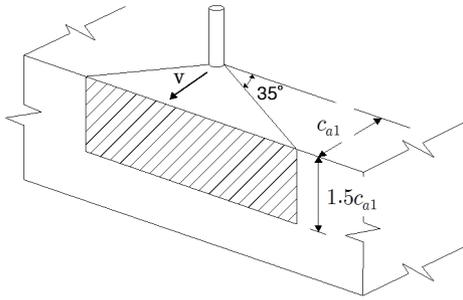


Fig. 1. Idealized breakout model for CCD method^[6]

- ETAG 001 : 비균열콘크리트

$$V_{u,mean} = 3.0 d_o^\alpha l_e^\beta \sqrt{f_{cc}} c_{a1}^{1.5} \quad (N) \quad (5)$$

여기서, $\alpha = 0.1 \left(\frac{l_e}{c_{a1}} \right)^{0.5}$, $\beta = 0.1 \left(\frac{d_o}{c_{a1}} \right)^{0.2}$, f_{cc} : 입방형 공시체 압축강도(MPa)

- ETAG 001 : 균열콘크리트

$$V_{c,mean} = 2.1 d_o^\alpha l_e^\beta \sqrt{f_{cc}} c_{a1}^{1.5} \quad (N) \quad (6)$$

2.2 선행 연구 사례

동적 전단하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도 평가를 위한 실험 연구 사례는 매우 제한적이며, 현재까지 발표된 주요 결과는 다음과 같다.

2.2.1 선설치앵커에 대한 연구

Gross 등^[15]은 비균열 및 균열콘크리트에 매입된 M19 선설치앵커에 대해 rise time 0.1초의 ramp loading에 의한 실험을 수행하였는데, 비균열콘크리트에서는 정적 대비 1.27배, 균열콘크리트에서는 1.44배 저항강도가 증가하였다. 본 실험은 선행논문^[7]에서 기술한 바와 같이 1회성 충격하중에 의한 것으로 지진 시의 동적 저항강도로 보기에 무리가 있다고 판단된다.

Petersen 등^[16]은 M19 선설치앵커에 대해 단조하중(monotonic loading), 편측반복하중(uni-cycle) 및 양진반복하중(reversed cyclic loading)으로 실험을 수행하였는데 반복하중은 모두 유사정적실험으로 수행하였다. 이들의 실험 결과도 선행논문^[7]에 요약하였으며, 편측반복과 양진반복 간에 강도의 차이가 거의 없었고, 또한 정적 단조하중실험에 비해서도 강도의 저하는 없었다고 제시하였다.

한편, Park 등^[7]은 비균열콘크리트에 매입된 연단거리 120mm의 M20 선설치앵커에 대해 1Hz의 편진 동하중을 점차 증가시켜가면서 콘크리트의 파괴강도를 평가하였다. 이로부터 정적 하중에 의한 저항강도는 평균 38.4kN, 동적 저항강도는 38.3kN으로 거의 동등한 강도를 보였다.

2.2.2 후설치앵커에 대한 연구

Ghobara 등^[17]은 균열콘크리트에 매입한 Hiliti 사의 HSLG-M16 후설치앵커에 대해 정적 및 CSA N287.2 기준(2.3절 참조)으로 지진모의실험을 수행하였다. 실험 결과 정적 강도와 지진모의실험에 의한 강도는 거의 동등한 것으로 제시하였다.

2.3 지진모의실험 기준

1994년 Northridge 지진 이후 특히 후설치앵커의 내진성능 평가에 대한 필요성이 증가되었다. 이에 1998년 캐나다에서 CSA N287.2 지진모의실험 기준이 제시되었고, 미국에서는 2000년 ACI 355.2 기준이 제정되었다. 한편 유럽은 2013년 ETAG 001 개정 시 지진하중에 대한 앵커 실험기준이 제정되었다.

2.3.1 CSA N287.2

캐나다의 CSA N287.2 기준은 후설치 앵커의 내진성능 평가 실험기준으로 현재 미국 ACI 355.2와 유럽 ETAG 001 실험기준의 근거가 되었다. 전단실험에서 반복하중의 크기와 횟수는 Fig. 2에 보인 바와 같이 $\pm 0.16F_y$ 및 $\pm 0.12F_y$ 하중 각 30회, $\pm 0.08F_y$ 80회, $\pm 0.04F_y$ 200회로 총 340회의 반복하중을 5Hz 주파수로 동적으로 가력하고 이후 파괴 시

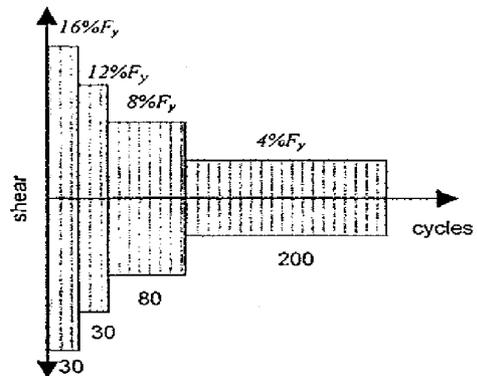


Fig. 2. Cyclic shear loading pattern : CSA N287.2^[13]

까지 정적으로 재하하여 저항강도를 평가한다. 여기서, F_y 는 앵커의 인장항복강도이며, 각 하중단계별 반복횟수와 하중의 크기는 강진 지역의 설계지진 스펙트럼 분석을 통하여 결정된 것이다. 앵커의 동적 저항강도의 평가는 지진모의실험으로부터 얻어진 저항강도가 반복하중을 가하지 않은 정적 파괴강도 이상이 되면 내진성능이 검증된 것으로 간주한다.

