

축소 철근콘크리트 벽체의 내력과 균열진전에 대한 개구부모서리 균열제어 띠의 영향

왕혜린¹, 양근혁^{2*}

Effect of Crack Control Strips at Opening Corners on the Strength and Crack Propagation of Downsized Reinforced Concrete Walls

Hye-Rin Wang¹, Keun-Hyeok Yang^{2*}

Abstract: The present study aimed to examine the effectiveness of different techniques for controlling the diagonal cracks at the corners of openings on the strength, deformation, and crack propagation in reinforced concrete walls. The crack control strip proposed in this study, the conventional diagonal steel reinforcing bars, and stress-dispersion curved plates were investigated for controlling the diagonal cracks at the opening corners. An additional crack self-healing function was also considered for the crack control strip. To evaluate the volume change ratio and crack width propagation around the opening, downsized wall specimens with a opening were tested under the diagonal shear force at the opening corner. Test result showed that the proposed crack control strip was more effective in reducing the volume change and controlling the crack width around the opening when compared to the conventional previous methods. The crack control strip with crack healing feature displayed the superior performance in improving the strength of the wall and reducing the crack width while healing cracks occurred in the previous tests.

Keywords: Opening, Wall, Crack control strip, Diagonal crack, Crack healing

1. 서론

철근콘크리트(reinforced concrete, RC) 벽체에서 창호, 문 등의 개구부 모서리는 단면의 불연속 및 응력집중으로 인해 사인장 균열에 대해 취약하다(Kharat and Kulkarni, 2013). 이 균열은 미관저해에 의한 민원 및 철근 부식에 의한 RC 구조물의 내구성 저하 등의 문제를 야기할 수 있다(Xing et al., 2013). 건축구조기준(KDS 14 20 50, 2021)에서는 개구부 모서리 사인장 균열 제어를 위한 보강근 배근을 요구하고 있다. 일반적으로 RC 벽체의 개구부 주위에서는 45도 기울기를 갖는 경사 보강근이 배근되고 있다. 하지만 경사보강근은 벽체 코어에 배근되기 때문에 건조수축 및 온도응력에 의한 콘크리트 표면부에서부터 진전되는 사인장 균열제어에는 다소 한계가 있다. 이에 따라 여전히 RC 벽체 개구부 모서리에는 사인장 균열이 자주 발행하고 있다.

최근 RC 벽체 개구부 모서리에서 사인장 균열제어를 위한 기술개발이 다소 관심을 받고 있다. Hong et al.(2012)은 개구

부 모서리에 집중되는 응력을 분산시켜 사인장 균열을 제어하기 위하여 플라스틱 소재를 이용한 응력분산곡면판을 제시하였다. 연구진은 축소 벽체 실험에서 개구부 모서리에서 응력분산곡면판을 설치할 경우 사인장 균열 폭 제어에 효율적임을 보였다. 하지만 이 응력분산곡면판은 벽체 철근 내부의 코어 영역에서 설치됨으로서 경사보강근과 같이 건조수축 응력이 가장 큰 콘크리트 표면부의 균열 제어에는 여전히 한계가 있다.

이 연구에서는 벽체 개구부 모서리에서 콘크리트 표면부에서부터 균열을 제어하기 위하여 띠 형상으로 구성된 균열제어 띠(crack control strip)를 제시하였다. 콘크리트 건조수축 및 온도변화에 의한 개구부 모서리에서 발생할 수 있는 사인장 균열의 적절한 제어를 위하여 유한요소해석을 수행하였으며, 이를 통해 균열제어 띠의 최적화된 형상을 결정하였다. 이 연구의 목적은 RC 벽체 개구부 모서리에서 사인장 균열제어에 대한 보강재들의 효율성을 실험적으로 평가하는 것이다. 개구부 사인장 균열제어 보강재로서 경사보강철근, 응력분산곡면판 및 균열제어 띠를 선정하였다. 균열제어 띠에서는 균열치유 기능이 부여된 것도 추가 고려하였다. 균열제어 보강재들의 개구부 주위에서 하중저항 및 균열제어에 미치는 효율성은 개구부 중심의 축소 벽체에서 하중재하 실험을 통해 얻어진 하중-변형률 관계 및 하중-균열 폭 관계를 통하여 평가하였다.

¹정회원, 경기대학교 일반대학원 건축공학과, 석사과정

²정회원, 경기대학교 스마트시티공학부 건축공학전공, 교수

*Corresponding author: yangkh@kgu.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Kyonggi, 16227, Korea.

•본 논문에 대한 토의를 2022년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2022년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 균열제어 띠(Crack control strip)

Fig. 1에는 개구부 모서리의 사인장 균열제어 보강재로서 제안된 균열제어 띠의 상세를 나타내었다. 균열제어 띠의 상세는 콘크리트의 건조수축, 크리프, 균열발생을 고려한 시간의존에 따른 유한요소해석(ABAQUS)을 통해 응력 및 변형을 검토하였다(Yang, 2021). 더불어 해석의 검토를 바탕으로 적절한 균열제어 띠의 상세를 결정하였다. 이때 해석에 사용된 균열제어 띠의 원소재는 플라스틱으로서 그 탄성계수 및 항복강도는 각각 1300 MPa 및 20 MPa이었다. 균열제어 띠의 강도를 결정하기 위하여 유한요소해석(ABAQUS)으로부터 개

