

반복하중이 가해지는 강판 콘크리트(SC) 벽체에서 스테드의 성능평가를 위한 해석적 연구

Analytical Study for Performance Evaluation of Studs for Steel Plate Concrete(SC) Walls subjected to Cyclic Loads

임진선¹⁾ 정영도²⁾ 이성태^{3)*}
Jin-Sun Lim Young-Do Jeong Seong-Tae Yi

Abstract

This study analytically reviewed the behavior of Steel Plate Concrete(SC) walls subjected to cyclic loads to investigate the effects of shape and arrangement spacing of studs on the behavior of SC walls. To perform it, 9 cases of finite element analyses considering the different shape and spacing of studs in SC wall were carried out. As the results, the skeleton curves were obtained from the load-displacement history curves and the ultimate and yielding forces were increased as the spacing of studs decrease. In addition, the strength of inclined studs are shown to be bigger compared to that of general studs. The damping ratios are increased as the decrease of strength ratio. Finally, as the decrease of stud spacings, the cumulative dissipated energy was increased and the seismic performance was improved.

Keywords : SC Wall, Stud Performance Evaluation, Cyclic Loads, Nonlinear Finite Element Analysis, KEPIC SNG

1. 서론

강판 콘크리트(SC) 구조는 강판 사이에 두꺼운 콘크리트가 채워진 합성체로 이루어져 있고, 강판과 콘크리트는 전단 연결체인 스테드(stud)로 연결된다. 일반적으로 SC 전단벽의 설계와 해석 시, 스테드로 연결된 강판과 콘크리트는 완전부착되어 합성거동을 한다고 가정한다.

SC 구조는 기존의 철근 콘크리트(RC) 구조에서 사용하던 철근을 대신하여 강판을 사용함으로써 부재에 필요한 면내 및 면외강도를 보완하고 거푸집의 역할까지 수행하는 구조이며 특히 전단 벽체로의 성능이 우수하다. SC 부재는 RC 부재의 단면보다 얇은 두께로도 RC와 유사한 강성을 확보할 수 있어 단면의 축소로 인한 내진성능을 확보할 수 있다. 그리고 기능적 측면에서 RC 구조에 비해 시공기간이 비교적 빠르고 품질관리가 용이하다고 알려져 있다(Cho et al., 2013).

그러나 현재까지도 RC나 강구조에 비하여 SC 구조의 연

구는 상대적으로 적은 편이며, SC 벽체에 대하여 국내·외에서 수행된 연구도 정적거동에 관한 것이 대부분이며, 동적 거동에 대해서는 일부만이 수행되었다. Ozaki et al.(2004)은 SC 벽체에 대하여 강판의 두께, 스테드 지름, 콘크리트의 강도, 축하중, 개구부 등의 다양한 조건에 대한 반복하중 실험을 수행하였다. Lee et al.(2010)은 벽체의 극한강도보다 낮은 수준의 하중에 대한 자유진동 실험을 통해 이를 분석하고 감쇠비를 제시하였다. Vecchio et al.(2011)은 2차원 유한요소 해석모델을 개선하여 반복하중에 대한 해석을 수행하였다. Cho et al.(2013)은 소규모 공시체에 대하여 외력에 의해 손상을 입지 않은 초기 상태에서 충격실험을 통해 감쇠비를 측정하였다. 그리고 동일한 시편에 대하여 반복하중을 가한 실험을 통해 감쇠비의 변화를 평가하였다. Epackachi et al.(2014)은 SC 벽체의 면내 전단강도를 해석적으로 검토하고, 반복하중에 대한 실험을 수행하여 동적인 거동을 살펴보았다.

본 연구는 비보강된 SC 벽체에 면내 방향으로 반복의 전

1) 정회원, 인하대학교 사회인프라공학과 박사후연구원
2) 정회원, 포스코 E&C, 선임연구원
3) 정회원, 인하공업전문대학 토목환경과 교수, 교신저자

* Corresponding author : yist@inhac.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2015년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2015년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

단하중이 가해질 때, 스티드의 배치와 형상이 미치는 영향을 해석적으로 검토하기 위하여 비선형의 유한요소해석을 수행하였다. 그리고 국내 설계기준인 KEPIC SNG(KEA, 2010)의 내진관련 기준 및 관련 연구의 결과와도 비교/검토하였다.

2. SC 전단벽의 비선형 유한요소해석

반복의 전단하중을 받는 SC 전단벽의 거동에 스티드가 미치는 영향을 평가하기 위하여 세 가지의 스티드 배치간격과 세 종류의 스티드 형상을 고려한 유한요소모형을 구성하였다. 이 연구를 위하여 이들 반복하중을 받는 SC 전단벽의 비선형 거동을 합리적으로 모사할 수 있는 해석이 요구되므로 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/Explicit가 사용되었다.

