

새로운 형태의 선설치 인서트 앵커에 대한 단조 인장 및 전단강도 평가

Tensile and Shear Strengths of New Type of Cast-in-Place Concrete Insert Anchors Under Monotonic Loading

전 주 성*
Jeon, Ju-Seong

김 지 훈**
Kim, Ji-Hoon

오 창 수***
Oh, Chang-Soo

이 창 환****
Lee, Chang-Hwan

Abstract

The damage to non-structural elements in buildings has been increasing due to earthquakes. In Korea, post-installed anchors produced overseas have been mainly used for seismic anchorage of non-structural components to structures. Recently, a new cast-in-place concrete insert anchor installed in concrete without drilling has been developed in Korea. In this paper, an experimental study was conducted to evaluate the tensile and shear strengths of the newly developed anchor under monotonic load. The failure modes of the tension specimens were divided into concrete breakout failure and steel failure, and all shear specimens showed steel failure. In both tension and shear, the maximum loads of specimens were greater than the nominal strengths predicted by the concrete design code (KDS 14 20 54). As a result, it is expected that the current code can also be used to calculate the strength of the developed cast-in anchor.

Keywords : Cast-in anchor, Headed insert, Tensile strength, Shear strength, Concrete failure, Thread failure, Bolt fracture

1. 서론

우리나라에서 건축물에 대한 내진설계기준은 1988년에 제정된 이래 최근까지 주로 구조요소를 대상으로 내진설계의 적용이 이루어지고 있다. 그러나 지진 발생 시 구조요소의 파괴뿐만 아니라 내부 칸막이벽과 가스 배관 등과 같은 비구조요소의 파열로 인한 피해도 지속적으로 증가하고 있다¹⁾. 이에 따라 비구조요소를 구조요소에 연결하기 위한 정착부의 내진설계²⁾에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한 발전설비의 정착부에 사용되는 선

설치 앵커³⁾, 모의지진실험에서의 전단성능 평가⁴⁾, 내진 보강용 후설치 앵커의 인장⁵⁾ 및 전단성능⁶⁾ 등 관련 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 선행 연구는 선설치 앵커의 경우 헤드볼트⁴⁾ 및 헤드스터드 앵커⁷⁾, 후설치 앵커의 경우 확장⁸⁾ 및 부착식 앵커⁹⁾를 주요 대상으로 하였다.

한편 국내에서는 비구조요소 정착부에 대한 내진설계용 앵커를 해외에서 개발된 후설치 앵커¹⁰⁾에 의존하는 실정이다. 후설치 앵커는 경화된 콘크리트 구조체에 천공 후 삽입 및 설치되어야 하므로 시공성 및 정밀도 확보에 어려움이 있다. 따라서 이러한 후설치 앵커의 시공 상 단점을 보완하고 내진설계용 앵커를 국산화하기 위한 목적으로 <Fig. 1>과 같은 새로운 형태의 선설치 인서트 앵커가 최근 개발되었다.

개발된 앵커는 크게 콘크리트 타설 전 매립되는 선설치 인서트와 거푸집 탈형 후 체결되는 전산볼트로 구성되는데, 시공성 개선을 위해 전산볼트를 토크 조임방식이 아닌 인력에 의해 가압식으로 인서트에 삽입하는 형태로 계획되었다. 따라서 콘크리트용 앵커 설계기준 (KDS 14 20 54)¹¹⁾에서 선설치 앵커로 구분되는 범주에

* 학생회원, 부경대학교 건축공학과, 학사과정
Department of Architectural Engineering,
Pukyong National University

** 정회원, (주)양수금속 책임연구원
Yang Soo Metals Co., Ltd.

*** 정회원, (주)양수금속 대표이사, 공학석사
Yang Soo Metals Co., Ltd.

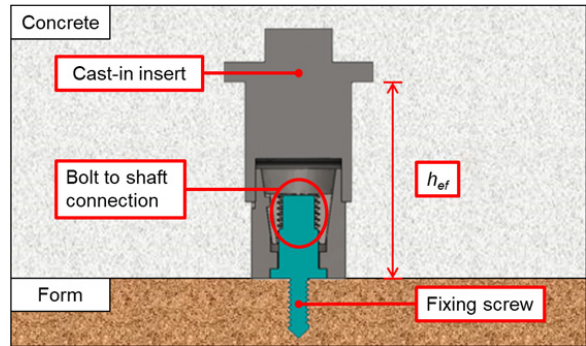
**** 교신저자, 정회원, 부경대학교 건축공학과 조교수,
공학박사
Department of Architectural Engineering,
Pukyong National University
Tel: 051-629-6087 Fax: 051-629-7084
E-mail: chlee@pknu.ac.kr

포함되지 않고, 인서트의 정착부 상세 및 인서트와 전산볼트의 연결부에 대한 적절성 확인 및 강도 평가가 반드시 수행되어야 한다.

