

상대변위측정기를 이용한 지반앵커의 보유인장력 측정

Measurement of Retaining Tensile Load with the Relative Displacement Detector of Ground Anchors

정 현 식¹ Jeong, Hyeon-Sik
한 광 석¹ Han, Kwang-Suk
이 영 생² Lee, Yeong-Saeng

Abstract

The tension load of the ground anchor inserted in the ground gradually changes over time. In this regard the change of the initial tension load is primarily decreased by the fixation condition of the fixing head and the mechanical characteristics of the tensile material. The subsequent additional tension load is a time-dependent loss mostly due to the fixing conditions of the bonded length and the surrounding ground properties of the field. In this paper, therefore, a measurement system using a relative displacement detector that can relatively easily measure the change of tension load is discussed. As a result of the review, it was confirmed that the results using the relative displacement detector are similar to those of the real scale model test, and it was also confirmed that similar results were obtained with the result of the pull-out test conducted on the ground anchors fixed to weathered rocks condition. In addition, a pull-out test was conducted on the test anchors whose initial tension load loss was relatively large and through this test pull-out behavior of the tension type ground anchors was verified.

요 지

지반내 근입된 앵커의 인장력은 시간이 경과하면서 점차 변화하게 되는데 이때 초기 인장력의 변화는 보통 정착해 드의 정착조건과 인장자재의 기계적 특성에 의해 1차적으로 감소하게 되며, 이후 추가적인 인장력의 변화는 대부분 정착장의 정착조건과 주변 지반특성에 기인한 시간의존적인 정착거동에 좌우된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 인장력 변화를 비교적 쉽게 측정 및 분석할 수 있는 상대변위측정기를 이용한 측정시스템에 대해서 연구하였다. 검토결과 실규모 모형시험을 통해서 본 측정시스템의 적용성을 확인 하였으며, 또한 풍화암에 정착된 지반앵커를 대상으로 실시한 현장 시험결과와도 유사함을 확인함에 따라 본 측정시스템의 적용성을 확인하였다. 그리고 초기인장력이 비교적 크게 감소된 시험앵커를 대상으로 추가적인 인발시험을 실시하였으며 이를 통해 인장형 앵커의 인발거동을 확인하였다.

Keywords : Ground anchors, Relative displacement detector, Retained bonding capacity, Pull-out test, Lift-off test

1 정희원, 경기대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Student, Dept. of Civil Engrg., Kyonggi-Univ.)

2 정희원, 경기대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyonggi-Univ., Tel: +82-031-249-9709, Fax: +82-031-249-9718, yslee@kyonggi.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지반앵커 공법은 기본적으로 천공홀내에 인장재의 삽입과 그라우트의 주입을 통해서 앵커 정착장을 형성하며 이렇게 형성된 정착장은 구조물에 발생하는 인장력에 대응하게 된다. 이때 요구되는 앵커정착력이 발휘되도록 하기 위해서는 비교적 고강도의 인장재에 선행하중(pre-stress)을 가한 후 헤드에 정착시킴으로써 지반으로부터 발생하는 응력에 대응토록 해야 한다. 이러한 지반앵커는 크게 세부분으로 구성되는데 먼저 인장재-그라우트의 부착저항과 그라우트-지반의 마찰저항을 통해 앵커력을 발휘하는 정착장, 정착장에서 발휘되는 응력을 전달하는 자유장, 그리고 자유장을 통해 전달되는 응력을 목적하는 구조체에 직접 재하하는 정착구로 구성되며 각각 필요한 안정성을 만족시킬 수 있도록 계획되어야 한다(Kim et al., 2016).

지반앵커는 일반적으로 비탈면 또는 벽체 구조물의 보강을 위해 적용되며 이때 앵커 인장력이 어떤 원인에 의해 변화하게 된다면 이는 대상 구조물의 안정성에 큰 영향을 주게 된다. 즉 지반앵커가 설치된 이후에는 앵커의 내외적인 요인들에 의해 인장력의 시간의존적인 변화가 불가피하게 발생하게 되며 이러한 변화는 대부분 앵커 정착능력을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 공용중인 구조물에 적용된 앵커 인장력의 변화를 조사하는 것은 방재측면에서도 매우 중요하다(Manual for design, construction and maintenance of ground anchors, 2009).

