나노클레이 첨가량에 따른 나노재료 시멘트 모르타르에 정착된 보강섬유의 인발성능

Pullout Performance of Reinforcing Fiber Embedded in Nano Materials Cement Mortar with Nano Clay Contents

오리온* · 박찬기**,*

Oh, Ri-On · Park, Chan Gi

ABSTRACT

Recently, it has been studied for the application of nano-materials in the concrete. Applied a small amount of nano-materials can achieve the goal of high strength, high performance and high durability. The small addition of nano clay improves strength, thermal stability, and durability of concrete because of the excellent dispersion. The present study has investigated the effectiveness, when varying with the contents of nano clay, influencing the pull-out behavior of macro synthetic fibers in nano materials cement mortar. Pullout tests conducted in accordance with the Japan Concrete Institute (JCI) SF-8 standard for fiber-reinforced concrete test methods were used to evaluate the pullout performance of the different nano clay. Nano clay was added to the 0, 1, 2, 3, 4 and 5 % of cement weight. The experimental results demonstrated that the addition of nano clay led to improve the pull-out properties as of the load-displacement curve in the precracked and debonded zone. Also, the compressive strength, flexural strength and pullout performance and of Mix No. 1 and No. 2 increased up to the point when nano clay used increased by 2 and 3 % contents, respectively, but decreased when the exceeded 3 and 4 %, respectively. It was proved by verifying increase of the scratching phenomenon in macro synthetic fiber surface through the microstructure analysis on the surface of macro synthetic fiber.

Keywords: Fiber reinforced concrete; microstructure; nano materials; nano clay; pullout performance

1. 서 론

최근 나노재료에 대한 관심이 집중되면서 콘크리트에도 나노 재료를 적용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다 (Aly et al., 2011; Morsy et al., 2011). 나노재료는 소량의 적용으로 콘크리트의 고강도, 고기능, 장수명이라고 하는 목표를 달성할 수 있다 (Park and Lee, 2013; Paola et al., 2012). 그러나 나노재료의 적용은 입자크기가 시멘트보다 상대적으로 크게 작은 미립자의 재료를 적용함으로써 분말도 향상에 따른 균열발생 가능성과 강도의 향상에 따른 취성적 성질을 증가시키는 문제점이 발생할 수 있다 (Aly et al., 2011; Morsy et al., 2011). 콘크리트에서 이와 같은 문제점은 보강섬유를 적용함으로써 해결할 수 있다. 보강섬유는 콘크리트에서 발생 및 성장하는 균열을 제어

함으로써 급속한 파괴 즉 취성파괴를 방지하고 연성파괴를 유도 한다 (Chan, 2004; Lee and Park, 2012). 이러한 섬유보강 콘크리트의 효과는 섬유와 콘크리트 사이의 부착 거동에 의해서 결정되는데 보강섬유의 부착거동은 콘크리트에 균열이 발생하였을 때 섬유의 가교 작용 (fiber bridging), 섬유분리 (fiber debonding), 섬유인발 (fiber pullout), 섬유파괴 (fiber fracture)를 포함한다 (Kim et al., 2012; Bentur and Mindess, 1990; Shannag et al., 1997; Park et al., 2008). 보강섬유와 콘크리트의 부착특성을 향상시키는 방법은 섬유의 형상을 변화시키는 방법과 광물질 혼화재 등을 적용하여 보강섬유와 콘크리트의 계면을 강화시키는 방법, 보강섬유의 표면을 친수성재료로 코팅하여 화학적 부착능력을 향상 시키는 것이다 (Jung, 2012; Mobasher and Li, 1996; Naaman and Najm, 1991; Singha et al, 2004). 본 연구에서는 이와 같은 방법 중 보강섬유와 콘크리트 사이의 접촉계면을 강화시키는 방법을 적용하고자 한다. 접촉계면을 강화시키는 재료로는 나노재료 중 나노클레이를 적용하고자 한다. 나노클레이는 마그네슘, 알루미늄, 실리콘염산층으로 적층된 것이다. 하나의 마그네슘, 알루미늄, 실리콘 염산 층에 대해서, 길이와 넓이가 수십~수백 나노미터이고 두께는 1 나노미터이다