이와 같은 배경으로 본 논문에서는 개발된 새로운 형태의 선설치 인서트 앵커의 구조적 성능을 확인하기 위한 첫 번째 단계로서 단조하중 하에서의 인장 및 전단강도를 평가하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 대상 앵커에 대한 개념 및 예비실험을 통한 상세 결정과정이 소개되고, 총 12개의 실험체를 대상으로 인장과 전단에 대해 수행된 구조실험의 내용 및 결과가 제시된다. 또한 현행 앵커 설계기준에 따른 공칭강도와 실험결과를 비교 및 분석하여 본 인서트 앵커의 강도 예측을 위한 기준의 적용 가능성이 평가된다.

2. 선설치 인서트 앵커

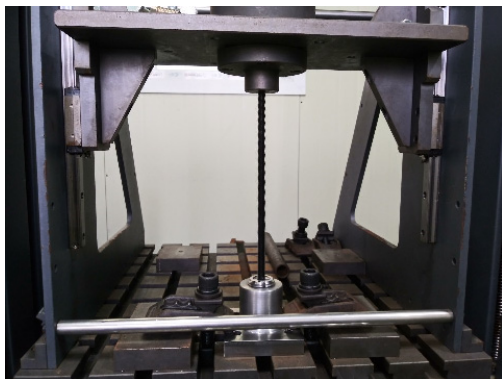
〈Fig. 1〉은 본 연구에서 대상으로 하는 선설치 인서트의 구성을 보여준다. 콘크리트 타설 전 거푸집에 나사못을 통하여 인서트가 고정되고, 콘크리트가 경화되면 거푸집 해체와 함께 고정용 나사못(Fixing screw)은 인



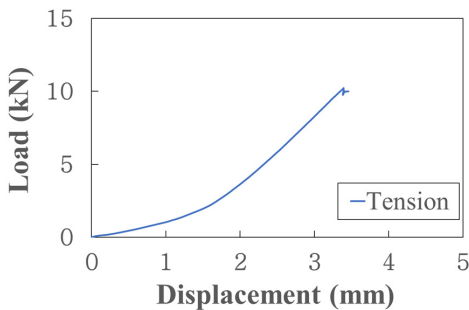
〈Fig. 1〉 Cast-in-place concrete insert

서트와 분리된다. 인서트 내부의 나사산이 노출되면 전산볼트를 삽입한 후 너트로 조임으로써 앵커가 콘크리트에 정착되는 형식이다.

본 선설치 인서트 앵커는 시공성을 개선하기 위하여 볼트를 회전 조립하지 않고 가압식으로 끼우는 구조를 가진다. 이러한 이유로 개발 과정에서 인장하중 하에서 〈Fig. 1〉에 표현된 인서트와 전산볼트의 접촉부(Bolt to shaft connection)에서의 조기파괴 우려가 제기되어 이에 대한 예비 가력실험을 수행하였다. 20kN의 가력용량을 가진 자체 보유 UTM을 사용하였으며, 인서트에 전



(a) Test setup



(b) Load-displacement curve

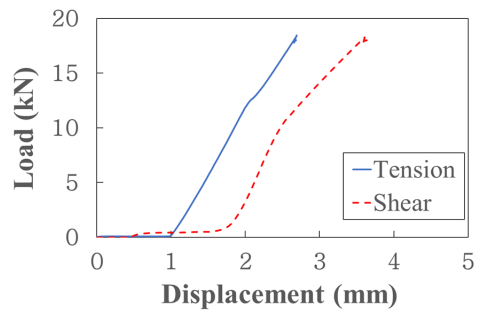
〈Fig. 2〉 The first preliminary test



(a) Tension test



(b) Shear test



(c) Load-displacement curve

〈Fig. 3〉 The second preliminary test

산볼트를 삽입한 후 강제 지그에 고정시켜 실험을 수행하였다. 실험 결과, 우려된 파괴에 대해 앵커는 안전할 것으로 판단되었다. 1차 예비실험의 모습과 하중-변위 곡선은 <Fig. 2>에 주어진다.