2.3.2 ACI 355.2

미국은 후설치앵커에 대해 ACI 355.2 기준에 따라 반복 하중에 의한 모의지진실험을 수행하여 콘크리트 동적 파열 파괴강도를 평가하도록 하고 있다. ACI 355.2에서 제시하고 있는 반복하중 가력형태는 Fig. 3과 같다. 반복하중은 $\pm V_{eq}$ 하중을 10회, $\pm V_i$ 하중을 30회, $\pm V_m$ 하중을 100회로 총 140회의 반복하중을 가력한다. 이때, 반복하중의 크기는 정적실험을 통해 결정된 콘크리트 파열파괴강도($V_{u,stat}$)의 비율로서 V_{eq} , V_i , V_m 는 각각 $V_{u,stat}$ 의 50%, 37.5%, 25%이다. 반복하중의 가력주파수는 0.1~2Hz로 규정하고 있다. 반복하중 가력 시 앵커는 0.5mm 균열콘크리트에 매입된 것으로 가정한다. 동적하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도 평가는 반복가력 후 정재하 실험으로부터 얻어진 콘크리트 파열파괴강도가 반복하중을 가하지 않은 정적 콘크리트 파괴강도의 80% 이상이면 내진성능이 검증된 것으로 간주한다.

2.3.3 ETAG 001

ETAG 001 기준에서는 중·약진 지역(C1 지역)과 강진 지역(C2 지역)으로 구분하여 제시하고 있는데, 여기서는 강진 지역에 대한 C2 기준은 제외하고 중·약진 지역 기준인 C1 기준에 대해서만 요약하였다. C1 지역에 대해서는 Fig. 3의

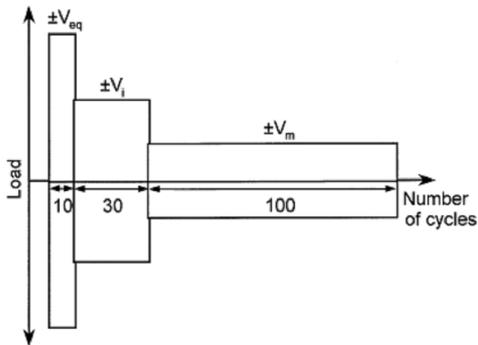


Fig. 3. Cyclic shear loading patten : ACI 355.02^[14]

Table 1. Comparison of seismic qualification test

Standards	Canada CSA-N287.2	USA ACI 355.2	Europe ETAG 001(C1)
Crack width	Non-crack	0.5mm	0.5mm
Loading	Alternating	Alternating	Alternating
No. of cycles	340	140	140
Loading rate	5Hz	0.1~2Hz	0.1~2Hz
$\pm V/V_{u,stat}$	*16%~4%	25%~50%	25%~50%

*Values are defined by the ratio of the yield strength of anchor

ACI 355.2 기준과 동일하게 하중크기, 가력주파수, 반복횟수를 정의하고 있다. 다만, 정적 콘크리트의 파열파괴강도를 균열콘크리트가 아닌 비균열콘크리트를 기준으로 한다. 동적하중에 대한 콘크리트 파열파괴강도 평가도 ACI 355.2 기준과 동일하게 반복 가력한 후 정재하 실험으로부터 얻어진 콘크리트 파괴강도가 반복하중을 가하지 않은 정적 파열 파괴강도의 80% 이상이면 내진성능이 검증된 것으로 간주한다.

이상에서 기술한 각국의 지진모의실험 기준을 Table 1에 요약하였다.

3. 실험 방법

3.1 시험체 제작

본 연구에서는 직경 30mm의 M30-S45C($F_y = 490\text{MPa}$) 앵커를 사용하였고, 콘크리트 설계기준강도는 $f_{ck} = 27\text{MPa}$ 로 설정하였다. 앵커 매입깊이는 240mm($8d_o$)로 하고 연단 거리는 150mm($5d_o$)로 하였다. 비균열 및 균열콘크리트 앵커 시험체 형상은 Fig. 4와 같다.

균열시험체는 관통 균열을 모사하기 위해 0.5mm 두께의 스테인리스판을 240mm 깊이까지 매입하고 그리스를 충분히 도포한 후 콘크리트를 타설하였다. 또한, 균열 방향에 따른 영향을 고려하기 위하여 Fig. 4(b)와 4(c)와 같이 스테인리스판을 하중의 수직방향과 수평방향으로 각각 설치한 시험체를 제작하였다. 하중에 수직방향 균열(CO-시험체)은 앵커 중심 양측에 각각 길이 60mm의 스테인리스판을 설치하였고, 하중의 수평방향 균열(CP-시험체)은 앵커 전후에 연단거리에 해당하는 폭 150mm의 판을 설치하였다.

