프리캐스트 스틸메쉬 보강 모르타르 패널의 휨 성능에 대한 실험적 연구

Experimental Study on Flexural Capacity of Precast Steel Mesh Reinforced Mortar Panel

이 나 현¹⁾

Yi, Na Hyun

김 장 호^{2)*}

Kim, Jang Ho Jay

이 상 원³⁾

Lee, Sang Won

김 태 균⁴⁾

Kim, Tae Gyun

Abstract

Recently, researches related to precast modular construction have been actively conducted for nuclear power plant, LNG gas tank, and small-medium PCCV as well as bridges and buildings. In this study, the precast panel cast with steel mesh reinforced mortar (SRM) which is similar reinforced ferrocement was developed for efficient precast construction, construction time reduction, and easy transportation. Mortar mixture with high strength and flowability was obtained from various case studies using silica fume and GGBS. Also, 1,200×600×150mm SRM and reinforced concrete (RC) panels were manufactured with reinforcing ratio of 2% and 4%. To verify structural performance of the SRM specimen, the basic material tests, free shrinkage test, and 3-point flexural test with a line loading were carried out. From the test results, it was determined that SRM specimens showed outstanding flexural capacity and ductility. However, the 4% reinforced SRM specimens must consider shear reinforcing to be used as a precast modular member.

Keywords : Ferrocement, Panel, Precast, Mortar, Steel mesh

1. 서 론

최근 프리캐스트를 이용한 모듈화 공법에 대한 관심이 증가하면서 고강도 및 고성능 콘크리트를 이용한 구조물의 프리캐스트 모듈화에 대한 연구가 활발하게 이뤄지고 있다 (David et al., 2005). 이와 같은 프리캐스트 모듈화에 대한 연구는 교량 및 빌딩뿐만 아니라, 원전구조물, LNG 가스탱크, 중소형 강합성 원전 구조물 등과 같은 특수구조물에도 적용하기 위해 지속적인 연구가 수행하고 있다. 특히, 2010년 UAE 원전 사업의 수주 등을 통해 해외건설 수주는 급증하고 있으며, 해외건설의 대부분이 개발도상국과 같이 접근성이 낮은 지역에서 주로 이뤄지고 있다. 이와 같은 해외건설의 경우, 국내와 다른 건설환경으로 인한 원활한 건설원자재 공급의 어려움과 서로 다른 기후 특성으로, 프리캐스트 제작을 통한 건설시공의 필요성 및 중요성은 더욱 증가하고

있는 실정이다 (Ichinami et al., 2010; Sohn, 2011; Kim, 2009).

그러므로 본 연구에서는 특수구조물의 프리캐스트 모듈화 적용에도 가능하며 현지에서의 건설 원자재를 쉽게 조달할 수 있는 방법으로써, 페로시멘트 (ferrocement) 제작 방법을 이용한 프리캐스트 스틸메쉬로 보강한 모르타르 패널을 개발하였다.

일반적으로 페로시멘트는 여러 겹의 철사망 또는 가는 직경의 강철망과 모르타르가 결합되어 단단한 구조적 형태를 만들 수 있는 복합재료를 의미한다. 이와 같은 페로시멘트는 스틸메쉬로 보강한 모르타르 구조체로써, SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete, 슬러리 주입 강섬유 콘크리트)과 SFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete, 강섬유 혼입콘크리트)와 같이 단섬유를 다량으로 사용할 경우, 발생할 수 있는 섬유 뭉침 현상에 의한 시공성의 저하 문제를 해결할 수 있

1) 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사후 연구원

2) 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수, 교신저자

3) 정회원, 연세대학교 토목공학과 석박사통합과정

4) 정회원, 연세대학교 토목공학과 석박사통합과정

* Corresponding author : jjhkim@yonsei.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2013년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

다. 또한 일정한 간격으로 보강재를 분포시킬 수 있어, 보강재를 보다 균질한 배근이 가능하며, 별도의 철근배근이 필요 없으므로, 간단하고 빠른 시공이 가능하다는 특징을 지닌다 (ACI 549 1R, 1997; ACI 549 2R, 2004; Paul and Pama, 1978; Stanley, 2008).

또한, 페로시멘트는 간단한 건설 기술로 다양한 모양으로 제작 가능하고, 대량생산 및 시공이 가능하여 개발도상국에서 주로 사용되었으나, 최근에는 페로시멘트가 건설재료로서의 적합성이 인식되면서 영국, 뉴질랜드 및 호주 등에서 새로운 시멘트계 합성구조재료로써 연구되고 있다 (Salihuddin and Mahyuddin, 2008; Suh, 2003; Kim, 1990).

