

SMA 와이어를 이용한 연결재의 인발저항성능 평가

정치영¹, 우태련², 이종한³, 정진환^{4*}

Evaluation of the Pull-out Resistance of the SMA Wire Connector

Chi-Young Jung¹, Tae-Ryeon Woo², Jong-Han Lee³, Jin-Hwan Cheung^{4*}

Abstract: Precast concrete (PC) structure is one of the type of the structures which is made in a facility prior to installing it to a construction field. The contact surfaces between two PC structures should be treated for obtaining enough binding force by inducing prestressing force. However, in the many cases, the contact surface causes the crack and leakage of water. These cracks and water leakage can cause the corrosion of the rebar, and the corrosion of the rebar can severely reduce the long-term durability. In this study, the SMA wire connector is suggested to solve the problem with the contact surfaces between two PC structures. The pull-out resistance of the suggested SMA wire connector is evaluated by conducting the tests to find the effect of the number of wires, shape of connector part, and shape memory effect. As a result of this study, the empirical formula is suggested to estimate the pull-out resistance related with the effects of the shape of the connector, shape memory effect, and the adhesive force. The validity between the estimated pull-out resistance and the measured value is confirmed.

Keywords: Shape memory alloy, Pull-out test, Precast concrete, Cold joint

1. 서 론

PC구조형식은 사전 제작된 PC 부재를 현장에서 거치한 후 추가 긴장력 도입 및 연결부 시공의 과정을 거쳐서 구조물을 완성시키는 형식이다. 건설공기의 단축, 기후 영향에 따른 콘크리트의 품질 저하 우려가 적고, 시공성 및 가격 경쟁력이 우수한 장점을 갖고 있다. 하지만 현장타설부와 PC부 사이 부착면에서 균열발생 및 수밀성 감소에 따른 누수문제가 발생할 수 있다. 이러한 균열 및 누수문제는 철근의 부식을 초래할 수 있으며, 이는 구조물의 장기사용 내구성을 급격히 감소시키는 주요 원인이 될 수 있다. PC 구조형식의 주요 장점에도 불구하고, 이러한 부재 간 경계면에서 발생하는 문제점들을 최소화하기 위해서 다양한 방법들이 적용되고 있다. 그 중에 대표적인 것이 경계면 부착력 증진을 위해서 경계면 시공시, PC 부재에 대한 후처리를 통해서 부착면을 거칠게 만드는 것이

다. 하지만 이러한 작업은 주로 현장에서 이루어지는데, 현장 작업을 최소화하고자 하는 PC 구조형식의 목적을 퇴색되게 하는 것으로 시공성 및 구조물의 품질 균등성을 저하시키는 원인이 될 수 있다 (Lee et al, 2012; Lee et al, 2013; Lee et al, 2015; Song and Hwang, 2016). 따라서 PC 구조물의 경계면에 대한 성능확보를 위한 기술개발이 필요한 실정이다.

최근 RC 구조물의 균열제어의 목적으로 형상기억합금 (Shape Memory Alloy: SMA)을 적용하고자하는 연구들이 많은 연구자들에 의해서 이루어지고 있다. 형상기억합금은 독특한 기계적 거동인 형상기억효과(Shape Memory Effect: SME)와 초탄성거동(super elastic behavior)을 보이며 다양한 분야에 적용되고 있는 소재이다. 토목분야에서는 이를 활용하기 위한 연구는 다수 진행되었으며, 주로 프리스트레싱력 도입이나, SMA 강섬유가 혼입된 콘크리트 등 구조물의 내하 성능 증진 및 공용 중 내하성능 복원을 목적으로 하는 연구들이 다수 진행되고 있다 (Kuang and Ou, 2008; Park and Yun, 2009; Kwak et al, 2010; Choi et al, 2014; Shajil et al, 2013; Kim et al, 2014; Choi et al, 2015; Choi et al, 2016).

본 연구에서는 기존 PC 구조물 접합부 경계면에서의 부착력 부족에 대한 문제를 해결하기 위해서, 형상기억합금을 활용한 표면처리 부재를 제안하고, 형상기억합금 와이어를 이용한 연결부의 성능을 평가하고자 한다. 제안하고자 하는 기

¹정회원, 부산대학교 지진방재연구센터 연구교수

²정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 석박사통합과정

³정회원, 대구대학교 건설시스템공학과 교수

⁴정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 교수

*Corresponding author: cheung@pusan.ac.kr

Department of Civil Engineering, Pusan National University 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 46241, South Korea

•본 논문에 대한 토의를 2019년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

술은 SMA 와이어를 후크(Hook) 형태로 절곡하고, 다수의 와이어를 결합하여 PC 구조물에 매립하여 타설한 후 현장 타설 시 돌출 되도록 하여 현장타설부와 PC부 간의 결합력 확보를 용이하도록 한 것이다. 본 연구는 해당 기술 실현을 위한 사전 연구로서 와이어의 개수와 절곡유무, 그리고 형상기억효과 발현 유무에 따른 연결재의 인발력을 평가하고자 한다.

