

정착판 GFRP 근(Rebar)의 모르타르 인발거동에 관한 시험연구

지효선^{1*}

¹대원대학교 철도건설공학과

An Experimental Study on the Pull-Out Behaviors of Headed GFRP Rebar in Mortar

Hyo-Seon Ji^{1*}

¹Department of Civil and Railroad Engineering, Daewon University College

요약 본 논문은 모르타르에 근입되어 인발하중을 받는 정착판 GFRP 근의 인발거동을 기술하고 있다. 정착판 GFRP 근의 모르타르 시험체를 5개 제작하여 인발시험을 수행하였다. 시험 결과를 검증하기 위해 ANSYS 상용프로그램을 이용한 유한요소해석을 수행하였으며 시험결과와 비교되었다. 시험결과 모르타르에 매입된 정착판 GFRP 근의 파열 파괴강도식은 45도 콘(Cone)파괴 이론 보다는 CCD(Concrete Capacity Design)파괴이론을 적용하는 것이 타당한 것으로 나타났다.

Abstract This paper presents the pull-out behaviors of headed glass fiber reinforced polymer (GFRP) rebar embedded in mortar under tension loading. Five specimens with headed GFRP rebars that were anchored in the center of mortar bases were constructed and the pull-out test was conducted. To verify the test results, the finite element analysis was conducted and the results were compared with the FE analysis using ANSYS software package. Based on the test results it was indicated that the CCD(concrete capacity design) failure theory should be adopted and not to use the 45o cone failure theory as the breakout capacity in the headed GFRP rebar embedded in mortar.

Key Words : Headed GFRP rebar, Pull-out behavior, FE analysis, ANSYS, CCD failure theory

1. 서론

앵커(Anchor) 공법은 가시설 흙막이 벽체, 사면보강 및 지반 굴착시 가설 토목구조물에 작용하는 외부 하중에 저항하기 위해 가설 구조물과 지반과의 사이에 앵커를 정착시키고 프리스트레스(Prestress)를 가함으로서 구조물의 안전성을 도모하는 것으로서 토목구조물의 안전성을 확보하기 위한 지반보강공법으로 많이 사용되고 있다. 국내에서 앵커에 대한 연구는 터널과 암 사면 등의 안정을 위한 연구가 주로 수행되어 왔다[1]. 대부분 절취사면은 대부분 중량이 많이 나가는 콘크리트 지압판을 이용하는 지압형 앵커 등으로 가설되고 있어, 공사 특성상 각종 가설용 중장비 동원 등이 어려움이 있으며, 주변 녹색 환경과 어울리지 않아 경관을 해치고 있어 구조 경

량화 및 주변 경관과의 조화가 반드시 필요한 실정이다. 또한 주 보강재로서 철근을 사용하고 있어 지중 지하수에 장기간 노출되어 있어 발생하는 부식에 의한 지반환경 오염문제 등이 지적되고 있는 실정이다. 본 문제에 대한 해결 방법으로서 경량내부식성고강도 및 내피로 특성이 우수한 FRP(Fiber Reinforced Polymer) 재료를 이용하는 것이다[5]. 본 연구에서는 경량내부식성고강도 및 내피로 특성이 우수한 유리섬유강화폴리머(GFRP) 근 보강재와 격자형상 패널 지압판을 이용한 절취사면 보강 앵커 시스템을 제안하였으며, 기존 강재 보강재와 콘크리트 지압판을 대체하고자 한다. 본 논문에서는 상기 앵커 시스템의 주요 구성요소인 모르타르 속에 근입된 정착판 GFRP 근 보강재에 대한 실제 인발성능시험을 통한 극한 인발력과 파괴 메카니즘에 대한 성능평가 결과를 기술하

*Corresponding Author : Hyo-Seon Ji

Tel: +82-43-649-32667 email: hsjj@mail.daewon.ac.kr

접수일 12년 03월 29일

수정일 12년 05월 08일

개재확정일 12년 06월 07일

는 데 그 목적을 두고 있다. 인발성능시험 결과에 대해 검증을 위해 상용 유한요소프로그램 인 ANSYS [4] 을 이용한 수치해석 결과와 비교 분석을 실시하였다. 그림 1 은 본 연구에서 제안한 정착판 GFRP 보강재와 GFRP 격자형상 패널을 이용한 절취사면 보강 앵커 시스템의 구조형태가 될 것이다.