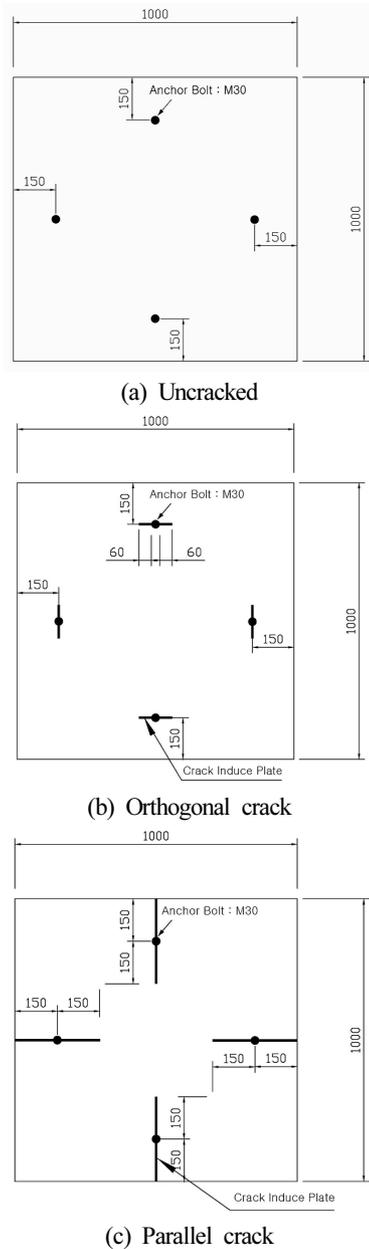


Fig. 4. Uncracked and cracked specimens (Units: mm)

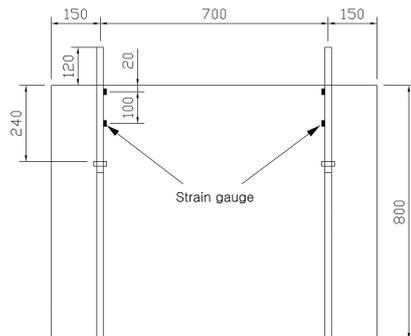


Fig. 5. Location of strain gauges (Units: mm)

한편, 앵커의 깊이별 거동을 평가하기 위하여 Fig. 5에 보인 바와 같이 앵커 후면에 상부표면에서부터 20mm와 120mm 위치에 변형률게이지를 설치하였다.

3.2 가력 방안

지진모의실험은 Fig. 6에 보인 바와 같이 UTM을 이용하여 콘크리트블록에 매입된 앵커를 상하 방향으로 가력하는 방식으로 수행하였다. 콘크리트 블록은 가력 시 상하 방향 움직임을 방지하기 위하여 2개 H-형강을 블록 상부 양측에 설치하고 강봉을 이용하여 바닥 플레이트에 고정시켰다. 이때 두꺼운 강판을 H-형강과 콘크리트 블록의 중하단부 사이에 설치하여 콘크리트 파괴권이 형강과 간섭되지 않도록 하였다. 가력 하중 크기는 UTM 하중으로 평가하였으며, 앵커의 변위는 전단지그(shear jig) 하부에 설치한 LVDT로부터 평가하였다.

지진모의실험 시 동적하중의 재하 방안은 CSA N287.2 기준, ACI 355.2 기준과 ETAG 001 기준을 바탕으로 결정하였다. 이들 기준의 가장 큰 차이는 Table 1에 제시한 바와 같이 동적 반복하중의 가력주파수와 반복횟수이다. 먼저 가력주파수와 관련하여서는 상기 3개 기준을 감안하여 1.0Hz와 5.0Hz의 두 경우를 고려하였다. 한편, 반복횟수는 미국과 유럽(C1 지역)에서는 140회로 제시하고 있어, 본 연구에서는 ACI 355.2와 ETAG 001(C1 지역) 기준과 동일하게 140회의 반복횟수로 결정하였다. 반복하중의 크기는 ACI 355.2에 따라 정적 파열과괴강도의 50%, 37.5%, 25%로 각각 10회, 30회, 100회로 순차적으로 반복 가력하였다.

