교량받침 연결부 단일 앵커의 매입 깊이에 따른 전단 저항성능 평가

Evaluating Shear Resisting Capacity of Single Anchors at Bridge Bearing Connection According to Embedment Depth

최진석* · 진원종** · 김영진*** · 윤영수****

Choi, Jin-Seok*, Chin, Won-Jong**, Kim, Young-Jin***, and Yoon, Young-Soo****

Abstract

In this study, the shear resisting capacity of a single anchor specimen with anchor socket, reinforcement and mortar was evaluated considering the characteristics of the bridge bearing connection and the anchor shear properties due to the horizontal load of an earthquake. In order to confirm the effect of the reinforcing bar (rebar) on anchor performance, the embedment depth variable of anchor socket was set and overall structural behavior of the specimens was verified by changing the height of supporting concrete. The experimental results showed that the shear resistance increased as the embedment depth of the socket increased, and the maximum performance of the anchor was reached when the socket was embedded up to the coping reinforcement according to the construction criteria. By analyzing the strains of the rebar in accordance with the load change, it was confirmed that the required rebar is applied conservatively in the current construction.

Key words : Bridge Bearing, Anchor, Concrete Breakout, Shear Resistance Capacity

요 지

본 연구에서는 교량받침 연결부의 특성과 지진의 수평하중에 의한 앵커전단 특성을 고려하여 앵커소켓의 매입과 보강철근의 배근, 모르타르를 타설한 단일 앵커 실험체의 전단저항성능을 평가하였다. 보강철근의 앵커성능에 대한 영향을 확인하기 위해 앵커소켓의 매입 깊이 변수를 설정하였고 받침콘크리트의 높이를 변화시켜 실험체의 전체적인 구조 거동을 확인하였다. 실험결과, 앵커소켓의 매입 깊이가 커질수록 전단저항성능이 증가하였고 시공 기준에 따라 하부구조의 코핑부 철근까지 매입된 경우 전단하중에 대한 앵커의 최대 성능 발현을 보였다. 하중 변화에 따른 보강철근의 변형률을 분석을 통해 현재 시공에서 적용 철근량이 보수적으로 적용되고 있음이 확인되었다.

핵심용어 : 교량받침, 앵커, 콘크리트 파열파괴, 전단저항성능

1. 서 론

교량받침 연결부는 상부구조의 수직하중을 지지하여 하부구조에 전달하고 수평변위와 회전을 허용하기 위한 교량

구조물의 중요한 활동관절시스템이다. 앵커(Anchor)는 차량 하중과 같은 다양한 하중에서의 복잡한 거동을 하며 앵커 볼트는 인장력과 전단력, 굽힘 응력을 콘크리트에 전달해야만 한다(Klingner et al., 1982). 해외에서는 미국, 일본,

*정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정(E-mail: radianc@korea.ac.kr)

Member, Master's Course, School of Environment and Architectural Engineering, Korea University

**한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 지진안전연구센터 수석연구원

Senior Researcher, Department of Infrastructure Safety Research Seismic Safety Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

***한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 선임연구위원

Senior Research Fellow, Department of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

****교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수(Tel: +82-2-3290-3320, Fax: +82-2-928-7656, E-mail: ysyoon@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, School of Environment and Architectural Engineering, Korea University

칠레 등에서 내진설계가 적용된 교량받침 연결부가 지진에 의해 파괴되고 교량 전체의 붕괴를 초래한 사례가 있어 지진에 취약한 교량받침 연결부의 안전성 향상을 위하여 설계기준을 보완하고 품질확보 체계를 구축하는 등 다양한 노력을 하고 있다.

최근 국내에 발생한 포항지진은 규모 6.0인 설계지진에 비하여 낮은 최대 규모 5.4인 지진에 의해 5개 교량 14개소에서 교량받침이 크게 손상된 것으로 보고되었다. 또한 1992년 도로교표준시방서에 국내 도로교의 내진설계가 도입되어 이후 교량의 건설에서는 내진성능을 확보하고 있으나 도로교의 90% 이상의 교량은 내진설계가 적용되어 있지 않은 것으로 나타나 있다(Kim, 2011).

