수치해석을 통한 앵커의 긴장력과 사면 안전율의 상관관계 도출

Evaluation of Relationship between Tensile Force of Anchor and Safety Factor of Slope through Numerical Analysis

김영상* · 이철주** · 성현종***

Kim, Young Sang · Lee, Cheol-Ju · Sung, Hyun-Jong

Abstract

Main reasons making the slope reinforced with anchors unsafe are rise of ground water table due to heavy rainfall and sudden reduction of initial tensile force due to damage of anchor head. In this research, numerical analysis was carried out to evaluate the safety of slope reinforced by anchors from the monitoring result of tensile force. Limit equilibrium analysis and 3D finite element analysis were carried out to model the sudden reduction of initial tensile force and increase of tensile force due to soil movement, which was caused by rise of ground water table. From the numerical analysis, it was found that the increase of tensile force due to rise of ground water table comes with nonlinear decrease of safety factor and reduction of initial tensile force due to damage of anchor head accompanied with linear decrease of safety factor. From the results, it can be concluded that safety of the slope can be evaluated indirectly by monitoring the tensile force of anchor using FBG sensor embedded tendon.

Key words : Anchor, Reinforcing Force, Monitoring, Safety factor of slope, Numerical analysis

요 지

최근 기후변화로 발생하는 이상강우에 의한 지하수위의 상승은 사면보강을 위해 설치한 앵커의 초기 긴장력의 증가를 유발시킬 수 있다. 한편 사면의 국부적 파괴나 낙석 등으로 인한 앵커 두부(head)의 예기치 못한 손상은 긴장력 상실로 이어져 앵커로 보강된 사면의 안정성을 저하시키는 주된 요인이 될 수 있다. 이와 같은 앵커 긴장력의 변화는 사면의 안정성에 매우 직접적으로 영향을 미치지만 현재의 기술은 앵커 긴장력의 존재 유무만을 간단히 확인하거나 단기간의 긴장력 변화를 측정할 수 있는 기술만이 있을 뿐 영구사면과 같이 장기간 앵커의 긴장력 변화와 사면의 안정성에 대한 직접적이고 효과적인 모니터링 방법은 찾아보기 어렵다. 본 연구에서는 장기간의 앵커 긴장력 모니터링이 가능하도록 개발된 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용하여 사면의 안정성을 직접 평가할 수 있도록 초기 긴장력 감소 및 증가와 사면 안전율의 상관관계에 대하여 수치해석적 검토를 수행하였다. 앵커가 시공되어 있는 실제 사면의 사례에 대한 한계평형해석 및 3차원 유한요소해석을 실시하여 사면에 설치된 앵커의 긴장력 변화와 사면 안전율(factor of safety) 변화에 대한 검토를 수행한 결과, 지하수위 상승으로 인한 앵커 긴장력의 증가는 사면 안전율의 비선형적 감소를 동반하며 일정 수준 이하의 앵커 긴장력 감소는 선형적 사면 안전율 감소를 동반하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 앵커, 긴장력, 모니터링, 사면 안전율, 수치해석

1. 서 론

김재민 등(2007)은 지반구조물이나 교량구조물 등 다양한 토목구조물에 사용되는 7연-강연선을 대상으로 광섬유 센서를 내장하여 변형률 측정이 가능하도록 광섬유 센서 내장형 스마트 텐던(이하 스마트 텐던)을 개발하였다. 일정 간격의 Bragg를 갖는 FBG(Fiber Bragg Grating) 센서를 내장한 스

마트 텐던의 개념도는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서처럼 스마트 텐던은 일반 강연선의 중앙 킹케이블을 중공 강재 튜브($\Phi 5.2$ mm)로 교체한 후 튜브 내부에 광섬유 센서를 삽입하고 접착제(폴리에스터레진+경화제)를 주입하여 케이블과 일체가 되도록 하여 강연선의 변형률을 측정할 수 있는 새로운 개념의 텐던이다(김재민 등, 2007). 김재민 등(2007)과 김영상 등(2008)은 FBG 센서가 삽입되어 접착제로 접착되어 있

*교신저자. 정회원. 전남대학교 해양토목공학과 부교수(Tel: +82-61-659-7248, Fax: +82-61-659-7329, E-mail: geoykskim@jnu.ac.kr)

Corresponding author. Member. Associate Professor, Dept. of Marine and Civil Engineering, Chonnam National University