미국 국가과학회 산하의 BOSTID (the Board on Science and Technology in International Development)에서는 페로시멘트 전문위원회를 만들어 페로시멘트의 특성과 특징을 공학적인 재료로 인정받을 수 있도록 현재까지의 최신 기술을 평가하여 시방서 등을 위한 연구를 수행하였으며 (Paul and Pama, 1978; Stanley, 2008), 지속적인 연구를 통해 페로시멘트의 공학적 사용에 대한 검증을 통하여 페로시멘트를 해양구조물 및 주택, 교량, 사일로 등으로 적용범위를 확장시켰다 (Paul and Pama, 1978; Miguel, 2004). 그에 따라 선진외국에서는 페로시멘트의 해석적 연구와 충돌 및 화재하중과 같은 극한하중에 대한 연구를 수행하고 있으며, 페로시멘트가 일반 철근콘크리트에 비하여 극한하중에 대하여 우수한 성능임을 실험적으로 검증하였다 (Kurosky et al., 2012; Eswaramoorthi and Subramanian, 2006; Al-Rifai, 2006; Greepala and Nimityongskul, 2008; Kurosky et al., 2012).

그러므로 본 연구에서는 이와 같은 최근 페로시멘트를 이용한 특수구조물과 관련된 해외 연구동향을 바탕으로, 일반 구조물 뿐 만 아니라, 특수구조물에서의 프리캐스트 모듈화의 적용 가능성을 판단하고자 한다. 이를 위해 2%와 4% 철근비의 스틸메쉬로 보강된 모르타르 (SRM) 패널과 일반 철근콘크리트 (RC) 패널을 각각 제작하여 재료 및 구조적 성능을 검토하고자 한다.

2. 스틸메쉬로 보강한 모르타르 패널의 제작 및 재료적 성능 평가

2.1 실험개요 및 사용재료

본 연구는 프리캐스트 SRM (Steel Mesh Reinforced Mortar, 스틸메쉬로 보강한 모르타르) 패널의 성능을 평가하기 위하여, RC (Reinforced Concrete, 일반 철근콘크리트) 패널과 재료 및 구조적 성능을 비교 검토하였다. SRM 패널은 스틸메쉬를 거푸집에 일정 간격으로 배치하여 보강 재료를 보다 균질하게 분포시켰으며, 본 연구에서 사용된 스틸메쉬는 용이한 작업성을 위하여, Fig. 1과 같은 국내 I사에서 납품하고 있는 2방향의 사각형 직금망 (woven square mesh)을 이용하였다. 본 연구에 사용된 스틸메쉬의 밀도는 7.93mg/mm^3 으로 일반적으로 사용되는 강섬유의 밀도 7.85mg/mm^3 와 유사하며, 스틸메쉬의 직경은 0.7mm 을 사용하였으며, 4.38mm 간격을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 스틸메쉬와 철근은 Table 1과 같으며, 철근과 사용된 스틸메쉬의 재료특성이 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서 사용된 조밀한 메쉬 간격에 모르타르가 주입되기 위해서는 고유동 · 고강도 모르타르의 배합이 필요하므로, 변수연구를 통하여 최적의 강도 및 슬럼프가 발현되는 배합을 Table 2와 같이 선정하였다. 고강도와 유동성을 위해

Fig. 1 Steel mesh figuration

Table 1 Steel mesh and rebar material properties

	Type	Tensile strength [MPa]	Elastic modulus [GPa]	Density [t/m ³]
Steel mesh	STS 304	530	193	7.93
Rebar	SD 400	560	200	unit weight 0.995 [kg/m]

Table 2 Optimum specified mix proportion of mortar

Slump flow [mm]	Specified compressive strength [MPa]	W/B [%]	S/a [%]	SF [%]	GGBS [%]	Unit weight [kg/m ³]				AE [%]	
						W	Binder				S
							C	SF ¹	GGBS ²		
700	40	35	100	4	20	245.4	532.8	28.0	140.2	1308.4	1.5

1. SF : Silica Fume, 2. GGBS : Ground Granulated Blast-furnace Slag

Table 3 Specified mix proportion of concrete

G_{max} [mm]	Slump [mm]	Specified compressive strength [MPa]	W/B [%]	S/a [%]	Unit weight [kg/m ³]				AE [%]
					W	C	S	G	
19	530	40	35	41.4	245.4	701.0	547.6	776.35	0.5

Fig. 2 Specimen reinforcement details and measuring gage locations

실리카폼과 고로슬래그를 시멘트와 함께 바인더로 사용하였으며, 실리카폼은 국내 C사의 중국산 실리카폼 (GSM-90U), 고로슬래그는 국내 H사의 고로슬래그 미분말 3종을 사용하였다. 또한 워커빌리티를 향상시키기 위하여 폴리카본산계 고성능 AE 감수제를 사용하였다.