구부 모서리에서 균열 진전으로 인한 보강재의 응력 및 변형을 평가하였다(Yang, 2021). 그 결과 균열제어 띠의 소요 인장강도는 14 MPa로 평가되었다. 설계된 균열제어 띠는 크게 모서리 표면부에서의 직각의 몸통부, 사인장 방향 균열 진전 제어를 위한 방사형 띠 및 개구부 보강근에 결속 고정하기 위한 고정용 막대로 구성된다(Fig. 1(a)). 직각의 몸통부는 콘크리트 표면에 위치함에 따라 건조수축에 의한 표면 균열 발생 시 유입가능한 수분 및 열화인자 등의 접촉을 방지하는 역할이다. 직각의 몸통부의 내민 길이는 유한요소해석을 통해 길이 변화에 따른 균열 제어 효율을 고려하여, 그 길이를 100 mm로 설계하였다. 직각 몸통부의 높이는 벽체 최소 피복두께(KDS 14 20 50, 2021)를 고려하여 20 mm로 설정하였다. 방사형 띠는 모서리 부위에서 발생하는 응력 분산에 유리한 곡선의 형태로 구성되었으며 내부 및 외부 2개의 영역으로 구별하여 서로 간섭되지 않도록 하였다. 외부 방사형 띠의 너비는 유한요소해석의 결과에서 균열들의 최대 분산 넓이인 60 mm로 설정하였다. 내부 방사형 띠의 경우 너비는 외부 방사형 띠의 너비보다 작은 30 mm으로 하였다. 모든 방사형 띠에서는 충전 구멍을 두어 콘크리트의 분리가 발생하지 않도록 하였다. 대각 방향에는 철근과의 용이한 결속 및 안정적인 설치를 위해 1 mm 폭의 홈이 형성된 지름 7 mm 및 길이 240 mm의 원통형 막대를 구성하였다. 결과적으로 제시된 균열제어 띠는 개구부 모서리의 콘크리트 표면부에서부터 균열 발생을 최소화하고 사인장 균열의 진전도 제어하는 것을 고려하였다.

더불어 이 연구에서는 개구부 모서리에서 발생하는 사인장 균열 제어와 함께 발생된 균열의 치유를 위해 치유 소재를 적용한 자기치유 균열제어 띠도 검토하였다(Fig. 1(b)). 균열 치유 소재를 위해 Yoon et al.(2022) 및 Hwang et al.(2021)에 의해 연구된 균열치유 환을 이용하여 모르타르를 배합하고 균열제어 띠에 설치하였다. 균열치유 환은 모르타르 배합 시 혼합되는 균열치유 소재가 믹서에 의해 물리적 손상을 입거나 배합수와 반응하여 수화하는 현상을 방지하기 위한 목적으로 고안되었다. 균열치유 환의 소재는 대체적으로 생체광물형성의 박테리아 또는 시멘트계 재료를 이용하여 제작되는데, 이 연구에서는 플라이애시, 고로슬래그 등의 시멘트계 재료를 이용하여 제작된 균열치유 환을 이용하였다(Yoon et al., 2022). Table 1에는 균열치유 환을 포함하는 고강도 모르타르의 배합상세를 나타내었다. 균열 치유 고강도 모르타르 배합에서 균열치유 환은 골재 부피의 20%를 치환하여 혼합된다.

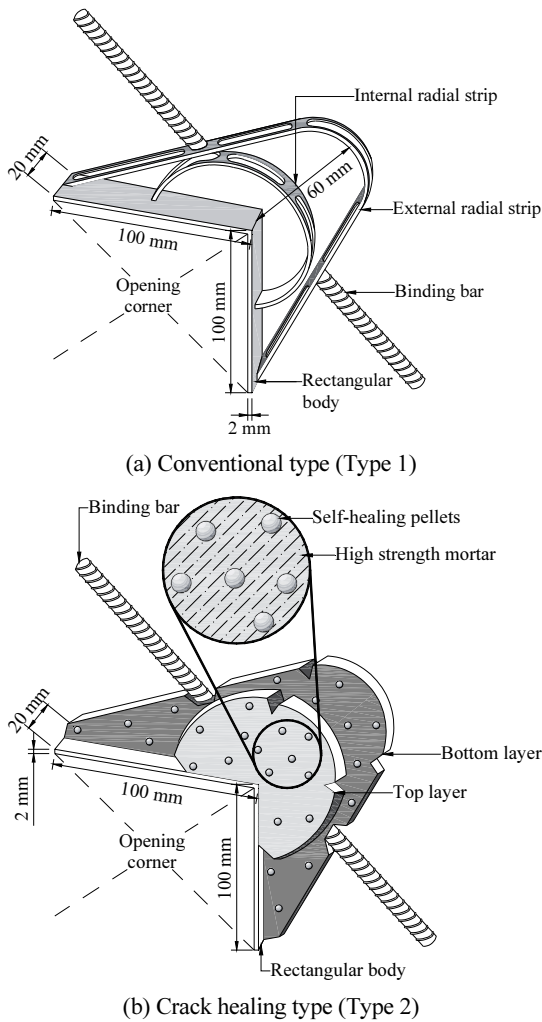


Fig. 1 Details of the developed crack control strips

Table 1 Mixing proportion of the self-healing mortar

W/B (%)	S/B	Binder composition (%)				Volume fraction of fiber(%)	Replacement ratio of self-healing pellets (% by sand volume)
		OPC	FA	SF	Polymer		
35	2.0	72	15.3	2.7	10	0.5	20

