

친환경시멘트 콘크리트를 사용한 강판콘크리트구조의 압축거동

강철규¹⁾ · 최병정^{2)*} · 정백선³⁾

¹⁾ 조교수, 경기대학교, 플랜트·건축공학과 ²⁾ 교수, 경기대학교, 플랜트·건축공학과 ³⁾ 박사과정, 경기대학교, 플랜트·건축공학과

Compressive Behavior of Steel Plate-Concrete Structures using Eco-Oriented Cement Concrete

Kang, Cheol Kyu¹⁾ Choi, Byong Jeong^{2)} Jeoung, Beak Seon³⁾*

¹⁾ Assistant Professor, Dept. of Plant Architectural Engineering, Kyonggi University, Gyeonggi, 443-760, Korea

²⁾ Professor, Dept. of Plant Architectural Engineering, Kyonggi University, Gyeonggi, 443-760, Korea

³⁾ Ph.D. Candidate, Dept. of Plant Architectural Engineering, Kyonggi University, Gyeonggi, 443-760, Korea

ABSTRACT : The domestic research of the steel plate concrete structures have been focused on the nuclear structures requiring much strong resistance. There are many advantages in the steel plate-concrete structures such as the possibility of prefabricated production and modular construction. This research tried to establish some basic design information of SC structures toward mid to low-rise general buildings with low strength. To reduce the strength mentioned, the some of the cement in weight was replaced by the soils which are traditional and environmental oriented material where the new system can be used to general buildings. This paper studied on the compressive characteristics, effective length factors, buckling loading, steel plate buckling, and stud strength using the compression member subjected to the concentrated compression loadings.

KEYWORDS : steel-concrete structure, eco-oriented cement concrete, B/t ratio, compressive behavior, modular construction

1. 서 론

강판콘크리트(Steel-Plate Concrete, 이하 SC구조 표기)구조는 강판, 콘크리트 및 전단연결재를 사용한 구조시스템으로 기둥 및 벽체 등 구조적으로 중요한 1차 부재에 사용할 수 있는 구조시스템이다⁽¹⁾.

국내의 기존 SC구조의 압축특성에 관한 연구는 초고층건물, 원자력발전소 등 특수건물에 적용하기 위해 고강도강재 및 고강도 콘크리트를 사용한 연구^{(2),(3),(4),(5)}를 진행하였다.

하지만 SC구조는 공장생산과 모듈화시공을 통한 공기단축이 가능하기에 일반건축물에서도 사용가능하도록 연구를 진행하고자 하였다. 일반화된 SC구조의 사용을 위해 내력을 감소시켜 안정성을 검증할 필요가 있었다. SC구조의 내력에 영향을 미치는 것은 강판의 강도와 콘크리트의 압축강도이다. 본 연구에서는 특수건물에서 요구되는 높은 강도가 아닌 중·저층의 일반건물에서도 낮은 강도를 갖고 사용할 수 있는 SC구조의 토대를 마련하고자 하였으며, 강도를 저감시키는 방법으로 친환경재료인 황토와 낮은 강도의 시멘트를 조합하여 중요도가 낮은 건물에 사용이 가능하도록 하기 위해 연구를 시작하였다. 또한 콘크리트의 강도는 낮추고 적게 사용하면서 강재의 사용을 극대화 할 수 있는 기법을 찾고자 하였다.

친환경 재료인 황토와 시멘트를 조합함으로써 시멘트의 생산과정에서 발생하는 이산화탄소(CO₂)의 배출을 일부 감소시켜 환경을 고려한 SC구조를 구현하였다. 또한 기존 연구에 의하면 황토를 치환하였을 경우 치환하지 않은 경우보다 부

Note.-Discussion open until April 30, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on January 17, 2012; revised August 1, 2012; approved on September 25, 2012.
© KSSC 2012

* Corresponding author

Tel. +82-31-249-9702 Fax. +82-31-249-9702
E-mail: bjchoi@kgu.ac.kr

착강도가 높게 측정되었다는 연구에 착안하여 황토를 사용함으로써 환경적인 부분을 고려하였다^[6]. 또한 SC구조의 부착력을 향상시켜 낮은 강도로도 중·저층에 활용이 가능하도록 하기 위해 연구를 하였다. 본 실험에서는 치환율을 결정하기 위해서 예비배합을 통하여 시멘트 중량비 대비 황토를 20% 치환하여 사용하였으며 황토를 치환한 시멘트를 저시멘트로 정의하였다.

본 연구에서는 저시멘트를 사용하여 SC구조 중 가장 기본이 되는 중심압축하중을 받는 구조부재를 대상으로 스티드간격별 최대압축강도가 기준식에 적합한지를 검증하였다. 또한 기둥이론과 판이론을 적용하여 강판좌굴을 분석하고 실험값을 통해 유효좌굴길이계수와 압축력 작용시 스티드의 인장거동을 파악하여 저시멘트를 사용한 SC구조의 사용성을 검증하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험체 개요

본 연구에서는 강판좌굴 영역을 탄성과 비탄성으로 구분하여 실험체를 제작하였다. 강판의 탄성영역에서 좌굴 유무를 구분해 주는 경계부분은 식 (1)을 이용하여 식 (2)로 유도하였다.

$$\epsilon_{cr} = \frac{\pi^2}{12K^2(B/t)^2} = \frac{\sigma_y}{E_s} \quad (1)$$

여기서,

$$E_s = 205,000 \text{ MPa}$$

$$K = 0.7 \text{ (가정)}$$

$$B/t = 600 / \sqrt{F_y} \quad (2)$$

강재의 인장강도시험 결과 항복강도가 428MPa로 측정되어 식 (2)에 의해 탄성과 비탄성의 경계영역은 B/t=29로 구분되었다. 강재가 비탄성 영역에서 좌굴하는 실험체는 B/t=20이며 탄성영역에서 좌굴하는 실험체는 B/t=30과 B/t=40이다.

압축실험은 보통시멘트를 사용한 스티드간격별 실험체 3개, 저시멘트를 사용한 스티드간격별 실험체 3개로 동일한 스티드간격에서 두 재료를 사용하여 총 6개의 실험체를 제작하였다. 각 실험체의 세부일람은 Table 1과 같다.