RC 시편을 제작하기 위한 콘크리트 배합은 Table 3과 같으며, 콘크리트 배합은 모르타르 배합과 비교분석하기 위하여, 동일한 수량과 물-바인더비 (W/B)로 구성하였다. 모르타르 배합과 동일한 물-바인더비 및 수량을 바탕으로 목표 설계 강도에 맞는 콘크리트 배합을 선정하였으며, 골재분리가 발생하지 않는 범위의 AE 감수제를 혼합하였다.

2.2 시편제작

본 연구에서는 패널을 대상구조물로 선정하였으며, 주로 사용하는 철근비 0.02와 페로시멘트에서 주로 사용되는 체적비인 0.01~0.08 중 대상 구조물에 동일 간격으로 보강이 가능하다고 판단되는 철근비 0.04를 선정하여, RC 시편과 SRM 시편에 각각의 보강재로 보강하였다. 표준시편인 RC 시편은 Fig. 2와 같이 1,200mm×600mm×150mm의 패널에 배근하였으며, SRM 시편에 들어가는 스틸메쉬는 2,350mm×600mm 길이로 재단하여 Fig. 2(d)와 같이 반으로 접어 철근비 0.02의 경우 10장을 서로 겹치도록 하였으며, 철근비 0.04에서는 20장을 서로 겹쳐 시편에 균일하게 보강될 수 있도록 제작하였다. 본 연구에서 선정된 최적화된 모르타르와 콘크리트 배

Photo 1 Slump flow of mortar and concrete

합의 슬럼프 플로우는 Photo 1과 같이 각각 평균 690mm, 650mm으로 높은 유동성을 지녔으며, 특히 스틸메쉬를 이용한 SRM 시편의 경우, 재료분리가 발생하지 않았고, 시공을 위한 워커빌리티를 만족하였다.

2.3 기초물성실험

프리캐스트 패널 부재의 재료적 성능을 검토하기 위하여 3, 7, 14, 28일의 평균 압축강도, 인장강도는 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 콘크리트 28일 평균 압축강도와 인장강도는 40.6MPa, 3.3MPa을 나타냈으며, 모르타르는 34.4MPa, 2.5MPa의 강도를 발현하였다. SRM 시편에 사용되는 모르타르의 압축강도는 콘크리트에 비하여 15% 낮은 강도를 나타내고 있다. 탄성계수 및 프아송비는 재령 28일에 대하여 KS F 2438에 따라 측정하였으며, Table 4와 같이 콘크리트의 시편의 탄성계수와 프아송비는 각각 32.24GPa, 0.229, 모르타

Fig. 3 Average compressive and tensile strength

Table 4 Average elastic modulus and poisson's ratio

Case	Concrete		Mortar	
	Elastic modulus [GPa]	Poisson's ratio	Elastic modulus [GPa]	Poisson's ratio
1	33.89	0.244	21.14	0.173
2	30.59	0.214	22.68	0.216
Avg.	32.24	0.229	21.91	0.195
Standard deviation	2.33	0.02	1.08	0.03

르 시편은 각각 21.91GPa, 0.195으로 탄성계수는 모르타르가 32% 낮게 나타나는 경향이 있음을 판단하였다.

2.4 자유건조수축 특성

콘크리트 및 모르타르의 건조수축으로 인해 발생하는 구속되지 않은 시편의 길이 변화율을 측정하기 위하여 자유건조수축 변형시험을 수행하였다. KS F 2424 모르타르 및 콘크리트 길이변화 실험 방법에서 명시한 400mm×100mm×100mm의 몰드를 사용하였으며, 각 시편을 3개씩 제작하여 콘크리트 타설 후 채령 7일에 거푸집 탈형 후, 시편의 중앙부에 콘크리트용 변형률 게이지를 부착하여 건조수축 변형률을 측정하였다.

RC시편의 콘크리트 (CONC), SRM에 배합되는 모르타르 (MOR), SRM 2%, 4%시편의 평균 자유건조수축 실험결과는 Fig. 4와 같다. 보통 콘크리트의 건조수축이 400×10^{-6} ~ 800×10^{-6} 인 것을 고려하였을 경우, 본 연구에서 사용된 콘크