모르타르에서 물-시멘트비(water to binder ratio, W/B) 및 잔골재-결합재비(sand to binder ratio, S/B)는 각각 35% 및 2.0이다. 모르타르 배합 시 결합재에는 보통포틀랜드시멘트(ordinary portland cement, OPC), 플라이애시(fly ash, FA), 실리카 폼(silica fume, SF) 및 재유화형 폴리머 분말이 이용되었으며, 이들 재료의 혼합비율은 각각 72%, 15.3%, 2.7% 및 10%의 질량비로 하였다. 또한 흡수율이 3.8%인 나일론 섬유(nylon fiber)를 0.5% 체적비로 혼입하여 균열면에서 가교역할을 통해 치유성능 향상을 유도하였다. 자기치유 환이 혼입된 모르타르는 균열제어 띠의 방사형 영역에 타설되도록 제작된 거푸집을 통해 타설됨으로서 공장제작 하였다.

3. 실험

3.1 시험체 상세

균열제어 띠가 설치된 축소 개구부 하중 재하 실험의 주요 변수는 개구부 모서리에서 사인장 균열을 제어하기 위한 보강재 종류이다(Fig. 2). 시험체 C는 균열제어 보강재가 없는 기준 벽체이다. 시험체 D는 일반적 방법으로서 개구부 모서리에서 45° 각도의 경사보강근(D 13)이 배근된 벽체이다. 시험체 P는 개구부 모서리에서 응력분산곡면판이 설치된 벽체이다. 응력분산곡면판의 경우 G사의 제품(규격 15)을 이용하였다. 시험체 T1는 이 연구에서 제시된 균열제어 띠(Type 1)가 개구부 모서리에 설치된 벽체이다. 시험체 T2는 균열치유 기능성을 갖는 균열제어 띠(Type 2)가 설치된 벽체이다.

개구부를 갖는 축소 벽체 시험체의 단면 및 철근 배근 상세는 Fig. 3에 나타내었다. 모든 시험체의 단면 크기 및 수직·수평 철근 배근상세는 동일하게 있다. 시험체의 길이는 1,100 mm, 높이는 1,100 mm 그리고 두께는 150 mm이다. 시험체 중앙에는 크기가 400 mm × 400 mm인 개구부를 설치하였다. 벽체의 수직 및 수평철근은 직경이 10 mm인 이형철근을 사용하였으며, 배근 간격은 모두 240 mm이다. 개구부 주위에는 수직·수평 철근으로서 건축구조기준(KBC 2016, 2016)에 따라

직경이 16 mm인 이형철근을 추가 배근하였다.

3.2 재료

균열제어 띠는 폴리프로필렌(poly propylene, PP) 및 폴리 에틸렌(poly ethylene, PE)의 혼합 소재로 제작되었다. 플라스틱 인장강도시험 방법(ASTM D 638, 2000)에 따른 균열제어

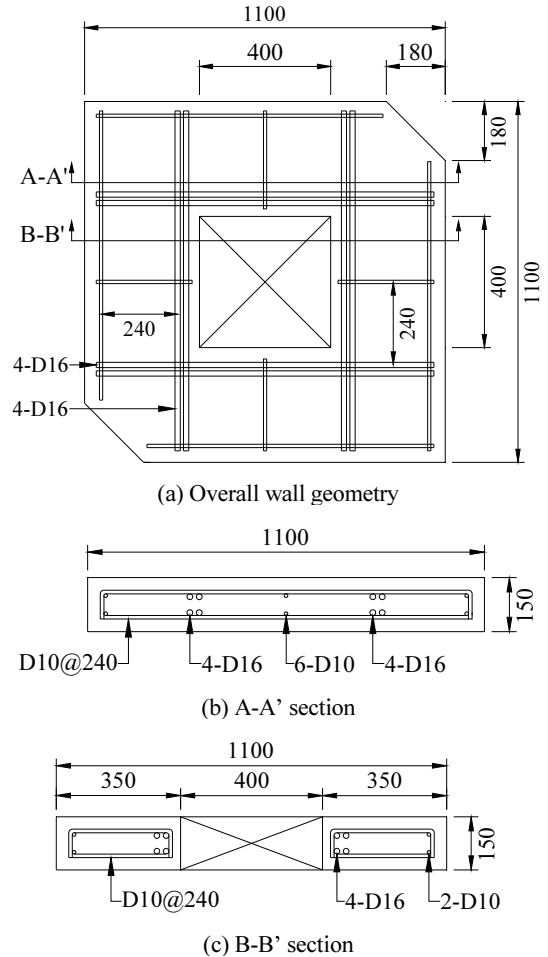


Fig. 3 Section dimensions and reinforcement arrangement of specimens (all dimensions are in mm)