선설치 인서트 앵커의 인장 및 전단강도를 최종 평가하기 위한 실험 수행에 앞서 시공성과 경제성을 확보한 인서트의 상세를 결정하기 위한 목적으로 2차 예비 가력실험을 수행하였다. 이 실험은 인서트의 헤드직경 (d_{head}) 및 유효문힘깊이(h_{ef})를 변수로 하여 인장과 전단하중 각각에 대해 18kN까지 재하한 후 10초간 유지하도록 계획되었다. <Fig. 3>은 2차 예비실험의 모습과 인장 및 전단에 대한 하중-변위 곡선을 보여준다. 그림

의 결과는 d_{head} 와 h_{ef} 가 각각 42mm와 59mm인 경우로, 사전 계획된 변수 중 가장 불리한 상세를 가졌음에도 불구하고 파괴 발생 없이 목표성능을 만족하였다. 이에 따라 d_{head} 와 h_{ef} 를 증가시킨 변수에 대한 추가적인 평가를 수행하지 않고 개발 앵커에 대한 상세 ($d_{head} = 42\text{mm}$, $h_{ef} = 59\text{mm}$)를 확정하였다.

3. 실험 개요

3.1 재료특성

실험체 제작에 사용된 콘크리트의 재료특성을 파악하기 위하여 공시체를 제작하여 압축시험을 수행한 결과,

<Table 1> Nominal strength in tension

Failure mode	Equation	Value (kN)
Steel strength	$N_{sa} = n \times A_{se,N} \times f_{uta}$	33.72
Concrete breakout strength	$N_{cb} = (A_{Nc}/A_{Nco}) \times \psi_{ed,N} \times \psi_{c,N} \times \psi_{cp,N} \times N_b$	19.21
Pullout strength	$N_{pn} = \psi_{c,P} \times N_p$	114.00
Concrete side-face blowout strength	$N_{sb} = (13 \times c_{a1} \times \sqrt{A_{brg}}) \times \lambda \times \sqrt{f_{ck}}$	209.50

Note) N_{sa} : nominal strength of a single anchor in tension as governed by the steel strength, n : number of anchors, $A_{se,N}$: effective cross-sectional area of anchor in tension, f_{uta} : specified tensile strength of anchor steel, N_{cb} : nominal concrete breakout strength in tension of a single anchor, A_{Nc} : projected concrete failure area of a single anchor, A_{Nco} : projected concrete failure area of a single anchor for calculation of strength in tension if not limited by edge distance or spacing, N_b : basic concrete breakout strength in tension of a single anchor in cracked concrete, N_{pn} : nominal pullout strength in tension of a single anchor, N_p : pullout strength in tension of a single anchor in cracked concrete, N_{sb} : side-face blowout strength of a single anchor, c_{a1} : distance from the center of an anchor shaft to the edge of concrete in one direction, A_{brg} : net bearing area of the head of stud, anchor bolt, or headed deformed bar, λ : modification factor to reflect the reduced mechanical properties of lightweight concrete relative to normal weight concrete of the same compressive strength, and f_{ck} : specified compressive strength of concrete.

<Table 2> Nominal strength in shear

Failure mode	Equation	Value (kN)
Steel strength	$V_{sa} = n \times 0.6 \times A_{se,V} \times f_{uta}$	20.23
Concrete breakout strength (Side-face)	$V_{cb} = (A_{Vc}/A_{Vco}) \times \psi_{ed,V} \times \psi_{c,V} \times \psi_{h,V} \times V_b$	48.38
Concrete pryout strength	$V_{cp} = k_{cp} \times N_{cb}$	20.77

Note) V_{sa} : nominal shear strength of a single anchor as governed by the steel strength, $A_{se,V}$: effective cross-sectional area of anchor in shear, V_{cb} : nominal concrete breakout strength in shear of a single anchor, A_{Vc} : projected concrete failure area of a single anchor 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, V_b : basic concrete breakout strength in shear of a single anchor in cracked concrete, V_{cp} : nominal concrete pryout strength of a single anchor, and k_{cp} : coefficient for pryout strength.