**강원대학교 토목공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University

***군산대학교 해양토목공학과 박사후 연구원

Post-doctoral researcher, Dept. of Civil Engineering, Kusan National University

Fig. 1. Concept of Smart Tendon

는 중공 강재 튜브에 대한 성능실험을 통해 FBG 센서의 중공 강재 튜브와 일체화 및 센서로서의 기능을 검증하였다. 한편 김영상 등(2009)은 광섬유 센서의 특성상 다중점 측정이 가능하므로 원하는 위치에서 Bragg센서의 변화를 측정하면 앵커의 장력뿐 아니라 앵커의 하중전이 측정도 가능함을 보였으며 성주현 등(2012)은 광섬유 센서 내장형 텐던을 내장한 앵커를 이용하여 실제 사면에서 1년 이상 앵커 긴장력을 측정하고 효과적인 온도보상 방법을 제안하여 스마트 텐던을 이용한 앵커의 장기 긴장력 모니터링이 가능함을 보였다. 이 논문에서는 앵커 두부 또는 정착단의 예기치 않은 움직임으로 인해 앵커에 도입한 초기 긴장력이 감소하는 경우와 강우로 인한 제체 내 토사의 움직임으로 긴장력이 증가하는 경우에 대해 사면 안전율과 긴장력 변화의 상관관계를 수치해석을 통해 밝힘으로써 장래에 스마트 텐던을 내장한 앵커로 보강된 사면의 안정성을 긴장력 모니터링을 통하여 도출할 수 있는지에 대하여 연구하였다.

2. 한계평형해석을 통한 앵커 긴장력 감소와 사면 안전율의 상관관계

2.1 사면안정해석

전남대학교와 (주)한국유지관리는 소방방재청이 지정한 경남 합천지역의 급경사지 위험사면에 대하여 장기간의 앵커 긴장력 모니터링을 수행중이며 이 사면에 대하여 SLOPE/W(2012)를 이용하여 Fig. 2와 같이 건기 시와 우기 시로 구분하여 한계평형해석을 수행하였다. 사면안정해석 시 적용된 지반정수 값은 시추조사 및 실험값을 참조하여 Table 1과 같이 선정하였다. 한편 국토해양부 건설공사 비탈면 설계기준(2011)에 따라 건기시 지하수위는 고려하지 않았으며 우기시 지하수위는 지표면에 위치하는 것으로 가정하였고, 건기시와 우기시의 요구 안전율(F_s)은 각각 $F_s=1.5$ 와 $F_s=1.2$ 를 적용하였다.

건기 시와 우기 시, 보강 전과 후로 구분하여 절취사면에

Fig. 2. Safety Factor of Slope before and after Reinforcing with Anchor

Table 1. Soil Parameters of Each Soil Layer for Slope Analysis

	Unit weight γ (kN/m ³)	Cohesion c (kN/m ²)	Friction angle ϕ (°)
Colluvium	18	0	26
Weathered soil	19	10	30
Weathered rock	21	40	33
Weak rock	22	100	33

Table 2. Change of Factor of Safety Before and After Reinforcing with Anchor

	Dry season	Rainy Season
	Minimum F_s	Minimum F_s
Before reinforcing	1.952	1.039
After reinforcing	2.552	1.432
Required safety factor at dry season $F_s \geq 1.5$, rainy season $F_s \geq 1.2$		

대한 안정해석을 수행한 결과, Fig. 2와 같이 우기 시 보강 전 최소 안전율($F_s=1.039$)이 요구 안전율($F_s=1.2$)을 만족하지 못하여 불안정한 것으로 나타났다. 이에 Fig. 2의 (c), (d)와 같이 활동과괴가 예상되는 2개소에 스마트 텐던을 내장한 그라운드 앵커(초기 긴장력=200 kN)로 보강하기로 계획하고 사면안정 해석을 재수행하였다. 앵커로 보강된 절취사면에 대한 한계평형해석 결과, 보강 전에 예상되었던 활동과괴면의 위치가 이동하고 문제가 되었던 우기 시 최소 안전율($F_s=1.432$)도 요구 안전율을 충분히 만족하는 것으로 나타나 계획대로 스마트 앵커를 시공하였으며 현재 모니터링 중이다. Table 2에 건기 시와 우기 시로 구분하여 앵커 설치 전후의 사면안정 해석에 의한 안전율이 정리되어 있다.