2.1 해석모형의 형상 및 요소

이 연구는 기존의 실험에서 수행한 연구결과들과의 비교를 위해서 복잡한 형상의 실구조물이 아닌, 실내실험에서 수행한 크기의 단순한 형상의 벽체를 해석모형의 대상으로 결정하였다. SC 전단벽의 해석모형의 크기는 과거 Ozaki et al.(2004)이 수행한 실험자료를 참고하여 그 크기를 Fig. 1과 같이 1,200mm×1,200mm×206mm으로 하였으며 강판과 콘크리트의 두께는 각각 3mm와 200mm로 결정하였고, 강판과 콘크리트의 전단연결재인 스티드의 영향을 보다 분명하게 관찰하기 위하여 강판의 두께를 KEPIC SNG(KEA, 2010)의 최소두께보다 얇은 수준으로 그리고 Ozaki et al.(2004)의 실험범위 내에서 결정하였다.

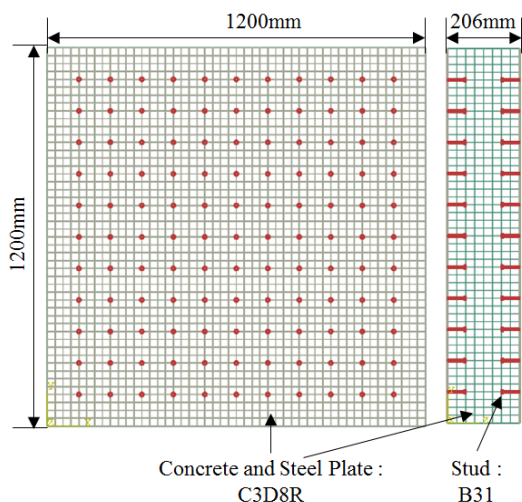


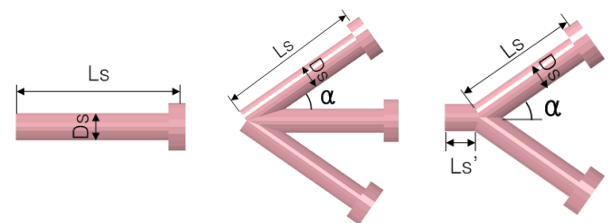
Fig. 1 Analytical model of a SC wall for FE analyses

정적 비선형해석을 수행한 기존 연구(Cho et al. ;2014a,b)에서는 C3D20R 요소를 사용하였지만, Explicit 해석 환경에서는 위 요소를 지원하지 않으므로 C3D8R요소를 사용하였고 기존의 연구보다 2배정도 더 조밀하게 메쉬를 분할하였다. 그리고 스티드는 전체 모형에 비하여 그 크기가 상대적으로 작으므로 단순한 보요소(B31)로 모델링하였다. 스티드의 배치간격은 세 가지(100mm, 167mm 및 250mm)의 경우가 고려되었다. 스티드의 크기는 콘크리트의 두께를 고려하여 결정했으며, 직경은 13mm(스티드 머리의 직경 22mm), 길이는 55mm(스티드 몸체 45mm+머리 10mm)이다. 스티드의 형상은 Cho et al.(2014a,b)에 의해 기 연구된 경사형 스티드인 DS1과 DS2 그리고 일반형 스티드인 GS를 사용하였다(Fig. 2, $\alpha=35^\circ$). 스티드는 강판에 용접되어 완전부착된 상태를 가정하였다.

Table 1은 각 해석모형에서 사용된 스티드의 형상과 배치간격을 설명한 것이다.

2.2 부재의 연결과 접촉면의 정의

스티드와 강판은 ABAQUS의 interaction 모듈인 “structural



(a) general stud (GS) (b) developed stud #1 (DS1) (c) developed stud #2 (DS2)

Fig. 2 Type of developed studs(Cho et al., 2014a, 2014b)

Table 1 Types and arrangement of studs

Model No.	Arrangement of studs		
	Type	Spacing(x×y)	Number
GS-100×100	General stud	100mm×100mm	36
GS-167×167	General stud	167mm×167mm	16
GS-250×250	General stud	250mm×250mm	9
DS1-100×100	Developed stud #1	100mm×100mm	108
DS1-167×167	Developed stud #1	167mm×167mm	48
DS1-250×250	Developed stud #1	250mm×250mm	27
DS2-100×100	Developed stud #2	100mm×100mm	72
DS2-167×167	Developed stud #2	167mm×167mm	32
DS2-250×250	Developed stud #2	250mm×250mm	18

* 500mm×500mm(area considered in the evaluation)

coupling”방법으로 연결하였다. 그리고 콘크리트 내부에 매설된 스티드를 모사하기 위해 삽입요소방법(embedded element method)을 사용하였다. 강판과 콘크리트 사이의 접촉거동에 대한 해석을 위해 접촉(contact)방법을 사용하였으며, 콘크리트와 강판의 부착력은 미비하다고 가정하여 무시하고 마찰 거동만 정의하였다. 마찰계수(μ)는 0.5로 정의하였다(Baltay and Gjelsvik, 1990).