* 공주대학교 일반대학원 농공학과

** 공주대학교 지역건설공학과

† Corresponding author Tel.: +82-41-330-1266

Fax: +82-41-330-1269

E-mail: cgpark@kongju.ac.kr

2013년 4월 18일 투고

2013년 5월 10일 심사완료

2013년 5월 13일 게재확정

(Paola et al., 2012; Aly et al., 2011; Morsy et al., 2011). 나노클레이는 분산력이 높아 극히 소량만 첨가 하여도 강도, 강도, 열안정성 등이 우수하다. 또한 현재 주로 나노클레이는 안정성, 난연성, 위생적, 항균성 등의 기능을 갖는 첨가제와 함께 혼합하여 일반적으로 복합재료에 적용되어 기능성을 확보해 왔다 (Paola et al., 2012; Aly et al., 2011). 그러나 분말도가 높아 배합수를 흡수하기 때문에 유동성이 감소하여 작업성을 악화시킬 수 있다. 따라서 유동화제 등 혼화제를 적용하지 않고 성능을 발휘할 수 있는 치환율을 결정하는 연구가 필요하다. 이와 같은 연구는 향후 항균성, 내화성 등 을 갖는 기능성 콘크리트를 제조하기위한 기초 연구가 될 수 있다. 특히, 농업시설물인 축사 등과 농촌주택에 보다 향상된 기능성을 가지는 콘크리트로서 활용이 가능하다. 본 연구에서는 농촌시설물의 기능성을 확보할 수 있는 기능성 섬유보강 콘크리트의 개발이라는 목표를 가지고 섬유보강 콘크리트에 유동화제 등 화학혼화제를 적용하지 않는 범위에서 나노클레이의 적용가능한 범위를 평가하였다. 이를 위하여 섬유보강 콘크리트의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 보강섬유의 부착특성을 나노클레이의 치환율에 따라 평가하였다.

II. 사용재료 및 방법

1. 사용재료

가. 시멘트 및 잔골재

본 연구에서는 국내 S사의 밀도 3.14 g/cm^3 의 1종 보통 포틀랜드 시멘트 및 밀도 2.61 g/cm^3 의 잔골재를 사용하였다. 잔골재의 밀도는 2.60 g/cm^3 이며 조립률은 2.99의 강사로 물리적 특성은 Table 1과 같다.

나. 나노클레이

본 연구에서 사용한 나노클레이는 몬모릴로나이트 (Montmorillonite)이며, 고무 및 플라스틱 제품에 성능을 향상시키기 위하여 적용되어 왔다. 본 연구에서는 나노클레이를 콘크리트에 적용하기 위하여 기초 연구를 실시하였으며 사용한 나노클레이의 특성은 Table 2와 같다.

Table 1 Physical properties of fine aggregate

Density (g/cm^3)	Absorption(%)	F.M
2.60	0.67	2.99

Table 2 Properties of nano clay

Moisture (%)	Dry particle size (μm)	Density (g/cm^3)	X-ray results (nm)
< 3	< 10	1.98	1.85

다. 보강섬유

보강강섬유로 본 연구에서는 섬유 길이 30 mm, 직경 1 mm의 매크로 합성섬유를 적용하였으며, 보강섬유의 형상과 특성은 Fig. 1 및 Table 3과 같다.

2. 배합설계

본 연구에서 사용된 시멘트 모르타르 배합은 Table 4와 같다.

Fig. 1 SEM investigation of macro synthetic fiber

Table 3 Properties of waste vinyl fiber

Elastic modulus (GPa)	Density (g/cm^3)	Fiber length (mm)	Fiber diameter (mm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)	Surface
10	0.91	30	1	30	550	Hydrophilic

Table 4 Mix proportions of cement mortar

No. of mix	W/B* (%)	Unit weight (kg/m^3)			
		Cement	Water	Fine aggregate	Nano clay
No. 1	0.5	679	340	1154	0
		672.2			6.8
		665.4			13.6
		658.6			20.4
		651.8			27.2
		645			34
No. 2	0.4	907	363	907	0
		897.9			9.1
		888.9			18.1
		879.8			27.2
		870.7			36.3
		861.6			45.4

* B: binder (cement + nano clay)

나노클레이의 치환율은 시멘트 중량의 0, 1, 2, 3, 4 및 5 %로 하여 부착특성을 평가하였다. 배합은 2가지 종류의 배합을 모두 고강도배합으로 실시하여 고강도 범위에서 나노클레이의 치환율에 따른 보강섬유의 인발특성을 평가하였다.