2. 시험 개요

2.1 시험체 상세

본 연구에서는 형상기억합금(SMA) 와이어로 제작된 후크(Hook)형 연결재의 인발성능 평가를 위하여 모르타르에 매립된 연결재에 대해서 직접인발 시험을 수행하였다. SMA 와이어는 니켈-티타늄 계열의 NiTi SMA를 이용하였다. 본 연구에서 사용된 와이어의 재료적 특성은 Table 1과 Fig. 1에서 보는 바와 같다. SMA 와이어의 응력-변형률 관계를 살펴보면, 기존 강재와 달리 항복구간이 두 번 나타나게 되는데, 이는 SMA 와이어의 제작 방식 및 화학구성에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서 사용한 SMA 와이어는 약 150MPa 지점에서 1차 항복점이 형성되고, 약 800MPa 지점에서 2차 항복점이 형성된다. 인장강도는 약 1000MPa 정도로 평가되었다.

시험변수는 크게 1) 가열을 통한 형상기억효과의 발현 유무(비가열 : NH, 가열 : H), 2) 후크형 절곡부의 유무(비절곡 : I, 절곡 : J), 그리고 3) SMA 와이어의 개수(1, 2, 4)로 구분하였다. 먼저 가열을 통한 형상기억효과 발현 유무의 경우(NH, H)에서는 후크형태로 모르타르에 매립된 연결재가 원래의 형상으로 복원하려는 성질에 의해서 결합력이 더욱 증진되는 효과를 확인하고자 하였다. 또한 절곡부의 유무 및 와이어 개수와 상호비교를 통해서 형상기억효과가 인발저항성능에 기여 정도를 구분하고자 하였다.

후크형 절곡부의 유무(I, J)는 모르타르에 매립된 연결재가 직선형태인 경우와 후크형태인 경우로 구분하여, 후크의 연결성능에 대한 기여효과를 평가할 수 있도록 하였다. 연결부의 형상 조건에 따라 후크형태 시험체의 경우 절곡부 뿐만 아니라 직선 구간 중 일부가 모르타르에 매립되게 된다. 이러한 경우 순수한 절곡부의 연결성능 평가에 영향을 미칠 수 있으므로, 후크형 시험체(J)의 경우 모르타르에 매립되는 직선부에는 구리스를 사전에 도포하여 와이어의 직선구간과 모르타르간의 화학적 부착을 방지할 수 있도록 하였다.

마지막으로 SMA 와이어의 개수(1, 2, 4)는 연결재의 인발저항성능과 와이어 개수의 상관관계를 확인하기 위해서 계획

하였다. 시험체는 각 변수에 대해서 동일한 시험체를 5개 제작하여, 시험결과에의 유효성을 확인할 수 있도록 하였다. Table 2는 본 연구에서 대상으로 하는 시험체의 변수를 정리한 것이다. Fig. 2는 시험체의 형상 및 크기를 나타낸 것이다.

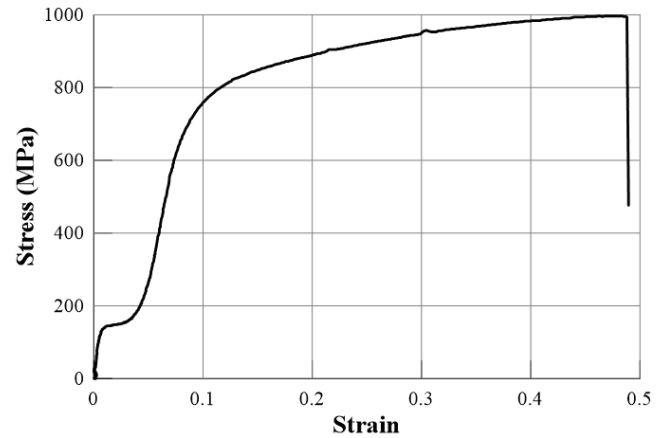


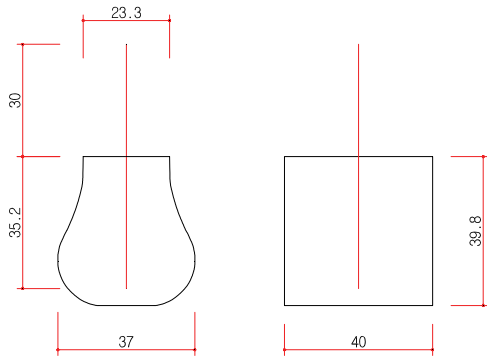
Fig. 1 Stress-strain curve of SMA fiber

Table 1 Material properties of the SMA wire

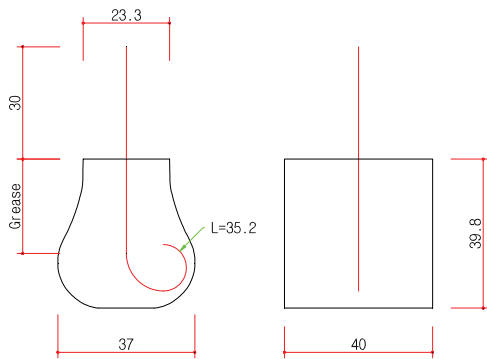
Chemical component ratio (wt%)	Transformation temperature (°C)
Ni : 41.69, Ti : 58.31	As : 75.1, Af : 94.4 Ms : 3.4, Mf : 24.6