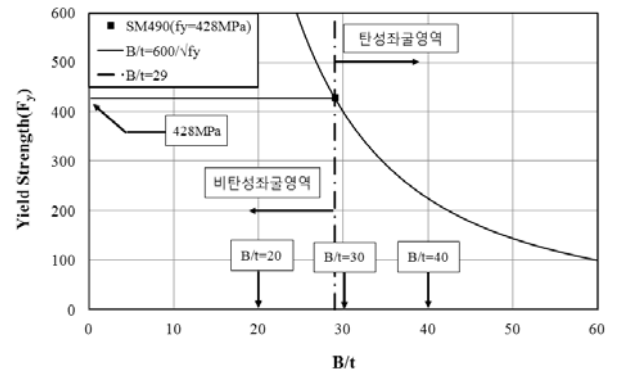
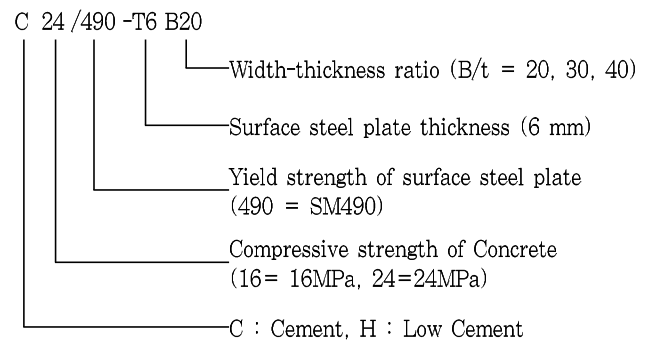


Fig.1 Elastic and inelastic buckling range

Table 1. List of Specimens

| No | Specimen | Material | B/t | f _{ck} (MPa) | Specimen Size (mm) | | |
|----|---------------|-------------------|-----|-----------------------|--------------------|-------|--------|
| | | | | | Thickness | Width | Height |
| 1 | C24/490-T6B20 | Cement | 20 | 24 | 250 | 280 | 380 |
| 2 | C24/490-T6B30 | Cement | 30 | 24 | 250 | 370 | 500 |
| 3 | C24/490-T6B40 | Cement | 40 | 24 | 250 | 460 | 620 |
| 4 | H16/490-T6B20 | Cement + Hwangtho | 20 | 16 | 250 | 280 | 380 |
| 5 | H16/490-T6B30 | Cement + Hwangtho | 30 | 16 | 250 | 370 | 500 |
| 6 | H16/490-T6B40 | Cement + Hwangtho | 40 | 16 | 250 | 460 | 620 |



본 실험에서는 스티드간격비(B/t)에서 강판의 두께(t)를 일정하게 하고 스티드간격(B)을 변수로 계획하였다. 스티드간격(B)은 B/t=20, B/t=30, B/t=40에서 각각 120mm, 180mm, 240mm이다. 각 실험체의 벽두께는 250mm로 일정하며 스티드의 크기는 축직경 13mm, 길이는 108mm(축직경에 8배 이상)로 계획하였다. 실험체 형상은 Fig. 2와 같다

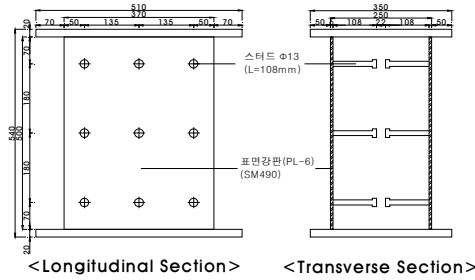


Fig. 2 Test specimen

2.2 재료시험

2.2.1 황토예비배합 시험

본 실험에 콘크리트배합설계강도 18MPa를 구현하기 위해 Table 2와 같이 예비배합을 실시하였다.

Table 2. Details of the mix proportions and measured material properties

| Specimen | W/C (%) | s/a (%) | Replacement ratio (%) | Unit Volume Weight(N/m ³) | | | | |
|----------|---------|---------|-----------------------|---------------------------------------|------|------|------|-------|
| | | | | W | C | H | S | A |
| OPC | 50 | 43 | 0 | 1813 | 3626 | 0 | 7428 | 10123 |
| H20 | 50 | 43 | 20 | 1813 | 2900 | 725 | 7134 | 10084 |
| H40 | 50 | 43 | 40 | 1813 | 2175 | 1450 | 7634 | 10035 |

※ OPC : 황토 무첨가 기준 실험체
 H20 : 황토치환율 20% 실험체
 H40 : 황토치환율 40% 실험체

예비배합결과 OPC는 28일 압축강도 테스트에서 24MPa를 보였으며 H20, H40은 각각 16MPa, 9MPa의 결과를 얻었다. H40은 많은 황토량으로 인해 예상압축강도에 도달하지 못하였기 때문에 본 실험에서는 예상설계기준압축강도에 근접한 결과를 보인 H20을 사용하기로 결정하였다.

2.2.2 콘크리트의 압축강도시험(본 실험)

본 실험에 사용된 콘크리트는 압축강도가 보통시멘트는 24MPa, 저시멘트콘크리트는 16MPa로 황토를 사용함으로써 압축강도가 약 33%로 축소된 결과가 나왔다. KS F 2403에 따라 제작한 공시체는 실험체와 동일한 환경조건에서 양생하였으며, 콘크리트의 압축강도 시험결과는 예비배합과 비슷한 결과로 나타났다. 콘크리트의 압축강도시험결과 및 배합비는 Table 3과 같다.

Table 3. Results of compressive test for concrete

| Specimen | Compressive strength (MPa) | Slump (mm) | W/C (%) | Unit Volume Weight(N/m ³) | | | | |
|----------|----------------------------|------------|---------|---------------------------------------|------|-----|------|-------|
| | | | | W | C | H | S | A |
| OPC | 24 | 120 | 50 | 1813 | 3626 | 0 | 7428 | 10123 |
| H20 | 16 | 90 | 50 | 1813 | 2900 | 725 | 7134 | 10084 |

2.2.3 강재의 인장강도시험

본 실험에 사용된 강재의 기계적 성질을 파악하기 위해 KS B 0801의 규정에 준하여 시험편 5호를 제작하였다. KS B 0802의 금속인장시험방법에 따라 인장강도시험을 실시하였다. 시험편은 두께가 6.0mm인 SM490강재이다. 변형률은 각 시험편에 부착된 스트레인지지를 통하여 측정하였으며 강재의 시험결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Results of tensile test

| Steel plate | Thickness (mm) | Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elastic Modulus (MPa) | Yield Ratio (%) | Ductility (%) |
|-------------|----------------|----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------|---------------|
| SM490 | 6.0 | 428 | 534 | 2.02E5 | 80 | 36 |

2.3 가력 및 측정방법

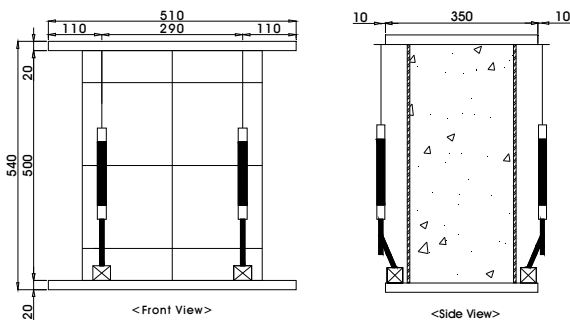
실험체의 가력은 5,000kN U.T.M.을 사용하여 Fig. 3과 같이 중심축하중으로 단조가력을 실시하였다. 실험체에 편심을 최소화하기 위하여 본실험이 실시되기 전에 예상최대압축강도의 10%정도 이하로 탄성범위 내에서 예비가력을 하여 변위가 일정하도록 하였다. 예비가력은 Fig. 4(a)와 같이 설

치된 4개의 LVDT가 거의 동일한 변위로 측정될 때 본가력을 실시하였다.