2.3 재료의 물성치

2.3.1 콘크리트

SC 전단벽의 콘크리트에 대한 정의는 압축 및 인장에 대한 비선형 거동을 위해 Concrete-damaged-plasticity 모델을 적용했다. 콘크리트의 일축압축강도와 포아송비는 각각 35MPa와 0.18로 가정했고, 콘크리트구조기준(KCI, 2012)을 참고하여 탄성계수를 식 (1)에 따라 29,779MPa로 결정하였다.

$$E_c = 0.077m_c^{1.5} \sqrt[3]{f_{cu}}, \text{ MPa} \quad (1)$$

여기서, f_{cu} 는 콘크리트의 평균압축강도(MPa), m_c 는 단위질량(kg/m^3)이다. Concrete-damaged-plasticity 모델의 소성관련 매개변수로는 Prakash et al.(2011)의 연구를 참고하여 Table 2에 나타난 값을 적용하였다.

콘크리트의 압축응력-변형률 관계는 Carreira and Chu(1985)가 제안한 모델인 식 (2)에 근거하여 산정하였다. 반면, 콘크리트의 인장응력-변형률 관계는 Evans and Marathe(1967)의 실험결과를 참고하였고 응력-변형률과-손상에 대한 관계는 Jankowiak and Lodygowski(2005)의 반복재하에 대한 연구를 참고하여 결정하였다.

Table 2 Parameters of the concrete plastic model

Parameters	Input value
Dilation angle	35.0
Eccentricity	0.1
K'	0.667
Viscosity parameter	0.0
Ratio of the ultimate biaxial compressive stress to the ultimate uniaxial compressive stress	1.12
Ratio of the uniaxial tensile to the uniaxial compressive strength	0.1

* : Ratio of second stress invariant on the tensile meridian to that on compression meridian at the initial yield for any given value of the pressure invariant

$$\sigma_c = \frac{f_c' \varphi \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_c'} \right)}{\varphi - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_c'} \right)^\varphi}, \text{ MPa} \quad (2)$$

여기서, σ_c 는 콘크리트의 압축응력(MPa), ϵ_c 는 압축변형률, f_c' 는 압축강도, ϵ_c' 는 압축강도 시 변형률(=0.002)이며, 응력-변형률곡선의 형상계수 φ 는 식(3)과 같다.

$$\varphi = \left(\frac{f_c'}{32.4} \right) + 1.55 \quad (3)$$

해석에 사용된 콘크리트의 응력-변형률-손상관계는 Fig. 3에 보인 바와 같다.

2.3.2 강판과 스티드

강판과 스티드의 재료특성으로 탄성계수와 포아송비는 각각 207,000MPa와 0.3을 사용하였고 탄소성 거동은 von Mises의 파괴기준을 따른다고 가정하였으며 강판과 스티드의 응력-변형률 관계는 Prakash et al.(2011)의 연구를 참고하여 Fig. 4를 사용하였다.

강판(KS SN400)의 경우, 항복강도와 인장강도는 각각 235MPa와 400MPa이고, KS B 1062를 따르는 스티드는 각각 550MPa와 710MPa이다.

2.4 경계조건과 해석방법

Fig. 5와 같이 SC 전단벽의 면내 반복의 전단하중에 대한 해석을 위해 먼저 벽체의 하부에 완전구속의 경계조건을 적용하였고, 벽체상부에 횡방향의 수직변위를 반복적으로 재하하였다. Fig. 5는 각 반복하중 마다의 재하된 변위이력을 도

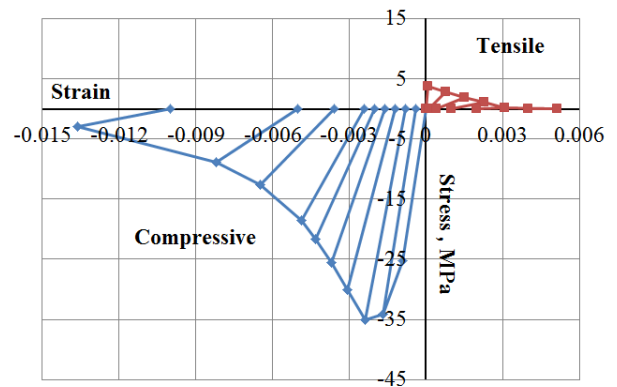


Fig. 3 Stress-strain-damage relationship of the concrete

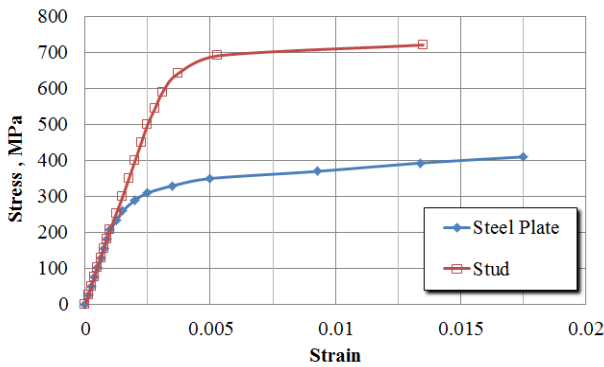


Fig. 4 Uniaxial stress-strain relationship of steels (Prakash et al., 2011)

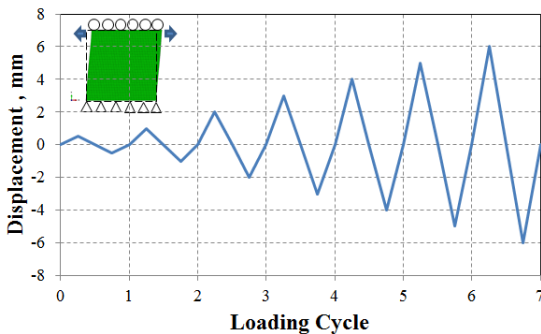


Fig. 5 Displacement history for numerical analyses

시한 것으로 총 7회의 반복하중을 최대 ($\pm 6\text{mm}$)까지 가하였다.