Fig. 4 Average dry shrinkage results

리트의 건조수축은 약 470×10^{-6} 으로 일반 콘크리트의 건조수축 범위 안에 적용되는 것을 확인하였다 (Nilson et al., 2003). 모르타르 시편은 콘크리트 시편에 비하여 상대적으로 짧은 기간 동안 측정되었으나, 45일간의 건조수축 경향을 보면, 모르타르 시편이 콘크리트 시편에 비하여 31% 이상의 큰 건조수축변형률을 보이고 있다. 이는 콘크리트와 모르타르 시편이 동일한 물-바인더비와 단위 골재량을 사용하였음에도 불구하고 건조 수축량의 차이가 발생한 것은 콘크리트 시편의 경우, 굵은 골재에 의해 시멘트 페이스트 내의 수분 손실이 억제되었기 때문이라고 판단되며, 본 연구에서는 콘크리트와 모르타르의 건조 수축량은 최대골재치수에 큰 영향을 받은 것이라고 판단된다 (Neville, 1996; Yang et al., 2006). SRM시편은 모르타르로 타설되었으나, 스틸메쉬가 함유된 SRM 4% 시편이 SRM 2% 시편에 비해 보다 적은 건조수축 변형률이 발생한 것을 확인할 수 있다. 즉, 스틸메쉬의 보강재의 함유율이 높아질수록 건조수축에 대해 우수한 성능을 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 스틸메쉬가 모르타르 매트릭스 사이를 가교작용 (bridge effect)을 하여 건조수축량을 감소시켰다고 판단된다. 특히 SRM 4%시편의 경우에는 20일까지는 CONC의 건조수축변형률과 거의 유사하나, 시간이 지날 수록 스틸메쉬에 의해 더욱 우수한 건조수축변형을 보인 것으로 판단된다.

3. 스틸메쉬로 보강한 모르타르 패널의 휨 성능 평가

3.1 실험방법

본 연구에서는 프리캐스트 패널 모듈 부재의 구조성능을 실험하기 위하여, Fig. 5와 같이 2,500kN의 UTM을 사용하여 양단 80mm 위치에서 단순지지조건의 3점 휨 실험을 진행하였다. 재하속도는 0.03mm/sec 속도로 변위제어를 하였으며, 폭 100mm의 선하중 (line load)으로 재하하였다. 이는 4번 지지와 중앙 집중하중을 가하는 2방향 슬래브 실험방법에 비하여 큰 변형을 유도하기 위하여, 본 실험방법으로 적용하였다.

본 실험에서 수행된 시편의 종류는 Table 5에서 보는 것과 같으며, SRM 4% 시편의 경우에는 시편제작 중에 발생된 오류로 인해 가압부의 굴곡이 발생하여, 본 실험에서는 SRM 4% 시편 1개만을 수행하였다. SCP-1000 LVDT를 이용하여 중앙부의 처짐을 측정하였으며, 콘크리트 상부에 콘크리트용 변형률 게이지를 부착하였다. 또한, 주철근의 변형률을 측정하기 위하여, 중앙부와 전단변형이 발생하는 위험단면부의 압축 및 인장철근에 철근용 변형률 게이지를 Fig. 2와 같이 부착하였다. 그러나, SRM 시편에 보강되는 스틸메쉬의 경우에는 메쉬 표면에 게이지 부착이 어려움으로 철근용 변형률

Fig. 5 Setup of test specimen

Table 5 Specimens classification and number

Steel ratio	2%	4%
RC specimen	3	2
SRM specimen	2	1

게이지를 부착하지 않았으며, 스틸메쉬의 항복점은 하중-변위곡선에서 탄성구간 이후로 하중변화가 없는 구간이전의 값으로 선정하였다. 또한 전단응력을 검토하기 위해 로제트 게이지 (rosette gauge)를 3개의 콘크리트 변형률 게이지로 구성하여 위험단면인 양단 180mm 위치에 부착하였다.

3.2 휨 성능 결과

스틸메쉬를 이용한 프리캐스트 모르타르 패널의 하중-변위곡선은 Figs. 6~7과 같다. 철근 및 스틸메쉬의 보강재가 항복하기 전까지의 초기거동은 거의 유사하게 나타났다. Fig.

(a) RC

(b) SRM

Fig. 6 Load-displacement curves for each specimens

Fig. 7 Load-displacement curves for flexural test

6(a)와 같이 RC 2% 시편은 3개의 시편 모두 유사한 거동을 하였으며, RC 4% 시편의 경우, RC 4%-1 시편이 RC 4%-2 시편에 비하여 낮은 극한강도에서 파괴가 발생하였다. 이는 RC 4% 시편은 과도한 철근이 보강되어, RC 2% 시편에 비해 취성적인 전단파괴가 발생하였음을 확인할 수 있었다. 또한, Fig. 6(b)에서 볼 수 있듯이, SRM 2% 시편은 SRM 4% 시편에 비하여 높은 연성이 확보되었으며, SRM 2%-2 시편의 경우, 약 30mm 변위가 발생하였을 시, 모르타르와 스틸 메쉬의 순간적인 파괴로 인해 저항성의 감소로 인해 휨 하중이 감소하였다. 이는 계층 (layered) 구조의 스틸메쉬의 특성으로 인해 지속적으로 휨 저항성능이 유지되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 각 시편별로 대표적인 시편을 선정하여 하중-변위 곡선을 서로 비교하였다. SRM 2% 시편의 경우, RC 2% 시편에 비하여 1.50~1.79배의 최대 변위 (Δ_{max})가 발생하였으며, 이를 통해 철근보강에 비하여 스틸메쉬에 의한 보강