현재 국내에서는 ACI 318과 동일한 콘크리트구조기준을 참고한 한국도로공사의 “교량 받침부 설계지침”을 따라 교량받침 연결부가 설계되어 시공되고 있다. 그러나 ACI 318 기준과 콘크리트구조기준의 설계식은 일반적인 앵커의 설계식이기 때문에 교량받침 연결부의 특성을 고려하고 있지 않다(KCI, 2017; ACI 318, 2014). 따라서 본 연구에서는 내진 특성 중 수평하중에 의한 앵커 전단저항성능과 앵커소켓과 보강철근, 모르타르를 고려한 실험체를 제작하여 받침 콘크리트의 높이와 앵커소켓의 매입 깊이에 따른 교량받침 연결부의 전단저항성능을 평가하였다. 이러한 성능평가를 통하여 현재 교량받침 연결부 설계기준 보완에 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 콘크리트구조기준의 앵커 강도 규정

콘크리트구조기준의 앵커 강도 규정에서는 전단하중을 받는 보통 중량 콘크리트 앵커의 파괴강도를 볼트 강재의 전단파괴강도, 콘크리트의 파열파괴 강도(Breakout strength), 콘크리트의 프라이아웃 강도(Pryout strength) 중 최소값을 사용하도록 제시되어있다. ACI 318-14와 콘크리트구조기준에 명시된 앵커의 전단강도 설계 식은 콘크리트의 파열파괴 형상의 콘 각도가 35° 인 피라미드로 이상화하는 Concrete Capacity Design (CCD) 방법에 근거하고 있다(Fuchs et al., 1995).

2.1 콘크리트 파열파괴 강도

전단 하중을 받는 단일 앵커의 공칭 콘크리트 파열파괴 강도는 다음 Eqs. (1), (2)에 의해 얻어진다.

$$V_{db} = \frac{A_{Vc}}{A_{Vco}} \Psi_{ed, V} \Psi_{c, V} \Psi_{h, V} V_b \quad (1)$$

$$V_b = \left[0.6 \left(\frac{l_e}{d_a} \right)^{0.2} \sqrt{d_a} \right] \sqrt{f_{ck}} (c_{a1})^{1.5} \quad (2)$$

단, l_e 는 $8d_a$ 를 넘지 않는다.

이 식들은 안전 계수로서 5% 분위수(Fractile)를 포함하는 CCD 방법을 근거하고 있다. 실제 콘크리트 파열파괴 강도를 예측하기 위해서는 Eq. (2)에서 안전계수가 제거되어야 한다. CCD 방법에 근거하여 인접 앵커의 중첩된 원뿔 또는 c_{a1} 에 수직인 방향의 모서리 영향을 받지 않는 비균열 콘크리트의 평균 콘크리트 파열파괴 강도는 Eq. (4)로 계산할 수 있다(Fuchs et al., 1995; Choi et al., 2015). 전단하중을 받는 콘크리트 파열파괴 강도는 다음 Eqs. (3), (4)와 같이 얻어질 수 있다.

$$V_{dbo} = \frac{A_{Vc}}{A_{Vco}} \Psi_{ed, V} \Psi_{h, V} V_{bo} \quad (3)$$

$$V_{bo} = \left[1.08 \left(\frac{l_e}{d_a} \right)^{0.2} \sqrt{d_a} \right] \sqrt{f_{ck}} (c_{a1})^{1.5} \quad (4)$$

단, l_e 는 $8d_a$ 를 넘지 않는다.

2.2 콘크리트 프라이아웃 강도

전단 하중을 받는 단일 앵커의 공칭 프라이아웃 강도는 다음 Eq. (5)에 의해 얻어진다.

$$V_{cp} = k_{cp} N_{cb} \quad (5)$$

$$N_{cb} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \Psi_{ed, N} \Psi_{c, N} N_b \quad (6)$$

$$N_b = 10 \sqrt{f_{ck}} h_{ef}^{1.5} \quad (7)$$

프라이아웃 강도는 인장하중을 받는 콘크리트의 파괴강도 N_{db} 를 통해 구해질 수 있다. 파열파괴 강도와 마찬가지로 상기 식들은 5% 분위수를 포함하는 CCD 방법을 근거하고 있다. 인접 앵커의 중첩된 원뿔 또는 c_{a1} 에 수직방향 가장자리의 영향을 받지 않는 비균열 콘크리트의 평균 인장강도는 Eq. (9)로 제안될 수 있다(Fuchs et al., 1995; Choi et al., 2015). 인장하중을 받는 콘크리트의 파열파괴 강도는 다음 Eqs. (8), (9)와 같다.