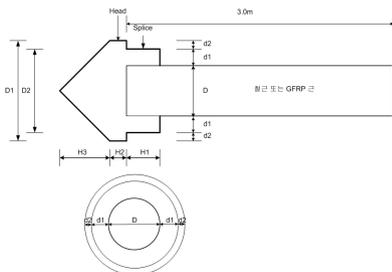
[그림 1] 절취사면 보강 GFRP 패널 앵커 시스템
[Fig. 1] GFRP panel anchor system for cut slope reinforcement

2. GFRP 앵커시스템의 구성

본 연구에서 제시한 GFRP 앵커 시스템은 그라운드 앵커 공법으로서 기존 철근 보강재 대신에 정착판 GFRP 근 보강재와 GFRP 격자형상 패널 지압판 기능을 첨가하여 지압력에 의해 인장력에 저항하는 정착되는 공법이다.

2.1 정착판 GFRP근 보강재의 구조

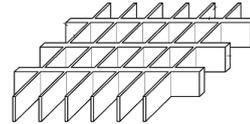
일반적으로 앵커 시스템은 인발력 작용시 앵커 단의 정착판에 의해 흙 주변의 지반을 밀어냄으로써 발생하는 흙 주변 지반의 전단강도 증가와 앵커 주변 지반 접촉면 마찰저항 증가 및 앵커 지반 내부로 정착에 의해서 발생하는 지압력에 의해 인발 저항력에 대해서 저항하는 구조로 되어 있다[1]. 이러한 본 연구에서 제시한 정착판 GFRP 근 보강재는 인발저항력에 효과적으로 저항하는 구조로서 그림 2과 같이 나타낸 것이다.



[그림 2] 정착판 GFRP 보강재의 구조도
[Fig. 2] Structure of headed GFRP reinforcement

2.2 GFRP 지압판의 구조

현장 지반에 천공을 실시하고 GFRP 앵커시스템 보강재를 삽입한 후 그라우팅하여 경화한 상태에서 소요되는 긴장력을 가한 후에 GFRP 앵커시스템 두부 장치를 이용한 지압판에 정착시킨다. 아래 그림 3은 GFRP 앵커시스템 지압판 제작에 사용되는 격자 패널의 구조를 나타낸 것이다



[그림 3] GFRP 격자 패널 지압판의 구조도
[Fig. 3] Structure of GFRP grid panel cover

2.3 정착판 GFRP 보강재의 제작

정착판 GFRP 근 보강재는 유리섬유 함유량이 70%이며, 인발공법(pultrusion)과 수적층 작업으로 제작하였다. 모르타르와의 부착력을 증대시키기 위해 규사 레진(에폭시)을 GFRP 근 표면에 2회에 걸쳐 도포하여 보강재 제작을 완료하였다. 그림 4는 제작된 정착판 GFRP 근 보강재이다.



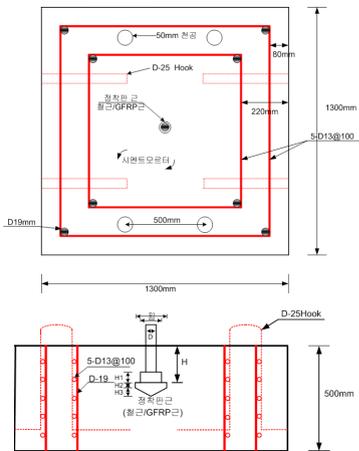
[그림 4] 정착판 GFRP근 보강재
[Fig. 4] Headed GFRP rebar