한편 사용기간이 18개월~24개월 이상인 영구앵커의 경우에는 비교적 장기간 동안에 사용 재료의 내구성이 확보되어야 하며, 이와 관련하여 사용되는 인장재는 기본적으로 이중부식방지 시스템을 적용함으로써 재료 부식에 대한 안정성을 확보하도록 규정하고 있다(Xanthakos, 1991; FHWA, 1999; BS 1237, 2000). 또한 사용기간이 길수록 정착장의 “보강효과” 즉 정착력이 충분히 발휘하고 있는지를 확인하는 것은 유지관리차원에서 매우 중요한 관계로 강도나 변형계수가 작은 모래지반 및 점성토 지반 등에서는 가능한 시간경과별로 앵커 정착력을 확인하는 것이 바람직하다(Xanthakos, 1991). 그러나 시간의존적인 앵커 정착력 변화를 평가하기 위해서 모든 앵커의 내외적인 영향요인들을 고려하기란 현실적인 한계가 있는 관계로 사용중인 앵커는 일반적으로 “합리적인 가정”에 기반한 실험적인 방법을 통해서 앵커 정착력을 평가하게 된다. 이와 관련하여 국내에서도

앵커정착특성을 다양한 방법으로 연구하고 있는데, 대표적으로 Kim(2001)은 풍화토 지반을 대상으로 인장형 앵커와 압축형 앵커 각각에 진동현식 스트레인게이지를 설치하여 지반앵커의 거동특성을 검토하였으며 Kim et al.(2004)과 Kim et al.(2014)은 각각의 위치별 내하체가 부착된 하중분산형 지반앵커를 대상으로 내하체 위치별 매립형 게이지를 이용하여 하중분산의 작용력을 분석하였다. 또한 Sung et al.(2011)은 인장형 지반앵커가 설치된 현장을 대상으로 자유장부와 정착장부에 각각 광섬유브래그격자(fiber bragg grating)를 설치하여 각 인장하중별 앵커 정착장의 응력분포를 측정하였다.

또한 해외의 경우 Mecsi(1997)은 다양한 앵커형식별로 비교적 장기간의 실계측을 통하여 앵커의 강성지수(k)와 극한인발력과의 상관관계를 통한 앵커 정착력의 변화를 검토하였다. 그리고 최근 Vukotic et al.(2013)은 그라우트-지반간의 정착응력분포와 별도의 효율계수(f_{eff}) 개념을 적용하여 단일 앵커유닛으로 구성된 일반앵커와 다수의 앵커유닛으로 구성된 지반앵커의 정착거동에 대해 검토하였다.

한편 이러한 기존의 연구사례는 대부분 앵커 정착장의 정착거동, 즉 정착장 내외부에 작용하는 응력분포 특성의 규명에 집중하고 있으며 정착장의 인발이나 자유장 변화에 대한 정착응력의 변화에 대한 연구는 미미한 편이다. 이러한 연구경향에 대한 원인은 아마도 자유장 대비 정착장의 거동특성이 상대적으로 복잡하고 또한 그 거동을 규명함에 있어서 비교적 다양한 영향인자에 좌우되므로 “지반앵커 연구”에 있어서는 상대적으로 “자유장” 대비 “정착장”의 거동에 더 많은 관심을 가지게 되는 것으로 판단된다. 그러나 앵커의 유지관리 측면에서 앵커 거동을 분석하기 위해서는 앵커 정착장의 변화는 물론 자유장의 변화도 검토되어야 한다. 그 이유는 지반앵커 특성상 초기인장력 조건으로 정착된 이후의 인장력 변화는 공용기간중에 다양한 원인에 의해서 발생하게 되며 이때의 인장력 변화가 정착장 길이(fixed length)의 불변조건에서 발생하게 된다면 상대적으로 자유장 길이(free length) 변화에 특히 민감하기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 기존의 리프트오프 시험(lift off test) 또는 로드셀을 이용한 앵커 정착력의 측정방법 대비 비교적 단순한 방법으로 사용중인 앵커에 대한 작용력을 측정할 수 있는 방법을 제안하고 이를 이용한 시험결과와 기존기술(lift off test)을 통해 획득한 시험결과를 비교, 검토 하였다. 이를 위하여 우선적으로 실규모 모

형실험을 통해 비교적 단순한 방법으로 앵커 인장력을 측정하는 시스템에 대하여 제안하고 그 이후에는 실제 현장에 적용된 시험앵커를 대상으로 일정기간 경과시의 앵커 인장력의 변화를 측정함으로써 제한한 방법의 적정성을 검증하였다.