$$N_{cbo} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \Psi_{ed, N} N_{bo} \quad (8)$$

$$N_{bo} = 16.74 \sqrt{f_{ck}} h_{ef}^{1.5} \quad (9)$$

안전계수를 제거한 실제 프라이아웃 강도는 다음 Eq. (10)과 같다.

$$V_{cpo} = k_{cp} N_{cbo} \quad (10)$$

3. 실험 계획 및 방법

3.1 실험 계획 및 변수 상세

단조중가 전단하중에서의 앵커 시스템의 거동을 확인하기 위하여 교량받침 연결부를 모사한 5개의 단일 앵커매입 실험체를 제작하였다. 실제 현장 시공에서 사용하고 있는 G10.9 (Grade 8, $f_y = 940\text{MPa}$), 지름 30 mm인 열처리 육각 앵커볼트와 SS375 ($f_y = 375\text{ MPa}$), 지름 70 mm (d_a)인 원형 앵커 소켓을 사용하였다. 원형 앵커 소켓에 지름 30 mm, 깊이 50 mm의 나사선을 만들어 육각 앵커볼트와 체결 가능하도록 제작하였다. 목표 압축강도는 30 MPa이며 교각 하부구조의 코핑부와 받침콘크리트를 일체로 타설하였다. 앵커 전단 실험을 수행시할 때의 동일 재령 압축강도는 평균 36.2 MPa를 나타내었다. 교각 하부구조의 코핑부 높이는 300 mm, 받침콘크리트의 높이(H_c)는 70 mm와 150 mm로 설정하였다. 받침콘크리트가 경화되고 내부 철근 상면(50 mm)까지 블록아웃(block out)하여 실제 현장에서 사용되고 있는 목표 압축강도 60 MPa의 모르타르를 타설하였고 두께는 도로교통공사에서 제안하는 50 mm로 설정하였다. 실험을 수행할 때의 동일 재령 압축강도는 66.6 MPa를 나타내었다. 앵커의 연단 거리(c_{al})는 315 mm ($4.5d_a$)로 설정하였다. 실험의 주요 변수인 앵커소켓의 매입 깊이 변수(h_{ef})는 Fig. 1과 같다. 즉, 교각 하부구조의 코핑부 철근 상면까지 매입된 변수, 코핑부 철근 상면에서 70 mm 위에 까지 매입된 변수, 코핑부와 받침콘크리트의 경계면 까지 매입된 변수로 3개(Type 1~3)의 매입 깊이 변수를 설정하였다. 5개 변수들의 상세는 Table 1과 같으며 실험체 명명은 $H_c h_{ef}$ 로 하였다.

교량의 받침콘크리트와 교각 하부구조의 코핑부에는 지 압력에 의한 인장력 또는 수평하중에 의한 전단력에 보강하기 위하여 보강철근을 배근한다. 코핑부의 보강은 2단 이상으로 하도록 제안되어 있고 받침콘크리트의 높이가 200 mm 이하인 경우 1단 배치하도록 되어 있다(Korea Highway Corporation, 2011). 앵커의 전단성능을 최대한 확보하기 위하여 D16의 항복강도 400 MPa인 보강철근을 사용하였고 철근의 인장실험으로부터 항복강도는 446.13 MPa, 항복 변형률은 $2.11 \times 10^{-3}\text{ mm/mm}$ 이었다. 보강철근은 받침콘크리트

상면에서 구부러 하부구조의 코핑부에 매입되었고 하중 가력 방향에 평행하게 철근 변형률 게이지를 부착하였다.