3. 인발성능시험

지반의 안정성이 우세한 경우 일반적으로 콘(Cone) 또는 썰기(Wedge)로 형상화된 파괴 메카니즘을 나타내고 있다[1]. 본 논문에서 제안한 GFRP 앵커시스템 구조의 극한 인발력 및 파괴 메카니즘 거동을 확인하기 위하여 모르타르에 근입된 정착판 GFRP 근 보강재에 대한 실내 인발 성능시험을 실시하였다. 모르타르 블록에 정착판 GFRP 근 보강재 매입길이에 따라시험체를 제작하여 인발시험을 수행하였다. 인발시험결과를 토대로 현 콘크리트 설계기준[2]에서 제시된 파열파괴 강도식의 적용성 여부를 평가하고자 한다.

3.1 정착판 GFRP 근 인발 시험체 제원

본 연구에서 고려한 시멘트 모르타르 설계기준강도는 $f_{ck} = 20MPa$ 이고, 사용된 정착판 GFRP 근은 직경 29mm에 대한 항복강도는 $f_y = 517MPa$ 이며, 이때 앵커의 항복하중은 $T_u = 332kN$ 이다. 모르타르 파괴 이전에 정착판 GFRP 근이 항복이 발생하지 않도록 고려하였다. 그림 5는 인발시험을 위한 정착판 GFRP 근의 모르타르 시험체 평면도 및 단면도이다.



[그림 5] 시험체 평면도 및 단면도
[Fig. 5] Plan and cross section view of specimen

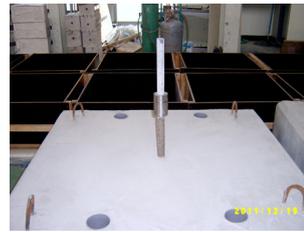
3.2 정착판 GFRP 근 인발 시험체 제작

콘크리트용 앵커볼트의 시험방법은 ASTM E488-96 (Reap-Proved 2003)[3] 과 국내 콘크리트 설계기준 콘크리트 앵커편[2]에서 규정하고 있는데, 본 규정에서는 콘크리트의 파괴에 의한 내하력을 평가하고자 할 경우 최소 5개의 시험체에 대한 시험을 요구하고 있다[2]. 따라서 본 연구에서는 정착판 GFRP 근 인발 시험체 제원에 따라 시험체 5개를 그림 6과 같이 제작하였다. 여기서 정착판 GFRP 근이 모르타르속에 매입되는 깊이를 370mm(No.1), 340mm(No.2), 310mm(No.3), 280mm(No.4), 250mm(No.5)로 하여 5개 제작하였다. 이 때 모르타르 예상 파괴하중은 332 kN이 된다. 시험체 제작시 사용된 시멘트 모르타르 압축강도는 $22MPa$ (제조사 제공)이고, 여기서 매입깊이는 다음 정착 응력식 (1)을 이용하여 구하였다.

$$T_b = \frac{P}{A_b} \quad (1)$$

여기서, T_b =접착응력, P =인발하중, $A_b = \pi \cdot d_b \cdot L_b$,

d_b = GFRP 근 직경, L_b =매입길이. 본 연구에서 사용된 GFRP 근의 제조회사에서 제시된 GFRP 근의 직경이 29mm 인 경우 항복강도 $f_y = 517MPa$, $T_u = 332kN$ 으로 나타났다. 정착판GFRP근의 인발거동과 인발저항력을 확인하기 위한 인장력 가력시 가력장치와 정착판 GFRP 근 연결 부위의 미끄럼 여부를 확인하기 위해 수행된 연구문헌[6, 7]을 참고하여 우선 간이 유압시험기를 이용하여 Slip 정도를 파악하였으며, 그 결과에 의거 GFRP 근의 인장 그림을 위한 최종 웨지(Wedge)길이를 확보할 수 있는 웨지형태를 설계 제작하였다. 그림6과 같이 웨지형태의 인장그림으로 구축된 정착판 GFRP 근의 모르타르 블록 시험체를 제작하였다.