즉 본 논문에서는 실규모의 앵커모형시험과 현장시험자료를 근간으로 지반앵커의 변위 특성을 검토하고 이를 이용하여 앵커 인장력의 변화를 보다 용이하게 평가할 수 있는 방법을 제안하였으며, 추가적으로 풍화암에 정착된 인장형 지반앵커의 소성거동을 확인하였다.

2. 앵커의 인장력과 자유장과의 관계

지반내 앵커설치시에는 일반적으로 정착헤드의 정착손실과 인장재 릴렉세이션(relaxation)에 의한 신장손실 등을 고려하여 초기인장을 하게 되며 이후 인장력의 변화는 시간의존적으로 다양한 원인에 의해 변화하게 된다. 즉 인장재에 선행하중(pre-stress)을 가하여 초기인장력 조건으로 지반앵커가 정착된 상태에서 정착헤드의 정착손실이나 인장재 자체의 릴렉세이션 등으로 인해 인장력의 손실이 발생하게 되며 이후에는 점차 일정하중으로 수렴하게 된다. 그러나 이 수렴된 하중 이후에도 앵커의 내외적인 요인에 의해 점차적으로 인장력에 대한 손실이 발생할 수 있는데 이에 대한 주요 원인은 크게 2가지로 구분하여 설명할 수 있다. 즉 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 선행 잭킹(jacking)하중으로 정착된 앵커의 인장력이 ①정착구 주변의 지표부 손실 또는 정착두부의 침하에 따른 자유장 길이(ΔL_1)의 감소로 인해 변화하거나, 또는 ②앵커 정착장 주변의 정착저항력이 감소하게 된다면 정착장 인발로 인해 자유장 길이(ΔL_2)가 감소하여 앵커 인장력이 변하게 된다(Littlejohn, 1980; Kim et al., 2016)

따라서 본 논문에서는 앵커 설치시 필히 발생하는 정착헤드의 정착손실과 인장재의 릴렉세이션에 등에 따른 인장력의 변화를 확인할 수 있고 또한 이러한 초기 인장력 손실 이후에도 앵커 인장력의 변화를 감지하고 분석할 수 있는 측정시스템에 대하여 언급하고자 한다. 이를 위해서 본 논문에서는 Fig. 1을 참조하여 앵커의 인장력과 자유장과의 관계를 다음과 같이 두 가지 조건으로 가정하였다.

먼저 첫 번째 가정사항으로서 인장력의 변화는 정착장 길이 대비 주로 자유장의 길이 변화에 의존함을 가정한다. 이는 자유장 대비 정착장의 축강성은 매우 크고, 또한 정착장부의 인장재와 그라우트의 접촉면에서 충분한 정착력(bonding capacity)이 발현된다면 정착장 길이 변화는 상대적으로 자유장부 대비 크지 않게 되므로 이는 비교적 타당한 가정이 된다(Xanthakos, 1991; BS 1237, 2000)

두 번째 가정사항은 앵커 인발에 따른 측면위는 그라우트와 주변 지반 경계면에서의 “슬립(slip) 변위”에 기인함을 가정하며, 동시에 앵커 인발시 정착장 내부의 인장재와 그라우트 경계면에서의 “슬립(slip) 변위”는 그라우트와 주변 지반 경계면에서 발생하는 “슬립(slip) 변위” 보다 상대적으로 작게 발생함을 가정한다. 이는 인장재와 그라우트의 부착저항이 그라우트와 주변지반과의 마찰저항 보다 상대적으로 더 큼을 나타내는 것으로서 대부분의 실험결과와 기준서에 제시된 값에 근거한다면 비교적 합리적인 가정사항이다(Littlejohn, 1980; Xanthakos, 1991).

결과적으로 인장재와 그라우트로 구성된 지반앵커의 정착장이 주변지반과의 일체화로 인해 그 길이가 변화되지 않음을 가정한다면 앵커의 인장력(tensile load, P) 변화는 주로 자유장 길이 변화에 의존할 것이다.