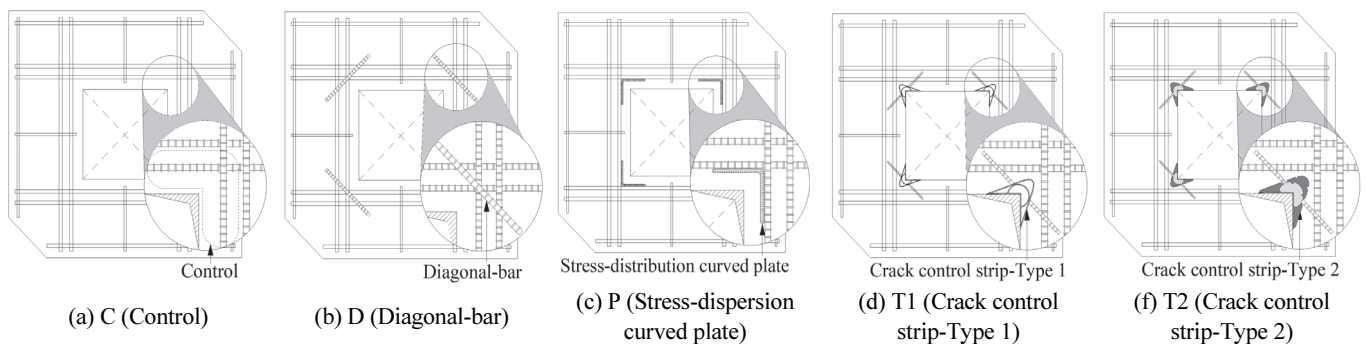


Fig. 2 Details of downsized wall specimens with opening

Table 2 Concrete mixture proportions

f_{cd} (MPa)	f_{ck} (MPa)	W/B (%)	S/a	Unit weight (kg/m ³)				
				W	OPC	FA	S	G
24	28.6	50	52.7	168	292	40	945	830

Note : f_{cd} = designed compressive strength of concrete, f_{ck} = measured compressive strength of concrete, W/B = water-cement ratio by weight, S/a = fine aggregate-to-total aggregate ration by volume, W = water, OPC = ordinary portland cement, FA = fly ash, S = sand, and G = gravel.

Table 3 Mechanical properties of deformed steel bars

Diameter (mm)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Yield strain
10	350	420	200,000	0.0018
13	450	610	190,000	0.0023
16	490	610	210,000	0.0023

띠 소재의 인장강도 및 탄성계수는 각각 39 MPa 및 2604 MPa이다. 더불어 이들 소재는 KS F 2821(2018)의 내후성 시험평가에서도 4% 이하의 인장강도 감소율을 보였다. 응력분산곡면판은 PP 합성수지소재이며, 일반적으로 적용되는 제품의 탄성계수 및 밀도는 각각 1200 MPa 및 1.2 ton/m³이다.

Table 2에는 축소 개구부 시험체 제작에 사용된 콘크리트의 배합표를 나타내었다. 콘크리트의 W/B 및 잔골재율(sand to aggregate volume ratio, S/a)는 각각 50% 및 52.7%이었다. 시험체 가력 시 콘크리트 압축강도(f_{ck})는 28.6 MPa로 측정되었다. 벽체 제작에 사용된 철근의 역학적 특성은 Table 3에 나타내었다. 철근은 직경 10 mm, 13 mm 및 16 mm의 이형철근이 이용되었다. 철근의 항복강도 및 탄성계수는 직경 10 mm인 경우 각각 350 MPa 및 200,000 MPa이다. 직경 13 mm 및 직경 16 mm 철근의 항복강도는 490 MPa로 동일하며, 탄성계수는 각각 190,000 MPa 및 210,000 MPa이었다.

3.3 가력 상세

Fig. 4에는 축소 개구부 벽체의 가력상세를 나타내었다. 개구부 모서리에서의 사인장 균열 유도를 위하여 시험체 대각선 방향으로 가력하였다(Hong et al., 2012). 가력은 10,000 kN ± 5% 용량 오일잭을 이용하였다. 오일잭 하부에는 가력 하중을 측정하기 위해 10,000 kN 용량의 압축 로드셀 및 편심을 방지하기 위한 힌지를 설치하였다. 가력은 분당 0.5 mm의 속도로 변위 제어하였다. 하중에 따른 벽체의 변형을 측정하기 위해 시험체 상하 및 좌우 방향으로 300 mm 용량의 변위계(Linear variable differential transformer, LVDT)가 설치되었다. 콘크리트 표면의 균열 폭을 측정하기 위해 개구부 상·하부 모서리에는 모서리로부터 25 mm 떨어진 위치에 균열 게이지를 설치하였다. 한편, 균열제어를 위한 보강재들에서 변형을 진전을 측정하기 위한 게이지는 설치하지 않았다.