콘크리트의 압축강도는 17.97MPa로 측정되었다. 앵커를 구성하는 전산볼트($\phi 12$)는 성질 등급이 4.6인 강재로 제작되었다. KS B ISO 898-1¹²⁾에서 규정하는 최소 항복강도와 인장강도는 각각 240MPa과 400MPa로 본 연구에서는 이 값들을 적용하여 기준에 따른 인장 및 전단 강도를 산정하였다.

3.2 예상강도 산정

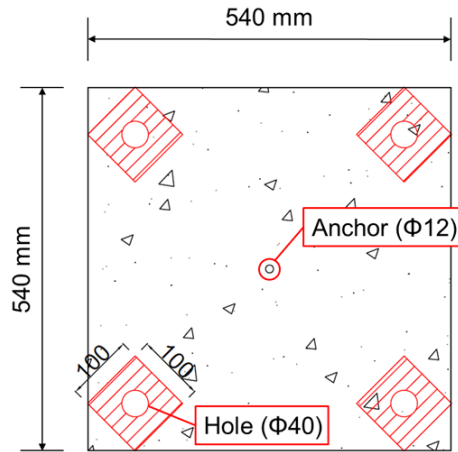
KDS 14 20 54¹¹⁾는 콘크리트구조용 앵커의 설계방법을 제시하고 있다. 선설치와 후설치 앵커 모두에 적용될 수 있으며, 선설치 앵커의 경우 헤드볼트, 헤드스터드 및 갈고리 볼트를 대상으로 한다. 본 연구의 대상인 선설치 인서트 앵커의 강도 예측과 더불어 적용 가능성을 평가하기 위하여 KDS 14 20 54를 적용하여 인장 및 전단강도를 산정하였다.

기준에 따른 인장에 대한 앵커의 파괴유형은 강재강도, 콘크리트 브레이크아웃강도, 뿔힘강도 및 측면파열강도로 구분된다. 전단의 경우 강재강도, 콘크리트 브레이크아웃강도 및 콘크리트 프라이아웃강도로 구분된다. 각각의 평가하중에 대하여 최소값에 해당하는 파괴유형의 값으로서 앵커의 인장 및 전단강도를 산정할 수 있다.

선설치 인서트 앵커의 상세 및 3.1절에서 제시된 재료강도를 적용하여 산정된 파괴유형별 예상강도는 <Table 1>과 <Table 2>에 제시된다. <Table 1>에서 강재의 인장강도 N_{sa} 는 인서트가 아닌 전산볼트의 파단을 고려한 것이고, 계산에 사용된 인서트의 헤드 지압면적 (A_{brg})은 678.58mm^2 이다. 기준에 따른 공칭강도 산정 결과, 인장에 대해서는 콘크리트 브레이크아웃강도가 19.21kN으로 지배적이었고, 전단의 경우 강재파괴에 대해 20.23kN의 강도가 예측되었다.

3.3 실험체 계획

선설치 인서트 앵커에 대한 단조하중 하에서의 인장 및 전단내력을 평가하기 위해 콘크리트 블록에 개발 앵커를 실제와 동일하게 설치하는 방식으로 실험체를 제작하였다. <Fig. 4>와 같이 콘크리트 블록의 크기는 $540 \times 540 \times 200\text{mm}$ 이며, 인장 및 전단 반력 지그에 체결하기 위해 네 모서리 부분에 직경이 40mm인 관통홀을 두었다. 또한 강봉 연결로 인한 콘크리트 국부파괴를 방지



<Fig. 4> Block specimen (Plan)

하기 위해 $100 \times 100\text{mm}$ 의 강재 판을 덧대었다. 이는 콘크리트 파괴면에 대한 간섭을 최소화하기 위하여 45° 로 배치하였다. 실험체는 인장과 전단에 대해 각각 6개씩 제작하였으며, 실험체명은 가력 순서에 따라 인장에 대해서는 T-01부터 T-06으로, 전단에 대해서는 S-01부터 S-06으로 명명하였다.