시편에서 보다 높은 연성을 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한, RC 2% 시편의 경우, 극한하중 이후에 처짐의 증가와 함께 하중의 감소가 발생하면서 파괴거동을 보이는 반면에, SRM 2% 시편은 항복한 이후에도 파괴될 때까지 변위와 하중이 점차적으로 증가하는 거동을 확인할 수 있다. 그러나, RC 4%와 SRM 4% 시편은 과다보강으로 인한 전단 파괴가 발생하였으며, 그로 인한 취성파괴가 발생한 것을 확인할 수 있다. 연성 (ductility)은 구조부재의 하중 증가와 함께 부재가 탄성범위를 초과하여 소성영역에서 파괴에 도달할 때까지의 변형을 확보하는 능력을 의미하며, 강도와 함께 구조물의 안전도를 평가함에 있어 중요한 성능 중 하나이다 (Kim et al., 2010).

그러므로 본 연구에서는 단면의 보강재가 항복할 때의 변위 (Δ_y)와 극한 하중시의 변위 (Δ_u)의 비로 표현되는 연성 지수를 사용하여 부재의 안전성을 Table 6과 같이 평가하였다. 하중-변위 실험결과에 근거한 SRM 2%의 연성지수는 44.63과 61.49로 RC 2%에 대해 7.095, 9.775배의 높은 상대 연성지수를 나타내고 있다.

즉, 이는 SRM의 스틸메쉬가 연성증가에 매우 효과적이며, SRM 2% 시편의 경우 그 효과가 크게 발현되었다고 판단된다. 그러나, SRM 4%와 RC 4% 시편의 경우에는 철근 및 스틸메쉬의 보강 함유율이 증가하더라도, 상대 연성지수의 차이는 미비하였으며, 상대적으로 낮은 연성지수를 나타내고 있다. 이는 비록 보강 함유율의 증가로 인해 극한하중은 증가하나 전단파괴에 의한 취성파괴가 발생하므로, 연성파괴를 유도할 수 있는 보강비를 산정하거나, 전단보강이 필요하다고 판단된다.

3.3 균열형상 및 파괴모드

본 연구에서 수행한 프리캐스트 패널의 휨 실험을 통한 각

Table 6 Ductility index of tested specimens

Specimen	Initial cracking		Yield state		Ultimate state		Δ_{max} [mm]	Ductility index [Δ_u/Δ_y]	Relative ductility index	Failure mode
	P_{cr} [kN]	Δ_{cr} [mm]	P_y [kN]	Δ_y [mm]	P_u [kN]	Δ_u [mm]				
RC 2%-1	45.75	0.718	135.8	4.58	185.3	28.8	84.1	6.290	1.000	Flexural
RC 2%-2	45.0	0.747	131.3	4.26	183.8	28.9	84.4	6.780	1.078	Flexural
RC 2%-3	42.75	0.718	122.3	3.53	181.5	28.9	96.5	8.177	1.300	Flexural
RC 4%-1	36.75	0.354	237.0	4.95	283.5	9.99	11.33	2.017	0.321	Shear
RC 4%-2	36.75	0.565	228.8	5.11	312.8	20.0	21.2	3.917	0.623	Shear
SRM 2%-1	50.25	0.718	142.5	3.21	198.8	143.2	144.6	44.63	7.095	Flexural
SRM 2%-2	52.50	0.172	121.5	2.43	184.5	149.6	150.8	61.49	9.775	Flexural
SRM 4%	150	1.523	219.8	3.23	319.5	12.70	17.39	3.934	0.625	Shear

시편의 균열형상 및 파괴모드는 Fig. 8과 같다. RC 2%는 휨 균열을 보이거나 철근 항복 이후 변위가 증가하면서 지압파괴가 크게 발생하였다. 그러나, RC 4%와 SRM 4% 시편은 주로 파다보강에 의한 전단파괴모드가 나타나고 있다. 그러나 휨 파괴가 주로 발생한 SRM 2% 시편의 경우에는 높은 연성으로 인해 Fig. 6 및 Fig. 8과 같이 휨 변형이 크게 발생하였으며, 휨 변형이 진행되면서 점차적으로 사인장파괴 양상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. SRM 시편에서는 최대 모멘트가 발생하는 중앙부에 집중적으로 균열이 발생하였으며, 계층구조로 보강된 스틸메쉬의 위치에 따라 종방향 균열이 형성되었다. 더불어 SRM 시편은 스틸메쉬가 전면에 걸쳐 균일하게 보강되어 모르타르와 스틸메쉬의 계면에 충분한 부착력을 발현할 수 있는 피복두께가 설정되지 못하여, Photo 2(a)에서 보는 것과 같이 계면 부착면적 및 부착력의 감소로 인한 박락과 미세균열이 발생한 것을 확인할 수 있

Fig. 8 Crack pattern

(a) Micro-crack of bottom (b) Prevention of exfoliation

Photo 2 Photos of SRM specimen

다. 그러나, Photo 2(b)에서 보는 것과 같이 스틸메쉬의 겹침 보강에 의해 모르타르의 큰 박락이 방지되는 것을 확인할 수 있다.