2.2 장력모니터링과 사면 안정성의 상관성 해석결과

지금까지 모든 보강사면의 설계 및 시공, 유지관리는 합천 급경사지 사례와 같이 설계 당시의 지반의 물성치와 설치한 보강재의 긴장력이 영구히 유지된다는 가정 하에서 시행되어 왔다. 물론 일시적인 변화를 확인하기 위하여 앵커 두부에 로드셀을 설치하고 재긴장이 가능하도록 하는 장치가 도입되기도 했지만 이 경우도 도입된 긴장력이 얼마나 손실되었는 가 보다는 긴장력의 유지 유·무만을 판단할 수 있을 뿐이었다. 따라서 만일 합천 현장의 경우도 앵커 두부에 발생하는 약간의 움직임만으로도 앵커의 긴장력이 감소할 경우, 우기 시 급경사지 사면의 안정성을 보장할 수 없게 된다. 이와 같이 지금까지 사면이 초기 상태에서 변화하는 과정을 모니터링 할 수 없었으며 안전율의 감소를 정량적으로 확인할 수 없어 예기치 않은 사면의 붕괴로 인해 인명과 재산의 피해가 발생해 왔었다. 그러나 본 연구에서 도입한 스마트 텐던을 이용한 그라운드 앵커는 지속적인 긴장력 모니터링이 가능하므로 이를 이용한 사면의 안정성에 대한 모니터링 방법을 개발하고자 한다. 다만 대부분의 지반공학자들이 사면의 안정여부를 판단하는 기준으로 안전율을 기본으로 하므로 이 연구에서도 한계평형해석을 이용하여 대상 사면(합천)에 대한 긴장력의 감소와 사면안전율의 변화의 상관성에 대한 수치해석적 상관관계를 도출하였다.

이를 위하여 Fig. 3과 같이 연속적으로 긴장력을 감소시키면서 사면 안정해석을 실시하였다. 그라운드 앵커 들(HTA-1, HTA-2)의 초기 긴장력 합력이 400 kN으로부터 50%로 감소한 200 kN인 경우까지는 안전율의 변화가 없으며 예상 파괴면의 위치도 변화가 없다. 그러나 긴장력 합력의 18.5%인 74 kN까지 긴장력이 감소한 시점부터 최소 안전율이 $F_s=1.422$ 로 감소하기 시작하였으며 활동 예상과괴면이 보강

Fig. 3. Limit Equilibrium Analysis Results

Fig. 3. Continued

된 그라운드 앵커를 지나가는 것으로 나타나 보강된 앵커가 불안정한 상태로 전이되기 시작함을 알 수 있다. 지속적으로 앵커의 긴장력이 감소하여 초기 긴장력의 12.5%인 50 kN에 도달하게 되면 최소안전율이 $F_s=1.28$ 로 감소하며 긴장력이 10kN이 되는 시점에서 최소안전율이 1.082에 도달하여 사면 파괴의 위험이 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 시나리오에 해당하는 합천현장의 앵커 긴장력과 사면안전율의 상관도를 Fig. 4에 정리하여 도시하였다.

이러한 시나리오는 매우 다양한 경우가 발생할 수 있으나, 현재 설계단계에서 고려하는 수치해석 조건에 대하여 앵커의 긴장력과 사면의 안전율 관계를 Fig. 4와 같이 도출하고 실제 보강 사면에 설치된 스마트 텐던을 이용하여 그라운드 앵커의 긴장력을 측정하면 사면의 안전율 변화를 간접적으로 확인할 수 있으므로 사면안정성에 대한 정량적인 관리가 가능할 것으로 판단된다. 이때 Fig. 4에 표시한 것과 같이 현

재 설계기준으로 이용되고 있는 기준 안전율(전기 시 1.5, 우기 시 1.3 또는 1.2)에 해당하는 긴장력을 관리기준으로 도입한다면, 모든 지반공학자들의 안전에 대한 개념을 그대로 유지하면서 정량화된 사면안전율 관리가 가능할 것으로 판단된다.

3 유한요소해석을 통한 긴장력 증가와 사면 안전율의 상관관계

본 절에서는 앞 절의 경우와 달리 외부 환경변화로 인한 지반의 변형이 앵커의 긴장력 증가의 원인이 된 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 따라서 앵커의 긴장력이 변화하기 전에 먼저 지반의 변형을 유도하여야 하고 이로 인한 앵커 긴장력을 조사하여야 하므로 한계평형해석이 아닌 유한요소해석을 이용한 연구를 수행하였다.