Table 2 Types of specimens

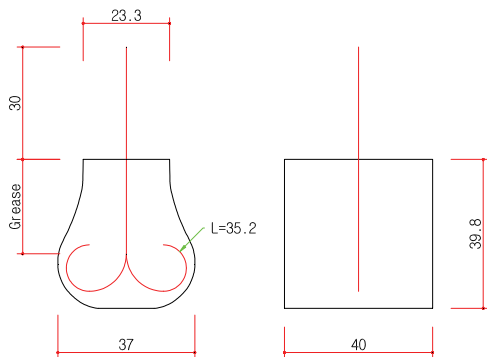
Name	Heat for SME	Embedded shape	Number of wires	Quantity
NH-I1	Non-heat	Straight	1	5
NH-J1			1	5
NH-J2			2	5
NH-J4			4	5
H-I1	Heat	Straight	1	5
H-J1			1	5
H-J2			2	5
H-J4			4	5



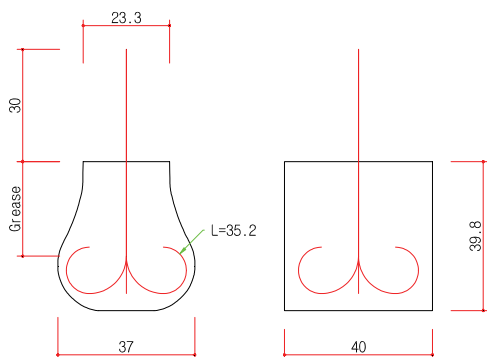
(a) I1



(b) J1



(c) J2



(d) J4

Fig. 2 Details of specimens

2.2 시험방법

Fig. 3은 인발시험을 위한 시험체 설치 모습을 나타낸 것이다. 시험체는 모르타르 부를 하부 지점에 고정하고 돌출된 SMA 와이어를 시험장치의 그림에 고정 시킨 후 인발시험을 수행하였다. 가력은 250kN 용량의 UTM을 이용하여 수행하였고, 가력 방법은 변위제어방법으로 분당 0.5mm의 속도로 가력하였다. 가력 종료시점은 1) 와이어가 모두 끊어지거나 2) 와이어가 완전히 뽑히거나, 혹은 3) 극한하중 대비 20% 이상의 하중이 감소하는 시점으로 결정하였다. 인발 시 발생하는 변위는 두 대의 변위계를 이용하여 측정 후 최종 결과는 두 계측값의 평균값을 사용하였다. 본 논문에서는 시험결과와 유효성을 확보하기 위해서 수행된 5개의 동일한 시험체 중 극한하중 값을 기준으로 최대/최소값을 나타낸 결과는 제외하고, 나머지 3개의 결과를 이용하여 결과분석을 수행하였다.

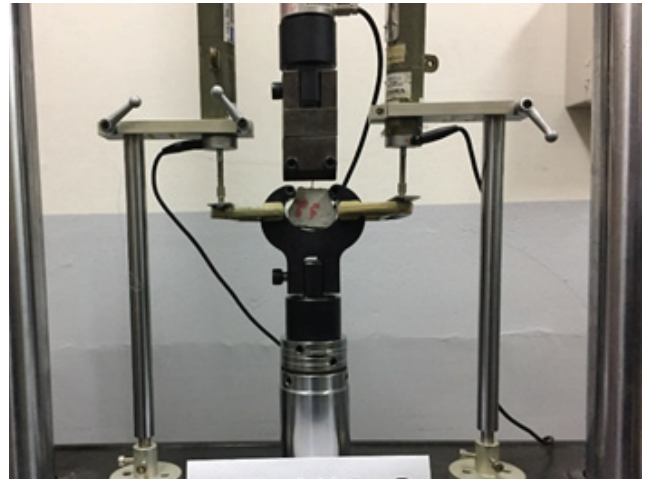


Fig. 3 Test and measurement set-up

3. 시험 결과 및 분석

본 연구에서는 인발시험결과들을 이용하여 SMA 연결부의 시험변수별 인발저항성능을 확인하고자 한다. 하중-변위 관계를 이용하여 평가하였고, 각 변수 조건별 극한하중을 비교하여, 독립된 효과를 평가하였다. Fig. 4는 시험 종류 후 시험체의 파괴 형상을 나타낸 것이다. 시험의 파괴형태는 주로 절곡한 와이어가 뽑혀 나오면서 파괴가 되었다. 뽑혀 나오는 과정에서 절곡한 와이어는 직선에 가까운 형태로 퍼지면서 인발되었다.