3.4 하중-변형률 관계

Fig. 9(a)~(b), (f)는 시험체 중앙부의 압축 및 인장철근과 압축 측 연단 콘크리트의 하중-변형률곡선이며, Fig. 9(d), (e)는 RC 패넬의 상·하단 철근의 전단변형 위치에서 측정된 하중-변형률 곡선이다. Fig. 9(a)와 같이 RC 2%의 시편은 압축철근과 인장철근 모두 항복한 것을 확인할 수 있으며, 항복 하중에서 철근의 변형이 크게 변형된 것을 통해 철근에 의한 연성 거동이 발생한 것을 확인할 수 있었다.

콘크리트의 변형률은 대략 0.002에서 최대 하중을 받았으며, 콘크리트의 극한 변형률 0.003에 도달하기 전에 철근이 먼저 항복 변형하였으므로 휨 인장파괴가 발생한 것을 확인할 수 있다. 반면, Fig. 9(b)의 RC 4% 시편에서는 RC 2% 시편과는 달리 압축철근이 항복하지 않은 것을 확인할 수 있으며, 이는 Fig. 6(a)와 Fig. 8의 파괴형상에서 확인할 수 있듯이, 압축철근이 항복하기 전에 패넬에 전단파괴가 발생한 것으로 판단된다. 이는 Fig. 9(d)와 (e)의 전단변형위치의 철근에서 발생한 변형률에서 보는 것과 같이, RC 4%의 전단위치의 철근에서는 RC 2%에 비해 큰 전단변형률이 발생한 것과 동시에 철근의 항복변형률에 도달한 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서 수행한 스틸메쉬를 이용한 SRM 시편에는 철근 게이지의 부착성의 어려움으로 스틸메쉬의 변형을 측정하지 못하였으며, Fig. 9(c)와 같이 모르타르의 변형만을 측정하였다. SRM 시편 또한 대략 0.002에서 최대 하중을 받았으며, SRM 2% 시편은 하중이 증가함에 따라 압축 변형률이 증가하다가 일정 하중에서는 변형률이 일정하다가 감소하는 것을 통해 시편이 연성적으로 거동하였음을 확인할 수 있었다. Fig. 9(f)에서 보는 것과 같이 RC 시편과 SRM 시편의 콘크리트 및 모르타르의 압축변형이 보강비에 따라 유사하게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

3.5 로젯 게이지를 통한 전단변형 결과

Fig. 10과 같이 전단변형을 측정하기 위해 로젯 게이지를 부착하여, 전단변형률과 최대전단응력을 Mohr's circle에 의해 Fig. 11과 같이 나타내었다. Fig. 11에서 보는 것과 같이 가해지는 하중에 대한 전단변형률을 확인해 보면, RC 2%

Fig. 9 Load-strain curves results

Fig. 10 Rosette gauge profile

시편에서는 SRM 2% 시편에 비하여 유사한 하중에서 큰 전단변형이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이는 휨 변형에 의

해 연성적으로 파괴된 RC 2% 시편에서 전단변형에 대해 연성적으로 변형하였으며, 전단변형-하중 곡선의 면적으로 표현할 수 있는 전단변형에너지가 크기 때문이라고 판단된다. 한편, SRM 2% 시편은 뛰어난 연성지수와 높은 휨 연성을 지니는 것에 비하여 RC 2% 시편에 비하여 적은 전단변형이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이는 SRM 2% 시편이 사인장 파괴모드로 파괴되면서 균열로 인한 전단변형이 발생하였다고 판단된다.