3.1 사면안정해석

유한요소해석에 의한 긴장력 증가와 사면 안전율 상관관계에 대한 대상사면은 소방방재청이 지정한 김포○○현장이다. 김포현장은 이미 여러 차례의 사면파괴가 발생한 현장으로 추가적인 사면 파괴에 대한 모니터링과 방지를 목적으로 스마트 텐던을 이용한 앵커로 보강하였다. 김포현장은 긴장력 감소에 대한 대상사면인 합천현장과 달리 지하수위 증가로 인한 지반의 점진적 변형이 앵커의 긴장력을 증가시킴으로써 사면의 안전율이 감소하는 대상사면으로 사용되었다. 수치해석기법으로는 3차원 유한요소해석 범용 프로그램인 Plaxis 3D(2012)를 이용하였다. 김포 사면은 Fig. 5와 같이 상부에 매우 얇은 붕적토와 하부 풍화토로 구성되어 있으며 Table 3에 각 지층의 기본 물성값들이 정리되어 있다. 앵커는 Figs.

Fig. 4. Relationship between Reduction of Initial Tensile Force and Factor of Safety(Hapcheon Site)

Table 3. Basic Soil Properties of BH-2

	Layer	Depth (GL.-m)	Water content (%)	Specific gravity	LL (%)	PI (%)	Passing percent(%)			USCS
							No.4	No.40	No.200	
BH-2	Colluvium	1.0	25.1	2.68	30.4	10.3	96.8	85.5	69.9	CL
	Weathered soil	12.0	36.4	2.68	NP	NP	100.0	85.9	68.0	ML

Fig. 5. Cross Section Profile and Soil Stratification(Kimpo)

Fig. 6. Analysis Section Profile of Finite Element Method

5-6에 표시한 바와 같이 상부로부터 4개를 일렬로 설치하였으며 유한요소망 경계조건으로는 측면은 롤러를, 바닥은 힌지를 이용하였다. 앵커는 자유장, 정착장 및 지압판으로 구성되어 있으며, 정착장의 경우 단위면적 당 전단강도를 규정하여 앵커의 인발저항력을 가정하였다. 지압판과 앵커의 자유장 끝단은 강결되어 있는 것으로 가정하였다. 수치해석에서는 김포현장의 조건을 최대한 반영하기 위하여 앵커의 자유장은 20 m, 정착장은 5 m로 모델하였으며 각 앵커에 150 kN의 초기 긴장력을 작용시켰다. 수치해석에서는 앞서 언급한 Table 1에 정리된 지반물성치를 이용하였으며 구성모델로는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 앵커의 자유장은 Plaxis3D에서 제공하는 node to node anchor, 정착장은 embedded piles를 이용하여 모델링하였다. 앵커의 EA는 7×10^5 kN으로 가정하였고, 앵커정착장의 마찰저항은 인근 현장에서 수행된 앵커 인발시험을 참조로 하여 250 kN/m로 가정하였다. 해석초기 사면 내 지하수위는 사면의 바닥아래에 위치하여 지하수의 영향은 없으나, 해석이 진행됨에 따라 지하수위를 점진적으로 상승시켜 이에 따른 사면의 안정성 및 앵커의 긴장력 분포를 비교 분석하였다. 이때 각 지하수위 단계별로 별도의 해석을

수행하여 전단강도감소 기법을 이용하여 사면의 안전율을 산정하였다.

3.2 앵커 긴장력 증가와 사면안전율의 상관관계 수치해석 결과

김포현장의 경우 Fig. 5에서처럼 지표면의 일부를 제외하고는 대체로 화강암의 풍화토로 구성되어 있으며, 앞서 언급한 바와 같이 자유장 20 m, 정착장 5 m 및 초기 인장력 150 kN이 가해진 앵커가 시공되어 있다. 사면의 경사는 평균 30도이며 지반조사 결과에 따르면 평상시 지하수위는 사면의 바닥아래에 존재하고 있다. 한편 본 사면에 시공된 앵커는 사면 전체를 보강하기 위한 목적이라기보다는 앵커의 축력변동을 관찰하기 위하여 시공되었기 때문에 일반적인 사면보강을 목적으로 시공된 앵커와는 다소의 차이가 있다고 할 수 있다. 즉 앵커시공으로 인한 사면 보강효과는 국부적일 것으로 판단된다.