3. 시험방법

가. 압축강도

나노클레이 치환율에 따른 압축강도 특성을 평가하기 위하여 KSL 5105에 따른 50 mm×50 mm×50 mm의 입방체 공시체를 6개 제작하여 재령 28일 후 압축강도 시험을 실시하였다.

나. 휨강도

나노클레이 치환율에 따른 휨강도 특성을 평가하기 위하여 KSL ISO R 679에 따른 40 mm×40 mm×160 mm의 각주형 공시체를 6개 제작하여 재령 28일 후 휨강도 시험을 실시하였다.

다. 부착특성

나노클레이 치환율에 따른 시멘트 모르타르와 보강섬유의 부착거동을 평가하기 위하여 JCI SF-8에 따른 Dog-bone shape 몰드를 제작하였다 (Park and Lee, 2012; Kim et al., 2012). Fig. 2와 같이 Dog-bone shape 공시체를 두 부분으로 분할한 후 중앙에 매크로 합성섬유를 정착시켰다. 시멘트 모르타르에 묻힌 섬유의 길이 (embedment length + anchored length)는 29 mm이다. 부착시험시 섬유의 변위는 미끄러짐과 섬유의 신장에 의한 변위로 구분하여야 하나 JCI SF-8의 규정에는 신장과 미끄러짐을 구분하지 않고 이를 포함한 변위를 측정하는 방법을 제시하고 있다. 부착시험 공시체는 제작 후 23±2 °C 및 상대 습도 50±2 %의 범위에서 24시간 동안 초기 양생을 실시 한 후 탈형하여 23±2 °C의 물속에서 시험 전까지 습윤양생을 실시하였다. 시험은 재령 28일간의 양생 후에 변위 제어방식의 UTM에 설치 한 후 0.4 mm/min의 하중재하속도로 시험을 실시하였다. 본 연구에서는 부착시험용 공시체를 6개씩 제작하여 실험한 평균값으로 부착강도를 결정하였으며 부착강도는 다음과 같은 식 (1)로 계산하였다 (Bentur and Mindess, 1990).

$$\tau_{\max} = \frac{P_{\max}}{\pi DL} \quad (1)$$

여기서, $\tau_{\max}$: 최대 부착강도

$P_{\max}$: 최대부착하중

D : 섬유의 직경 (1 mm)

L : 정착 길이 (15 mm)

Fig. 2 Arrangement of the partitioning board and fibers, and setting in the mold (unit: mm)

섬유보강 콘크리트에서 보강섬유는 균열 발생 후 인장응력의 지속적인 전달을 통하여 균열의 성장을 억제하는 동시에 섬유가 콘크리트로부터 인발되면서 취성 파괴를 방지하는 역할을 한다 (Park and Lee, 2012; Bentur and Mindess, 1990). 계면인성은 균열발생 후 거동을 나타내는 중요한 인자로 계면인성이 클수록 콘크리트의 연성 거동 확보에 유리하다. 일반적으로 계면인성은 섬유의 인발과정에서 소비되는 역학적 에너지로 정의될 수 있으며, 인발거동 곡선 아래면적으로 구할 수 있다 (Park and Lee, 2012; Bentur and Mindess, 1990). 본 연구에서는 계면인성을 변위 10mm까지의 곡선 아래면적으로 계산하였다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 압축강도 및 휨강도