Fig. 1. Design Details of Specimens

Table 1. Details of Specimens

Specimen ID	H_c (mm)	h_{ef} (mm)
70_220	70	220
70_150	70	150
70_70	70	70
150_300	150	300
150_230	150	230

3.2 실험 방법

실험에 사용한 액추에이터의 배치, 가력판, 계측기의 셋업은 Fig. 2와 같다. 실험체를 고정하기 위하여 5 ton급 고정력 볼트 5개를 사용하였다. 실험체 하부를 너트로 고정한 후 천천히 유압을 가하여 실험체를 고정하였다. 고정 지점을 추가적으로 사용하여 하중 방향으로의 실험체 밀림을 방지하였다. 앵커볼트에 전단 하중을 가하기 위하여 100 ton

Fig. 2. Monotonic Shear Test Setup

용량의 액추에이터가 사용되었다. 액추에이터 헤드의 처짐과 하중 재하시 가력판의 회전을 방지하기 위해 액추에이터 본체는 바닥에 브레이싱되었다. 액추에이터의 하중 재하 속도는 1.2 mm/min로 설정하였다. 앵커볼트에 전단 하중을 작용시키기 위해 가력판을 제작하였고 받침부에 포함되는 하부판으로 고려하여 두께 30 mm로 설정했다. 앵커볼트의 실제 변위를 측정하기 위해 볼트 상면에 steel plate를 부착하여 Fig. 2와 같이 Linear Variable Differential Transformers (LVDTs)로 측정하였다. 실험체의 밀림을 확인하기 위하여 지면에 LVDTs를 설치하여 실험체의 변위를 측정하였다. 측정 결과 실험체의 밀림은 발생하지 않았다. 데이터 로고 (TDS-540)를 사용하여 보강철근에 부착된 철근 변형률 게이지, LVDTs와 액추에이터의 측정값을 기록하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 전단실험 결과

전단 하중에서 앵커 실험체의 하중-변위 거동과 파괴 양상은 Fig. 3과 같다. 전단 하중을 받는 실험체의 파괴 양상은 총 두 가지로 나타났다. 최대매입 깊이 변수 150_300은 강제 전단파괴가 발생하였고 기타 변수는 콘크리트 파열 파괴가 발생하였다. Table 2에 측정된 최대 전단 하중과 Eqs. (3), (10)에 의해 계산된 강도값을 나타내었다. 실험 최대 전단 하중을 콘크리트 파열파괴 강도 또는 프라이아웃 강도 중 작은 값으로 나누어 측정값과 설계식에 의한 강도와 의 차이 정도를 계산하였고 관측된 최종 파괴 양상도 나타내었다.

Fig. 3. Test Results of Anchor Specimens

Table 2. Test Results

Specimen ID	V_t (kN)	V_{cbo} (kN)	V_{cpo} (kN)	$\frac{V_t}{\min(V_{cbo}, V_{cpo})}$	Observed failure mode
70_220	340.05	338.19	618.88	1.01	Concrete breakout
70_150	245.54	313.25	370.06	0.78	Concrete breakout
70_70	115.6	268.96	117.97	0.98	Concrete breakout
150_300	334.92	396.83	666.75	0.84	Steel failure
150_230	319.44	376.29	624.80	0.85	Concrete breakout

앵커소켓이 코핑부 철근 상면까지 매입된 실험체에서는 받침 콘크리트가 70 mm인 변수 70_220은 전단 하중에 의해 앵커 볼트가 휘었지만 파괴(failure)는 발생하지 않았고 콘크리트의 파열파괴가 발생하였다. 반면 받침 콘크리트가 150 mm인 변수 150_300은 모르타르와 콘크리트의 파열 균열은 발생하였으나 균열 폭이 확장되기 이전에 앵커 볼트의 전단 파괴가 발생하였다. 반면 두 변수 실험체의 최대 전단하중은 변수 70_220은 변수 150_300보다 5.13 kN 높은 값을 나타내었다.

이는 앵커소켓의 매입 깊이가 시공 기준인 코핑부 철근 상면에 도달하여 충분한 매립을 확보하였을 때 받침 콘크리트의 높이 증가로 인하여 수평 하중이 상대적으로 면적이 큰 코핑부에 분산되지 못하고 받침 콘크리트에 하중이 집중된 후 앵커 볼트의 파단이 발생하였기 때문이라고 판단된다 (Korea Highway Corporation, 2011).