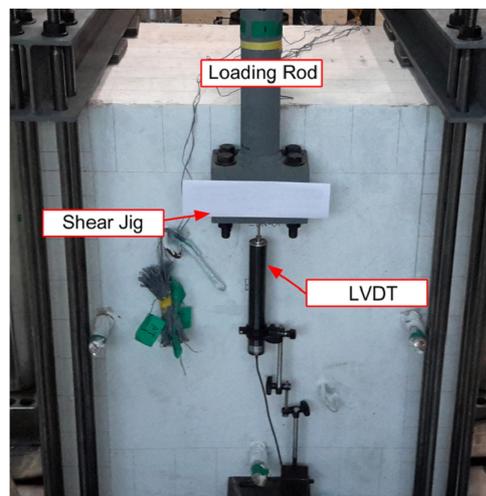


Fig. 6. Setup of dynamic shear test

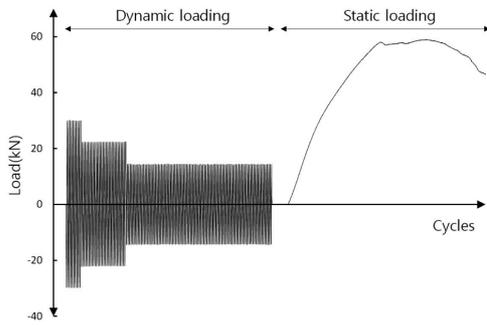


Fig. 7. An example of actual loading step

이때, 정적 파열파괴강도의 크기는 동일한 콘크리트의 타설과 양생조건으로 이루어진 선행 연구^[8]를 기준으로 하여 비균열 시험체(UN-시험체)와 하중 직각방향 균열 시험체(CO-시험체)는 평균 60 kN, 하중 평행방향 균열 시험체(CP-시험체)는 평균 57 kN으로 결정하였다. 참고로 CO-시험체 실험 결과 가력주파수에 따른 강도 차이가 거의 없었고 또한 시험체 제작비 여건상 CP-시험체는 가력주파수 1.0Hz에 대해서만 실험을 수행하였다. 한편 동적가력 후 정적 재하하는 1mm/min의 속도로 콘크리트 파열파괴가 발생할 때까지 가력함으로써 지진모의실험을 종료하였다. 지진모의실험 시 실제 가력 예를 Fig. 7에 제시하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 실험 결과

비균열 및 균열콘크리트에 매입된 앵커의 전단하중에 대한 지진모의실험 결과는 Table 2에 제시하였으며, 모든 시

험체는 콘크리트 파열파괴로 종료되었다. 비균열콘크리트(UN-시험체)와 하중 직각방향 균열콘크리트(CO-시험체) 블록은 동일 레미콘으로 타설하였으며, 하중 평행방향 균열 콘크리트(CP-시험체) 블록은 제작 및 실험 시점이 다르다. 실험 전에 각각 실시한 공시체의 평균 압축강도와 실험 후 콘크리트블록 상부에서 채취한 코어의 평균 압축강도를 Table 2에 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 2에 제시하였는데, 최대 -2mm에서 +4mm의 오차를 보였다. Table 2의 결과는 콘크리트 강도 차이와 연단거리 오차를 고려하여 정규화하여 분석하기로 한다.

4.1.1 파괴 형상

모든 시험체에서 동적 가력 중에 앵커 상단부가 하중 방향으로 콘크리트와 미세하게 접촉 및 이격이 발생하는 것이 육안으로 관측되었다. 그러나, 동적 가력 완료 후 육안으로 관측될 만한 균열은 발생하지 않았다. 동적재하 후 정적재하 과정에서 최대강도에 도달하기 직전 UN-시험체는 앵커줄기의 좌우에서, CO-시험체는 균열 모사를 위한 스테인리스판의 끝단에서 최초 균열이 발생하였고 이후 균열이 빠르게 진전되면서 저항능력이 감소하였다. 한편, CP-시험체는 앵커줄기 좌우에서 균열이 발생하고 전면부 스테인리스판 설치 위치에서 콘크리트가 벌어지면서 파괴에 이르렀다. 각 경우의 파괴 형상 예를 Fig. 8 (a)~(c)에 제시하였다.

실험 종료 후 콘크리트 블록의 상부와 측면에서의 파괴 형상을 측정하였으며 이를 Fig. 8(d)에 예시하였다. 각 시험체

Table 2. Summary of seismic qualification test results

Loading rate	Specimens	Crack	Cylinder Compressive strength	Core Compressive strength	Edge distance c_{a1} (mm)	Ultimate load (kN)		Displacement at failure (mm)		
						V_{test}	Mean	u_{test}	Mean	
1.0 Hz	UN-DM-01	uncracked	27.6MPa	25.3MPa	148	63.8	61.5	4.7	3.9	
	UN-DM-02				153	59.1		3.1		
	CO-DM-01	crack - orthogonal			154	61.0	60.5	3.3	3.4	
	CO-DM-02				154	60.1		3.4		
	CP-DM-01	crack - parallel			28.7MPa	154	58.2	57.7	3.2	3.3
	CP-DM-02					151	57.1		3.4	
5.0 Hz	UN-DH-01	uncracked	27.6MPa	25.3MPa	152	59.2	60.8	3.1	2.9	
	UN-DH-02				152	62.4		2.8		
	CO-DH-01	crack - orthogonal			151	63.4	59.9	3.5	2.9	
	CO-DH-02				151	56.3		2.2		



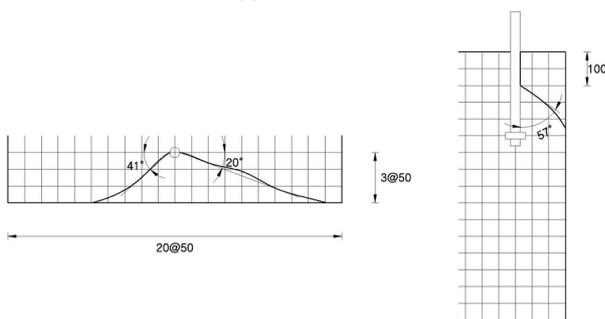
(a) UN-DM-01



(b) CO-DM-02



(c) CP-DM-01



(d) Fracture angle(UN-DM-01)