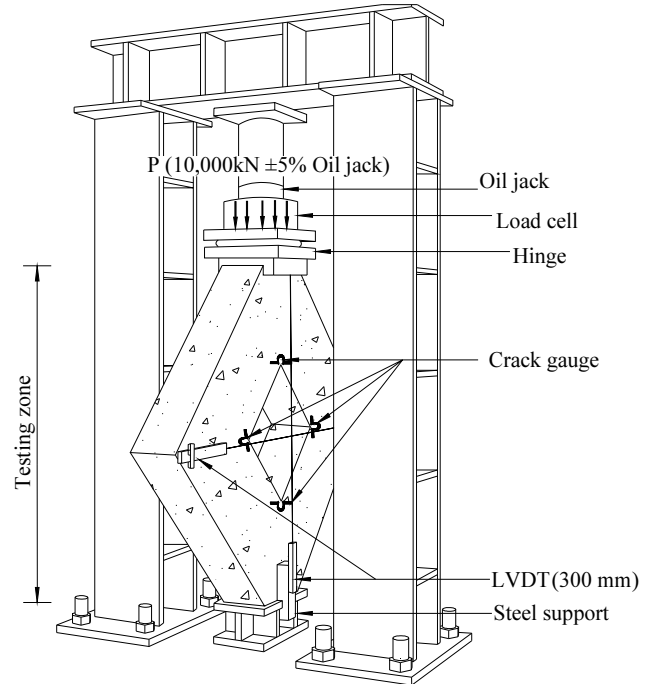


Fig. 4 Test setup

균열치유 소재가 적용되지 않은 시험체(C, D, P, T1, T2)는 최대 내력(P_n) 이후 P_n 의 80%까지 가력을 실시하였다. 균열치유 소재가 적용된 시험체(T2)는 균열치유 소재에 의한 균열부위 회복의 결과를 확인하기 위해 균열발생 시점까지 가력한 후 하중을 제거하여 28일간 살수 양생하였다. 이후 해당 시험체에서 균열치유의 결과를 광학현미경 촬영을 통해 확인하고 재가력 하였다.

4. 결과 분석

4.1 균열진전 및 파괴모드

개구부가 있는 벽체의 파괴모드를 Fig. 5에 나타내었다. 사인장 균열제어 보강재들이 시험체 파괴모드 및 균열분산에 미치는 영향은 미미하였다. 모든 시험체의 초기균열은 상부 가력 지점 및 하부지지 지점에서 종방향으로 발생하였다. 이후 종방향 균열은 하중의 증가와 함께 개구부 모서리를 향하여 빠르게 진전하였다. 하중의 증가와 함께 수평방향으로 개

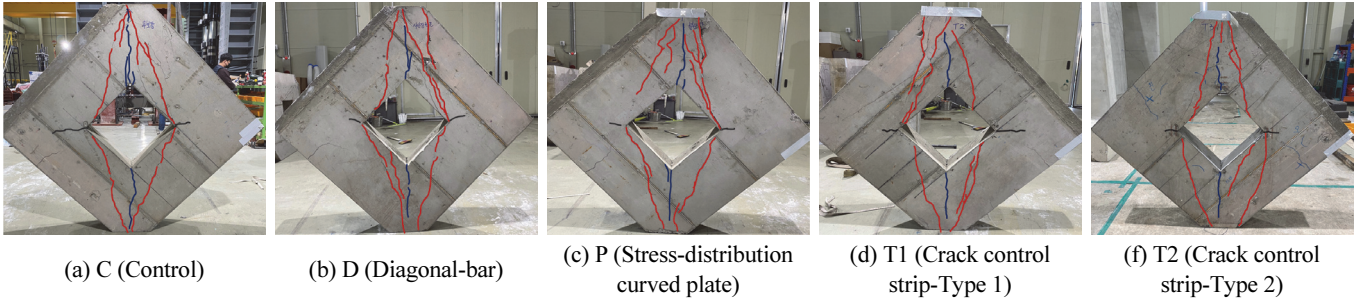


Fig. 5 Typical crack propagation around opening

구부 모서리에서 균열이 발생하였다. 최대 내력 시점에서 가력점과 개구부 모서리가 연결되는 경사 스트럿을 따라 균열이 발생하였다. 최대 내력 이후에는 이 경사 스트럿을 따라 발생한 균열 및 개구부 모서리에서 수평방향으로 발생한 균열에서 파괴가 집중되었다.

4.2 하중-변형을 관계

Fig. 6에는 하중 증가에 따른 시험체의 수직 및 수평 변형률의 진전을 나타내었다. 개구부 모서리 주변의 수직 및 수평 변형률은 LVDT에서 측정된 변형을 LVDT 설치 구간으로 나누어 산정하였다. 모든 시험체의 하중-변형률 관계는 개구부 모서리에서 종방향으로 균열이 발생하기 전까지 선형거동을 보였다. 이 때 개구부 모서리 보강재들이 시험체의 선형 강성에 미치는 영향은 무시할만 하였다. 개구부 모서리에서 종방향 균열의 발생과 함께 수직 및 수평 변형률은 급격히 증가하였다. 이때 수직 및 수평 변형률의 증가 기울기에 대한 개구부 모서리 보강재들의 영향은 미미하였다. 하중의 증가와 함께 개구부 모서리에서 횡방향 및 가력점과 개구부 모서리를 연결하는 경사 스트럿에서 균열이 급격히 진전하면서 P_n 에 도달하였다. 최대 내력 도달 이후에는 하중이 급격하게 감소하는 취성파괴 모드를 보였다.

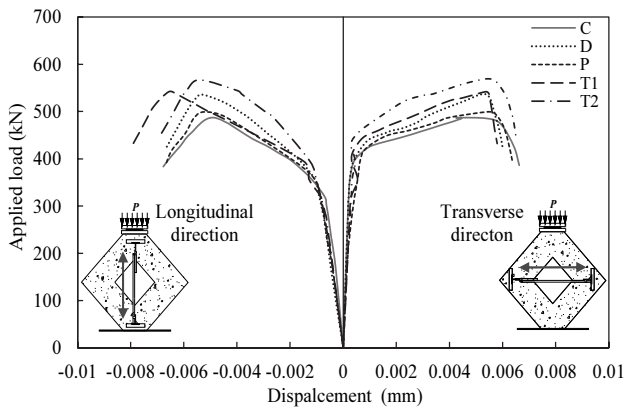


Fig. 6 Axial load-strain curves of wall specimens

시험체 T2는 개구부 모서리에서 발생한 균열들을 치유한 후 재가력 한 경우이다. 균열치유 후 하중-변형률 관계는 종방향 및 횡방향에서 시험체 T1과 비슷한 거동을 보였다. 즉, 초기 선형 거동에서의 기울기, 그리고 개구부 모서리 균열 발생 후 강성 저하 기울기 등에서 다른 시험체들과 비슷한 거동을 보였다. 이는 치유된 균열들은 개구부 모서리에서 부재 강성에 영향을 미치지 않음을 의미한다.