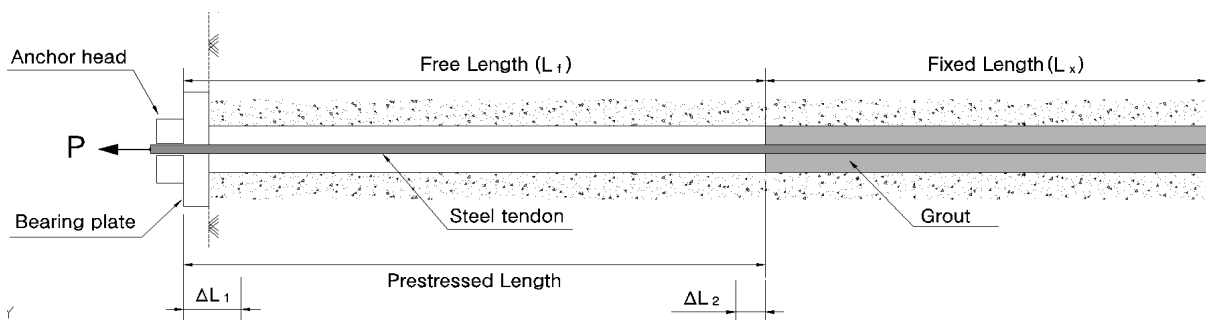


Fig. 1. Conceptual diagram about the cause of bonding capacity loss (Kim et al., 2016)

3. 상대변위측정기를 이용한 앵커인장력의 거동 평가

본 절에서는 기 정착된 지반앵커의 인장력 손실에 대한 가정사항과 Fig. 1에 나타난 자유장 길이 변화량 ($\Delta L_t = \Delta L_1 + \Delta L_2$)을 이용하여 앵커 인장력의 변화를 측정하는 방법에 대하여 논하고자 한다. 즉 앵커 인장력의 변화는 자유장 길이 변화에 연관됨에 따라 본 논문에서는 자유장 길이 변화량(ΔL_t)을 측정하기 위하여 Fig. 2에 나타난 바와 같이 자유장부와 정착장부에 걸쳐 직경 2mm의 강선으로 제작된 별도의 상대변위측정기(relative displacement detector)를 부착하였다.

이는 앵커 인장력 변화량에 대응하는 자유장 길이 변화량(ΔL_t)을 측정하기 위한 것으로서 Fig. 2에 나타난 바와 같이 상대변위측정기는 정착장에 고정되고 자유장부에서는 별도의 매끄러운 실리콘 호스로 피복하여 주변 그라우트와 부착되지 않는 조건으로 설치되며 이로 인해 자유장부 길이변화(ΔL_1)나 정착부 인발시의 길이 변화(ΔL_2)를 상대변위측정기를 통해 측정할 수 있도록 하였다. 또한 이 측정 변위량으로부터 앵커가 보유하고 있는 인장력은 후크 법칙(Hooke's law)을 통해 산정하였다. 즉 지반앵커의 현재 인장응력 상태를 확인하기 위해서는 상대변위측정기의 길이 변화량(ΔL_t)을 확인할 필요가 있으며 이는 또한 정착장부와 정착두부 간에 발생하는 상대변위를 의미하므로 상대변위측정기의 길이 변화량(ΔL_t)만 측정하게 된다면 지반앵커가 현재 유지하고 있는 인장력 상태를 확인할 수 있게 된다. 즉 지반앵커 정착장에서 손실된 인장력 크기(loss of tension load, ΔP)는 정착장과 정착 두부간의 상대변위(ΔL_t)와 관계가 있으며 이 상대변위값(ΔL_t)과 자유장 길이(L_f)를 이용하게 된다면 손실된 인장력 크기는 다음 식 (1), (2)를

이용하여 계산할 수 있게 된다. 여기서, 식 (1)은 지반앵커 인장력의 손실량(ΔP)과 측정된 상대변위(ΔL_t)의 관계를 나타내며, 식 (2)는 식 (1)을 통해 지반앵커가 현재 유지하고 있는 앵커 인장력(P_t)을 산정할 수 있는 관계식을 나타낸다.

$$\Delta P = \frac{\Delta L_t \cdot E_s \cdot A_s}{L_f} \quad (1)$$

$$P_t = P_o - \Delta P = P_o - \frac{\Delta L_t \cdot E_s \cdot A_s}{L_f} \quad (2)$$

여기서, P_o 는 정착시의 초기 인장력을 나타내고 ΔL_t 는 지반앵커에 기 장착된 상대변위측정기를 통해 측정된 상대변위값을 나타낸다. 또한 L_f 와 E_s , A_s 는 각각 자유장 길이 및 자유장 강재의 탄성계수와 단면적을 나타낸다.