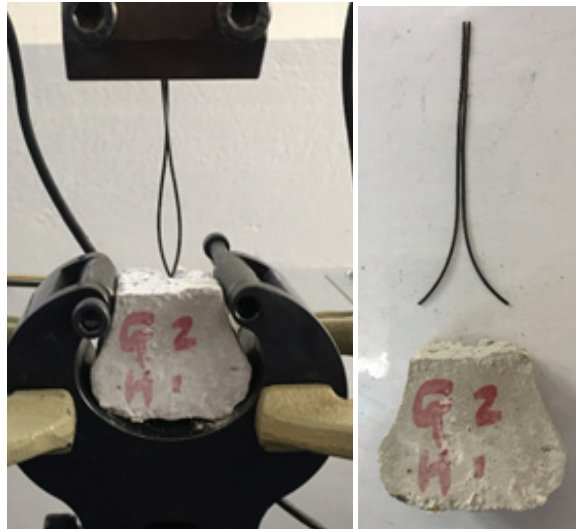


Fig. 4 Failure of specimen

3.1 시험체별 하중-변위 관계

Table 3은 시험체별 극한하중을 정리한 것이다. Fig. 5는 시험체의 하중-변위 관계를 나타낸 것이다. 하중-변위 관계는 하중이 극한하중 도달 이후 약 20% 감소하는 시점까지 도시하였다. 시험체 변수 증가열유무(NH, H)에 따른 거동 차이를 살펴보면, 동일한 와이어 형상과 개수를 갖는 경우 가열한 경우(H)가 비가열(NH) 대비 약 1.8~1.9배 정도 인발저항성능이 향상되는 것을 알 수 있었다. 이러한 거동특성은 Choi et al. (2013) 연구에서도 알 수 있는바와 같이, 변형된 SMA 와이어가 오스테나이트 상태에 도달하면서 변형을 회복하려고, 그 과정에서 포아송 효과에 의해서 작아졌던 지름이 원래상태로 돌아오게 된다. 이 때 와이어를 구속하고 있는 모르타르에는 팽창력이 가해지게 되고, 이는 와이어와 모르타르 간의 마찰력을 증진시키는 효과는 가져온다. 따라서 이러한 마찰력 증진효과에 의해서 인발저항성능이 향상되게 된다는 것을 유추할 수 있다. 실험결과를 통해서 가열유무 차이에서 보여지는 또 다른 거동차이를 발견할 수 있었는데, 비가열의 경우에는 1차 항복거동이 발생한다는 점이다. Fig. 1에 나타낸 SMA 와이어의 응력-변형률 관계에서 알 수 있듯이 본 연구에서 사용한 SMA 와이어는 1차 항복점과 2차 항복점을 갖고 있다. 비가열(NH) 시험체의 결과를 살펴보면 다수의 시험체에서 1차 항복거동을 나타내었다. 그러나 가열(H) 시험체의 결과에서는 1차 항복거동이 나타나지 않거나, 동일한 변수의 비가열(NH) 시험체 대비 1차 항복구간에서 발생하는 변위가 매우 작게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

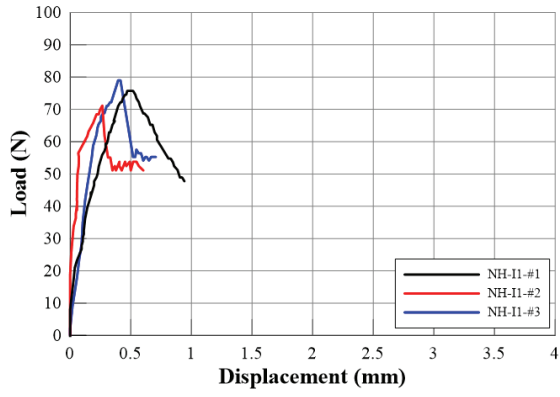
후크형태(J)와 직선형태(I)의 경우에는 후크로 절곡한 와이어의 경우가 약 10 ~ 14% 정도 인발저항성능이 향상되는 것을 알 수 있었다. 후크형태의 한 개의 SMA 와이어를 적용한

시험체(J1)의 경우 모르타르에 매립된 직선구간에는 타설 전 구리스를 도포하여 모르타르와 와이어 간의 화학적 부착이 발생하지 못 하도록 하였다. 따라서 J1 시험체와 I1 시험체의 와이어와 모르타르 부착구간은 동일하게 제작하였다. 따라서 와이어를 후크형태로 절곡함으로써, 직선형태보다 인발저항 성능 확보에 유리함을 확인할 수 있었다.

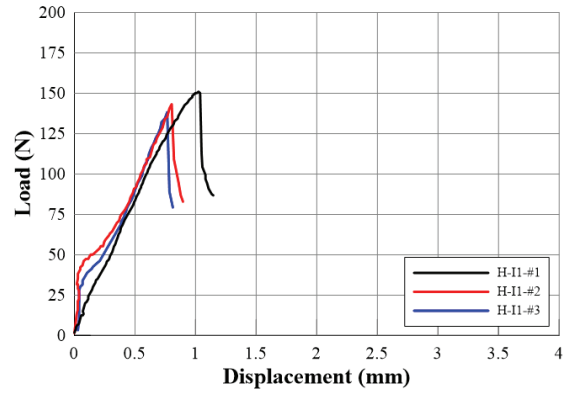
와이어 개수의 경우에는 와이어 개수가 늘어남에 따라 인발저항성능의 향상이 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 J4 시험체의 경우 J1 시험체 대비 평균 5.3배 정도 인발저항성능이 향상되어 와이어 개수 증가비보다 더 큰 증가율을 나타냈다. 다수의 와이어를 사용할 경우 와이어를 결합함에 있어 커플러를 사용하게 되는데, 와이어의 개수가 증가함에 따라 이러한 커플러 결합부도 커지게 된다. 그러므로 J4의 경우 커플러 연결부가 다소 인발저항성능에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3 Comparisons of pull-out resistance results