Fig. 7에는 하중 증가에 따른 개구부 주변에서의 체적 변화를 나타내었다. 개구부 모서리에서 체적변화율(e)은 시험체 두께 방향에서 변형률은 종방향 변형률과 포와송 효과를 함께 고려하여 다음 식을 통하여 산정하였다.

$$e = \varepsilon_x + (1 - \nu)\varepsilon_y \quad (1)$$

여기서, ε_x 와 ε_y 는 개구부 주변에서 각각 횡방향 변형률과 종방향 변형률을 의미하며, ν 는 포와송비이다. 시험체의 포와송비는 콘크리트의 일반적인 포와송비인 0.167을 적용하였다 (Huang et al., 2022). 모든 시험체에서 가력 초기에 개구부 주위의 e 은 감소하였다. 이때 체적의 감소율은 무보강 및 경사 보강철근이 배근된 시험체들에서 컸다. 개구부 모서리에서 수평 균열의 발생과 함께 체적 감소율은 더욱 커지는데, 이때

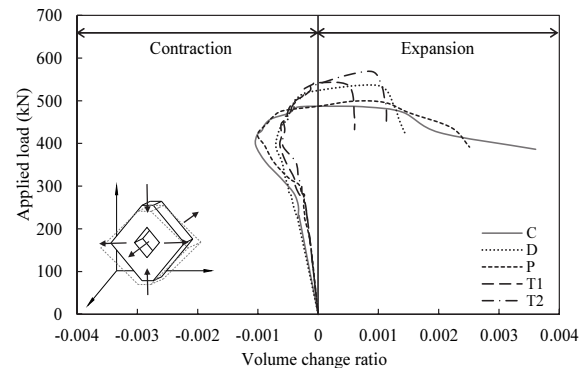


Fig. 7 Volume change ratio around opening as a function of the applied loads

에도 무보강 및 경사보강철근이 배근된 시험체들에서 더욱 현저하였다. 이후 P_n 의 약 70~85% 하중에서 개구부 주변 체적의 변화는 가력점과 개구부 모서리를 연결하는 콘크리트 스트럿에서의 균열 폭 증가로 수축에서 팽창으로 변하기 시작하였으며, P_n 의 약 97%~99% 수준에서 체적 팽창변형을 보였다. 개구부 주위의 체적 수축 변형률 및 팽창 변형률의 변화는 균열제어 띠(T1, T2)가 설치된 시험체에서 가장 작게 나타났다. 특히 균열 치유 후 재가력한 시험체 T2에서 체적변화율도 시험체 T1과 비슷한 수준으로서 다른 시험체들에 비해 낮았다. 결과적으로 이 연구에서 제시한 개구부 모서리 균열제어 띠는 개구부 주변의 체적 변화 제어에도 경사보강근 및 응력분산곡면판에 비해 효율적이었다.

4.3 균열 및 최대내력

Fig. 8에는 각 시험체의 개구부 모서리에서의 초기 균열내력(P_{cr}) 및 P_n 의 비교를 나타내었다. 시험체 C는 가장 낮은 P_{cr} 및 P_n 을 보였다. 시험체 T1의 P_{cr} 및 P_n 은 시험체 D에 비

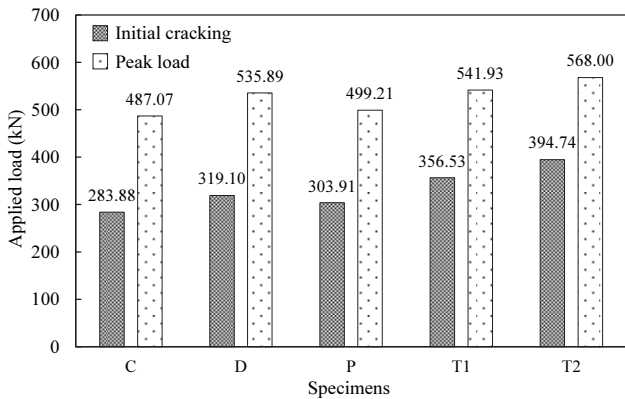


Fig. 8 Initial cracking and peak loads of specimens

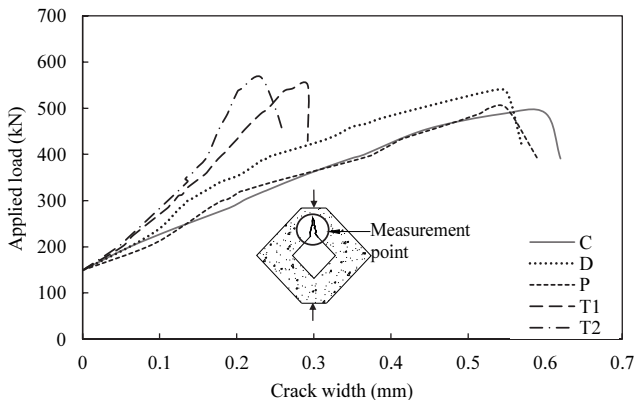


Fig. 9 Crack width propagation at the opening corner as a function of the applied loads