Fig. 8. Examples of breakout failure

별 상부 및 측면 파괴각과 파괴단면 깊이(breakout depth, 이하 l_b)를 Table 3에 정리하였다. 상부 파괴면의 각도는 CCD 이론의 35° 에 비해 대부분 다소 완만한 기울기를 보였으며, 측면 파괴각은 이보다 큰 각도를 보였다. 한편, UN-

Table 3. Fracture angle and breakout depth

Specimen	Top surface		Side	Breakout depth (mm)
	Left	Right	Angle	
UN-DM-01	20°	41°	57°	100
UN-DM-02	12°	7°	63°	147
UN-DH-01	20°	41°	46°	158
UN-DH-02	21°	26°	64°	153
(Average)	(18°)	(29°)	(58°)	(140)
CO-DM-01	20°	18°	46°	200
CO-DM-02	18°	19°	73°	156
CO-DH-01	6°	17°	78°	90
CO-DH-02	19°	18°	46°	118
(Average)	(16°)	(18°)	(61°)	(141)
CP-DM-01	15°	13°	57°	208
CP-DM-02	2°	10°	54°	235
(Average)	(9°)	(12°)	(56°)	(222)

시험체와 CO-시험체의 파괴단면 깊이는 평균 140mm 정도로서 앵커 직경의 4.7배, CP-시험체는 평균 222mm로서 앵커 직경의 7.3배의 깊이를 보였다. 식 (1)~(2) 및 식 (5)~(6)에서 콘크리트 파열파괴강도 산정 시 유효지압길이(l_e)를 $8d_o$ 까지 고려하는데 비해 본 연구의 시험체들에서 측정된 파괴단면 깊이는 이에 미치지 못하였다.

4.1.2 하중-변위선도

지진모의실험으로부터 구해진 하중-변위 선도를 가력주파수 1.0Hz 시험체에 대해 Fig. 9에 예시하였다. Fig. 9로부터 UN-시험체는 최대하중 도달 이후 하중의 감소가 비교적 완만하게 발생하였으나, CO-시험체에서는 최대하중 도달 이후 저항능력이 급격히 감소하였고 CP-시험체는 중간 형

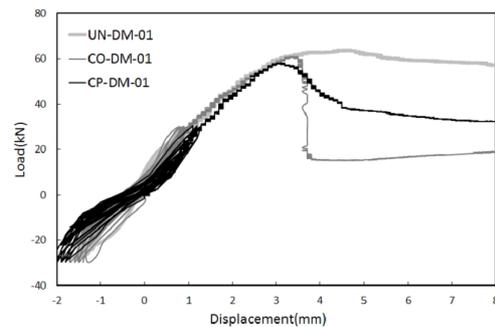


Fig. 9. Load-displacement curve(1.0Hz)

태를 보였다. 최대 하중 도달 시의 변위는 Table 2에 제시한 바와 같이 2.2~4.7mm로서 동적 재하 후 시험체의 구속이 흐트러졌을 가능성을 감안할 때 변위 차이에 따른 분석에 의미를 두기는 어려웠다.

4.1.3 앵커 변형률

Fig. 5에 보인 바와 같이 앵커의 상부 및 중간 높이에 설치한 변형률계이지로부터 정재하 시 측정된 변형률을 Fig. 10에 예시하였다. Fig. 10(a)으로부터 앵커 상부에서 최대 변형률은 2,200~3,800 micro-strain이다. 한편 Fig. 10(b)로부터 중간부에서는 균열시험체들은 1,000 micro-strain 내외이며, 특히 CO-시험체는 변형률이 급격하게 저하한 반면 UN-시험체는 변형률이 급격히 저하하지 않는 경향을 보였는데 이는 Fig. 9의 하중-변위선도의 경향과 일치한다. 전체적으로 상부의 변형률이 중간부에 비해 2배 이상 크고, 따라서 앵커 중간부에 비해 상부 콘크리트에서 상대적으로 큰 지압응력이 발생함을 추측할 수 있다. 이는 유효지압 깊이와 연관이 있고 따라서 선행논문^[8]에서 제시한 바와 같이 ACI 318-08 및 ETAG 001 기준에서 지압깊이를 $8d_o$ 까지 고려하는 것은 실제보다 전단에 대한 저항강도를 과다평가하는 요인이 되는 것으로 판단된다.