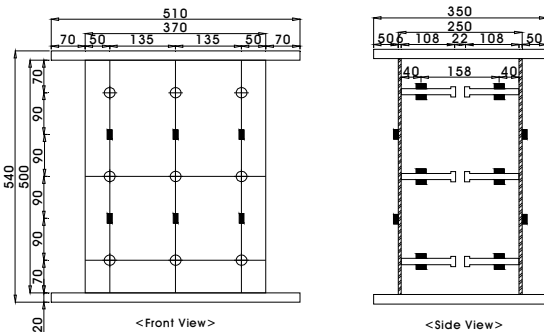


Fig. 3 U.T.M .and Specimen(Specimen No.3)

연직방향으로 작용하는 압축하중에 의한 구조적 거동을 관찰하기 위해 LVDT를 모서리 네 방향의 Fig. 4(a)와 같이 설치하였다. Fig. 4(b)처럼 스테드와 스테드 사이에 강재용 스트레인지지를 설치하여 강판의 변형률을 측정하였으며 스테드의 인장거동을 확인하기 위하여 스테드의 위·아래 방향에 강재용 스트레인지지를 설치하였다.



(a) Installation of LVDT



(b) Installation of strain gauge

Fig. 4 Measurement of displacement and strain

3. 실험결과 및 분석

3.1 최대압축강도

압축 구조부재 설계시 가장 중요한 요소는 압축부재의 최대압축강도를 파악하는 일이다. 본 절에서는 국내의 기준식인 KEPIC-SNG와 일본의 기준식인 JEAG-4618를 각각의 실험체에 대하여 압축강도를 구하였다. Table 5는 각각의 기준식에 적용되는 제원을 나타내었다^{[7],[8]}.

Table 5. Sectional and mechanical data for specimens

| Specimen | Cross section area(mm ²) | | Compressive strength of concrete (MPa) | Buckling strength of steel Plate (MPa) | | |
|---------------|--------------------------------------|--|--|--|----------------|----------------|
| | concrete (A _c) | steel plate (2A _p =A _s) | | f _{ck} | KEPIC-SNG | JEAG-4618 |
| | | | F _{cr} | | F _y | F _e |
| C24/490-T6B20 | 66,640 | 3,360 | 24 | 380 | 428 | - |
| C24/490-T6B30 | 88,060 | 4,440 | 24 | 288 | - | 382 |
| C24/490-T6B40 | 109,480 | 5,520 | 24 | 196 | - | 215 |
| H16/490-T6B20 | 66,640 | 3,360 | 16 | 380 | 428 | - |
| H16/490-T6B30 | 88,060 | 4,440 | 16 | 288 | - | 382 |
| H16/490-T6B40 | 109,480 | 5,520 | 16 | 196 | - | 215 |

3.1.1 KEPIC-SNG 기준식

KEPIC-SNG에서는 공칭압축강도를 표면강판 국부좌굴강도식을 포함하여 벽 전체의 휨좌굴 한계상태로 정의하였다. 비보강 강판콘크리트 벽체의 관한 공칭압축강도(P_n) 기준식은 다음과 같다.

(1) P_e ≥ 0.44 P_o 인 경우

$$P_n = \left[0.658 \frac{P_o}{P_e} \right] P_o$$

(2) $P_e < 0.44 P_o$ 인 경우

$$P_n = 0.877 P_e$$

여기서, P_o : 스테드사이에서의 좌굴을 고려하지 않은 전체높이구간의 공칭압축강도 (N)

$$P_o = 2 A_p F_{cr} + 0.85 A_c f_{ck} \quad (3)$$

$$F_{cr} : \text{탄성좌굴 압축강도 (N)} \left\{ = \frac{\pi^2 EI_{eff}}{(K_w L)^2} \right\}$$

식 (3)에서 표면강판의 좌굴강도(F_{cr})은 식 (4)와 같이 산정된다(KEPIC-SNG, 2010).

$$F_{cr} = (1.5 - 0.043 \frac{K_p B}{t_p} - 90 \epsilon_n) F_{yp} < F_{yp} \quad (4)$$

여기서, K : 유효좌굴길이 계수 (=0.5)

본 연구에서는 전체실험체의 높이가 1M 이하로서 세장한 실험체는 고려하지 않았다. 강판의 좌굴은 표면강판의 국부좌굴한계상태로 결정되기 때문에 실험체의 공칭압축강도는 식 (3)과 같이 좌굴을 고려하지 않은 공칭압축강도(P_o)를 적용하였다.

KEPIC-SNG 기준식은 식 (4)에 의하면 스테드 간격비가 증가할수록 스테드와 스테드 사이에 지지되는 강판의 길이가 증가하여 낮은 탄성좌굴강도를 사용하게 됨을 알 수 있다. 또한 스테드 사이에서의 좌굴을 고려하지 않은 전체 높이 구간의 공칭압축강도(P_o)는 JEAG-4618 기준식에서 고려하지 않은 콘크리트의 강도저감계수 0.85를 적용하여 실제 시공에서 보다 안전하게 사용할 수 있도록 하였다.

3.1.2 JEAG-4618 기준식

JEAG-4618 기준식은 단기하중에 대한 허용강도로 설계하였으며 기준식은 식 (5)와 같다.

$$P_{JEAG} = F_{cr} A_s + f_{ck} A_c \quad (5)$$

(1) $B/t \leq 600/\sqrt{F_y}$ 인 경우(비탄성좌굴) : $F_{cr} = F_y$

(2) $B/t > 600/\sqrt{F_y}$ 인 경우(탄성좌굴) : $F_{cr} = F_e$

본 연구에서는 스테드간격비(B/t)가 $600/\sqrt{F_y}$ 보다 작은 경우 강판은 비탄성좌굴하여 강판좌굴강도(F_{cr})는 강판항복강도(F_y)와 같다. 하지만 스테드간격비가 큰 경우에는 강

판은 강판의 항복강도에 이르기 전에 탄성좌굴하게 되므로 식 (6)과 같이 탄성좌굴강도식을 사용하였다.