3.4 실험 방법

가력에는 250kN급 UTM 장비를 사용하였으며, 변위 제어 방식으로 하중을 재하였다. <Fig. 5>는 인장과 전단실험에 대한 세팅 모습을 보여준다. 인장실험에서는 콘크리트 블록 실험체를 지면과 수평하게 반력 지그에



(a) Tension test (b) Shear test

<Fig. 5> Test setup

연결하고, M12 전산볼트에 대해 수직방향으로 인장력을 가하였다. 전단실험에서는 실험체를 지면에 수직방향으로 배치한 후 위로 당기는 방향으로 가력하였다. 또한 가력 지그를 콘크리트 블록 표면에 밀착시켜 모멘트의 영향을 최소화하였다.

4. 실험 결과 및 분석

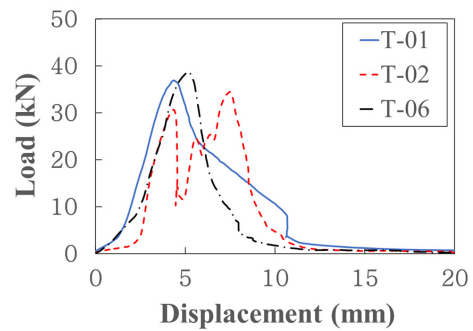
4.1 인장실험

인장실험 결과, 실험체의 파괴유형은 T-01, T-02 및 T-06의 경우 콘크리트파괴(브레이크아웃)였고, T-03, T-04 및 T-05는 최종적으로 강재파괴를 나타냈다. <Fig. 6>은 실험체의 하중-변위 관계를 보여준다. <Table 3>에는 실험에서 얻어진 최대 인장하중(T_{max})과 해당 파괴유형에 대해 <Table 1>에서 산정된 예상강도(T_n)가 비교된다. 각 파괴유형에 대한 T_{max} 의 평균 값은 콘크리트파괴의 경우 36.72kN, 강재파괴의 경우 39.01kN이었다.

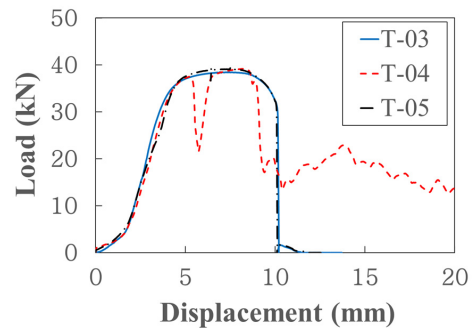
<Fig. 7>은 인장실험체의 파괴모습을 보여준다. 본 앵커의 h_{ef} 는 59mm로 콘크리트에 매립되는 인서트의 깊이가 상대적으로 깊지 않다. 또한 인서트 직경은 외부의 전산볼트 직경보다 큰 특징을 가지는데, 콘크리트 브레이크아웃으로 파괴된 실험체에서는 앵커 중심에서 파괴면까지의 거리가 KDS 14 20 54¹¹⁾ 및 ACI 318-19¹³⁾에 제시된 $1.5h_{ef}$ 보다 훨씬 큰 결과를 보였다. <Table 3>에서 콘크리트파괴에 해당하는 T_{max} 가 T_n 대비 90% 가량 큰 것은 이렇듯 콘크리트 파괴면이 커진 영향으로

<Table 3> Tension test results

Specimen	Failure mode	T_n (kN)	T_{max} (kN)
T-01	Concrete breakout	19.21	36.93
T-02	Concrete breakout	19.21	34.49
T-03	Steel failure	33.72	38.48
T-04	Steel failure	33.72	39.17
T-05	Steel failure	33.72	39.37
T-06	Concrete breakout	19.21	38.74