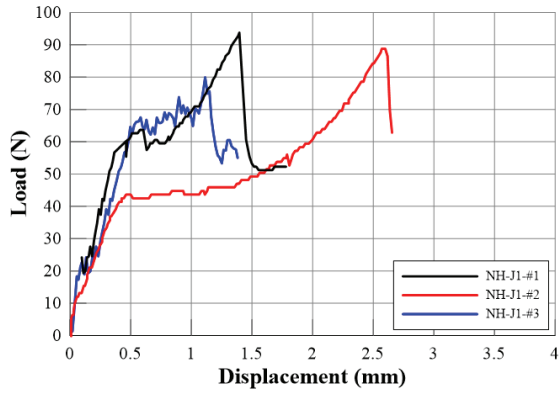
Name	No.	Pull-out resistance (N)	Avg. (N)	Ratio of		
				H/NH	J/I	2, 4 / 1
NH-I1	#1	75.7	75.3	1.000	1.000	-
	#2	71.2				
	#3	79.0				
NH-J1	#1	91.1	86.6	1.000	1.150	1.000
	#2	88.7				
	#3	79.9				
NH-J2	#1	172.2	177.5	1.000	-	2.050
	#2	180.3				
	#3	179.9				
NH-J4	#1	452.6	466.8	1.000	-	5.392
	#2	480.9				
	#3	467.0				
H-I1	#1	150.9	144.1	1.914	1.000	-
	#2	143.2				
	#3	138.2				
H-J1	#1	158.5	158.7	1.833	1.101	1.000
	#2	154.5				
	#3	163.0				
H-J2	#1	324.3	341.4	1.924	-	2.151
	#2	350.7				
	#3	349.2				
H-J4	#1	824.8	824.0	1.765	-	5.193
	#2	854.1				
	#3	793.1				