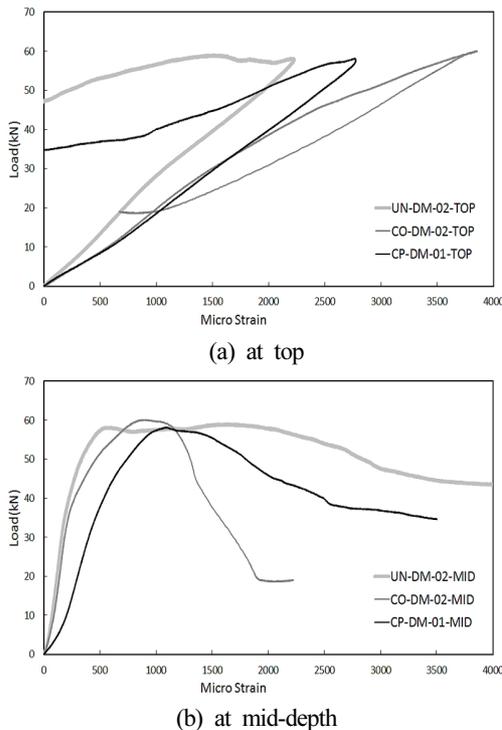


Fig. 10. Strain distribution of anchors

4.2 실험 결과 분석

4.2.1 정규화 콘크리트 저항 강도와 설계기준 강도

본 연구의 실험 결과와 설계기준들에 의한 비균열 및 균열 콘크리트의 파괴강도를 Table 4에 정리하였다. 결과의 분석에서 콘크리트 강도는 Table 2에 제시한 코어 강도를 기준으로 하되 압축강도 27.0 MPa로 정규화하고 또한, 설정 연단 거리 150mm에 대한 오차로 인한 차이를 보정하기 위해 연단거리에 대해서도 보정을 실시하였다. 즉, $V_{test}^{nt} = V_{test} \times \sqrt{27/f_{ck}} \times (150/c_{a1})^{1.5}$ 으로 정규화하였다. 한편, 본 지진모의실험에 의한 결과와 정적 재하실험에 의한 결과를 비교하기 위해 선행논문^[8]의 정적 실험 결과를 Table 4에 함께 제시하였다.

선행논문에서 보인 바와 같이 유효지압깊이(l_e)를 $8d_o$ 로 고려하는 경우 ACI 318-08의 식 (1)은 실제보다 강도를 과다 평가하는 문제점이 있어 본 검토에서는 제외하였다. 따라서 강도 비교는 ACI 318-11의 수정강도식(식 (3) 및 (4))과 ETAG 001의 강도식(식 (5) 및 (6))으로 비교하였다. ETAG 001 기준에 의한 산정 시 $l_e = 8d_o$ 와 측정된 파괴단면 깊이(l_b , Table 3 참조)를 각각 고려하였다.

4.2.2 비균열콘크리트의 동적 파열파괴강도

Table 4로부터 지진모의실험에 의한 비균열 시험체의 평균 파열파괴강도는 62.4kN으로 선행논문의 정적재하 실험 결과(61.9kN)와 거의 동등한 강도를 보였다. 따라서 ACI 318-11부터 전단하중에 대해서는 정적 강도에 비해 동적 강도를 75%로 저감하는 규정을 삭제한 것에 부합하는 결과를 보였다. 한편, 지진모의실험에서 1.0Hz로 가력 시 강도는 67.3~59.3kN, 5.0Hz로 가력 시에는 60.0~63.2kN으로 가력주파수에 따른 차이는 크지 않았다.

지진모의실험으로부터 구해진 파괴강도(62.4kN)는 ACI 318-11 기준의 94%, ETAG 001 기준($l_e = 8d_o$)의 88%로 ACI 318-11 기준과는 대체로 부합하지만, 유효지압깊이를 $8d_o$ 까지 고려하는 ETAG 001 기준에는 12% 못 미치는 결과가 얻어졌다. 반면에 유효지압깊이를 파괴단면 깊이($l_b = 4.7d_o$)로 적용한 경우 ETAG 001의 61.8kN과 거의 일치하는 값을 보이며, 따라서 유효지압깊이를 고려하는 기존 CCD 강도식(식 (1) 및 식 (5))은 유효지압깊이가 파열파괴강도에 민감하게 작용함을 알 수 있다. 따라서 선행 연구^[7]에서 제시한 바와 같이 파괴단면의 깊이와 콘크리트 파열파괴강도 간에

상관성이 매우 적음을 감안하면 유효지압길이를 고려하지 않는 ACI 318-11 기준(식 (3))이 콘크리트 파열파괴강도 평가에 타당한 것으로 판단된다.

4.2.3 균열콘크리트의 동적 파열파괴강도

Table 4로부터 지진모의실험에 의한 CO-균열 시험체의 평균 파열파괴강도는 60.7kN으로 정적 강도 62.1kN에 비해 2.3%, CP-균열 시험체는 55.5kN으로 정적 강도 56.3kN에 비해 1.4% 작은 결과를 보였다. 제한된 시험체 수이지만 균열콘크리트에서도 정적 대비 동적 강도의 차이가 거의 없거나 감소 정도가 매우 적다고 판단되며, 따라서 균열콘크리트에서도 ACI 318-11부터 전단하중에 대해 정적 대비 동적 강도를 75% 저감하는 규정을 삭제한 것에 부합하는 결과가 얻어졌다. 한편, CO-시험체에서 1.0Hz로 가력 시 강도는 60.6~59.7kN, 5.0Hz로 가력 시에는 64.8~57.6kN으로 균열시험체에서도 가력주파수에 따른 강도 차이는 크지 않았다.