해 각각 1.12배 와 1.01배 높았으며, 시험체 P에 비해서는 각각 1.17배 와 1.09배 높았다. 이 연구에서 제안된 균열제어 띠는 개구부 모서리의 P_{cr} 을 기존 기술들에 비해 향상시킨 반면, P_n 향상에는 동등 수준으로 평가되었다. 한편 균열 치유 후 재가력한 시험체 T2의 P_{cr} 및 P_n 은 다른 시험체들에 비해 높았는데, 시험체 T1에 비해 각각 1.11배와 1.05배 높았다. 이는 균열제어 띠에 설치된 고강도 균열치유 모르타르가 개구부 모서리에서 균열제어 및 내력향상에 기여하였기 때문으로 판단된다.

4.4 하중-균열 폭 관계

Fig. 9에는 하중진전에 따른 개구부 모서리에서 균열 폭의 진전을 나타내었다. Fig. 10에는 각 시험체의 하중단계에서 균열 폭 값을 나타내었다. 개구부 모서리에서의 균열 폭의 진전은 균열의 발생과 함께 급격히 증가하는데, 이 때 그 증가 기울기는 시험체 T1 및 T2에서 높았다. 즉, 개구부 모서리에서 균열 폭의 진전은 시험체 T1 및 T2에서 작았다. 최대 내력의 60% 수준에서 모든 시험체는 개구부 모서리 균열 폭이 0.2 mm 이하로 있었는데, 이 때 그 크기에 대한 개구부 모서리 균열 제어 보강재들에 의한 영향은 미미하였다. 최대 내력의 80% 수준에서 측정된 균열 폭은 시험체 T1의 경우 시험체 D 및 P에 비해 각각 35.10%와 46.73% 낮았다. 최대 내력에서는 시험체 T1에서 측정된 최대 균열 폭은 시험체 D 및 P에 비해 각각 48.22%와 48.41% 낮았다. 균열 치유 후 재가력한 시험체 T2는 시험체 T1에 비해서도 낮은 균열 폭 진전을 보였다. 시험체 T2에서 측정된 최대 균열 폭은 시험체 T1에 비해 P_n 의 80% 및 P_n 수준에서 각각 11.84%와 15.19% 낮은 값을 보였다. 또한 시험체 T1 및 T2는 P_n 의 80% 수준까지 개구부 모서리에서 균열 폭을 0.3 mm 이하로 제어 하였다.

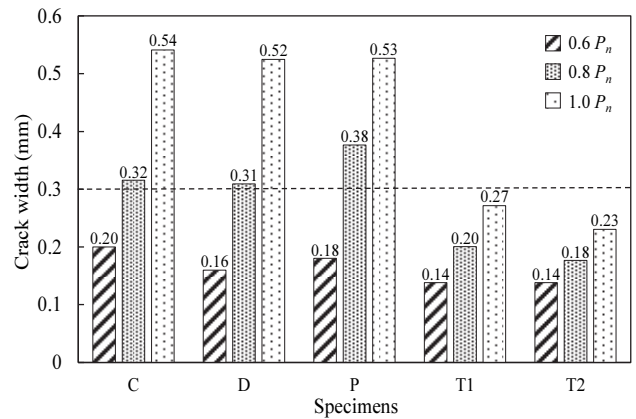
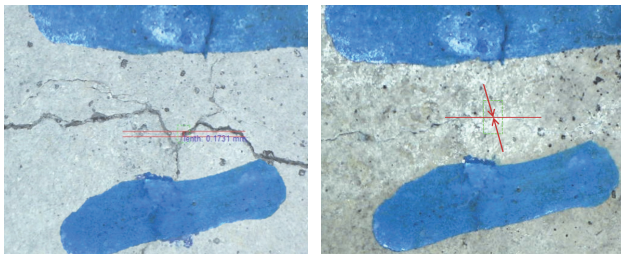


Fig. 10 Crack width at the opening corner at different loading levels



(a) Width of initial crack (b) Healed crack

Fig. 11 Typical images for crack healing in specimen T2

4.5 균열제어 띠 설치 개구부 모서리의 균열치유 특성

균열 치유 소재가 적용된 띠를 설치한 시험체의 가력 이후 개구부 모서리에 발생한 균열 폭의 현미경 촬영 이미지를 Fig. 11에 나타내었다. 최초 가력 시 개구부 모서리에서 균열진전 길이는 약 100 mm로서 그 평균 폭은 0.26 mm 수준이었다. 균열 발생 후 28일간의 양생 후에는 균열 면을 따라 치유 생성물이 형성되면서 균열치유가 나타났다. 치유 생성물은 초기 균열길이 전체에서 나타났으며, 치유 후 균열 폭도 약 0 mm로 측정되었다. 결과적으로 초기 개구부 모서리에서 발생한 균열은 치유 환의 작용을 통하여 복구되었다. 더불어 하중-균열 폭 관계에서 나타내었듯이 치유 후 내력의 향상 및 균열 폭의 진전 제어도 다른 개구부 모서리 균열제어 보강재들에 비해 우수함을 보였다.