4. 실규모 모형실험을 통한 앵커 인장력 변화 검증

4.1 실험조건

지반앵커가 현재 유지하고 있는 인장력을 확인하기 위해서는 기정착 되어있는 앵커구조체의 자유장 길이 변화량(ΔL_t)을 확인할 필요가 있다. 따라서 자유장 길이 변화에 따른 인장력의 변화를 측정하기 위해 Fig. 3과 같이 강관케이싱을 이용한 실규모의 앵커모형을 제작하였으며 이를 통해 인발시험을 실시하였다. 한편 본 실험조건에서는 앵커의 초기인장력이 가장 크게 작용하며 이로 인해 케이싱 내부의 앵커 그라우트체가 인발되지 않도록 계획함이 필요하다. 따라서 정착장 내부의 그라우트 압축강도는 20MPa 이상이 되도록 구근을 형

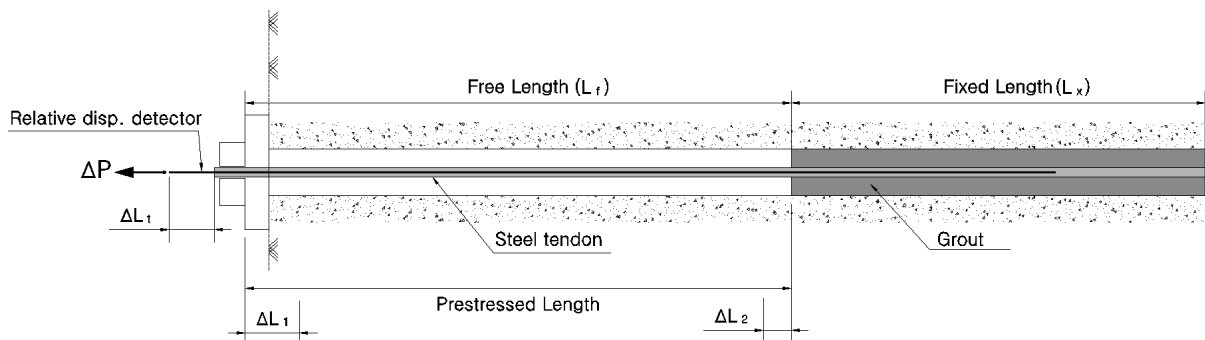


Fig. 2. Relationship between a loss of tendon load and displacement of the relative displacement detector (Kim et al., 2016)