Table 4로부터 CO-시험체는 비균열 시험체와 거의 동등한 정적 강도를 보인 것과 마찬가지로 지진모의실험에서도

CO-시험체(60.7kN)는 비균열 시험체(62.4kN)와 1.8% 차이로써 거의 같은 수준의 강도를 보였다. 한편, CP-시험체(55.5kN)의 동적 강도는 비균열 시험체(62.4kN)에 비해 89%로 감소하였는데, 이는 정적 실험에서의 강도비 91%(=56.3kN/61.9kN)와 비슷한 수준의 감소비를 보였다.

이후 비균열콘크리트에 비해 강도의 감소가 거의 없는 CO-시험체는 제외하고 강도의 감소를 보이는 CP-균열 시험체의 결과를 설계기준 강도와 비교하기로 한다. Table 4에 제시된 바와 같이 CP-시험체의 동적 강도(55.5kN)는 ACI 318-11 기준의 비균열 상태의 강도(66.8kN) 대비 83%, ETAG 001 기준($l_e = 8d_o$, 적용 시 71.2kN) 대비 78%로서 평균 80%, 즉 1.25배 정도의 낮은 강도를 보인다. 반면 Table 4에서 CP-시험체의 강도가 ACI 318-11의 수정강도식 대비 정적 강도는 1.18배, 동적 강도는 1.16배 큰 값을 보이고, ETAG 001 기준($l_e = 8d_o$, 적용 시)에 비해 정적 강도는 1.11배, 동적강도는 1.10배 큰 강도를 보인다. 이는 현재 기준들에서 균열콘크리트 강도를 비균열콘크리트에 비해 1.4배 저감하는 것에 원인이 있다. 이는 선행논문^[8]에서 제시된 바와 같이 비균열 대비 균열콘크리트의 강도감소비는 Hollowell

Table 4. Normalized shear strength

Specimen		Loading	Test		$l_{b,mean}$ (mm)	$V_{ACI318-11}$ (kN) : Eq.(3) or (4)	$V_{ETAG001}$ (kN) : Eq.(5) or (6)	
			V_{test}^n (kN)	Mean			$l_e = 8d_o$	$l_e = l_{b,mean}$
Uncracked	UN-01	Static ^[8]	65.2	61.9	143 (4.8 d_o)	66.8 (0.93)	71.2 (0.86)	62.1 (0.997)
	UN-02		58.7					
	UN-DM-01	Seismic Qualification Test	67.3	62.4	140 (4.7 d_o)	66.8 (0.94)	71.2 (0.88)	61.8 (1.01)
	UN-DM-02		59.3					
UN-DH-01	60.0							
Cracked - Orthogonal	CO-01	Static ^[8]	58.7	62.1	240 (8.0 d_o)	47.7 (1.30)	50.5 (1.23)	50.5 (1.23)
	CO-02		63.3					
	CO-03		64.4					
	CO-DM-01	Seismic Qualification Test	60.6	60.7	141 (4.7 d_o)	47.7 (1.27)	50.5 (1.20)	43.9 (1.38)
	CO-DM-02		59.7					
	CO-DH-01		64.8					
Cracked - Parallel	CP-01	Static ^[8]	54.9	56.3	189 (6.3 d_o)	47.7 (1.18)	50.5 (1.11)	47.3 (1.19)
	CP-02		56.9					
	CP-03		57.3					
	CP-DM-01	Seismic Qualification Test	55.2	55.5	222 (7.4 d_o)	47.7 (1.16)	50.5 (1.10)	49.3 (1.13)
	CP-DM-02		55.8					

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

과 Klingner 등이 수행한 두 가지 실험 데이터로부터 결정된 것으로 Klingner 등의 실험데이터를 균열콘크리트에 포함하는 것에 대해 재고가 필요하고 적합한 강도감소비의 도출을 위해서는 향후 보다 많은 실험데이터가 필요한 실정이다.