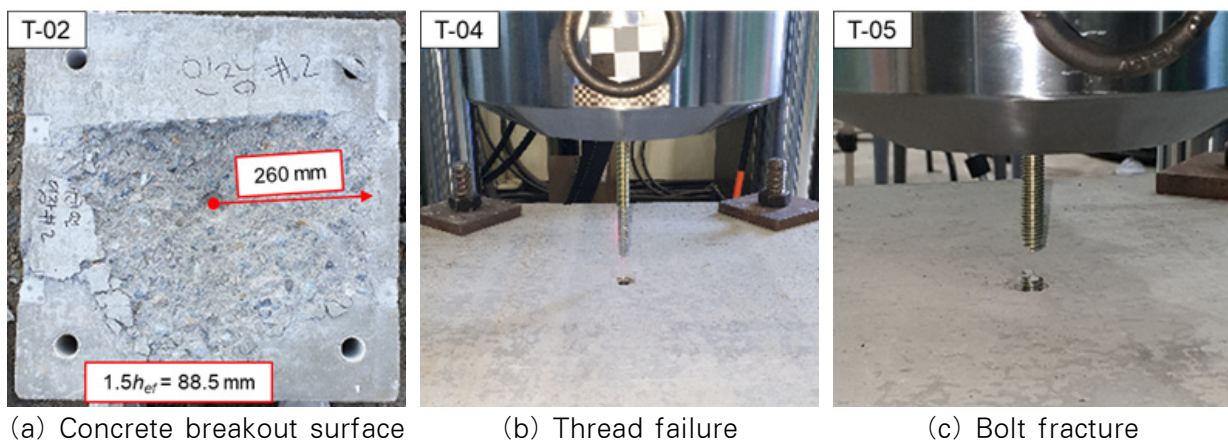


(a) Concrete breakout failure



(b) Steel failure

<Fig. 6> Load-displacement curves of tension specimens



<Fig. 7> Failure modes of tension specimens

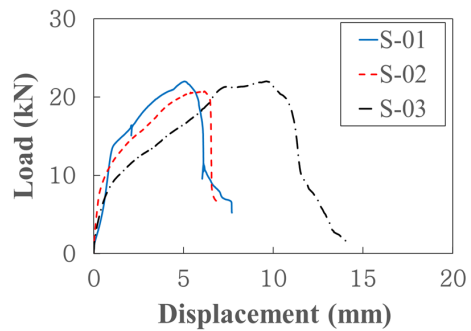
볼 수 있다. <Fig. 7 (a)>에서는 콘크리트 파괴면이 앵커 위치를 기준으로 비대칭적인 모습도 확인된다. 이는 선 설치 인서트의 수직도에 대한 시공오차로 인해 앵커가 인장하중을 받으면서 지렛대와 유사한 거동을 보였기 때문인 것으로 추정된다.

한편 <Fig. 6>을 참고하면 T-02와 T-04 실험체의 경우 T_{max} 에 도달하기 전 하중이 일시적으로 급격히 떨어지는 특이한 현상이 나타남을 알 수 있다. 2절에서 전술된 것과 같이 본 선설치 앵커에서는 전산볼트가 토크를 통해 인서트에 삽입되지 않고 사람의 힘으로 밀어넣는 형태로 설치되기 때문에 인서트 내부의 암나사와 전산볼트의 나사산 사이에 이격이 생기게 된다. 이러한 영향으로 인장하중을 받는 동안 나사산의 미끄럼이 발생할 가능성이 있고, 이때 하중이 일시적으로 감소하게 된다. T-02의 경우 일시적인 나사산의 미끄럼 이후 최종적으로 콘크리트파괴가 발생하였고, T-04의 경우 추가적인 미끄럼이 지속되어 최종 나사산 파괴(Thread failure)¹⁴⁾가 발생하였다.

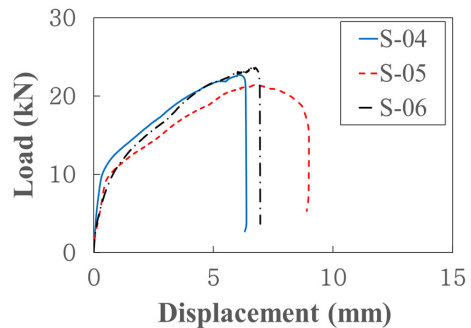
이와 같이 인장실험체의 파괴유형은 콘크리트파괴와 강제파괴로 구분되어 나타났지만 실험체 간 T_{max} 값의 편차는 크지 않았다. 콘크리트파괴가 발생한 실험체의 T_{max} 도 강제파괴에 해당하는 T_n 보다 큰 결과를 보였는데, 이는 본 인서트 앵커가 인장하중에 대하여 안정적인 상세로 설계되었음을 알려준다. 또한 모든 파괴유형에 대해 T_{max} 는 T_n 보다 크게 나타났고, 이로써 현행 콘크리트용 앵커 설계기준¹¹⁾은 본 선설치 인서트 앵커의 인장강도 예측에도 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