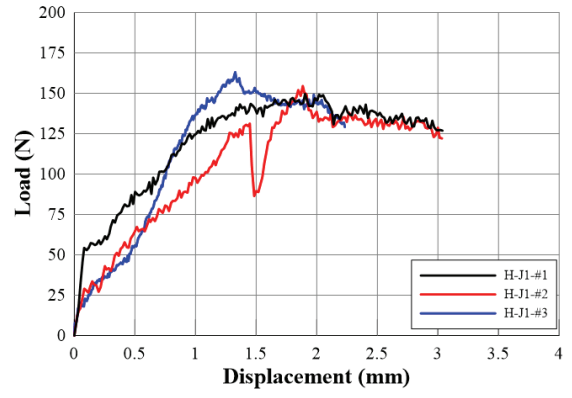
(a) NH-I1



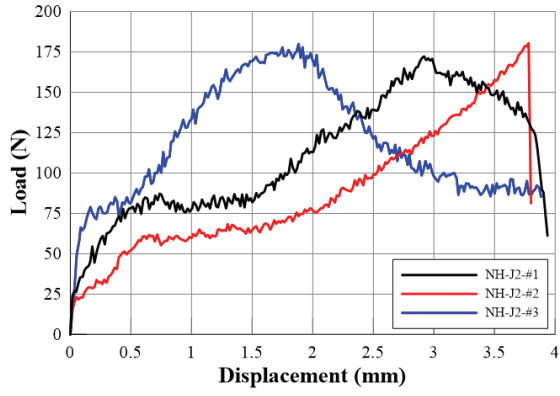
(e) H-I1



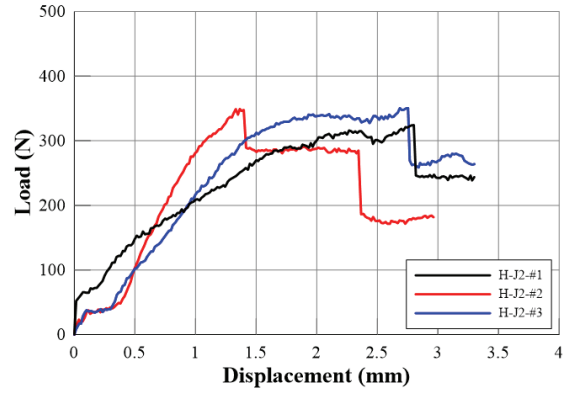
(b) NH-J1



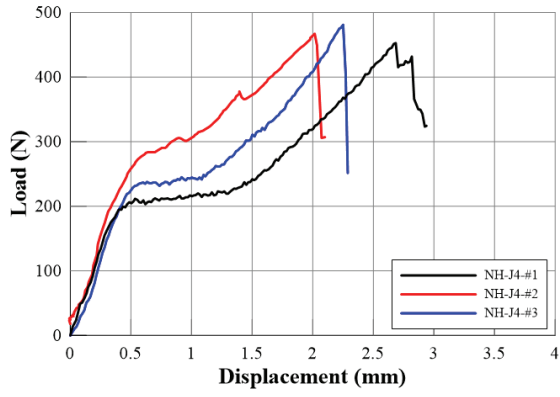
(f) H-J1



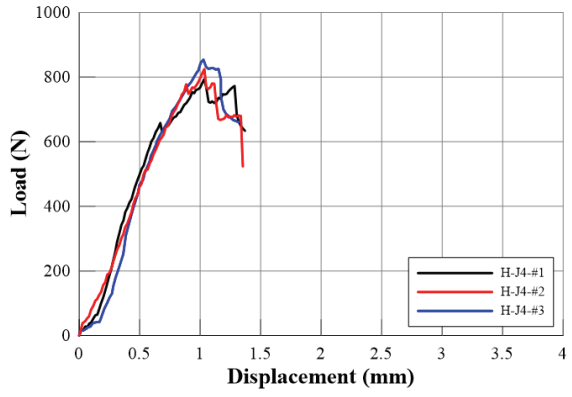
(c) NH-J2



(g) H-J2



(d) NH-J4



(h) H-J4

Fig. 5 Load-displacement curve of the specimens

3.2 시험변수별 인발저항성능에 대한 기여효과 분석

본 연구에서 수행한 다양한 변수실험을 바탕으로 시험체를 구성하는 각 변수가 인발저항성능에 기여하는 정도를 분석하고자 하였다. Fig. 6은 매립된 연결부의 형상에 따라서 변화되는 인발저항강도의 변화를 비교하기 위해서 NH-II과 H-II의 결과를 각각 평균한 후 각각의 평균값과 실험값의 차이를 도시한 그래프이다. Fig. 7과 8은 발현된 형상기억효과가 기여한 인발강도와 화학적 부착이 기여한 인발강도에 대해서 와이어 개수와 연관하여 경향을 비교한 그래프이다.

연결부의 후크형과 직선형인 경우를 비교한 결과 개별 곡선부의 영향은 개별 와이어 당 약 12.9N 정도의 인발저항성능을 향상시키는 것으로 나타났다. 이는 앞 절에서 기술한 바와 같이 직선형 인발강도의 10~15% 정도의 증가효과를 보이는 것으로 다른 시험변수 대비 비교적 작은 기여효과를 갖고 있다. 하지만 본 연구에서 수행한 연결부 형상 변수의 경우, 매우 제한적인 조건만을 수행하였다. 따라서 더욱 정확한 결과를 위해서는 직선형의 개수에 대한 변수에 대한 연구가 추가로 수행되어야 할 것이다.

형상기억효과는 와이어 당 약 78.0N 정도의 인발저항성능을 향상시키는 것으로 나타났다. 형상기억효과의 경우에는 형상기억효과가 SMA 와이어의 단면이 팽창하면서 발생되기 때문에 모르타르에 매립된 구간 전체에서 발현되게 된다. 따라서 시험체 제작 시 구리스를 도포한 구간에서도 형상기억 효과에 의한 인발저항성능 기여효과가 발생되게 된다. 따라서 유효한 형상기억효과 발현구간의 표면적을 고려하여 기여효과를 산출하면 약 0.51N/mm² 인 것으로 평가된다.

마지막으로 부착력에 의한 인발저항성능은 와이어 당 약 82.1N 정도의 인발저항성능을 향상시키는 것으로 평가되었다. 구리스를 도포한 구간을 제외한 실제 부착면을 기준으로 부착력에 의한 인발저항성능 기여효과를 산출하면 약 0.74N/mm² 인 것으로 평가된다. Table 4는 단위길이 및 단위 개수 당 인발저항성능의 기여효과를 정리한 것이다. 식 (1)은 개별 기여효과를 이용하여 인발저항성능을 산출하기 위한 식을 정리한 것이다.

$$R = n_j \cdot J + n_s \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot S + n_a \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot A \quad (1)$$

여기서, R 은 인발저항성능을 나타내고, n_j 는 후크형 와이어의 개수, n_s 는 SME가 발현되는 와이어의 개수, L 은 SME가 발현되는 구간의 길이, n_a 는 부착력이 발현되는 와이어의 개수, l 은 부착구간의 길이이다. 연결부 형상 효과 J 와 형상기억발현 효과 S , 그리고 부착효과 A 는 Table 4에 정리된 상수이다.