[그림 6] 웨지구속 GFRP 근의 모르타르블록 시험체
[Fig. 6] GFRP rebar with wedge in mortar block specimen

3.3 시험 방법

시험체와 지지치구의 구축 작업으로서 4개의 구멍을 통해 강봉으로 모르타르 시험체와 강결하였으며, 그리고 500kN의 액추레이터를 이용하여 인장력을 가력하기 위하여 그림 7과 같이 인장그립 치구를 이용하여 가력장치를 제작하여 시험체에 매입된 웨지로 구축된 GFRP 근을 연결하였다.



[그림 7] 인장그립용 웨지 구축 정착판 GFRP 근
[Fig. 7] Headed GFRP rebar reinforced by wedge

그림 8은 실제 인발시험을 위한 전경을 보여 주고 있다. 인장하중 평가는 시험체 상부 표면에 3개의 변위계 LVDT를 설치하여 슬립(Slip)을 측정하면서 인발하중을

평가하였다. 정착관 앵커의 내하력 평가 시험에서 가력속도는 약 1mm/min의 속도로 변위제어방식으로 가력하였다. 인발 시험시 하중은 50kN 씩 증가할 때마다 정지한 후 시험체 모르타르 상부의 균열 여부를 파악하고 다시 가력하는 절차로 중국 상태까지 진행하였다.

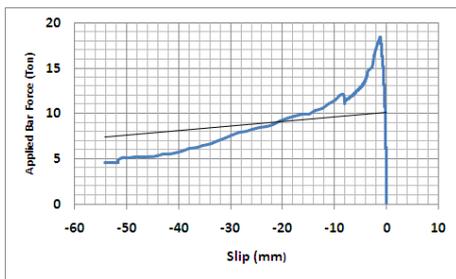


[그림 8] 인발시험 전경
[Fig. 8] View of pull-out test

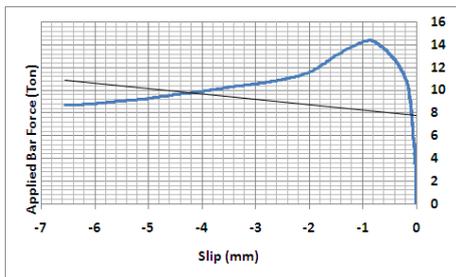
4. 시험결과

4.1 하중-변위선도

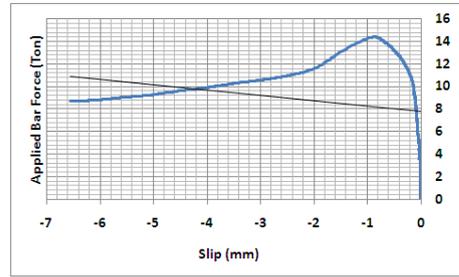
인발 시험체 No.1에서 No.5까지에 대한 하중-변위 곡선을 그림 9에서 13까지 나타내었다.



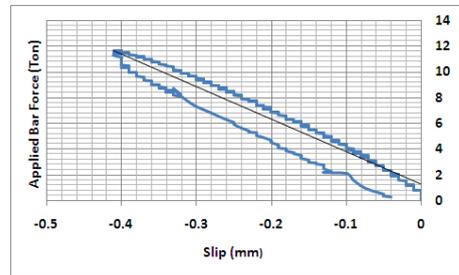
[그림 9] 하중-변위곡선(No.1)
[Fig. 9] Load-displacement curve(No.1)



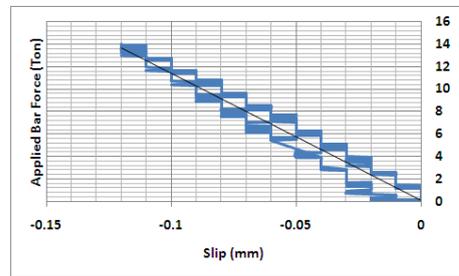
[그림 10] 하중-변위곡선(No.2)
[Fig. 10] Load-displacement curve(No.2)



[그림 11] 하중-변위곡선(No.3)
[Fig. 11] Load-displacement curve(No.3)



[그림 12] 하중-변위곡선(No.4)
[Fig. 12] Load-displacement curve(No.4)



[그림 13] 하중-변위곡선(No.5)
[Fig. 13] Load-displacement curve(No.5)

그리고 5개 시험체에 대한 최대 인발하중 및 해당 변위(Slip)는 표 1과 같다.