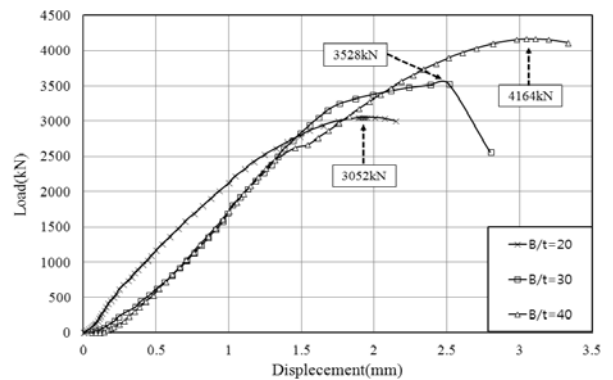
$$F_e = E_s \frac{\pi^2}{12K^2(B/t)^2} \quad (6)$$

여기서, K : 유효좌굴길이 계수(=0.7)

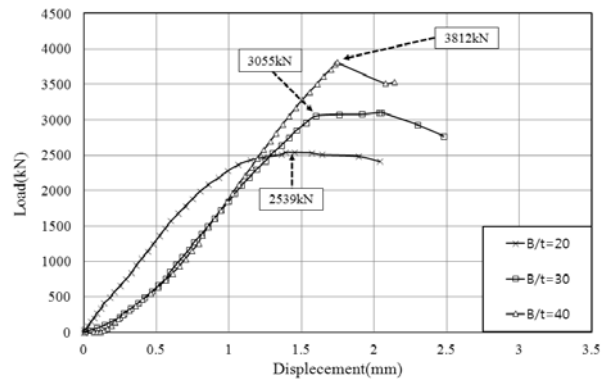
3.1.3 기준식에 의한 최대압축강도 분석

KEPIC-SNG와 JEAG-4618에 대하여 각 기준식에 의하여 산정되는 압축강도를 계산하였다. 계산결과는 Table 6으로 정리하여 비교·분석하였고 실험에 의해 측정된 재료별 하중변위 곡선을 통하여 최대하중을 Fig. 5와 같이 나타냈다.

보통시멘트를 사용한 실험체의 최대압축강도는 B/t가 20에서 40으로 증가할수록 실험체의 단면이 증가하게 되어 실험체의 최대압축강도는 3052kN에서 4164kN으로 증가하는 것으로 나타났다. 저시멘트를 사용한 실험체의 최대압축강도는 보통시멘트를 사용한 실험체와 마찬가지로 최대압축강도는 2539kN에서 3812kN으로 증가하였다.



(a) Ordinary Portland cement concrete



(b) Eco-oriented cement concrete

Fig. 5 Load-displacement relationship

Table 6. Comparison of Compressive strength (kN)

| No. | Specimen | Test Value | P ₀ (KEPIC-SNG) (D) | P _{JEAG} (JEAG-4618) (E) | Ratio(%) | |
|--------------------|---------------|------------|--------------------------------------|---|----------|------|
| | | | | | C/D | C/E |
| (A) | (B) | (C) | (D) | (E) | C/D | C/E |
| 1 | C24/490-T6B20 | 3052 | 2639 | 3037 | 116 | 100 |
| 2 | C24/490-T6B30 | 3528 | 3079 | 3811 | 115 | 92 |
| 3 | C24/490-T6B40 | 4164 | 3320 | 3814 | 125 | 109 |
| 4 | H16/490-T6B20 | 2539 | 2186 | 2504 | 116 | 101 |
| 5 | H16/490-T6B30 | 3055 | 2480 | 3106 | 123 | 98 |
| 6 | H16/490-T6B40 | 3812 | 2575 | 2938 | 148 | 130 |
| No.1~No.3 average | | - | - | - | 119 | 100 |
| No.4~No.6 average | | - | - | - | 129 | 109 |
| Total average | | - | - | - | 124 | 105 |
| Standard deviation | | - | - | - | 11.5 | 11.9 |

보통시멘트를 사용한 실험체의 무차원화된 압축강도비인 “실험값/KEPIC-SNG”은 B/t=20, B/t=30, B/t=40에서 각각 116%, 115%, 125%로 계산되었으며 평균은 119%로 기준식에 모두 상향하는 것으로 나타났다. 하지만 무차원화된 압축강도비인 “실험값/JEAG-4618”에서는 B/t=30 실험체에서 기준식보다 약 8%정도 낮은 것으로 나타났다.

저시멘트를 사용한 실험체에서는 “실험값/KEPIC-SNG”의 비는 B/t=20, B/t=30, B/t=40에서 각각 116%, 123%, 148%로 기준식에 상향하는 것으로 나타났다. “실험값/JEAG-4618”에서는 보통시멘트를 사용한 B/t=30 실험체와 마찬가지로 기준식보다 약 2%정도 낮게 나타났다.

KEPIC-SNG 기준식을 보면 보통시멘트와 저시멘트를 사용한 B/t=20 실험체(No.1과 No.3의 비교)는 116%로 동일하였고, B/t=30인 실험체(No.2와 No.5의 비교)는 보통시멘트실험체에서 115%, 저시멘트실험체에서 123%로 나타났다. 또한, B/t=40 실험체(No.3과 No.6의 비교)에서 보통시멘트실험체는 125%, 저시멘트실험체는 148%로 나타났다.

콘크리트의 압축강도는 공시체 시험결과, 저시멘트콘크리트는 보통시멘트콘크리트에 비해 약 33%로 낮은 결과를 보였듯이, 황토를 사용한 각 실험체의 변수별 압축강도를 비교해 보면 B/t=20 실험체는 약 16%, B/t=30 실험체는 약

13%, B/t=40 실험체는 약 8%정도 저감되는 것으로 나타났다. 이는 B/t=20 실험체에서 더 크게 강도가 감소하는 것으로 보인다. 그러나 황토를 적용한 실험체의 경우, B/t가 작다하더라도 비탄성거동을 하는 것을 실험을 통해 확인하였다. 또한 B/t를 증가시켜 탄성거동을 요하는 실험체에서는 강도 감소폭이 작았으며 연성거동을 확인하였다.

압축강도 실험결과에 따르면 황토를 사용한 저시멘트콘크리트의 압축강도는 Table 6의 KEPIC-SNG의 비교 항목에서 모든 실험체에서 기준식에 상향하는 값을 나타냈으므로 저시멘트콘크리트를 사용한 강판콘크리트구조도 활용 가능성이 있음을 확인하였다.

3.2 이론식을 이용한 강판의 좌굴분석

3.2.1 기둥이론을 이용한 좌굴분석

기둥이론을 적용한 강판의 좌굴강도는 Fig. 6의 표시된 부분과 같이 스티드와 스티드 사이를 하나의 기둥으로 보고 좌굴강도를 계산하였다.