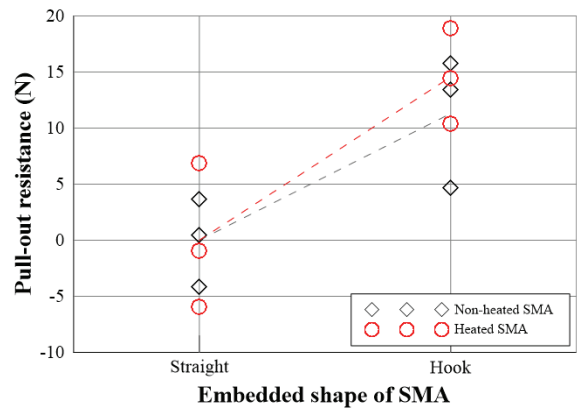


Fig. 6 Effect of the embedded shape of SMA

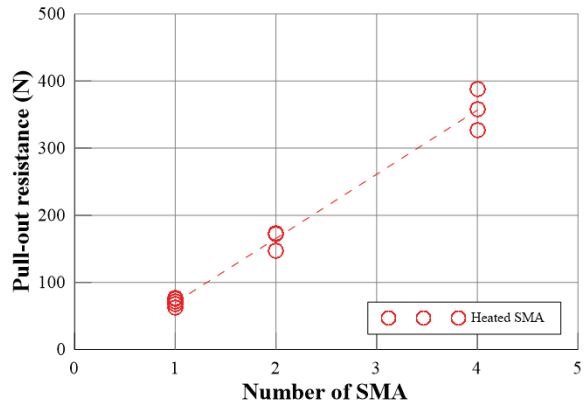


Fig. 7 Effect of the shape memory effect

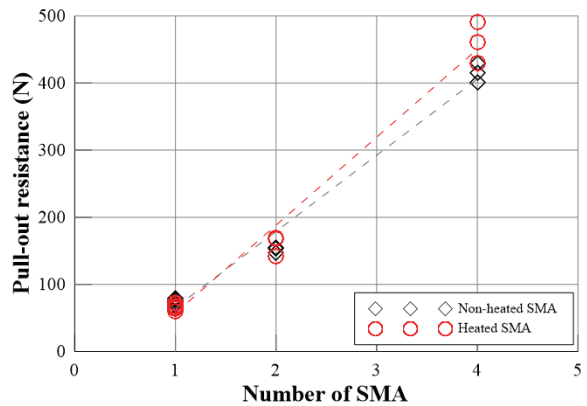


Fig. 8 Effect of the adhesive force caused by chemical bonding

Table 4 Contant of the effect improving the pull-out resistance

Embedded shape effect (J)	SME effect (S)	Adhesive force effect (A)
12.93 N/ea	0.51 N/mm ²	0.74 N/mm ²

Table 5는 식(1)을 이용하여 산출한 각 변수에 대한 인발저항성능을 비교하고, 최종 예측 인발저항성능을 정리한 것이다. Fig. 9는 실험에서 측정된 값과 예측값을 비교한 것으로 추세선의 기울기가 1에 가까울수록 실험값과 예측값이 잘 일치함을 의미한다. 본 연구에서 얻어진 결과의 경우에는 1.106으로 다소 차이가 있는 것으로 평가되었으나, 추후 더 많은 시험변수에 대해서 고려할 경우 이에 대한 오차는 더욱 낮아질 것으로 판단된다.

Table 5 Separated pull-out resistance according to the variables (unit: N)

Name	Embedded shape	SME	Adhesive force	Total
NH-I1	-	-	81.8	81.8
NH-J1	12.9	-	81.8	94.7
NH-J2	25.9	-	163.6	189.4
NH-J4	51.7	-	327.2	378.9
H-I1	-	56.4	81.8	138.2
H-J1	12.9	96.7	81.8	191.5
H-J2	25.9	163.6	163.6	382.9
H-J4	51.7	386.9	327.2	765.8

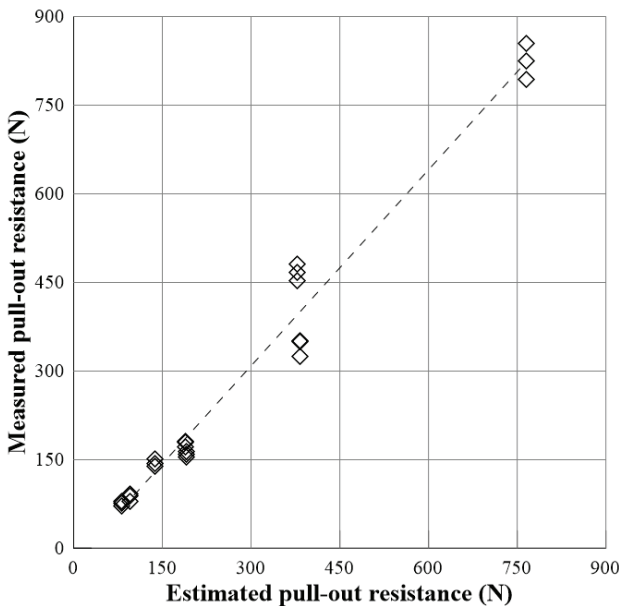


Fig. 9 Comparison between the measured pull-out resistance and the estimated pull-out resistance

4. 결론

본 연구에서는 기존 PC 구조물 접합부 경계면에서의 부착력 부족에 대한 문제를 해결하기 위해서, 형상기억합금을 활용한 표면처리 부재를 제안하고, 형상기억합금 와이어를 이용한 연결부의 성능을 평가하고자 하였다. 제안하고자 하는 기술은 와이어를 후크(Hook) 형태로 절곡하고, 다수의 와이어를 결합하여 PC 구조물에 매립하여 타설한 후 현장 타설 시 돌출 되도록 하여 현장타설부와 PC부 간의 결합력 확보를 용이하도록 한 것이다. 본 연구는 해당 기술 실현을 위한 사전연구로서 와이어의 개수와 절곡유무, 그리고 형상기억효과 발현 유무에 따른 연결재의 인발저항성능을 평가하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

시험체 변수 중 가열유무(NH, H)에 따른 거동 차이를 살펴보면, 동일한 와이어 형상과 개수를 갖는 경우 가열한 경우(H)가 비가열(NH) 대비 약 1.8~1.9배 정도 인발저항성능이 향상되는 것을 알 수 있었다. 후크형태(J)와 직선형태(I)의 경우에는 후크로 절곡한 와이어의 경우가 약 10~14% 정도 인발저항성능이 향상되는 것을 알 수 있었다. 와이어 개수의 경우에는 와이어 개수가 늘어남에 따라 인발저항성능의 향상이 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 J4 시험체의 경우 J1 시험체 대비 평균 5.3배 정도 인발저항성능이 향상되어 와이어 개수 증가비보다 더 큰 증가율을 나타냈다.