[표 1] 인발시험 결과
[Table 1] Pull-out test results

시험체명	최대하중 (kN)	변위(mm)
No.1	180.9	1.41
No.2	143.9	0.87
No.3	137.9	0.69
No.4	116.2	0.40
No.5	139.9	0.12

4.2 파괴 형상

최대 인발하중 도달 시 상부 표면에서 일부 균열만이 발견되었는데, 파괴 콘의 형상 분석을 위해 최대하중 도달 이후에도 계속 긴장력을 가력하였다. 그림 14는 No.1 시험체의 파괴 형상을 나타내고 있다.



[그림 14] 인발시험 종료 후 균열 및 파괴 형상
[Fig. 14] Crack and failure shape after pull-out test

한편, 그림 15는 No.1 시험체에서 측정된 동서 및 남북 방향 파괴 단면의 예이며, 다른 시험체에 대해서도 파괴 콘의 깊이를 동서 및 남북 방향으로 측정하였다. 파괴 각도는 No.1 시험체에서 22°의 각도를 보였다. 다른 시험체에서도 이와 비슷한 각도를 보이고 있다. 이는 CCD(Concrete Capacity Design)이론의 35° 각도보다 다소 완만한 기울기를 보였으며, 파괴면의 기울기 비는 CCD 이론의 1:1.5 보다 조금 완만한 1:2의 기울기에 해당한다.



[그림 15] 인발시험 종료 후 파괴 형상
[Fig. 15] Failure shape after pull-out test

5. ANSYS 유한요소해석모델

본 장에서는 상기 3장에서 실시한 모르타르속에 매입된 정착판 GFRP 근의 인발성능 시험 결과를 수치해석값과 비교하기 위해서 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS[4]을 사용하였다. 해석은 정착판 GFRP 근의 매입깊이 변화에 대한 내용을 수치 해석적으로 검증하였다.

여기서 모르타르 속에 GFRP 근 매입 길이는 시험체 상부표면에서 370mm(No.1), 340mm(No.2), 310mm(No.3), 280mm(No.4), 250mm(No.5) 인 5개 시험체인 경우를 적용하였으며, 수치해석을 위해서 사용된 정착판 GFRP 근에 대한 제원과 GFRP에 대한 재료적 성질은 표 2와 같다. 시험체 모르타르의 재료적인 성질로서 설계기준강도, 탄성계수 및 포아송 비는 다음 값을 사용하였다: $f_{ck} = 22MPa$, $E_c = 25.5GPa$, $\nu_c = 0.15$. GFRP의 물성은 섬유 분포나 배열에 따라 크게 좌우된다. 재료 물성을 추정하는 방법으로 많이 사용되는 재료역학적인 방법인 혼합법을 이용하였으면 사용된 식은 다음과 같다.

$$V_f = \frac{w_f}{\rho_f} \left\{ \frac{w_f + w_m}{\rho_f + \rho_m} \right\}, \quad V_m = 1 - V_f \quad (2)$$

여기서, w_f , w_m 은 섬유와 수지의 무게비를 나타내며, ρ_f , ρ_m 은 비중을 나타낸다. 혼합법을 이용하여 계산되는 Lamina의 재료물성은 식 (3)로 구할 수 있다.