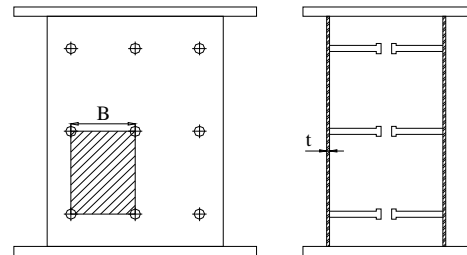


Fig. 6 B/t ratio to apply the column theory

SC구조는 스티드간격(B)과 강판두께(t)에 의해 기준식이 결정되므로 기둥이론을 적용하기 위해 오일러 좌굴식인 식 (7)을 이용하였다.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(Kl)^2} \tag{7}$$

여기서, $P_{cr} = \sigma_{cr} A$ $l = B$ $A = B \times t$ 이다.

식 (7)을 이용하여 식 (8)과 같이 유도하였다.

$$\epsilon_{cr} = \frac{\pi^2}{12K^2(B/t)^2} \tag{8}$$

AISC에서 제시한 한계상태식을 SC구조에 적용하기 위하

여 세장변수를 식 (9)와 같이 유도하였다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{cr} &= (0.658^{\lambda_c^2})\epsilon_y & \text{for } \lambda_c \leq 1.5 \\ \epsilon_{cr} &= \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right)\epsilon_y & \text{for } \lambda_c > 1.5 \\ \lambda_c &= \frac{\sqrt{12} \cdot K}{\pi} \cdot \frac{B}{t} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \end{aligned} \quad (9)$$

Fig. 7은 식 (8)과 식 (9)를 이용하여 유효좌굴길이계수를 들 KEPIC-SNG 기준인 0.5와 JEAG-4618 기준인 0.7을 사용하여 나타냈으며 보통시멘트와 저시멘트를 사용한 실험체의 좌굴위치에서 측정된 값을 표시하였다.

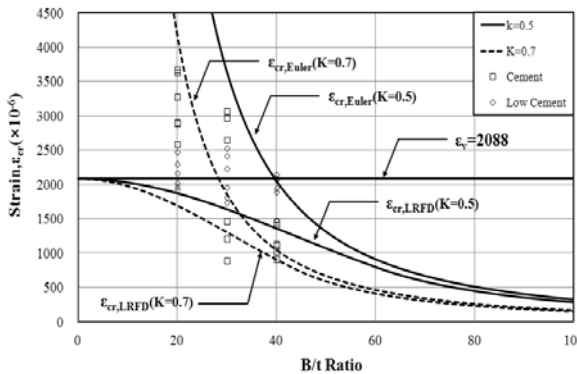


Fig. 7 B/t ratio vs. strain of surface steel plate

보통시멘트와 저시멘트를 사용한 비탄성실험체인 B/t=20은 유효좌굴길이계수를 0.5와 0.7을 사용하여 오일러의 좌굴식($\epsilon_{cr, Euler}$)에 접목하면 측정된 변형률은 오일러변형을 곡선을 초과하지는 못하였다. 한계상태식($\epsilon_{cr, LRFD}$)에서는 유효좌굴길이계수 0.5와 0.7을 사용하였을 때 측정된 변형률은 변형률곡선을 모두 상회하는 것으로 나타났다.

탄성실험체인 B/t=30은 보통시멘트를 사용한 실험체의 경우, 유효좌굴길이계수를 0.7을 적용하였을 때 변형률이 대부분 오일러의 변형을 곡선을 상회하는 것으로 나타났으며, 일부 초과하지 않는 부분은 응력이 전달되지 않는 것으로 판단된다. 저시멘트를 사용한 실험체는 유효좌굴길이계수 0.7을 사용하였을 때는 측정된 변형률은 변형률곡선을 상회하는 결과를 보였다. 하지만 유효좌굴길이계수 0.5를 적용하였을 때는 보통시멘트와 저시멘트를 사용한 실험체 모두 오일러 변형을 곡선을 상회하지 못하였다. 한계상태식의 변형을 곡선을 통해 비교해본 결과, 보통시멘트와 저시멘트를 사용한 실험체 모두 유효좌굴길이계수 0.5와 0.7을 사용하였을 때 측정된 변형률은 변형률 곡선을 상회하는 것으로 나타났다.

B/t=40 실험체는 보통시멘트를 사용한 실험체의 경우, 유효좌굴길이계수 0.7을 사용했을 때 오일러 변형을 곡선을 상회하였지만, 유효좌굴길이계수 0.5에서는 오일러 변형을 곡선에 미치지 못하는 못하였다. 하지만 한계상태식은 유효좌굴길이계수 0.5와 0.7에서 변형을 곡선을 모두 상회하였다. 저시멘트를 사용한 실험체의 경우, 오일러 변형을 곡선과 한계상태식변형을 곡선에서 유효좌굴길이계수 0.5와 0.7을 적용하였을 때 변형을 곡선을 상회하는 것으로 나타났다.

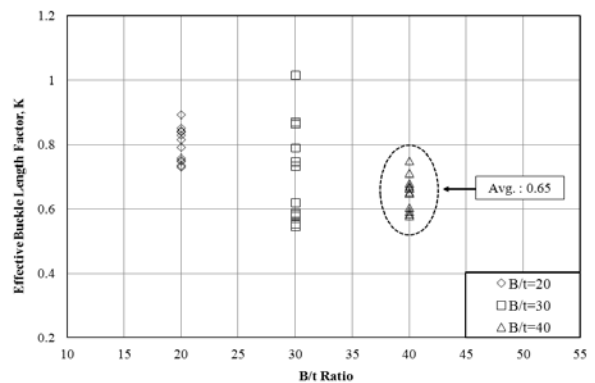
기둥이론을 적용한 강판분석의 경우 B/t가 탄성영역에 가까울수록 오일러 좌굴식에 의한 곡선을 상회하는 안정적인 범위임을 확인하였다. 또한, 보통시멘트와 저시멘트를 사용한 실험체를 비교해 보면 탄성범위에서는 저시멘트를 사용한 강판콘크리트 구조가 안정성을 많이 확보하는 것으로 나타났다.

저시멘트를 사용한 강판좌굴분석은 한계상태식을 적용하였을 때 모든 실험체에서 유효좌굴길이계수 0.5로 적용하여도 무방하다는 결과를 얻을 수 있었다.