시험결과를 토대로 SMA 와이어를 이용한 연결재의 인발저항성능을 예측하기 위한 식을 제안하였다. 해당 식은 크게 연결부의 형상효과와 형상기억발현효과, 그리고 부착효과로 구성되어 있다. 제안한 식을 이용한 예측값과 실험값을 비교한 결과 평균 10%정도의 차이가 있는 것으로 평가되었다. 추후 더 많은 시험변수에 대해서 고려할 경우 이에 대한 오차는 더욱 낮아질 것으로 판단된다.

이번 연구결과에 더불어 SMA 와이어를 이용한 접합면에 대한 연결재를 개발 및 연구결과에 대한 신뢰도 향상을 위해서 다양한 직경의 와이어와 다양한 후크형태, 그리고 다양한 조건의 직선형태의 연결재에 대한 실험과 실험결과의 반복성 확인 등이 필요할 것으로 사료된다. 따라서 향후 연구에서는 더 많은 표본을 대상으로 인발시험을 수행하고, 이에 대한 추가적인 분석이 수행되어야 할 것이며, 실제 PC부재의 접합면에 대한 적용성을 평가하기 위한 실물 크기의 시험역시 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

1. Song, J. J., Hwang, Y. K. (2016), Field Application of Connecting Members to Construct Slab Type Precast Modular Bridge, *Proceeding of the Conference of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 205-206.
2. Lee, J. M., Lee, S. Y., Song, J. J., Park, K. H. (2015), Static Load Tests on Flexural Strength and Crack Serviceability of a Longitudinal Joint for the Slab-Type Precast Modular Bridges, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 27(2), 137-145.
3. Lee, P. G., Park, C. H., Jung, E. J. (2013), R&D in Modular Bridges, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 25(2), 16-20.
4. Kuang, Y. and Ou, J. (2008), Self-repairing performance of concrete beams strengthened using superelastic SMA wires in combination with adhesives released from hollow fibers, *Smart Materials and Structures*, 17(2), 025020.
5. Park, J. H. and Yun, S. N. (2009), Basic Characteristic of Shape Memory Alloy and Its Application, *Journal of the Korea fluid power systems society*, 6(2), 34-39.
6. B. Kwak, D. Kim, and E. Choi (2010), The Behavior of Steel Jakets for Compressive Concrete Composite Member under Cyclic Loading, *Proceeding of the Conference of Korean Society of Civil Engineering*, 1239-1242.
7. Choi, E., Kim, D., Chung, Y. S. and Nam, T. H. (2014), Bond-slip characteristics of SMA reinforcing fibers obtained by pull-out tests, *Materials research bulletin*, 58, 28-31.
8. Shajil, N., Srinivasan, M., and Santhanam, M. (2013), Self-centering of shape memory alloy fiber reinforced cement mortar members subjected to strong cyclic loading, *Materials and Structures*, 46(4), 651-661.
9. Kim, D. J., Kim, H. A., Chung, Y. S., and Choi, E. (2014), Pullout resistance of straight NiTi shape memory alloy fibers in cement mortar after cold drawing and heat treatment, *Composite Engineering*, 67, 588-594.
10. Choi, E., Kim, D. J., Chung, Y. S., Kim, H. S., and Jung, C. (2015), Crack-closing of cement mortar beams using NiTi cold-drawn SMA short fibers, *Smart materials & structures*, 24(1), 015018.
11. Kim, M. K., Kim, D. J., Chung, Y. S., and Choi, E. (2016), Direct tensile behavior of shape-memory-alloy fiber-reinforced cement composites, *Construction and Building Materials*, 102, 462-470.

Received : 10/19/2018

Revised : 12/03/2018

Accepted : 12/10/2018

요 지 : PC구조형식은 사전 제작된 PC 부재를 현장에서 거치한 후 추가 긴장력 도입 및 연결부 시공의 과정을 거쳐서 구조물을 완성시키는 형식이다. 하지만 현장타설부와 PC부 사이 부착면에서 균열발생 및 수밀성 감소에 따른 누수문제가 발생할 수 있다. 이러한 균열 및 누수문제는 철근의 부식을 초래할 수 있으며, 이는 구조물의 장기사용 내구성을 급격히 감소시키는 주요 원인이 될 수 있다. 본 연구에서는 기존 PC 구조물 접합부 경계면에서의 부착력 부족에 대한 문제를 해결하기 위해서, 형상기억합금을 활용한 표면처리 부재를 제안하고, 형상기억합금 와이어를 이용한 연결부의 성능을 평가하고자 하였다. 이를 위해서 본 연구는 해당 기술 실현을 위한 사전연구로서 와이어의 개수와 절곡유무, 그리고 형상기억효과 발현 유무에 따른 연결재의 인발력을 평가하고자 하였다. 연구결과를 통해서 SMA 연결재의 인발저항성능을 결정짓는 연결부의 형상효과와 형상기억발현효과, 그리고 부착효과에 대해서 평가할 수 있었다. 또한 이에 대한 설계변수별 예측식을 제안하였고, 예측값과 실험값 간의 유효성을 확인하였다.

핵심용어 : 형상기억합금, 인발실험, 프리캐스트 콘크리트, 부착면