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m, \quad E_2 = \frac{1}{\left\{ \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \right\}} \quad (3a)$$

$$G_{12} = \frac{1}{\left\{ \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \right\}}, \quad \nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (3c)$$

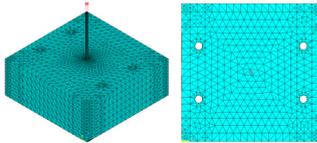
윗 식에서, E_1 , E_2 는 각각 Lamina의 섬유방향 및 섬유직각방향의 탄성계수를 말하며 G_{12} , ν_{12} 는 lamina의 면내 전단탄성계수 및 프와송 비를 나타낸다.

[표 2] 수치해석에 사용된 제원 및 재료적 성질
[Table 2] Dimension and materials properties for numerical analysis

		GFRP bar	Head	Splice
크기	직경	29mm	55mm	43mm
재료	강도	$f_y = 33GPa$	$f_y = 33GPa$	$f_y = 33GPa$
	탄성계수	20GPa	20GPa	20GPa

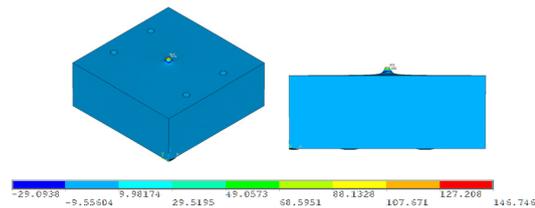
치수 변수	D	D1	D2	H1	H2	H3	d 1	d 2	H
크기	29 mm	55 mm	43 mm	33 mm	12 mm	36 mm	10 mm	5 mm	변수

표 2에서 나타난 보강재 치수 변수는 상기 그림 2에 표시된 정착판 GFRP 보강재의 치수 변수명과 같다. 유한요소 범용 해석 프로그램인 ANSYS 7.0[4]을 이용하여 모르타르속에 매입된 정착판 GFRP 근의 시험체에 대한 인발저항에 대한 거동을 모사하기 위하여 그림 16과 같이 유한요소 모델링하였다.



[그림 16] 정착판 GFRP 근 FE 모델
[Fig. 16] FE model of headed GFRP rebar

모르타르에 적용한 요소는 Solid 요소이며 정착판 GFRP 근은 보 요소이다. 보 요소는 GFRP 근의 복합적층 특성을 잘 반영해주는 요소이다. 경계조건은 4변이 고정지지이다. 모르타르 속에 GFRP Rebar 매입 길이는 시험체 상부표면에서 370mm, 340mm, 310mm, 280mm, 250mm인 5개 시험체에 대한 해석결과를 하였으며 그중에서 GFRP Rebar 매입 길이 370mm(No.1)인 응력(σ_z)분포도를 다음 그림 17과 같이 나타내었다.



[그림 17] 정착판 GFRP근의 응력분포도($H=370mm$)
[Fig. 17] Stress diagram of headed GFRP rebar ($H=370mm$)

5. 결과 분석

정착판 GFRP 근 보강재 매입깊이를 370mm, 340mm, 310mm, 280mm, 250mm로 변화시켜 인발시험을 수행하였다. 표 1에 나타난 바와 같이 매입깊이가 증가함에 따라 최대하중이 증가하는 것으로 나타났으며 매입깊이가 280mm일 때는 수치해석의 최대하중 이 시험결과와 비교적 잘 일치하였으나 다른 매입깊이에서는 수치해석결과가 시험결과보다 약 38~55% 적게 나타났다. 그러나 본 시험에서 사용된 GFRP 근의 최대인장력이 332kN일 때 최대하중 180.9kN은 매우 적은 것으로 나타났다. 이런