Fig. 3은 압축강도 시험결과를 나타낸다. 두 배합 모두 압축강도 40 MPa 이상의 고강도를 나타내었다. Mix No. 1은 나노클레이의 치환율이 3 %까지는 압축강도가 증가하다가 4 % 이상이 되면서 감소하는 결과를 나타냈으며, Mix No. 2는 나노클레이 치환율 2 %까지는 증가하다가 3 % 이상에서는 감소하는 결과를 보여주었다. 압축강도시험결과를 살펴보면 Mix No. 1 배합은 나노클레이 치환율이 0, 1, 2, 3, 4 및 5 %로 증가하면서 압축강도는 48.2, 50.9, 55.3, 58.9, 53.9 및 49.1 MPa를 나타내었다. Mix No. 2는 나노클레이 치환율이 0, 1, 2, 3, 4 및 5 %로 증가하면서 압축강도는 52.6, 60.6, 72.5, 65.5, 62.1 및 56.2 MPa를 각각 보여주었다. 나노클레이의 첨가율이 증가하면 비표

면적이 큰 나노클레이가 배합수를 흡착하여 유동성이 감소한다. 유동성이 감소하면 다짐 등이 어려워져 압축강도가 감소한다. 본 연구에서는 물-시멘트비가 큰 Mix No.1에서는 나노클레이 치환율 3 %까지 압축강도가 증가하지만 물-시멘트비가 작은 Mix No. 2배합에서는 2 %까지 증가하고 3 %에서는 감소하는 결과를 나타냈는데 이와 같은 결과는 유동성의 감소로 인한 다짐의 불충분으로 나타나는 결과이다.

나노클레이 첨가율에 따른 휨강도 시험결과는 Fig. 4와 같다. 나노클레이 치환율이 0, 1, 2, 3, 4 및 5 %일 때 Mix No. 1은 각각 7.01, 8.02, 8.25, 9.62, 7.31 및 6.99 MPa를 나타내었고, Mix No. 2는 각각 8.26, 9.27, 9.90, 9.81, 9.57 및 8.41 MPa를 보여주었다. 휨강도는 Mix No. 1은 나노클레이 치환율 3 %까지 증가하였고, Mix No. 2는 2 %까지 증가하였다. 나노클레이 치환율은 시멘트 모르타르의 휨강도는 증가시키지만 배합수를 많이 흡착하여 유동성의 감소로 다짐이 어려워 압축강도와 동일한 경향을 나타내었다.

Fig. 3 Compressive strength of cement mortar with nano clay contents

Fig. 4 Flexural strength of cement mortar with nano clay contents

3. 부착성능

가. 인발거동

Fig. 5는 나노클레이 치환율에 따른 부착하중과 변위와의 관계를 나타낸 것이다. 일반적으로 시멘트 모르타르와 보강섬유의 부착거동은 균열발생 전 거동 구간 (precracked zone)과 시멘트 모르타르와 보강섬유의 계면 분리구간 (debonded zone)으로 나눌 수 있다. 균열발생 전 거동은 부착하중에 영향을 미치고 계면 분리구간은 계면인성에 영향을 미친다. 본 연구에서도 균열발생 전 거동구간과 계면분리 구간으로 부착하중-변위관계를 보여주고 있다. 균열발생 전 거동에서 최고부착하중은 시멘트 모르타르의 나노클레이의 치환율이 Mix No. 1은 3 %에서 가장 크게 나타났고, Mix No. 2에서는 나노클레이 치환율 2 %에서 가장 크게 나타났다. 또한 최고부착하중에 도달 한 후 하중이 급격하게 감소 한 후 일정한 하중에서 매크로 합성섬유가 인발되면서 하중이 서서히 감소하는 결과를 보여주고 있다. 최고부착하중까지는 변위가 크게 나타나지 않으면서 하중이 급격하게 증가하는 결과를 보여주고 있다. 최고부착하중 후 부착하중 감소는 Mix

(a) Mix No. 1

(b) Mix No. 2

Fig. 5 Bond behavior of macro synthetic fiber embedded in cement mortar with nano clay contents

No. 1 보다는 Mix No. 2가 크게 나타났다. 최고부착하중의 크면 균열 발생 후 하중의 감소도 크다는 것을 알 수 있다. 또한 최고부착하중은 시멘트 모르타르의 압축 및 휨강도와 유사한 결과를 보여주고 있다. 따라서 최고부착하중은 시멘트 모르타르의 압축강도에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