3. 해석 결과

3.1 하중과 변위관계

면내 전단하중은 강판의 전단 항복변형을 및 기존실험의 결과를 참고하여 최대변위 $\pm 6\text{mm}$ 를 기준으로 변위의 0.5배 수준부터 점차 증가시키며 벽체에 반복적으로 재하하였고, 벽체 상부의 평균변위와 벽체 하부의 반력을 검토하였다. Fig. 6은 스테드의 배치 및 형상에 대하여 각각의 반복이력 내에서의 최대 전단력과 그때의 변위관계를 나타낸 스케레톤 곡선이다. 그리고 Fig. 7은 각각의 경우에 대한 하중-변위 이력곡선을 나타낸다.

스테드의 간격은 KEPIC SNG(2010)의 규정에 따른 100mm의 경우가 다른 스테드 간격보다 최대 전단강도가 높게 나타났고, 스테드 형태의 경우 100mm 간격에서는 개선 스테드 DS1 및 DS2가 일반 스테드보다 전단강도가 4~6% 정도 높게 나타났으나, 다른 스테드 간격에서는 일반 스테드

보다 강도가 미소하게 높거나 유사한 수준을 나타내었다.

Table 3은 반복의 전단하중에 대한 초기강성(K_f), 극한강도(V_u) 및 이때의 변위(δ_u), 항복강도(V_y) 및 항복변위(V_y)에 대하여 정리한 것이다. SC 구조체의 경우, 강재와는 달리 항복점이 뚜렷하지 않은 이유로 Elmenshawi et al.(2010)의 연구를 참고하여 극한강도(V_u)의 0.8배를 항복강도(V_y)로 하였고, 이때의 변위를 항복변위로 결정하였다.

초기강성은 처음 반복하중시의 접선강성으로 스테드의 간격이 좁아질수록 강판과 콘크리트의 합성이 보다 더 잘되어 높게 나타났고, 경사부재를 가지는 스테드를 사용한 경우가 보다 높은 수치를 나타냈다. 극한강도의 경우, 강판과 콘크리트의 합성상태가 좋은 스테드 간격 100mm의 경우에는 콘크리트가 점진적으로 손상을 받다가 4번째 주기 이후로 완전히 손상되었다. 하지만 스테드의 간격이 점차 넓어질수록 불완전 합성상태가 되어 이보다 이른 주기에서 콘크리트가 완전히 손상됨을 확인할 수 있다.

3.2 강성 저하에 따른 감쇠비

지진과 같은 반복의 횡하중에 대한 구조체의 파괴양상을 평가하기 위해서는 복잡한 운동방정식을 풀어야하지만 쉽지 않으므로 Fig. 8과 같은 하중과-변위이력곡선으로부터 구조체 평균강성의 저하 및 등가점성감쇠비를 산정하여 각각의 경우에 대하여 평가하였다. 실제 구조물은 반복하중에 의하여 식(4)로 나타내어지는 평균강성(K_a)이 저하되고, 외력에 의한 에너지를 소비하면서 감쇠비가 증가한다.

$$K_a = \frac{P_m}{\delta_m}, \text{ kN/mm} \quad (4)$$

여기서, K_a 는 각 주기 당 평균강성, P_m 은 각 싸이클당 평균최대하중, 그리고 δ_m 은 평균최대변위이다.

단자유도계 구조물에서 외력으로 작용하는 반복의 횡하중이 $P(t) = P_0 \sin \omega t$ 표현될 때, 점성감쇠에 의해 소산되는 에너지(E_D)는 식(5)와 같이 표현할 수 있다. 이는 Fig. 8과 같이 조화하중에 의한 하중-변위이력곡선의 면적과 같다(Lee et al., 2007; Cho et al., 2013).

$$E_D = \int f_D \cdot d\delta = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \left(c \frac{d\delta}{dt} \right) \frac{d\delta}{dt} dt = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} c \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 dt, \text{ kN} \cdot \text{mm} \quad (5)$$