한편 앵커소켓이 코핑부 철근 상면에서 70 mm 위까지 매입된 변수 150_230은 변수 70_150보다 최대 전단하중은 73.9 kN 높게 나타내었다. 이는 받침 콘크리트의 높이가 70 mm에서 150 mm로 증가하였으나 앵커소켓이 시공 기준만큼의 충분한 매입 깊이를 확보하지 못하여 변수 150_230보다 짧은 매입 깊이를 갖는 변수 70_150의 최대 전단하중이 적게 나타난 것으로 판단된다.

앵커소켓의 매입 깊이가 증가할수록 최대 전단하중은 증가하였다. 변수 70_220과 변수 150_300은 코핑부에 보강된 철근과 받침콘크리트 내부에 보강된 철근의 균열제어 영향을 받는 반면 기타 변수들은 오직 받침콘크리트 내부 철근의 균열제어 영향에 의해 더 낮은 하중에서 균열이 발생하였고 최대 전단하중도 Eq. (3)에 비해 낮게 나타난 것으로 판단된다(Randl and John, 2001).

변수 70_70의 최대 전단하중 대비 설계강도 비는 0.98로 실험값과 설계강도가 유사하게 나타났다. 전단력을 받는 앵커에 의해 압축부 모르타르 및 콘크리트에서 콘크리트 파열파괴 균열이 크게 발생하였고 후면에도 균열이 발생하였으나 프라이아웃 파괴 양상은 발생하지 않았다. 이는 앵커소켓에 대한 보강철근의 지압효과에 의한 것으로 판단된다 (Anderson and Meinheit, 2005).

실험 종료 후 앵커 볼트의 형상은 Fig. 4와 같으며 총

3가지 종류로 구분된다. Fig. 4(a)는 강재의 휨이 발생하지 않았는데 변수 70_150과 변수 70_70이 이에 해당하며 최대 전단하중 발현 전에 콘크리트의 파괴가 발생하였다. Fig. 4(b)는 앵커 볼트의 큰 휨이 발생하였다. 변수 70_220과 변수 150_230은 하중-변위 곡선과 같이 첫 번째 최대 하중점에서 콘크리트의 파열파괴가 일어난 후 앵커 볼트가 휘어지며 강재의 전단 저항 성능을 발휘하였다. Figs. 4(c)와 4(d)는 앵커 볼트가 파괴된 사진이다. 변수 150_300에서 나타낸 앵커 볼트의 파괴 하중은 설계식에 의해 계산된 값보다 크게 나타났다. 이는 Fig. 4(d)에 보이는 것처럼 전단 하중에 의해 발생한 인장에 의해 앵커면(shaft)이 늘어나며 파단될 수 있기 때문이다(Petersen and Zhao, 2013).

Fig. 4. Anchor Bolt Modes After Test

4.2 보강철근의 변형률 거동

보강철근의 배근상세와 철근 변형률 게이지의 위치를 Fig 5에 나타내었다. 변형률 게이지는 총 10개를 사용하였고 파란 점선으로 표기된 35° 예상 콘 파괴로부터 25 mm 위에 있는 보강철근 상면에 설치하였다. 앵커볼트를 중심으로 왼쪽은 음수로 오른쪽은 양수로 나누어 철근 변형률 게이지의 위치를 표기하였다. 콘크리트 파열 파괴각은 45° 원추형 콘크리트 파괴 방법(ACI 349, 1990) 보다는 CCD 개념의 35° 피라미드 형상의 파괴모드와 유사하게 나타내었다(Fuchs et al., 1995). 콘크리트 파열파괴 균열과 실험체 모서리로 향하는 표면균열, 쪼갬균열이 발생하였으며 최대

하중에 도달한 후 원형 소켓과 콘크리트와의 부착파괴의 발생을 확인할 수 있었다. 일반적으로 앵커 볼트에 인접한 보강철근에서 큰 변형률이 측정되었다.