나. 부착강도 및 계면인성

나노클레이 치환율에 따른 부착강도 시험결과는 Fig. 6과 같다. 부착강도 시험결과 나노클레이의 치환율이 0, 1, 2, 3, 4 및 5 %로 증가함에 따라 Mix No. 1의 부착강도는 0.39, 0.51, 0.74, 1.33, 0.87 및 0.63 MPa를 나타냈으며, Mix No. 2의 부착강도는 0.55, 0.94, 1.62, 1.44, 1.21 및 0.76 MPa를 보여주었다. 나노클레이는 배합에 따라 다르지만 섬유와 시멘트 모르타르의

Fig. 6 Bond strength of macro synthetic fiber in cement mortar with nano clay contents

Fig. 7 Interface toughness of macro synthetic fiber in mortar with nano clay contents

부착강도를 증가시키는데 효과가 있는 결과를 나타냈다. 부착강도의 증가경향은 나노클레이 치환율의 증가에 따른 유동성 감소가 영향을 미치는 것으로 보인다. 즉 유동성이 좋아 공시체 제작시 다짐이 잘되면 이에 따라 부착강도가 증가하지만 유동성이 거의 없게 되면 다짐 등이 어려워 보강섬유와 모르타르의 계면에 공극이 발생하여 부착강도가 감소하는 결과가 나타났다. 따라서 물-시멘트비가 작은 Mix No. 2는 3 %부터 부착강도의 감

(a) Compressive and bond strength

(b) Flexural strength and bond strength

Fig. 8 Relationship strength and bond strength of macro synthetic fiber in mortar with nano clay contents

소가 나타나지만 물-시멘트비가 상대적으로 큰 Mix No. 1의 배합에서는 4 %부터 부착강도의 감소가 나타났다.

나노클레이 치환율에 따른 계면인성 시험결과는 Fig. 7과 같다. 나노클레이 치환율이 0, 1, 2, 3, 4, 및 5 %로 증가함에 따라 Mix No. 1의 계면인성은 각각 30.55, 44.79, 106.25, 127.91, 59.39 및 47.94 N-mm의 값을 나타내었다. 또한 Mix No. 2의

계면인성은 각각 77.86, 133.79, 183.16, 158.64, 124.94 및 91.66 N-mm를 보여주었다. 이와 같은 결과는 나노클레이 치환율이 증가하면 시멘트 모르타르의 유동성을 감소시켜 부착시험 공시체의 제작이 어렵고, 다짐이 불충분하여 매크로 합성섬유와 시멘트 모르타르사이의 부착계면에 공극이 생기는 등의 문제가 발생하기 때문에 계면인성은 감소하는 결과가 나타났다. 이와 같은 결과는 부착강도 시험결과와 동일한 결과이다.

4. 강도와 부착성능과의 관계

나노클레이 치환율에 따른 압축강도 및 휨강도와 부착강도와 의 관계는 Fig. 8 및 9와 같다. 압축강도 및 휨강도는 부착강도 및 계면인성 시험결과와 동일한 경향을 보여주고 있다. 즉 강도가 증가하면 부착강도와 계면인성도 같이 증가하고, 압축강도와 휨강도가 감소하면 부착강도와 계면인성도 같이 감소하는 결과를 보여주었다. 이와 같은 결과는 강도가 증가하면 매크로 합성 섬유와 시멘트 모르타르의 계면을 강화하여 부착강도 및 계면인성이 증가하고 강도가 감소하면 부착계면이 약화되어 부착강도 및 계면인성이 감소하는 것이다. 나노클레이가 첨가되면 시멘트 모르타르와 매크로 합성섬유의 계면에 영향을 미쳐 부착강도 및 계면인성에 영향을 미치는 것을 보여주는 결과이다.

5. 상대부착특성

본 연구에서는 강도 증가 또는 감소에 영향을 제외하고 부착 강도에 미치는 나노클레이의 효과를 평가하기 위하여 상대부착 강도를 분석하였다. 상대부착강도는 식 (2)로 결정하였다 (Jung et al., 2013; Kim et al., 2012)).

$$\tau_R = \frac{\tau_{\max}}{\sqrt{f_{ck}}} \quad (2)$$

여기서, τ_R : 상대부착강도

$\tau_{\max}$: 최대부착강도

f_{ck} : 압축강도를 나타낸다.