한편 본 연구에서는 지반변형에 의한 사면 안전율 변화의 주요소를 찾기 위하여 지하수위, 지반 전단강도, 앵커판의 크기 등의 요소에 대한 안전율 변화를 탐색하여 가장 주요한 요소가 지하수위 변화임을 파악하였다. 따라서 초기해석 이후 사면 내 지하수위를 점진적으로 증가시켜 이에 따른 사면의 변형, 앵커축력의 변화 및 사면안전율의 증감을 분석하였다. 지하수위가 GL-2.0 m 보다 위에 존재하는 경우 사면이 불안정하여(즉 안전율이 1.0 미만) 수치해석이 수렴되지 않기 때문에 본 연구에서는 지하수위가 GL-2.0 m인 경우까지만 해석하고 분석하였다.

Fig. 7은 정착장에서 앵커의 인장력의 분포를 해석초기 상태(GL-15 m) 및 지하수위가 GL-2.0 m까지 상승한 경우에 대하여 비교하여 나타내고 있다. 해석초기 단계의 경우 정착장의 앞쪽에 인장력이 크고 길이방향으로 아래로 내려갈수록 전단응력 전이에 의해 거의 인장력이 발생하지 않고 있다. 그러나 지하수위가 상승한 경우 앵커의 축력이 증가하여 정착장 전체에 걸쳐서 인장력이 발생하는 경향을 보여 지하수위 상승 시 지반의 변형이 정착장내 인장력의 분포를 크게 변화시키는 요소임을 알 수 있다.

Fig. 7. Change of Initial Tensile Force Distribution Due to Rise of Ground Water Table

Fig. 8. Relationship between Ground Water Table and Tensile Force

Fig. 9. Relationship between Ground Water Table and Factor of Safety

Fig. 8은 지하수위 변화에 의한 앵커 긴장력의 변화를 나타내고 있으며 설치위치에 따라 약간의 차이는 있으나 모두 지하수위가 증가할수록 앵커의 긴장력이 비선형적으로 급속히 증가하고 있음을 알 수 있다. 초기 긴장력 150 kN이 지하수위 상승에 따라 최대 약 750 kN까지 증가함을 알 수 있다. 물론 이 수치는 앵커체의 허용 인장강도를 넘어서는 값으로 현장조건하에서는 앵커체가 파괴됨을 의미한다. 이와 같은 해석결과가 얻어진 이유는 앵커사이의 간격이 크고, 그 수가 제한되어 있어 단지 국부적인 수준의 보강밖에 할 수 없기 때문이다. 또한 각 지하수위 조건하에서 실시된 사면 안전율 산정결과를 지하수위와 함께 Fig. 9에 도시하였다. 해석초기 약 1.85정도의 안전율을 가지고 있던 사면이 지하수위가 상승함에 따라 점차 감소하여 지하수위가 GL-2.0 m에 위치하는 경우 약 1.1로 안전율이 감소되어 지하수위 증가가 안전율과 직접적인 상관성이 있음을 알 수 있다.

한편 Fig. 8과 Fig. 9를 결합하여 앵커 긴장력과 사면 안전율의 관계를 Fig. 10에 도시하였다. Fig. 10을 분석한 결과 앵커의 사면 내 위치에 따라 다소 차이를 보이고는 있으나 사면의 안전율과 앵커 긴장력의 순변화(net change of tensile force)는 반비례하는 경향이 있을 수 있다. 이에

Fig. 10. Relationship between Increment of Initial Tensile Force and Factor of Safety(Kimpo Site)

앵커의 긴장력이 감소하는 경우와 동일하게 국토해양부 건설공사 비탈면 설계기준(2011)에 따라 안전율 1.5(건기 시)와 1.2 또는 1.3(우기 시)를 사면 관리기준으로 표시하였다. 최하단에 위치한 1번 앵커로부터 최상단의 4번 앵커에 이르기까지 위치에 따라 다소 차이가 있으나 앵커의 긴장력이 약 250~400 kN이상 증가하게 될 경우 우기 시 기준 안전율이 이하로 안전율이 감소하여 위험 상태에 도달하는 것으로 판단할 수 있다.