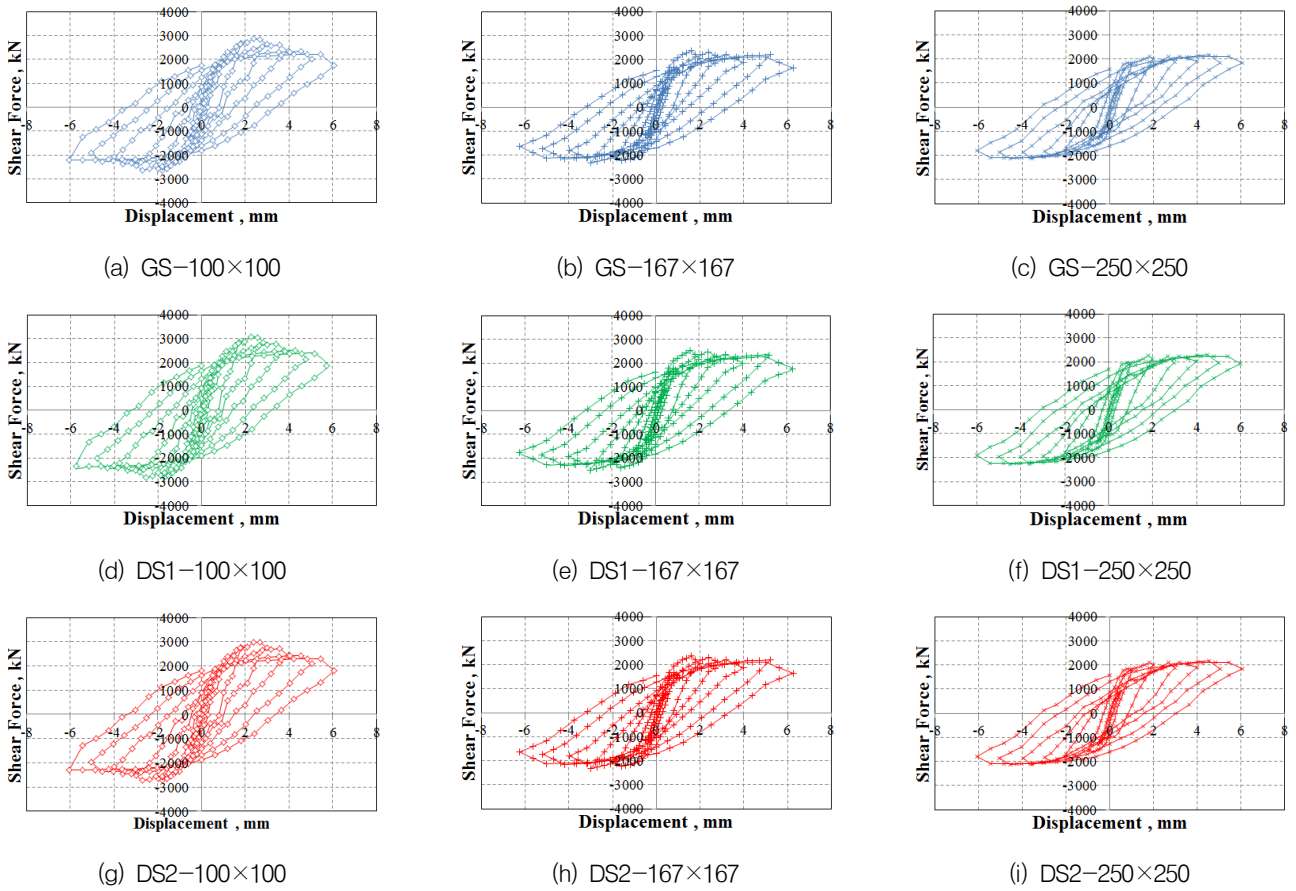


Fig. 6 Hysteresis curves from FE results

Table 3 Result summary of FE analyses

	Initial stiffness K_I , kN/mm	Ultimate force V_u , kN	Displacement at V_u δ_u , mm	Yielding force V_Y , kN	Displacement at V_Y δ_Y , mm
GS-100×100	2510	2869	2.71	2295	1.62
GS-167×167	2410	2366	2.11	1893	1.11
GS-250×250	2386	2151	2.01	1721	1.09
DS1-100×100	2613	3069	2.55	2455	1.52
DS1-167×167	2501	2531	2.10	2025	1.13
DS1-250×250	2411	2216	2.01	1773	1.10
DS2-100×100	2607	2983	2.61	2386	1.60
DS2-167×167	2415	2318	2.08	1854	1.14
DS2-250×250	2399	2173	2.03	1738	1.01

여기서 E_D 는 소산에너지, f_D 는 외력, δ 는 변위, c 는 감쇠계수, ω 는 감쇠고유진동수 그리고 t 는 시간이다.

또한, 구조물의 변형에너지(E_S)는 식(6)과 같고 변형에너지(E_{S_0})는 식(7)로 나타낼 수 있으며 이는 Fig. 8에서 빗금으로 나타낸 부분의 넓이와 같다(Lee et al., 2007; Cho et al., 2013).

$$E_S = \int f_S \cdot d\delta = \int_0^{2\pi} \omega (K_a \cdot \delta) \frac{d\delta}{dt} dt, \text{ kN} \cdot \text{mm} \quad (6)$$