상대부착강도는 Fig. 10과 같으며 Mix No. 1은 나노클레이의 치환율 3 %까지 상대부착강도가 증가하였고, Mix No. 2는 나노클레이 치환율 2 %까지 상대부착강도가 증가하였다. 따라서 나노클레이 치환율은 강도의 증가와 상관없이 부착강도가 나노클레이 치환율에 Mix No. 1 및 2 모두 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다.

(a) Compressive and Bond strength

(b) Flexural strength and bond strength

Fig. 9 Relationship strength and interface toughness of macro synthetic fiber in mortar with nano clay contents

Fig. 10 Relationship strength and interface toughness of macro synthetic fiber in mortar with nano clay contents

6. 미세구조분석

본 연구에서는 부착시험 후 섬유 표면을 관찰하여 섬유와 시멘트 모르타르의 마찰력에 따른 굽힘 현상을 관찰하였다. Fig. 11~12는 나노클레이 치환율에 따른 Mix No. 1 및 2 배합에 정착된 매크로섬유의 부착시험 후 섬유 표면의 SEM 사진을 보여준다. Mix No. 1 및 2 배합 모두에서 나노클레이 치환율이 증가할수록 섬유 표면의 굽힘 현상은 증가하고 있다. 이와 같은 결과는 섬유가 인발될 때 지속적으로 시멘트 매트릭스와 마찰력에 의하여 인발저항력을 갖기 때문이다. 일반적으로 섬유와 모르타르 사이의 마찰력에 의한 섬유 표면의 굽힘현상은 최고인발하중 하중에 도달한 후 발생하는 섬유의 인발 거동에 더 큰 영향을 받는다. 따라서 부착강도와 계면인성이 모두 우수한 나노클레이 치환율에서 굽힘현상도 크게 나타났다. Mix No. 1배합에서는 나노클레이 치환율 3 %까지 굽힘현상이 증가하다가 4 % 이상이 되면 감소하기 시작하였고, Mix No. 2 배합에서는 나노클레이 치

Fig. 11 Microstructure of fiber surface with nano clay contents (Mix No. 1)

Fig. 12 Microstructure of fiber surface with nano clay contents (Mix No. 2)

환율 2 %까지는 증가하다가 3 % 이상이 되면 감소하기 시작하였다. 따라서 나노클레이의 치환율은 보강섬유와 시멘트 모르타르의 부착계면에 영향을 미친다는 것을 섬유표면의 굽힘 현상으로 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 나노클레이 치환율에 따른 시멘트 모르타르에서 보강섬유의 부착거동을 인발시험을 통하여 평가하였다. 보강 섬유로는 매크로 합성섬유를 적용하였으며, 나노클레이의 치환율은 0, 1, 2, 3, 4 및 5 %로 하였다. 인발시험 후 섬유 부착표면의 미세구조관찰을 실시하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 압축 및 휨강도 시험결과 Mix No.1 및 2 배합 모두 고강도 범위의 강도를 나타내었으며, Mix No.1 배합은 나노클레이 치환율 3 %, Mix No. 2 배합은 2 %에서 가장 큰 강도를 나타

내었다.

2. 인발하중과 변위와의 관계 곡선에서는 나노클레이의 치환율에 따라 최고인발하중과 섬유와 시멘트 모르타르의 분리가 발생하는 하중에 영향을 미쳤으며 Mix No. 1 배합에서는 나노클레이 치환율 3 %, Mix No. 2 배합에서는 치환율 2 %에서 가장 우수한 최고인발하중과 섬유와 시멘트 모르타르의 분리가 발생하는 하중이 가장 크게 나타났다.

3. 부착강도 및 계면인성 시험결과 나노클레이의 치환율이 증가할수록 유동성 감소에 따른 성형 및 다짐이 어려워 부착강도 및 계면인성에 영향을 미쳤다. 나노클레이 치환율에 따른 영향은 Mix No. 1은 3 %, Mix No. 2는 2 % 배합까지 부착강도 및 계면인성이 증가하였다.