또한, 하중저항과 전단변형이 일정 구간에서 지속적으로

Fig. 11 Load-shear strain curve results

Table 7 Maximum shear stress–shear strain relation

Specimen	Max. shear strain, γ_{xy} [$\mu\epsilon$]	Max. principle strain [$\mu\epsilon$]		Max. principle stress [MPa]		Max. shear stress, τ_{max} [MPa]
		ϵ_1	ϵ_2	σ_1	σ_2	
RC 2%	3515	3458.76	-3571.8	89.85	-94.57	92.209
RC 4%	1210	1993.97	-495.97	63.98	-1.34	32.657
SRM 2%	383	367.996	-399	9.076	-10.22	9.649
SRM 4%	145	112.54	-177.5	2.448	-4.851	3.649

변화되는 것을, SRM 2% 시편의 특성으로 인해 중방향 균열과 사인장 균열, 휨 균열 등이 동시다발적으로 발생하면서 하중이 서로 분산되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 스틸메쉬와 모르타르의 하중저항성에 따라 변형률의 크기가 변화되는 것으로 판단된다. 이와 같은 SRM 2% 시편의 전단변형 거동은, 유사한 사인장 파괴모드가 나타난 Fig. 11(a)의 RC 4%와 Fig. 11(b)의 SRM 4% 시편 거동과는 상이하게 발생한 것을 확인할 수 있다. RC 4%와 SRM 4%의 하중-전단변형률 곡선에서는 극한하중에서 전단변형이 순간적으로 감소하였으며, 이로 인해 실제 급작스러운 전단파괴가 발생하였다고 판단된다.

Table 7은 최대전단응력과 전단변형률의 관계를 나타내었다. RC 4%와 SRM 4% 시편은 RC 2%와 SRM 2% 시편에 비하여 상대적으로 대략 1/3 낮은 전단응력과 전단변형을 나타내고 있다. 이는 4% 보강비를 가진 각 시편들은 전단응력에 대해 취약함을 나타내며, 전단파괴에 의한 취성파괴가 발생할 가능성이 높은 것을 확인할 수 있다. 또한 SRM 시편은 RC 시편에 비해 1/10배의 낮은 최대전단응력과 전단변형을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 SRM 2% 시편의 경우, 패널 높이에 걸쳐 일정간격으로 배근된 스틸메쉬에 의해 전단응력에 대한 응력분산이 RC 시편에 비해 효과적으로 발생하였으며, 그로 인한 많은 휨-전단균열이 발생하였다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 페로시멘트의 개념을 적용하여, 일반구조물 뿐만 아니라 특수구조물의 프리캐스트 모듈화를 위한 방법으로 스틸메쉬를 이용한 모르타르 프리캐스트 패널 부재를 제작하였으며, 보강비에 따른 재료 및 구조적 성능을 일반 철근콘크리트 (RC)와 비교 평가하였다. 모르타르는 콘크리트에 비하여 낮은 강성과 강도를 가짐에도 불구하고, 스틸메쉬로 보강된 모르타르 (SRM) 패널이 RC패널과 유사하거나 우수한 휨 성능을 나타내었다. 이는 구조물의 요구성능에 따

라 적절한 철근비에 따른 프리캐스트 모듈화로써의 활용이 가능하다고 판단되었다. 더불어 추후, 특수구조물에 적용하기 위한 충돌 및 화재 등과 같은 특수하중 및 파괴메커니즘을 위한 추가적인 연구와 스틸메쉬를 이용하여 보수보강과 관련된 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 (NRF)의 지원 (No.2012-0005218)과 우수공학연구센터 (ERC)의 지원 (No.2011-0030846)을 통해 이뤄졌으며, 이에 감사의 뜻을 전합니다.

References

1. ACI Committee 549-1R, State-of-the-Art Report on Ferrocement, Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan. 1997, pp.1-30.
2. ACI Committee 549-2R, Report on Thin Reinforced Cementitious Products, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan. 2004, pp.1-28.
3. Al-Rifai, W. N., "Ferrocement Wall: Penetration Testing", Proceedings of Eight International Symposium and Workshop on Ferrocement and Thin Reinforced cement Composites, Bangkok, Thailand, 2006, pp.177-185.
4. David, G. H., Jonathan, M. W., Marc, O. E. and John, F. S., State-of-the-art report on precast concrete systems for rapid construction of bridges, US department of transportation Federal Highway Administration, Final technical report, Task 53, 2005, pp.1-85.
5. Eswaranmoorthi, P. and Subramanian, K., "Impact resistance of fibrous ferrocement slabs", Proceedings of Eight International Symposium and Workshop on Ferrocement and Thin Reinforced cement Composites, Bangkok, Thailand, 2006, pp.133-140.
6. Greepala, V. and Nimityongskul, P., "Structural integrity of ferrocement panels exposed to fire", Cement and Concrete Composites, vol. 30, No. 5, 2008, pp.419-430.
7. Ichinami, K., Okajima, S., Nishinomuya, G. and Takagi, H., "Design and construction of DUALPC wall-Sakaide LNG terminal, 180,000kl PC LNG tank", 3rd fib congress 2010, National report, Washington D.C., USA, pp.193-196.
8. Kim, M. S., "Forecast of international construction market and strategies for diversification after the Dubai debacle",