$$E_{S_0} = \frac{1}{2} K_a \delta_m^2, \text{ kN} \cdot \text{mm} \quad (7)$$

여기서, E_S 는 변형에너지, E_{S_0} 는 근사변형에너지, f_S 는

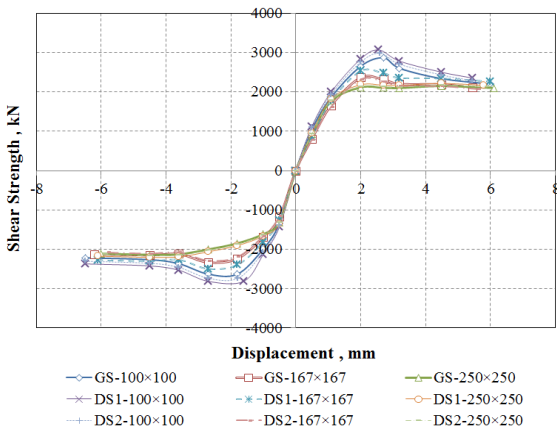


Fig. 7 Comparative P VS Δ skeleton curves from numerical analyses

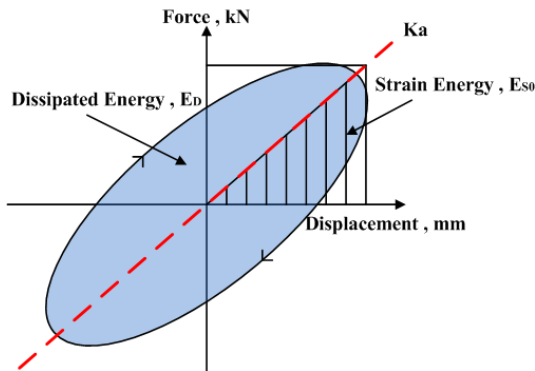


Fig. 8 Hysteresis curve for viscous damping (Cho et al., 2013)

내력이다.

구조물의 감쇠에 의한 소산에너지와 변형에너지의 관계로부터 i 번째 주기에서의 등가점성감쇠비(ξ_{ei})는 식 (8)과 같이 구할 수 있다(Lee et al., 2007; Cho et al., 2013).

$$\xi_{ei} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{Di}}{E_{S_{0,i}}} \quad (8)$$

Fig. 9는 강성비(K_a/K_u)와 등가점성감쇠비 사이의 관계를 나타낸다. 강성비는 각 주기의 평균강성(K_a)을 극한강도 시의 강성(K_u)으로 나눈 값으로 정의하였다. 첫 번째 주기에서 등가점성감쇠비는 2.5~4.7% 수준으로 산정되었는데 이는 Lee et al.(2010)이 극한강도보다 낮은 수준의 자유진동 실험을 통하여 얻은 감쇠비와 유사한 수준이었다. Cho et al.(2013)은 실내에서 소규모 SC 공시체에 대한 반복하중 실험을 통해 극한강도의 절반인 K_a/K_u 가 2.0인 수준에서 약

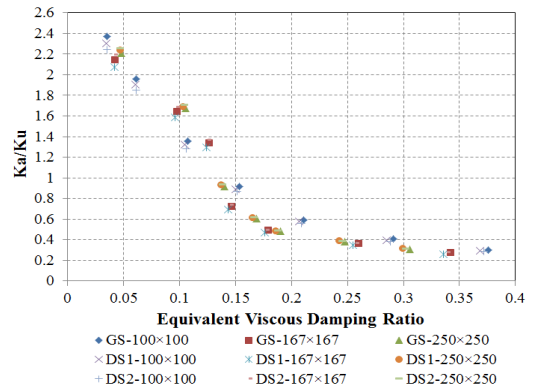


Fig. 9 Stiffness ratio vs equivalent viscous damping ratio

6%의 등가점성감쇠비를 얻었는데, 해석결과도 이와 유사한 수준으로 나타났다. 그리고 Cho et al.(2013)의 연구는 극한강도의 80%정도인 K_a/K_u 가 1.15~1.25의 수준에서 등가점성감쇠비를 약 10%로 보고하였는데, 유한요소해석을 수행한 본 연구에서는 약 11~13%정도로 나타났다. KEPIC SNG는 SC 구조가 RC 구조보다 균열발생이 적어 안정지진 수준의 감쇠비를 6%로 정의하고 있다. 하지만 해석결과 콘크리트에 균열을 수반한 손상으로 인해 강성비가 작아질수록 감쇠비가 증가함을 확인하였다.

3.3 누적소산에너지

일반적으로 에너지소산능력이 클수록 내진성능이 우수하다고 알려져 있다. 소산에너지는 구조물이 내력을 유지하면서 받아들인 에너지로, 하중-변위이력곡선으로 둘러싸인 면적의 합으로 계산할 수 있다. 따라서 이 논문에서는 각 사이클 별로 이 곡선을 통해 소산에너지를 계산하였고 그 값을 누적하여 누적소산에너지를 산정하였다.

Fig. 10은 유한요소해석을 통해 얻은 하중-변위이력곡선으로부터, 반복의 횡하중을 받은 SC 벽체의 각 주기당 누적소산에너지를 나타낸 것이다. 7번째 주기를 기준으로, 일반 스테드 100mm 간격에 비해 일반 스테드 167mm와 일반 스테드 250mm는 누적소산에너지가 각각 85% 그리고 82% 수준이었다. 이것은 스테드의 간격이 너무 커서 강관과 콘크리트가 불완전 합성된 경우, 내진성능이 낮아짐을 나타낸다. 일반 스테드에 비하여 경사 스테드 2개 및 평행 스테드 1개로 이루어진 DS1의 경우 일반 스테드에 비해 약 7%정도 누적소산에너지가 높았으며, 경사 스테드 2개로 이루어진 DS2의 경우 일반 스테드에 비하여 약 4%정도 누적소산에너지가 높게 나타났다.