Fig. 5. Location of Strain Gauges and Reinforcements (Specimen 150_230)

Fig. 6은 하중 변화(Load level)에 따른 보강철근의 철근 변형률을 게이지의 위치 별로 나타낸 것이다. 이때 그래프의 Load level 200은 하중이 최대하중 도달 전 구간에서의 하중 200 kN을 뜻하며 Load level 200(2)는 최대하중 도달 이후 하중이 떨어지는 구간에서의 하중 200 kN을 의미한다. 철근 변형률 게이지에서 측정된 보강 철근의 변형률은 하중이 증가할수록 크게 나타났다. 실험체에 발현한 균열과 매입된 철근 변형률 게이지의 상대적 위치는 계측 변형률에 영향을 줄 수 있다(Petersen and Zhao, 2013). 앵커 볼트 및 균열로부터 거리가 먼 철근 게이지 L5와 R5에서 측정된 변형률은 매우 작았다. 게이지 L1이 설치된 보강철근을 제외하고 어떠한 철근도 항복하지 않았다. 게이지 L1의 경우 최대 하중(peak-load) 이후 하중이 떨어지는 구간인 Load level 200(2)에서 철근의 항복변형률 2.11×10^{-3} mm/mm보다 큰 변형률 2.17×10^{-3} mm/mm를 나타냈다. 콘크리트가 더 이상 하중을 받을 수 없을 때 앵커 볼트에 가장 인접한

Fig. 6. Strains in Anchor Reinforcement (Specimen 150_230)

게이지 L1이 부착된 보강철근이 항복점을 넘어 하중에 저항하는 것을 볼 수 있으며 기타 보강철근이 항복하지 못하고 실험체가 하중에 저항하지 못하는 것으로 현재 받침부 철근 배근에서 소요 철근량이 다소 보수적으로 적용되고 있음을 확인할 수 있다(Korea Highway Corporation, 2011).

5. 결 론

본 연구에서는 보통강도 콘크리트와 모르타르를 사용한 교량받침 연결부 모사 실험체의 받침콘크리트의 높이와 앵커소켓 매입 깊이에 따른 전단저항성능을 평가하였다. 본 연구의 범위 내에서 결론은 다음과 같다.

- (1) 기존 콘크리트구조기준에서는 고려되지 않은 앵커소켓과 모르타르가 실험체 설계에 사용되었음에도 불구하고 CCD 개념의 35° 피라미드 형상의 파괴각과 유사한 콘크리트 파열파괴가 발생하였다. 그러나 설계강도와 실험값의 차이를 보였다.
- (2) 동일한 받침콘크리트의 높이에서 앵커소켓의 매입 깊이가 증가할수록 실험체의 전단하중 저항성능이 증가하였다. 시공기준과 같이 앵커소켓이 교각 하부 구조의 코핑부 철근 상면까지 매입할 경우 보강철근의 지압효과에 의해 앵커 볼트의 최대 저항 성능이 발휘되었고 받침콘크리트의 높이가 클수록 하중이 코핑부에 분산되지 못하고 볼트의 파단이 발생하였다.
- (3) 보강철근의 변형률의 거동을 통하여 앵커에 발생하는 응력분포를 확인할 수 있었다. 현재 교량받침 설계에 사용되는 소요 철근의 배근이 다소 보수적으로 적용됨을 확인하였다.

이상을 종합하여 보았을 때, 추후 연구에서는 앵커볼트의 파괴가 발생하지 않는 범위 내에서 짧은 연단거리를 설정하여 매입 깊이와 연단거리 변화에 따른 전단저항성능 평가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원 주요사업인 “(과제번호: 20190191-001) 지진 시 대피로 및 복귀 차량 운행 노선 확보를 위한 교량 취약 연결부 및 내진장치의 안전성 향상 기술 개발(2차년도)” 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

ACI 318. (2014). *Building code requirements for structural concrete and commentary*. American Concrete

Institute.

- ACI 349. (1990). *Code requirements for nuclear safety related concrete structures and commentary*. American Concrete Institute.
- Anderson, N.S., and Meinheit, D.F. (2005). Pryout capacity of cast-in headed stud anchors. *PCI Journal*, Vol. 50, No. 2, pp. 90-112.
- Choi, S.H., Joh, C.B., and Chun, S.C. (2015). Behavior and strengths of single cast-in anchors in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) subjected to a monotonic tension or shear. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 19, No. 4, pp. 964-973.
- Fuchs, W., Eligehausen, R., and Breen, J. (1995). Concrete capacity design approach for fastening to concrete. *ACI Structural Journal*, Vol. 92, No. 1, pp. 73-94.
- Kim, M.S. (2011). *Seismic performance of the anchor system of bearing-protection devices preventing the unseating failure of bridges*. Master thesis, University of Ulsan, Ulsan, Republic of Korea.
- Klingner, R.E., Mendonca, J.A., and Malik, J.B. (1982). Effect of reinforcing details on the shear resistance of anchor bolts under reversed cyclic loading. *ACI Journal Proceedings*, Vol. 79, No. 1, pp. 3-12.
- Korea Highway Corporation. (2011). *Guidelines for the design of bridge bearing*.
- Korean Concrete Institute (KCI). (2017). *Structural design code for concrete*.
- Petersen, D., and Zhao, J. (2013). Design of anchor reinforcement for seismic shear loads. *ACI Structural Journal*, Vol. 110, No. 1, pp. 53-62.
- Randl, N., and John, M. (2001). Shear anchoring in concrete close to the edge. *International Symposium on Connections between Steel and Concrete*, pp. 251-260.