<Table 4> Shear test results

Specimen	Failure mode	V_n (kN)	V_{max} (kN)
S-01	Steel failure	20.23	22.01
S-02	Steel failure	20.23	20.85
S-03	Steel failure	20.23	22.01
S-04	Steel failure	20.23	22.75
S-05	Steel failure	20.23	21.40
S-06	Steel failure	20.23	23.66

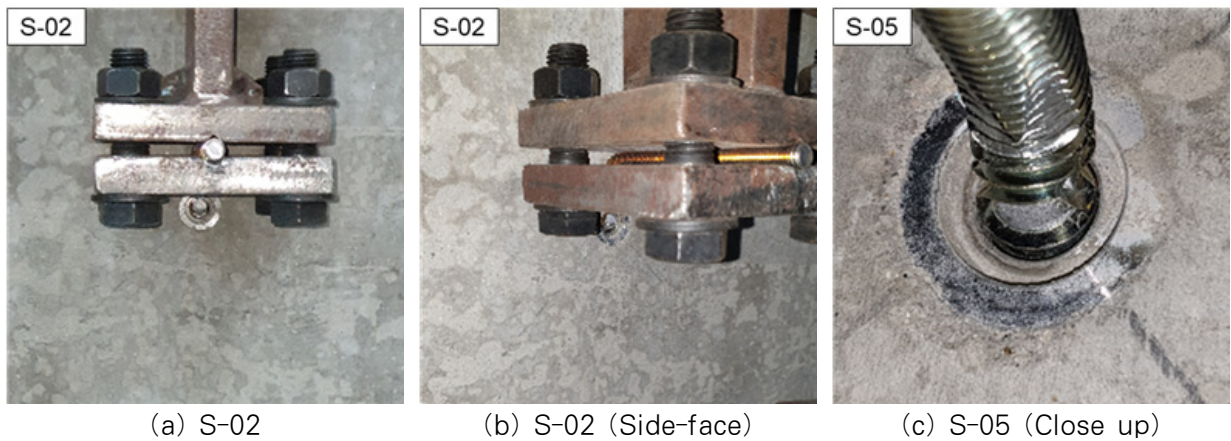


(a) S-01, S-02 and S-03



(b) S-04, S-05 and S-06

<Fig. 8> Load-displacement curves of shear specimens



<Fig. 9> Steel failure modes of shear specimens

4.2 전단실험

전단실험 결과, 모든 실험체에서 강재파괴가 발생하였다. <Fig. 8>은 실험체의 하중-변위 관계를 보여준다. 전단실험체들은 점진적인 강도 상승을 보이다가 전산불트가 파단하면서 하중저항능력을 상실하는 형태로 파괴하였다. 최대하중에서의 변위는 5.07~9.62mm 사이에 있었는데, S-03이 가장 연성적인 거동을 보였다. <Fig. 9>는 전단실험체의 파괴모습을 보여준다.

<Table 4>에는 실험에서 얻어진 최대 전단하중(V_{max})과 강재파괴에 대해 <Table 2>에서 산정된 예상 강도(V_n)가 비교된다. V_{max} 는 20.85~23.66kN의 범위로 실험체 간 V_{max} 의 편차가 매우 작은 안정적인 결과를 나타냈다. V_n 은 V_{max} 의 평균값(22.11kN)과는 4% 수준의 매우 낮은 오차를 보였고, 모든 실험체에 대해 V_{max} 보다 작은 보수적인 결과를 나타냈다. 이로써 현행 콘크리트용 앵커 설계기준¹¹⁾은 본 선설치 인서트 앵커의 전단강도 예측에도 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 새로운 형태의 선설치 인서트 앵커를 개발하고, 단조하중 하에서의 인장 및 전단강도를 평가하기 위한 연구를 수행하였다. 총 12개의 실험체를 대상으로 한 인장과 전단실험 결과 분석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

인장실험 결과, 파괴유형은 콘크리트파괴와 강재파괴로 구분되어 나타났다. 최대 인장하중(T_{max})의 평균값은 콘크리트파괴의 경우 36.72kN, 강재파괴의 경우 39.01kN이었다. 두 파괴유형에 대해 실험체 간 T_{max} 의 편차는 크지 않았으며, 모든 실험체의 T_{max} 는 설계기준에 따라 산정된 예상강도(T_n)보다 큰 결과를 나타냈다. 이로써 현행 콘크리트용 앵커 설계기준은 본 인서트 앵커의 인장강도 예측에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