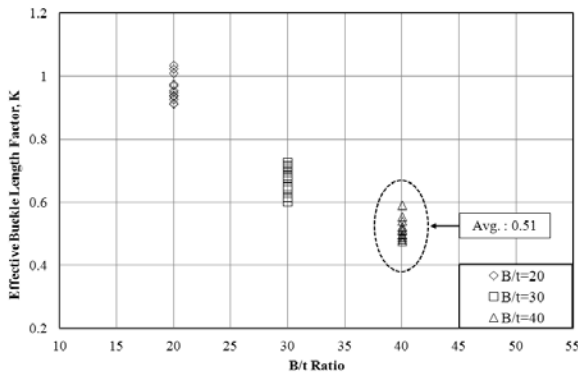
강재의 변형률을 이용한 유효좌굴길이계수는 기둥이론에 의한 식 (8)을 K에 관해 정리하여 식 (10)과 같이 유도하였다. 강판의 변형률(ϵ)은 실험을 통해서 측정된 값을 이용하였다.

$$K = \sqrt{\frac{\pi^2}{12\epsilon(B/t)^2}} \quad (10)$$

Fig. 8은 강판이 좌굴하였을 때 좌굴위치에서 측정된 값을 사용하였다. 보통시멘트를 사용한 실험체는 K값이 0.58에서 0.75에 이르는 분포를 나타냈고 평균은 0.65로 계산되었다. 저시멘트를 사용한 실험체는 최소 0.47에서 최대 0.59까지의 분포를 보였으며 평균은 0.51로 계산되었다. 보통시멘트와 저시멘트의 K값의 평균 차는 0.14로 저시멘트를 사용한 실험체가 낮게 나왔다.



(a) Ordinary Portland cement concrete



(b) Eco-oriented cement concrete
Fig. 8 Effective length factor, K

3.2.2 판이론을 이용한 좌굴분석

판이론을 이용한 좌굴강도는 Fig. 9의 표시된 부분과 같이 스티드열과 스티드열 사이를 하나의 판으로 보고 좌굴강도를 계산하였으며 경계조건은 스티드 위치를 제외한 단순지지로 가정하였다.

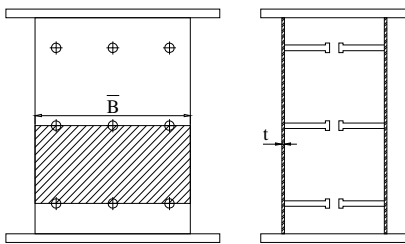


Fig. 9 \bar{B}/t ratio to apply the plate theory

판이론에 의한 좌굴강도식은 식 (11)과 같다^[9].

$$\sigma_{cr,pl} = K_{pl} \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu)^2 (\bar{B}/t)^2} \quad (11)$$

평판의 좌굴길이 계수 K_{pl} 은 판이론식 유도과정에 의해 식 (12)로 표현된다.

$$K_{pl} = \left(\frac{m}{\alpha}\right)^2 + 2n^2 + n^4 \left(\frac{\alpha}{m}\right)^2 \quad (12)$$

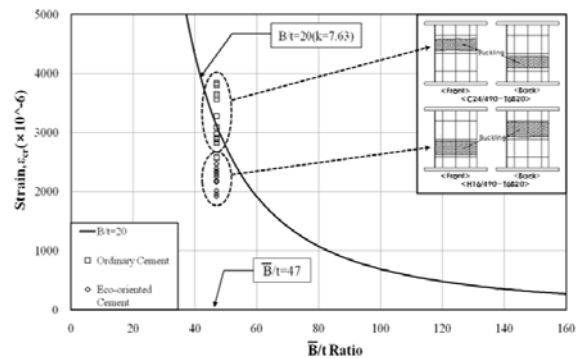
y방향 주기함수의 진동수(n)값이 크면 클수록 평판좌굴응력($\sigma_{cr,pl}$)값은 커진다. 따라서 좌굴을 일으키는 가장 작은 평판좌굴응력($\sigma_{cr,pl}$)값을 얻기 위해서는 진동수(n)값이 1이어야 한다. 따라서 평판 좌굴길이계수(K_{pl})은 식 (13)과 같이 간략화가 된다.

$$K_{pl} = \left(\frac{m}{\alpha} + \frac{\alpha}{m}\right)^2 \quad (13)$$

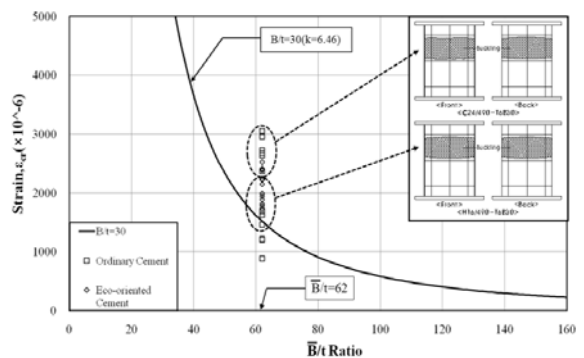
평판좌굴길이계수(K_{pl})는 $B/t=20$ 에서 7.63, $B/t=30$ 에서 6.46, $B/t=40$ 에서 5.95로 각각 계산되었다. 또한, B 를 \bar{B} 로 사용함으로써 $B/t=20$ 은 $\bar{B}/t=47$, $B/t=30$ 은 $\bar{B}/t=62$, $B/t=40$ 은 $\bar{B}/t=77$ 에 해당되는 값이다. Fig. 10은 각각의 변수별 판이론을 적용하여 강판에 부착된 게이지값을 표시하였다.

비탄성 실험체인 $B/t=20$ 은 보통시멘트 사용한 실험체에서 변형을 곡선을 상회하거나 거의 비슷한 결과를 나타냈으나, 저시멘트를 사용한 실험체에서는 변형을 곡선에 이르지 못하는 것으로 나타났다. 탄성실험체인 $B/t=30$ 은 보통시멘트와 저시멘트 사용한 실험체에서 변형을 곡선에 상회하는 것으로 나타났다. $B/t=40$ 은 보통시멘트실험체와 저시멘트실험체에서 모두 안정한 값을 갖는 것으로 나타났다.

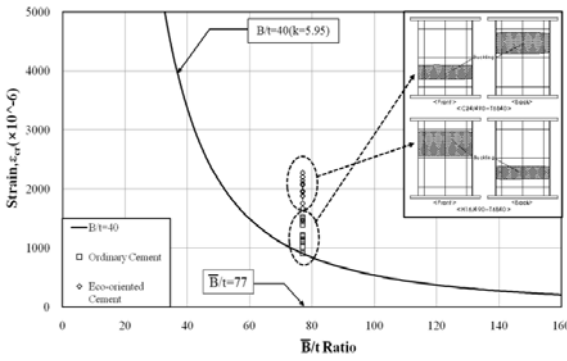
기둥이론과 판이론을 적용한 강판분석을 종합해 보면 저시멘트를 사용한 탄성실험체인 경우 판이론을 적용하여 유효좌굴길이계수를 구해도 Fig. 10(c)와 같이 좌굴변형 값보다 상회한 변형률의 결과 값을 얻을 수 있었다. 한편 비탄성 실험체인 $B/t=20$ 은 변형을 값이 판이론에 의한 좌굴변형을 값보다 낮게 측정되는 결과를 얻었다. 따라서 비탄성 실험체인 경우 유효좌굴길이계수의 분석은 기둥이론이 더 잘 맞는 것으로 유추해 볼 수 있다.