Notation

- A_{Nc} = Projected concrete failure area of a single anchor or group of anchors, for calculation of strength in tension
- A_{Nco} = Projected concrete failure area of a single anchor, for calculation of strength in tension if not limited by edge distance or spacing
- A_{Vc} = Projected concrete failure area of a single anchor or group of anchors, for calculation of strength in shear
- A_{Vco} = Projected concrete failure area of a single anchor, for calculation of strength in shear, if not limited by corner influences, spacing, or member thickness

- c_{a1} = Distance from the center of an anchor shaft to the edge of concrete in one direction. If shear is applied to anchor, c_{a1} is taken in the direction of the applied shear
- d_a = Diameter of anchor socket
- f_{ck} = Compressive strength of concrete
- H_c = Height of bearing concrete
- h_{ef} = Effective embedment depth of anchor socket
- k_{cp} = Coefficient for pryout strength. If $h_{ef} < 65\text{mm}$ then $k_{cp} = 1.0$, otherwise $k_{cp} = 2.0$
- l_e = Load bearing length of anchor for shear
- N_b = Basic concrete breakout strength in tension of a single anchor in cracked concrete
- N_{bo} = Basic concrete breakout strength in tension of a single anchor in uncracked concrete suggested by CCD method (Fuchs et al. 1995)
- N_{cb} = Nominal concrete breakout strength in tension of a single anchor
- N_{cbo} = Concrete breakout strength in shear of a single anchor suggested by CCD method (Fuchs et al. 1995)
- V_b = Basic concrete breakout strength in shear of a single anchor in cracked concrete
- V_{bo} = Basic concrete breakout strength in shear of a single anchor in uncracked concrete suggested by CCD method (Fuchs et al. 1995)
- V_{cb} = Nominal concrete breakout strength in shear of a single anchor
- V_{cbo} = Concrete breakout strength in shear of a single anchor suggested by CCD method (Fuchs et al. 1995)
- V_{cp} = Nominal concrete pryout strength of a single anchor
- V_{cpo} = Concrete pryout strength of a single anchor without a safety factor (Choi et al. 2015)
- V_t = Measured strength in shear
- $\Psi_{c,N}$ = Modification factor for crack effects in tension. For anchors located in a region where analysis indicates no cracking, $\Psi_{c,N} = 1.25$ for cast-in anchors, otherwise $\Psi_{c,N} = 1.0$
- $\Psi_{c,V}$ = Modification factor for effects of crack and supplementary reinforcement in shear. Refer to 17.5.2.7 of ACI 318-14
- $\Psi_{ed,N}$ = Modification factor for edge effects in tension. If $c_{a,\min} < 1.5h_{ef}$ then $\Psi_{ed,N} = 0.7 + 0.3c_{a,\min}/(1.5h_{ef})$, otherwise $\Psi_{ed,N} = 1.0$
- $\Psi_{ed,V}$ = Modification factor for edge effects in shear. If $c_{a2} < 1.5c_{a1}$ then $\Psi_{ed,V} = 0.7 + 0.3c_{a2}/(1.5c_{a1})$, otherwise $\Psi_{ed,V} = 1.0$
- $\Psi_{h,V}$ = Modification factor for anchors located in a concrete member where $h_a < 1.5c_{a1} (= \sqrt{1.5c_{a1}/h_a})$

Received	October 17, 2019
Revised	October 17, 2019
Accepted	November 6, 2019