전단실험 결과, 모든 실험체에서 강재파괴가 발생하였다. 최대 전단하중(V_{max})은 20.85~23.66kN의 범위에 있었으며, 실험체 간 V_{max} 의 편차가 매우 작았다. 모든 실험체의 V_{max} 는 설계기준에 따라 산정된 예상강도(V_n)보다 큰 결과를 나타냈다. 이로써 현행 콘크리트용

앵커 설계기준은 본 인서트 앵커의 전단강도 예측에도 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 성과물은 중소벤처기업부에서 지원하는 2020년도 산학연 Collabo R&D사업(No. S2880202)과 2021년도 산학연 Collabo R&D사업(No. S3103759)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

1. Yoon, B. I., "Nonstructural Elements Resulting From Pohang Earthquake and Direction of Future Seismic Design Nonstructural Elements", Review of Architecture and Building Science, Vol.62, No.4, pp.23~28, 2018
2. Jeong, Y. S., Woo, T. R., & Kim, J. B., "Behavior Characteristics of Cast-in Anchor Channel Anchor Shape on Non-structural Members", Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures, Vol.11, No.3, pp.46~54, 2020, doi: 10.11004/kosacs.2020.11.3.046
3. Kim, D. I., & Jong, W. Y., "Performance Evaluation of the Cast-in-place Anchor Bolt in Non-cracked Concrete used in Power Plant Facilities", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.20, No.11, pp.250~258, 2019, doi: 10.5762/KAIS.2019.20.11.250
4. Lee, J. H. (2015). Evaluation of Shear Resistance of CIP Anchors in Concrete Using Seismic Simulation Tests. Proceedings of the Korea Concrete Institute, Republic of Korea, Vol.2015, No.5, pp.195~196
5. Yun, S. Y., & Park, J. H., "An Experimental Study on the Tension Behaviour of Post-Installed Anchors for Seismic Retrofit",

- Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.31, No.3, pp.27~36, 2015, doi: https://doi.org/10.5659/JAIK_SC.2015.31.3.27
6. Yun, S. Y., & Park, J. H., "An Experimental Study on the Shear Behaviour of Post-Installed Anchors for Seismic Retrofit", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.30, No.9, pp.41~51, 2014, doi: 10.5659/JAIK_SC.2014.30.9.41
 7. Lee, S. K., Kim, S. H., Yun, H. D., & Choi, W. C. (2017). A Parametric Study for Shear Behavior of Steel Stud anchors in Concrete wall. Program Book of 2017 Conference of the Korean Society for Advanced Composite Structures, Republic of Korea, pp.115~116
 8. Kim, S. Y., & Kim, K. S., "Evaluation of Concrete Cone Breakout Strength of Expansion Anchors", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.15, No.6, pp.649~660, 2003, Retrieved from <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200310103439722.pdf>
 9. Yoo, S. W., Jung, S. H., Kwak, K. S., & Lee, J. H., "Experimental Study on Pull Out Characteristics of Adhesive Anchor", Journal of Civil and Environmental Engineering Research, Vol.26, No.3A, pp.555~563, 2006
 10. HILTI, Products: Anchors and Fasteners: Wedge anchors: HST3-R, Retrieved from https://www.hilti.co.kr/c/CLS_FASTENER_7135/CLS_WEDGE_ANCHORS_7135/r3987999
 11. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), "KDS 14 20 54", MOLIT, 2021.
 12. Korean Agency for Technology and Standards (KATS), "KS B ISO 898-1: Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel — Part 1: Bolts, screws and studs", KATS, 2018.
 13. American Concrete Institute (ACI). "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-19) and Commentary (318RM-19)", ACI, 2019.
 14. Grimsmo, E. L., Aalberg, A., Langseth, M., & Clausen, A. H., "Failure modes of bolt and nut assemblies under tensile loading", Journal of Constructional Steel Research, Vol.126, pp.15~25, 2016, doi: 10.1016/j.jcsr.2016.06.023
- Received : April 30, 2021
 - Revised : May 28, 2021
 - Accepted : May 28, 2021