(a) $B/t=20$ ($\bar{B}/t=47$) specimen



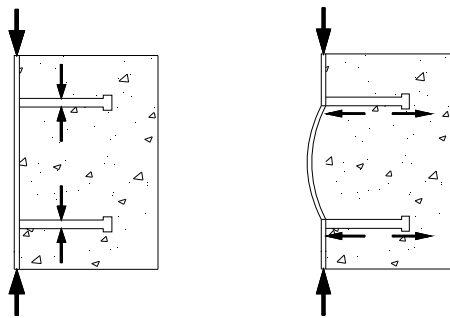
(b) $B/t=30$ ($\bar{B}/t=62$) specimen



(c) B/t=40(B/t=77) specimen
Fig. 10 B/t ratio vs. strain of surface steel plate using plate theory

3.3 압축력 작용시 스테드의 인장거동

SC구조에서 스테드는 강판에 용접되어 강판에서 전달되는 응력에 저항 할 수 있는 거동을 하게 된다. Fig. 11(a)와 같이 강판의 응력이 탄성영역이면 스테드는 전달력을 받는 전단거동을 하고 Fig. 11(b)와 같이 강판의 응력이 점차 증가하여 강판이 콘크리트로부터 이격하기 시작하면 스테드는 인장거동을 하게 된다. 즉, 스테드와 스테드 사이의 강판이 밖으로 벌어지면서 스테드는 인장력을 받게 된다. 이때 스테드 사이의 강판에 작용하는 좌굴강도는 식 (14)와 같으며 스테드 한 개당 작용하는 인장강도는 식 (15)와 같다.



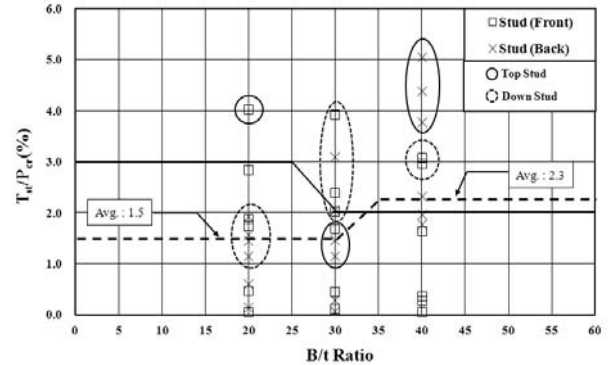
(a)elastic behavior (b)behavior after separation

Fig. 11 Behavior of the headed studs

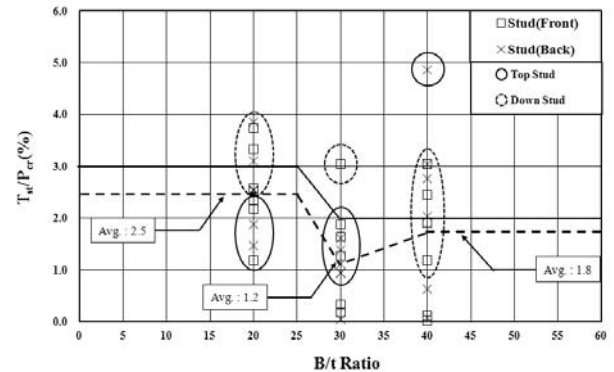
$$P_{cr} = \epsilon_{cr} E_s Bt \quad (14)$$

$$T_{st} = \epsilon_{st} E_{st} A_{st} \quad (15)$$

Fig. 12는 스테드간격비(B/t)에 따른 강판의 좌굴강도에 대한 스테드 인장강도비(Tst/Pcr)를 나타내고 있으며, 스테



(a) Ordinary Portland cement concrete



(b) Eco-oriented cement concrete

Fig. 12 Normalized ratio of the stud bolts with B/t ratio

Fig. 12(a)의 보통시멘트를 사용한 B/t=20 실험체는 전면의 상부 스테드에서 Tst/Pcr가 4%로 나타났으며 평균은 1.5%를 보였다. B/t=30 실험체는 전·후면의 하부 스테드에서 Tst/Pcr가 2.0%에서 3.9%의 분포도를 나타냈으며 평균은 1.5%로 나왔다. B/t=40 실험체는 후면의 상부 스테드에서 Tst/Pcr가 3.7%에서 5.0%로 나타났으며 평균은 2.3%로 나타났다.

Fig. 12(b)의 저시멘트를 사용한 B/t=20 실험체는 전·후면의 하부 스테드에서 Tst/Pcr가 2.5%~3.8%의 분포도를 나타냈으며 평균은 2.5%로 나타났다. B/t=30 실험체는 전면의 하부 스테드에서 Tst/Pcr가 3.0%로 나타났으며, 상부 스테드는 전·후면에서 Tst/Pcr가 0.9%~1.8%의 분포도를 보였다. 평균은 1.2%로 나타났다. B/t=40 실험체는 후면의 상부 스테드에서 Tst/Pcr가 4.8%가 측정되었으며, 하부 스테드는 전·후면에

서 T_{st}/P_{cr} 가 1.1%~3.0%의 분포도를 보였으며 평균은 1.8%로 나타났다.

황토를 사용한 저시멘트콘크리트 실험체의 강판좌굴에 따른 스테드 인장강도비를 측정된 결과 $B/t=20$ 은 평균 2.5%, $B/t=30$ 은 평균 1.2%, $B/t=40$ 은 평균 1.8%로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 콘크리트강도를 저감시킨 보통시멘트와 저시멘트를 사용하여 스테드 간격별로 최대압축강도가 기준식에 적합한지를 검증하였다. 또한, 강재의 좌굴분석을 기둥이론과 판이론을 적용하여 기준의 만족도를 파악하였으며 실험을 통해 측정된 변형률을 이용하여 유효좌굴길이계수를 계산하였다. 압축력 작용시 스테드의 인장거동을 파악하여 최대인장력을 계산하여 SC구조의 사용성을 검증하였다. 이와 같은 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험체의 일반적인 파괴양상은 콘크리트에 미세한 균열이 시작되고 강판의 좌굴 및 콘크리트의 균열이 발생되어 진행되는 형태이며 강판의 좌굴 위치는 스테드와 스테드 사이에서 발생하였다.
- (2) 저시멘트를 사용한 실험체는 KEPIC-SNG기준식과 실험값의 비에서 최저 116%에서 최대 148%까지 측정되었으며 평균은 약 129%정도로 안정된 값을 보였다. 황토를 사용한 저시멘트콘크리트의 강도구현을 만족한다면 사용이 가능 할 수도 있다고 판단된다.
- (3) 저시멘트콘크리트의 기둥이론을 적용한 강판분석은 한계상태식을 적용하였을 때 유효좌굴길이계수를 0.5로 적용하여도 무방하다고 판단된다.
- (4) 강판변형률에 의한 유효좌굴길이계수는 보통시멘트는 평균 0.65를 보였으며 저시멘트는 평균 0.51로 유효좌굴길이계수의 평균 차는 0.14로 저시멘트를 사용한 실험체가 낮게 나타났다.
- (5) 판이론을 이용한 좌굴분석 결과 저시멘트콘크리트를 사용한 비탄성실험체는 변형을 곡선에 이르지 못하였지만, 탄성실험체는 변형을 곡선을 상회하는 것으로 나타났다. 이는 비탄성좌굴실험체의 경우 유효좌굴길이계수의 분석은 기둥이론을 적용하는 것이 더 잘 맞는 것으로 유추해 볼 수 있다.
- (6) 압축력작용시 스테드의 인장거동을 살펴보면 강판좌굴지점에 따라 응력이 작용하는 분포가 다르기 때문에 기준을 만족하는 스테드열의 위치가 다르게 나타났다. 황토를 사용한 저시멘트콘크리트 실험체의 강판좌굴에 따른 스테드