- Construction Economy, Korea Research Institute For Human Settlements, vol. 61, 2009, pp.65-74. (in Korean)
9. Kim, S. B., Kim, H. Y., Yi, N. H. and Kim, J. H. J., "Strength and crack resistance properties of fiber reinforced concrete mixed with recycled PET fiber", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, vol. 14, No. 1, 2010, pp.102-108. (in Korean)
 10. Kim, Y. B., "Ferrocement", Journal of the Korea Concrete Institute, Korea Concrete Institute, vol. 2, No. 1, 1990, pp.39-42. (in Korean)
 11. Kurosky, J., Hughes, B., Zalok, E., Halim, A. O. A. E. and Tolba, A., "On ameliorating the residual strength of reinforced concrete panels subjected to elevated temperature", Construction and Building Materials, vol. 27, No. 1, 2010, pp.623-629.
 12. Miguel, A. P. L. H., Physical and numerical experimentation of fiber reinforced concrete and ferrocement elements, Dissertation doctor of philosophy, University of California Davis, 2001, pp.1-118.
 13. Naaman, A. E., Ferrocement and laminated cementitious composites, Ann Arbor, Michigan, 2000, pp.58-132.
 14. Neville, A. M., Properties of concrete, 4th ed. John Wiley & Sons, 1996, New York, pp.412-481.
 15. Nilson, H., Darwin, D. and Dolan, C. W., Design of Concrete Structures 14th ed., 2010, McGraw-Hill, New York, pp.49-52.
 16. Paul, B. K. and Pama, R. P., "Ferrocement", International Ferrocement Information Center, Asian Institute of Technology, Bangkok, 1978, pp.23-130.
 17. Salimuddin, R. S. and Mahyuddin, R., "Development of lightweight ferrocement sandwich panels for modular housing and industrialized building system", University Technology Malaysia, No. 73311, 2008, pp.20-93.
 18. Sohn, T. H., "A study on associations among number of bidders, contract award rate and profitability on international construction", Journal of the Korea Society of Civil Engineers, Korea Society of Civil Engineers, vol. 31, No. 2D, 2011, pp.247-253. (in Korean)
 19. Stanley, A., Ferrocement: Building with Cement, Sand, and Wire Mesh, Hill family, Minnesota, 2008, pp.15-90.
 20. Suh, K. S., Ferrocement mechanics, Cheong Moon Gak, Seoul, 2003, pp.3-85. (in Korean)
 21. Yang, K. H., Hwang, H. J., Kim, S. Y. and Song, J. G., "The Behavior of shrinkage strain and compressive strength of the cementless mortar using Hwangto binder according to mixing conditions", Journal of the Architectural Institute of Korea, Architectural Institute of Korea, vol. 22, No. 6, 2006, pp.87-94. (in Korean)

Received : 09/19/2012

Revised : 02/18/2013

Accepted : 03/11/2013

요 지

최근, 프리캐스트를 통한 모듈화에 대한 관심으로 인해 교량 및 빌딩 뿐만 아니라, 원전구조물, LNG 가스탱크, 중소형 강합성 구조물 등 특수구조물에도 프리캐스트 모듈화에 대한 연구가 활발하게 이뤄지고 있다. 본 연구에서는 프리캐스트 제작의 시공 및 작업성, 원활한 자재의 조달할 수 있는 방법으로 페로시멘트 (ferrocement)를 바탕으로 한 스틸메쉬로 보강된 모르타르 프리캐스트 패널을 제작하였다. 모르타르는 고강도 및 고유동성을 지니도록 실리카폼과 고로슬래그의 배합율에 대한 변수연구를 통해 최적의 배합을 선정하였으며, 1,200×600×150mm의 패널을 제작하여 스틸메쉬로 보강한 모르타르 시편과 일반 철근콘크리트 시편을 보강비 2%와 4%로 각각 제작하였다. 제작된 스틸메쉬로 보강한 모르타르의 프리캐스트 모듈화의 적용 가능성을 판단하기 위하여 기본적인 재료물성실험과 자유건조수축실험을 수행하였으며, 선하중으로 하중을 재하하여 3점 휨 시험으로 스틸메쉬로 보강한 모르타르의 구조성능을 검토하였다. 실험결과를 통해, 스틸메쉬로 보강된 모르타르 프리캐스트 패널은 높은 휨성능 및 연성효과가 있으나, 4%로 보강된 스틸메쉬 모르타르 프리캐스트 패널은 전단보강에 대한 고려가 필요하다고 판단되며, 이에 대한 조치가 이루어진다면 프리캐스트 모듈화 부재로 적용이 가능하다고 판단된다.

핵심 용어 : 페로시멘트, 패널, 프리캐스트, 모르타르, 스틸메쉬