이 연구에서는 앵커의 긴장력이 감소하거나 증가하는 경우에 실제 현장의 거동을 모사하기 위하여 서로 다른 대상사면에 대한 해석을 실시하여 앵커 긴장력의 변화와 사면 안전율의 상관도를 도출하였다. 그러나 실제 적용 시에는 앵커에 의한 모니터링을 실시할 동일 사면에 대하여 한계평형법과 유한요소해석을 통해 긴장력이 증가 및 감소하는 경우에 대한 긴장력 관리 기준도를 작성하고 앵커의 긴장력을 모니터링 한다면 그동안 정량화된 수치로 관리할 수 없었던 사면의 안정성을 관리할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

스마트 텐던을 이용한 앵커의 긴장력 모니터링 기술을 바탕으로 사면의 안전성을 정량적으로 평가하고 관리하기 위하여 수치해석에 근거한 앵커의 긴장력과 사면안전율의 상관관계에 대한 연구를 수행하고 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 앵커 초기 긴장력의 감소가 사면의 안정성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 한계평형해석법을 이용하여 실제 위험사면에 설치된 앵커 초기 긴장력의 감소와 사면 안정성의 상관관계에 대한 해석결과, 초기 긴장력이 특정 값 이하로 감소할 경우 안전측이던 사면의 안전율이 선형적으로 감소하여 주의 및 위험구간으로 전이되는 현상을 확인하였다.
- 2) 지하수위 상승으로 인한 사면의 변형 및 사면안정성의 변화와 앵커 긴장력의 변화에 대한 상관관계를 3차원 유한요소해석을 통해 분석한 결과, 앵커의 긴장력은 지하수위 상승으로 사면의 안전율이 감소할수록 점차 증가

하는 것으로 나타나 이를 사면의 관리기준치로 설정할 수 있을 것으로 분석되었다. 다만 지하수위 변동에 따른 앵커긴장력의 변화는 파괴면의 특성, 앵커지압판의 기하학적 특성 및 지반특성 등 매우 다양한 요인에 좌우될 수 있기 때문에 향후 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

- 3) 이상의 결과로부터 지금까지 초기에 도입한 앵커 긴장력의 관리가 불가능했던 상황과 달리 광섬유 센서를 내장한 앵커를 이용한 초기 긴장력 및 장기간 긴장력 변화량을 현장에서 직접 모니터링하면 긴장력 감소 및 증가로 인한 사면의 안정성을 정량적으로 관리할 수 있을 뿐 아니라 위험구간에서는 파괴 시점에 대한 예측과 대비가 가능할 것으로 판단된다.

이 연구 결과는 스마트 텐던을 이용하여 급경사 사면의 안정성을 직접적이고 정량적으로 관리함으로써 재해에 대한 예방을 통해 인명을 보호하고 사회적 비용을 절감하는 효과가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 한국연구재단 기초연구사업 광섬유 센서 매립형 텐던을 이용한 앵커의 하중전이 특성 연구(2010-0024625)의 지원을 받아 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Kim, J.-M., Kim, Y.-S., Kim, H.-W., Seo, D.-N., and Yun, C.-B. (2007) Development of Smart Tendon Instrumented with Optical FBG Sensors, *Proceedings of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 20 No. 2, pp. 121 (in Korean).
- Kim, Y.-S., Suh, D.-N., Kim, J.-M., and Lee, S.-R. (2008) Development and Application of A Smart Anchor with Optical FBG Sensors, *Proceedings of KGS Spring National Conference, March 28-29, Seoul Korea*, pp. 393-398 (in Korean).
- Kim, Y.-S., Suh, D.-N., Kim, J.-M., and Sung, H.-J. (2009) Load Transfer Characteristics of the 7-wire strand using FBG Sensor Embedded Smart Tendon, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9 No. 5, pp. 79-86 (in Korean).
- PLAXIS 3D (2012) Finite Element Package.
- SLOPE/W (2012) slope stability analysis, GEO-SLOPE INTERNATIONAL Ltd.
- Sung, H.-J., Kim, Y.-S., Kim, J.-M., and Park, G.-H. (2012) Temperature Compensation of Optical FBG Sensors Embedded Tendon for Long-term Monitoring of Tension Force of Ground Anchor, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 28 No. 5, pp. 13-25 (in Korean).
- The Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011) Specification for design criteria of slope in construction (in Korean).

© Received April 11, 2013

© Revised April 19, 2013

© Accepted June 21, 2013