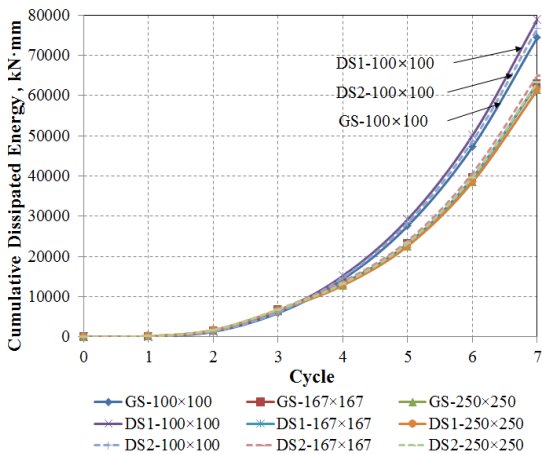


Fig. 10 Cumulative dissipated energy from FE analyses

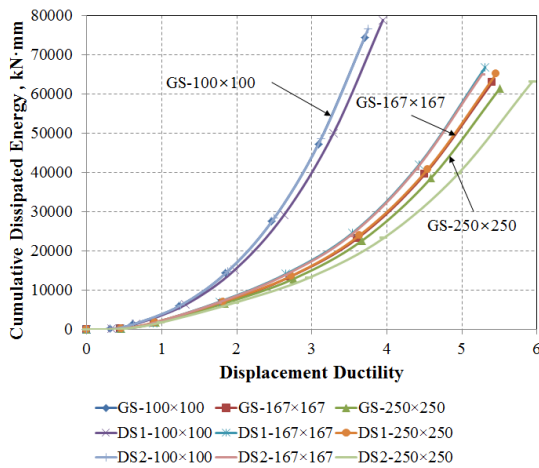


Fig. 11 Cumulative dissipated energy-displacement ductility relationship

3.4 누적소산에너지와 연성

연성이 큰 재료일수록 파괴이전에 상당한 에너지를 흡수할 수 있다. 이 때문에 누적소산에너지 뿐만 아니라 지진에 대한 구조물의 내력성능을 평가하는 지표로 연성이 사용된다. 비탄성 변형에 저항하는 연성효과를 나타내는 지표는 식 (9)와 같이 각 하중-변위이력곡선에서 최대변위(δ_{max})를 항복변위(δ_Y)로 나눈 값으로 나타낼 수 있으며, 이를 변위연성 (displacement ductility) 혹은 연성계수(μ)라고 한다.

$$\mu = \frac{\delta_{max}}{\delta_Y} \quad (9)$$

Fig. 11은 스테드의 간격과 형태에 따른 누적소산에너지와

변위연성과의 관계를 나타내고 있다. 동일한 누적소산에너지 능력을 가질 때, 스테드의 간격이 넓어질수록 연성이 우수한 것으로 나타났다. 그리고 스테드의 종류는 스테드 간격이 100mm인 경우 DS1이 연성이 약간 우수한 것으로 나타났고, DS2는 일반 스테드와 거의 유사하였다. 하지만 그 이상의 스테드 간격에서는 경향이 뚜렷이 나타나지 않았다. 연성의 경우, 스테드 간격이 넓어질수록 우수한 것으로 나타났는데, 이는 강판과 콘크리트가 불완전하게 합성되어 일반적인 경우보다 이른 상태의 변위 및 하중상태에서 항복이 일어났기 때문이다. 따라서 강판과 콘크리트의 연결이 불량한 경우 누적소산에너지-연성의 관계로 내진성능을 판별하기에는 무리가 있다고 사료된다.

4. 결론

본 연구는 스테드의 간격 및 종류가 반복의 전단하중을 받는 SC 구조체의 내진성능에 미치는 영향을 살펴보기 위해 유한요소방법으로 이를 해석하였고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 반복하중에 대한 해석을 통해서 얻은 하중-변위이력곡선으로 스텔레톤 곡선을 나타내었고, 이로부터 극한강도 및 항복강도 그리고 그에 대한 변위를 얻었다. 스테드의 간격이 좁을수록 극한강도 및 항복강도가 크게 나타났고, 일반 스테드 보다 경사부재가 있는 경사 스테드의 강도가 더 크게 나타났다.
- (2) 하중-변위이력곡선으로부터 감쇠비를 산정하였고 이를 강성과 함께 비교한 결과, 강성비가 줄어들수록 감쇠비가 증가함을 확인하였다. 극한강도의 절반 수준에서 약 6%의 감쇠비를 나타냈으며, 극한강도의 80% 수준에서 약 11~13%의 감쇠비를 나타냈다.
- (3) 하중-변위이력곡선으로부터 소산에너지를 산정한 후 이를 누적하여 누적소산에너지를 구하였고 각각의 경우를 비교한 결과, 스테드의 간격이 좁을수록 누적소산에너지가 크게 나타났으며 내진성능이 우수함을 확인하였다. DS1과 DS2의 경우, 일반 스테드의 경우보다 각각 7%와 4%정도 큰 것으로 나타났다.
- (4) 동일한 누적소산에너지에 대하여 스테드 간격이 넓어질수록 연성은 증가하였고 스테드의 종류에 따른 경향은 보이지 않았다. 하지만 스테드 간격이 넓어진 경우 불완전 합성으로 인해 강도가 감소하였기 때문에 연성