주요원인으로 GFRP 근과 수작업으로 제작한 정착판과의 접착강도 부족으로 인한 것으로 판단된다. 또한, 거동 특성은 22도의 파괴를 보이고 있어 45도의 콘파괴에 못 미치고 있음을 알 수 있었다. 이것은 정착판 GFRP 근이 인발저항력을 증대시키는 효과가 있음을 뜻한다고 볼 수 있다. 그리고 수치 해석결과 모르타르속에 매입 ($H=370mm$)된 GFRP 근의 응력은 14.6 MPa로 분석되고 있다. 최대 접착응력이 11.6 MPa임을 감안할 때 약 25.8% 정도 높게 나타났다. 정착판과 GFRP 근과의 일체 성형이 중요함을 확인할 수 있는 근거가 될 것으로 판단된다. 해석결과 GFRP 근의 매입깊이하고는 큰 영향을 받지 않고 있음을 확인할 수 있었다. 규사레진을 도포한 GFRP 근이 부착력을 증대하고 있지만 영향은 크지 않음을 뜻한다고 볼 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 절취사면 지반보강공법으로 지금까지 사용되는 강재 보강재와 콘크리트 지압판 대신에 정착판 GFRP 보강재와 GFRP 격자형상의 패널 지압판으로 대체하는 앵커시스템을 제안하였다. 그 활용 가능성을 확인하기 위해 본 앵커시스템 주요구성요소인 모르타르에 매입된 정착판 GFRP 근 보강재의 극한인발력과 파괴메카니즘 평가를 위한 인발 성능시험과 시험결과를 검증을 위한 유한요소 해석을 수행하였다. 당초 기대되었던 저항능력보다 적은 하중에서 파괴되었으며, 모르타르에 매입된 GFRP 근 보강재의 거동 특성은 45도의 콘파괴가 아닌 22도 파괴의 양상을 보이고 있다. 일반적인 45도 콘파괴 이론에 의한 파열파괴강도식 적용보다는 CCD(Concrete Capacity Design)이론에 의한 파열파괴강도식을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 적은 하중에 파괴된 원인으로는 GFRP 근과 수작업으로 제작한 정착판과의 접착강도 부족으로 인한 것으로 판단되며, 그 결과 인발저항력이 감소된 것으로 시험을 통해서 확인되었다. 앞으로 개선될 것으로 정착판과 GFRP 근과의 일체 성형이 필요함을 확인할 수 있었다. 본 정착판 GFRP보강재와 지압판을 이용한 앵커시스템 공법은 중량 저감으로 인한 공사 기간과 공사비를 획기적으로 줄일 수 있는 공법으로 설명될 수 있다.

Reference

[1] Byung-Soo Park and Do-Sik Shim, "Numerical Analysis

- for the Pullout Behavior and Failure Mechanism of Ground Anchor", Journal of KSHM, Vol. 10, No. 2, pp. 69~76, 2010.
- [2] KCI, "Concrete Structures Design Criteria Appendix IV Anchoring to Concrete", Korean Concrete Institute, pp.462~494, 2007.
- [3] ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02); Appendix D Anchoring to Concrete, American Concrete Institute, pp.399~426, 2008.
- [4] ANSYS Inc., ANSYS 10.0 documentation, Canonsburg, PA, USA, 2005.
- [5] Burgonyne Chris J., "Advanced Composites in Civil Engineering in Europe", Sructural Engineering International No.4, Reports pp.1~7, 1999.
- [6] Harajli M. and Abounuaj M., "Bond Performance of GFRP Bars in Tension: Experimental Evaluation and Assessment of ACI 440 Guidelines", Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol. 14, No. 6, pp.659~668, 2010.
- [7] Okelo Roman and Yuan Robert L., "Bond Strength of Fiber Reinforced Polymer Rebars in Normal Strength Concrete", Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol. 9, No. 3, pp.203~213, 2005.

지 호 선(Hyo-Seon Ji)

[정회원]



- 1990년 2월 ~ 1997년 3월 : 서울특별시 지하철건설본부 토목감독관
- 1994년 12월 ~ 1995년 6월 : 영국 런던대학교 임페리얼대학(복합재료연구소)객원연구원
- 1997년 8월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2006년 8월 ~ 2007년 7월 : 미국 테네시 주립대학교 토목환경공학과 연구교수
- 1997년 3월 ~ 현재 : 대원대학교 철도건설공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 복합신소재(FRP 재료) 구조 및 교량, 급속시공 교량