5. 결론

본 연구에서는 비균열 및 균열콘크리트에 매입된 선설치앵커에 대해 지진모의실험으로 전단 저항강도를 평가하기 위한 연구를 수행하였으며 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 비균열 및 균열 시험체에서 동적 저항강도는 정적 강도에 비해 강도의 감소가 없거나 매우 작은 수준이었다. 이는 ACI 318-08까지 동적 강도를 정적 강도의 75%로 저감하였으나 이후 ACI 318-11부터 전단하중에 대해서는 강도 감소 규정을 삭제한 것에 부합하는 결과를 보였다. 따라서 ACI 318-08에 근거한 국내 관련 기준^[10]의 개정 시 이에 대한 고려가 필요하다.
- (2) 각 기준별로 지진모의 실험 시 동적 하중의 가력주파수에 대한 규정이 다른데 비해 본 연구에서 수행한 1.0Hz와 5.0Hz 범위에서 비균열 및 균열 콘크리트 모두 최종 강도의 차이는 거의 없었다.
- (3) 앵커의 변형률 측정으로부터 최대 하중 도달 시 앵커 상부의 변형률이 중간부보다 약 2배 이상으로서 파괴단면의 깊이는 대부분 매입깊이 $8d_o$ 에 이르지 못하였다. 정적 하중에 대한 선행 연구에서도 제시한 바와 같이 본 연구에서도 유효지압길이를 $8d_o$ 까지 고려하는 ACI 318-08(식 (1)) 및 ETAG 001(식 (5)), 특히 ACI 318-08 기준은 실제보다 비균열 콘크리트의 동적 파열파괴강도를 과다 평가할 수 있으며 유효지압길이를 고려하지 않는 ACI 318-11의 수정강도식(식 (3))이 보다 타당한 것으로 판단되었다. 이에 따라 국내 기준^[10]에서도 수정강도식의 채택이 필요하다.
- (4) 선행논문의 정적 하중에 대한 강도와 유사하게 하중직각방향 균열을 갖는 CO-시험체는 비균열 콘크리트 시험체에 비해 강도의 감소가 1.8%에 불과하여 거의 동등한 저항강도를 보였으며, 하중 평행방향 균열을 갖는 CP-시험체는 비균열 시험체 대비 89%의 강도를 보였다. 설계기준과 비교 시 CP-시험체는 ACI 318-11의 비

균열 강도식 대비 83%, ETAG 001 기준 대비 78%의 강도를 보였다. 이는 현재 기준들에서 균열 콘크리트의 강도를 비균열 강도의 71%(1.4배 저감)로 간주하는 것에 비해 조금 큰 강도를 보였다.

감사의 글

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

참고문헌(References)

- [1] ACI Committee 349 (2001) *Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures, ACI 349-01, Appendix B: Anchoring to Concrete*, American Concrete Institute.
- [2] ACI Committee 318 (2002) *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-02, Appendix D: Anchoring to Concrete*, American Concrete Institute.
- [3] ETAG 001 (2013) *Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for use in Concrete*, European Organization for Technical Approvals (EOTA).
- [4] ACI Committee 318 (2011) *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, Appendix D: Anchoring to Concrete*, American Concrete Institute.
- [5] 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*, Vol.107, No.4, pp.146-156.
- [6] 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).
- [7] 박용명, 강문기, 김동현, 이종한, 강충현(2014) 선설치앵커의 동적 전단하중에 대한 저항강도: 비보강 앵커, 한국강구

- 조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제1호, pp.11-20.
 Park, Y.M., Kang, M.G., 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).
- [8] 박용명, 주호중, 김동현, 강문기, 이종한(2015) 균열콘크리트에 매입된 선설치앵커의 정적 전단하중에 대한 저항강도, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제1호, pp.87-97.
 Park, Y.M., Ju, H.J., Kim, D.H., Kang, M.G., and Lee, J.H. (2015) Static Shear Resistance of Cast-In-Place Anchors in Cracked Concrete, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.1, pp.87-97 (in Korean).
- [9] ACI Committee 318 (2008) *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, ACI 318-08, Appendix D: Anchoring to Concrete, American Concrete Institute.
- [10] 한국콘크리트학회(2012) 콘크리트구조기준해설, 부록 II 콘크리트용 앵커.
 Korean Concrete Institute (2012) *Concrete Structure Design Code and Commentary*, Appendix II Anchoring to Concrete (in Korean).
- [11] Hallowell, J.M. (1996) *Tensile and Shear Behavior of Anchors in Uncracked Concrete Under Static and Dynamic Loading*, Master Thesis, The University of Texas at Austin.
- [12] 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*, Vol.79, No.1, pp.3-12.
- [13] CSA N287.2 (1998) *Material Requirements for Concrete Containment Structures for CANDU Nuclear Power Plants*, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario.
- [14] ACI 355.2 (2000) *Evaluating the Performance of Post-installed Mechanical Anchors in Concrete*, Reported by ACI Committee 355.
- [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* (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] 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.
- [17] 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.

요 약 : 본 연구에서는 지진모의실험으로 비보강 선설치앵커의 전단에 대한 콘크리트 파열파괴강도를 평가하기 위한 실험 연구를 수행하였다. 이를 위해 앵커 직경 30mm, 연단거리 150mm, 매입깊이 240mm인 비균열 시험체와 전단하중에 수직 및 수평 방향 균열콘크리트 시험체들에 대해 각각 실험을 수행하였다. 지진모의실험 시 동적 가력은 CSA N287.2, ACI 355.2와 ETAG 001 기준을 참조하여 결정하였으며 이후 파괴 시까지 정적 재하를 실시하였다. 비균열 및 균열콘크리트 모두 지진모의실험에 의한 저항강도는 각각 정적 강도와 거의 동등한 수준이었다. 한편, 콘크리트 파괴단면의 깊이는 $8d_o$ 에 모두 미치지 못하였으며 이로부터 기존 강도식에 비해 유효지압길이를 고려하지 않는 ACI 318-11의 수정강도식이 콘크리트 파열파괴강도를 적절하게 평가하는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 선설치앵커, 지진모의실험, 비균열 콘크리트, 균열콘크리트, 전단 저항강도, 유효지압길이