도만으로 내진성능을 평가하기에는 무리가 있다고 사
료되었다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의
지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2014R1A1A2056504)

References

1. Cho, S. G., So, G. H., and Park, W. K. (2013), Investigation of Damping Ratio of Steel Plate Concrete (SC) Shear Wall by Lateral Loading Test & Impact Test, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 17(2), 79-88 (in Korean).
2. Ozaki, M., Akita, S., Oosuga, H., Nakayama, T., and Adachi, N. (2004) Study on Steel Plate Reinforced Concrete Panels subjected to Cyclic In-Plane Shear, *Nuclear Engineering and Design*, 228(1), 225-244.
3. Lee S. J. and Kim W. K. (2010), Damping Ratios for Seismic Design of SC Structures, *Korean Society of Steel Construction*, 22(5), 487-496 (in Korean).
4. Vecchio F. J. and McQuade, I. (2011), Towards Improved Modeling of Steel-Concrete Composite Wall Elements, *Nuclear Engineering and Design*, 241(8), 2629-2642.
5. Epackachi, S., Nguyen, N., Kurt, E., Whittaker, A., and Varma, A. (2014) In-Plane Seismic Behavior of Rectangular Steel-Plate Composite Wall Piers, *ASCE Journal of Structural Engineering*, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001148](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001148).
6. Korea Electric Association (KEA) (2010), Nuclear Safety Related Structures : Steel-Plate Concrete Structure, *KEPIC-SNG*, Korea Electric Association (in Korean).
7. Cho, S. G., Lim, J. S., Jeong, Y. D., and Yi, S. T. (2014a), Analytical Study for Performance Improvement of Studs for Steel Plate Concrete(SC) Walls subjected to Bending Moment, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 18(2), 74-81 (in Korean).
8. Cho, S. G., Lim, J. S., Jeong, Y. D., and Yi, S. T. (2014b),

Analytical Study for Design of Shape and Arrangement Spacing of Studs in Steel Plate Concrete(SC) Wall subjected to Shear and Axial Forces, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 18(4), 67-76 (in Korean).

9. Baltay, P. and Gjelsvik, A. (1990), Coefficient of Friction for Steel on Concrete at High Normal Stress, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2(1), 46-49.
10. Korea Concrete Institute(KCI) (2012), *The Korean Concrete Structure Design Code*, Korea Concrete Institute (in Korean).
11. Prakash, A., Anandavalli, N., Madheswaran, C. K., Rajasankar, J., and Lakshmanan, N. (2011), Three Dimensional FE Model of Stud Connected Steel-Concrete Composite Girders Subjected to Monotonic Loading, *International Journal of Mechanics and Applications*, 1(1), 1-11.
12. Carreira, D. J. and Chu, K. H. (1985), Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression, *ACI Journal*, American Concrete Institute, 82(6), 797-804.
13. Jankowiak, T. and Lodygowski, T. (2005), Identification of Parameters of Concrete Damage Plasticity Constitutive Model, *Foundation of civil and environmental engineering*, No. 6, Poznan University of Technology, Poland, 53-69.
14. Evans, R. H. and Marathe, M. S. (1967), Microcracking and Stress-Strain Curves for Concrete in Tension, *Materials and Structures*, 1(1), 61-64.
15. Elmenshawi, A. and Brown, T. (2010), Hysteretic Energy and Damping Capacity of Flexural Elements Constructed with Different Concrete Strengths, *Engineering Structures*, 32(1), 297-305.
16. Lee, K. H., Kim, H. C., Hong, W. K., and Lee, Y. H. (2007), Capacity of Concrete Filled Carbon Tube Columns Based on the Comparison of Ductility and Energy Dissipation Capacity, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 11(1), 29-35(in Korean).

Received : 12/26/2014
Revised : 01/08/2015
Accepted : 01/16/2015

요 지

이 연구에서는 SC 전단벽의 전단 연결재인 스티드의 배치와 형상이 SC 전단벽의 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위해 전단벽체가 반복의 전단하중을 받을 때의 거동을 해석적으로 검토하였다. 이를 위해 서로 다른 배치간격과 형상의 스티드가 배열된 SC 전단벽을 대상으로 유한요소해석을 수행하였다. 그 결과, 하중-변위이력곡선으로부터 스켈레톤 곡선을 얻었고 스티드의 간격이 좁을수록 극한강도 및 항복강도가 크게 나타남을 확인했다. 또한, 일반 스티드 보다 경사부재가 있는 경사 스티드의 강도가 더 크게 나타났고 강성비가 줄어들수록 감쇠비가 증가함을 확인했다. 최종적으로 스티드의 간격이 좁을수록 누적손상에너지가 크게 나타나며 내진성능이 우수함을 확인하였다.

핵심 용어 : 강판 콘크리트 벽체, 스티드 성능평가, 반복하중, 비선형 유한요소해석, KEPIC SNG