4. 시멘트 모르타르의 강도에 대한 영향을 제외하고 나노클레이의 치환율이 매크로 합성섬유의 부착특성에 미치는 영향을 평가하고자 상대부착강도를 계산하였다. 상대부착강도 시험결과 나

노클레이의 치환율은 강도의 증감에 관계없이 시멘트 모르타르와 매크로 합성섬유의 부착특성에 영향을 미쳤다.

5. 인발시험 후 섬유의 표면관찰결과 나노클레이의 치환율에 영향을 받아 섬유의 표면에 마찰력에 의한 굽힘 현상이 관찰되었다. 부착강도 및 계면인성이 큰 나노클레이 치환율 일수록 표면에 굽힘 현상이 증가하였다. 따라서 부착성능은 마찰력에 의한 표면굽힘 현상과 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있다.

이 논문은 2010년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (연구과제번호: 2010-0021570)

REFERENCES

1. Aly, M., M. S. J. Hashmi, A. G. Olabi, M. Messeiry, and A.I. Hussain, 2011. Effect of nano clay particles on mechanical, thermal and physical behaviours of waste-glass cement mortars. *Materials Science and Engineering A* 27(15): 7991-7998.
2. Bentur, A. and S. Mindess, 1990. Fibre reinforced cementitious composites. Elsevier Applied Science, London, 1-377.
3. Chan, Y. W. and S. H. Chu, 2004. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research* 34(7): 1167-1172.
4. Jung, J. Y., J. S. Park, and C. G. Park, 2012. Bond properties of structural polypropylene fiber in hybrid nonstructural polypropylene and structural polypropylene fiber-reinforced latex-modified cement-based composites. *Journal of Applied Polymer Science* 127(2): 1221-1227.
5. Kim, D. H., J. W. Lee, and C. G. Park, 2012. Effect of mineral admixture on bond between structural synthetic fiber and latex modified cement mortar under sulfate environments. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 54(5): 25-34 (in Korean).
6. Lee, J. W. and C. G. Park, 2012. Bond properties of structural poly vinyl alcohol fiber in cement based composites with metakaolin and silica fume contents. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 54(5): 9-16 (in Korean).
7. Mobasher, B. and C. Y. Li, 1996. Effect of interfacial properties on the crack propagation in cementitious composites. *Advanced Cement Based Materials* 4(3/4): 93-105.
8. Morsy, M. S., S. H. Alsayed, M. Aqel, 2011. Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar. *Construction and Building Materials* 25(1): 145-149.
9. Naaman, A. E., and H. Najm, 1991. Bond-slip mechanism of steel fibres in concrete. *ACI Materials Journal* 88(2): 135-145.
10. Park, C. G. and J. W. Lee, 2013. Effect of nanosilica and silica fume content on the bond properties of macro-synthetic fibre in cement-based composites. *Magazine of Concrete Research* 65(3): 148-157.
11. Park, C. G. and J. H. Lee, 2012. Effect of styrene butadiene latex polymer contents on the bond properties of macro polypropylene fiber in polymer-modified cement-based composites. *Journal of applied polymer science* 126(suppl2): E330-E337.
12. Park, C. G. and J. P. Won, 2008. Flexural performance and fire resistance of polyolefin based structural synthetic fiber reinforced concrete. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 50(1): 49-57 (in Korean).
13. Paola Scarfato, Luciano Di Maio, Maria Letizia Fariello, Paola Russo, Loredana Incarnato, 2012. Preparation and evaluation of polymer/clay nanocomposite surface treatments for concrete durability enhancement. *Cement and Concrete Composites* 34(3): 297-305.
14. Shannag, M. J., R. Brinker, and W. Hansen, 1997. Pullout behavior of steel fibers from cement-based composites. *Cement and Concrete Research* 27(6): 925-936.
15. Singha, S., A. Shuklaa, and R. Brown, 2004. Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix. *Cement and Concrete Research* 34(10): 1919-1925.