인장강도비를 측정된 결과 $B/t=20$ 은 평균 2.5%, $B/t=30$ 은 평균 1.2%, $B/t=40$ 은 평균 1.8%로 나타났다.

기 호

- A_c : 콘크리트단면적(mm^2)
- A_p : 한쪽면의 표면강판 단면적(mm^2)
- A_s : 강판단면적(mm^2)
- A_{st} : 스테드의 단면적(mm^2)
- B : 스테드 연직간격(mm)
- E_c : 콘크리트의 탄성계수(N/mm^2)
- E_s : 강재의 탄성계수(N/mm^2)
- E_{st} : 스테드의 탄성계수(N/mm^2)
- EI_{eff} : 벽체의 유효휨강성도($N \cdot mm^2$)
- F_{cr} : 강판좌굴응력(N/mm^2)
- f_{ck} : 콘크리트의 설계기준압축강도(N/mm^2)
- F_e : 탄성좌굴응력(N/mm^2)
- F_y : 강재의 항복강도(N/mm^2)
- F_{yp} : 표면강판의 설계기준 항복강도(N/mm^2)
- I_c : 인장축 콘크리트를 무시하지 않은 콘크리트 단면 2차모멘트(mm^4)
- I_p : 양면 표면강판만의 단면2차모멘트(mm^4)
- K_p : 스테드로 횡지지된 표면강판의 좌굴길이계수
- K_{pl} : 평판좌굴계수
- L : 벽체의 길이(mm)
- P_0 : 좌굴을 고려하지 않은 공칭압축강도(N)
- P_{cr} : 강판의 좌굴강도(N)
- P_e : 탄성좌굴 압축강도(N)
- P_n : 공칭압축강도(N)
- P_u : 설계압축강도(N)
- r : 압축재의 단면2차반경(mm)
- t : 강판의 두께(mm)
- T_{st} : 스테드 한 개의 인장강도(N)
- t : 표면강판의 두께(mm)
- ϕ : 압축강도감소계수(=0.65)
- ϵ_n : 공칭압축변형률(=0.002 C_{cs})
- C_{cs} : Creep와 Shrinkage를 고려한 계수
- ϵ_{st} : 스테드의 몸통 표면에서 측정된 변형률

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 (No.2011-0026221)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌(References)

- [1] 김형국, 김우범, 김원기(2008) SC구조 벽-바닥 접합부의 내력 및 거동 특성, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제2호, pp.347-354.
Kim, H.G., Kim, W.B., and Kim, W.K. (2008) Behavior and strength of wall-slab connection in SC structure, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 20, No. 2, pp.347-354 (in Korean).
- [2] 최병정, 한홍수(2008) 압축력을 받는 강판-콘크리트 구조의 해석적 고찰, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제2호, pp.269-278.
Choi, B.J. and Han, H.S. (2008) Concrets structures under compressive load, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 20, No. 2, pp.269-278 (in Korean).
- [3] 최병정, 한홍수, 김원기, 이승준, 김우범(2008) 스티드 간격과 강판두께의 비를 변수로 한 비보강 강판-콘크리트 구조의 압축실험, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제4호, pp.549-559.
Choi, B.J., Han, H.S., Kim, W.K., Lee, S.J., and Kim, W.B. (2008) Compression tests for unstiffened steel plate-concrets structures with variation of B/t ratio, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 20, No. 4, pp.549-559 (in Korean).
- [4] 한홍수, 최병정, 한권규(2011) 폭두께비에 따른 강판콘크리트구조의 압축거동, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제2호, pp.229-236.
Han, H.S., Choi, B.J., and Han, K.G. (2008) Compression behavior of steel plate-concrete structures with the Width-to-Thickness Ratio, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 23, No. 2, pp.229-236 (in Korean).
- [5] Kim, W.B. and Choi, B.J. (2011) Shear strength of connections between open and closed steel-Concrete Composite Sandwich Structures, *An International Journal of Steel and Composite Structures*, Vol. 11, No. 2, April.
- [6] 정연백, 양근혁, 황혜주, 정현수(2005) 황토를 첨가한 콘크리트의 부착성능 및 전단거동평가, 2005년도 학술발표회 논문집, 한국콘크리트학회, pp.83-86.
Jung, Y.B., Yang, K.H., Hwang, H.Z., and Chung, H.S. (2005) An Evaluation of the bond performance and the shear behavior of concrete mixed with Hwang-toh, *Journal of Korean Concrete Institute*, pp.83-86 (in Korean).
- [7] 대한전기협회(2010) 전력산업기술기준-SNG 강판콘크리트 구조.
Korea Electric Association (2010) Korea Electric Power Industry Code-SNG Steel-Plate Concrete Structure.
- [8] 日本電氣協會(2005) 鋼板コンクリート構造耐震設計技術(案) 建物・構築物編(JEAG4618).
The Japan Electric Association (2005) Steel-Plate Concrete Structure Seismic Design(JEAG4618).
- [9] Galambos, T.V. (1998) Guide to stability design criteria for metal structures, WILEY, Canada, pp.124-137.

요약 : 강판콘크리트(SC)구조에 관한 국내의 연구는 내력을 많이 요구하는 원전건물을 중심으로 연구가 진행되었다. 또한 SC구조는 공장생산과 모듈화시공을 통한 공기단축이 가능한 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 중·저층의 일반건물에서 낮은 강도로 사용할 수 있는 SC구조의 토대를 마련하고자 하였다. 강도를 저감시키는 방법으로 친환경재료인 황토와 시멘트를 조합하여 중요도가 낮은 건물에 사용이 가능하도록 하였다. 본 연구에서는 중심압축하중을 받는 기둥부재를 대상으로 압축거동, 유효길이계수, 좌굴하중, 강판좌굴 및 스티드의 성능을 검증하였다.

핵심용어 : 강판-콘크리트 구조, 저시멘트콘크리트, 스티드간격비, 압축거동, 모듈시공