5. 결론

이 연구에서는 축소 벽체의 내력 및 균열제어 측면에서 개구부 모서리의 사인장 균열제어를 위하여 제시된 균열제어 띠의 효율성을 평가하고 기존 경사보강철근 및 응력분산곡면판 기술들과 비교하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 개구부 주위의 체적 수축 변형률 및 팽창 변형률의 변화는 균열제어 띠가 설치된 시험체에서 가장 작게 나타났다.
- 2) 균열제어 띠가 설치된 시험체 T1의 초기 균열내력(P_{cr}) 및 최대 내력(P_n)은 경사보강철근이 배근된 시험체 D에 비해 각각 1.12배와 1.01배 높았으며, 응력분산곡면판이 설치된 시험체 P에 비해서는 각각 1.17와 1.09배 높았다.
- 3) 개구부 모서리에서 균열 폭의 진전은 시험체 D 및 P에 비해 시험체 T1에서 작았다. 최대 내력의 80% 수준에서 균열 폭은 시험체 T1의 경우 시험체 D 및 P에 비해 각각 35.0%와 46.7% 낮았다.
- 4) 균열 치유 기능이 포함된 균열제어 띠는 축소 개구부 벽체의 균열 및 P_n 그리고 개구부 모서리에서의 균열진전 제어 측면에서 가장 우수한 결과를 보였다.

- 5) 균열 치유 기능이 포함된 균열제어 띠를 설치한 시험체에서 개구부 모서리에 발생한 약 0.26 mm 폭의 균열은 재령 28일 경과 후 치유되었다.

감사의 글

본 연구는 2020년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구(과제번호:S3035523)이며, 2022학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행된 연구임.

References

1. ASTM D638 (2020), Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, American Society for Testing and Materials, USA.
2. Cho, S., Hwang, S. Y., Oh, D. X., and Park, J. (2021), Recent progress in self-healing polymers and hydrogels based on reversible dynamic B-O bonds: boronic/boronate esters, borax, and benzoxaborole, *Journal of Materials Chemistry*, 9, 26, 14630-14655.
3. KDS 14 20 00 (2021), Concrete Structure Design Criteria, Korea Concrete Institute, Korea.
4. KDS 14 20 50 (2021), Concrete Structure Reinforcement Detail Design Criteria, Korea Concrete Institute, Korea.
5. Kharat, A., and Kulkarni, V. V. (2013), Stress concentration at openings in pressure vessels-A review, *International Journal of innovative research in science, engineering and technology*, 15, 2, 670-677.
6. KS F 2821 (2020), Standard Test Method for Change in Properties of Plastic Building Materials Resulting from Weathering Resistance, Korea Standard Association, Korea.
7. Lee, K. M., Kim, H. S., Lee, D. K., and Shin, K. J. (2021), Self-healing performance evaluation of concrete incorporating inorganic materials based on a water permeability test, *Materials*, 14, 12, <https://doi.org/10.3390/ma14123202>.
8. Powers, T. C. (1968), The thermodynamics of volume change and creep, *Matériaux et construction*, 1, 6, 487-507.
9. Safiuddin, M., Kaish, A., Woon, C. O., and Raman, S. (2018), Early-age cracking in concrete: causes, consequences, remedial measures, and recommendations, *Applied Sciences*, 8, 10, <https://doi.org/10.3390/app8101730>.
10. Xing, F., Ni, Z., Tang, J., Deng, X., Zhu, G. Y., Han, N., and Zhang, M. (2013), State of the art for self-healing concrete, *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 35, 5, 486-494.
11. Yang, K. H. (2021), Analytical study of diagonal crack control strip in RC walls with opening, Ministry of SMEs and Startups, Korea, Technical Report. (in Korean)
12. Yoon, H. S., Lee, J. Y., Yang, K. H., and Park, S. H. (2022), Evaluation of the crack healing efficiency of mortar incorporating

self-healing pellets based on cementitious materials, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 38, 4, 207-215.

Received : 06/30/2022

Revised : 07/02/2022

Accepted : 08/29/2022

13. Hong, S. G. (2012), Sine field crack prevention performance evaluation of stress-dispersion curved plate, Structural Engineering Materials Lab of Seoul National University, Korea, Technical Report. (in Korean)

요 지 : 이 연구의 목적은 철근콘크리트 벽체의 내력, 변형 및 균열진전에 대한 개구부 모서리의 사인장 균열 제어를 위한 다양한 보강방법들이 효율성을 평가하는 것이다. 개구부 모서리의 사인장 균열 제어 보강방법으로서 이 연구에서 제안한 균열 제어 띠, 기존의 경사보강근 배근 방법, 그리고 응력분산곡면판을 선택하였다. 균열 제어 띠에서는 균열 치유 가능성이 부여된 것도 함께 고려하였다. 개구부 주위의 체적변화 및 균열 폭 진전을 평가하기 위하여 개구부 모서리에서 사인장 균열 유도를 위한 축소 벽체 실험을 수행하였다. 실험결과 균열 제어 띠는 경사보강근 및 응력분산곡면판에 비해 개구부 주위의 체적변화 감소 및 개구부 모서리 균열 폭 제어에 효율적이었다. 균열 치유 기능이 포함된 균열 제어 띠는 사전 실험에서 발생한 균열들을 치유하면서 축소 벽체의 내력 향상 및 균열 폭 감소에 가장 좋은 성능을 보였다.

핵심용어 : 개구부, 벽체, 균열 제어 띠, 사인장 균열, 균열 치유