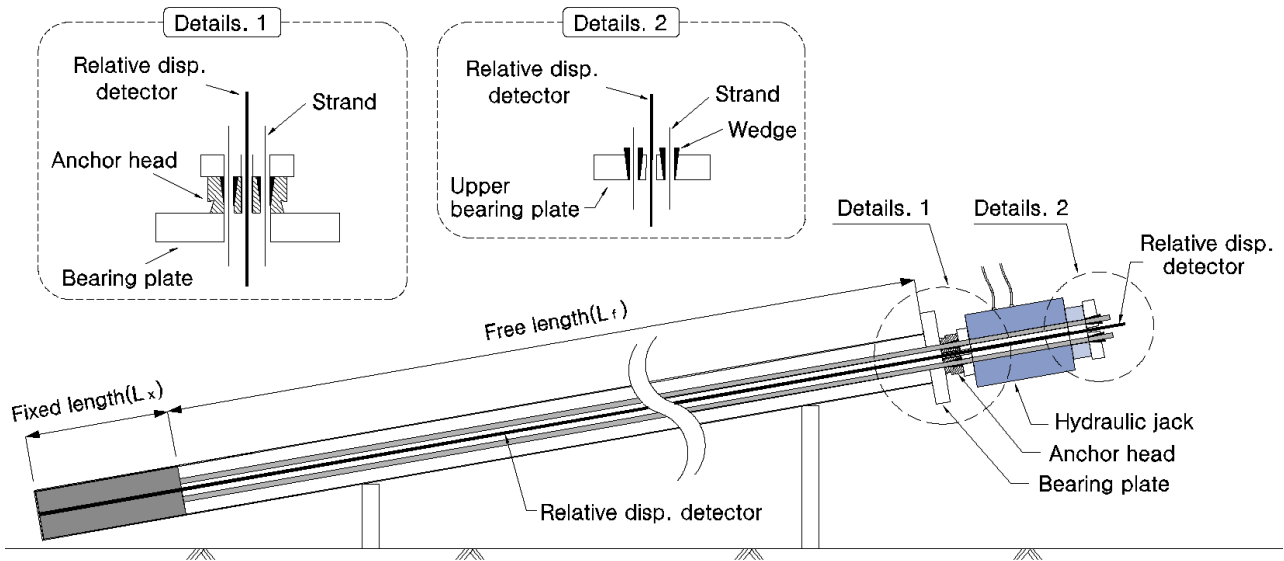


Fig. 3. Conceptual diagram of the test anchors for a real scale model test

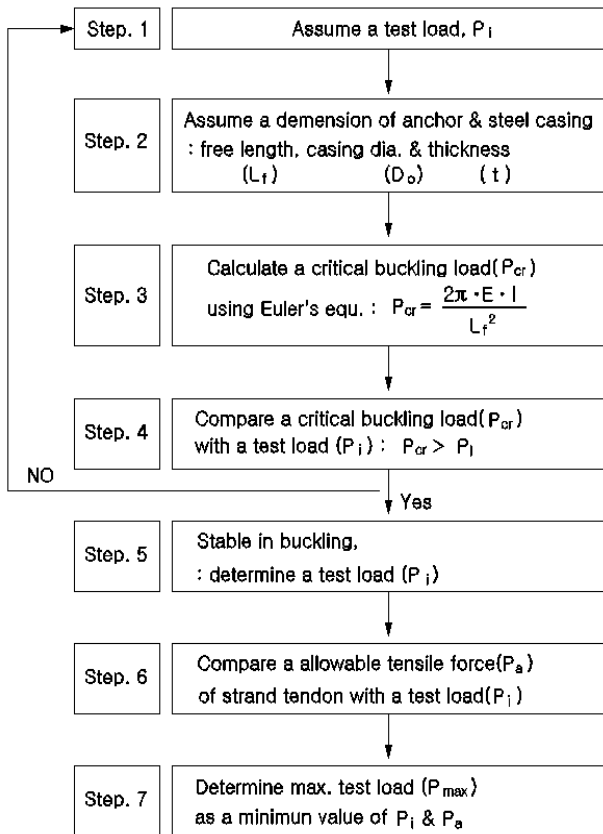


Fig. 4. Determination of the test load considering the critical buckling load of free length

성하였으며 이로 인해 그라우트와 케이싱이 충분한 부착강도가 발현되도록 유도하였다. 또한 앵커 인발시 강관케이싱의 장경비(slenderness ratio, L/D)가 큰 경우에는 강관케이싱의 압축파괴와 좌굴발생으로 인해 실험의 오류가 발생할 수 있으므로 이에 대한 사전검토가 필요하다. 따라서 본 실험시에는 항복강도 $f_y=235\text{MPa}$ 의 강관을 이용하여 강관케이싱의 압축변형이 발생되지 않도록 계획하였고 추가적으로 인발하중 작용시 인장재의 파단과 강관케이싱(자유장부)에서 좌굴에 따른 상대변위측정기의 측정 오류가 발생하지 않도록 하기 위하여 최대인발하중은 Fig. 4의 검토 흐름도를 고려하여 결정하였다.

즉 Fig. 4의 검토조건에 부합되는 강관케이싱의 제원은 Table 1과 같이 외경(D_o)은 139.8mm, 두께(t)는 3.6mm로 선정하였으며, 실험에 적용된 인장재 조건은 Table 2에 나타난 바와 같이 $\phi 12.7\text{mm}$ 의 강연선을 적용하였다. 한편 강연선 개수는 시험앵커체에 각각 2가닥, 3가닥 적용하였고 또한 자유장 길이(L_f)는 각각 5.0m, 6.0m 조건으로 적용하였으며 정착장 길이(L_x)는 1m로 동일하게 적용하였다. 따라서 이를 고려한 케이싱의 임계좌굴하중(P_{cr})은 Euler의 좌굴공식을 이용하여 각각 564kN

Table 1. Physical properties of steel casing

Casing type	Outer dia. (D_o , mm)	Inner Dia. (D_i , mm)	Thickness (t , mm)	Nominal cross section (A_c , mm^2)	Yield strength (f_y , MPa)	Moment of inertia (I , m^4)
SPPS 41	139.8	132.6	3.6	15,400	235	3.6×10^{-6}

(Notes) Classification of steel casing : KS D 3566

Table 2. Physical properties of strand type tendon(per one strand)

Tendon type	Nominal diameter (mm)	Nominal cross section (mm ²)	Unit weight (kN/m)	Allowable tensile load (kN)	Classification
PC 7-wire strand	12.7	98.71	7.59×10^{-3}	109.8	KS D 7002

Table 3. Test condition for a real scale model test with test anchors

Test condition	Number of strand	Free length (L _f , m)	Fixed length (L _b , m)	Total length (L _t , m)	Critical buckling load (P _{cr} , kN)	Allowable tensile load (kN)
T-1	2	5.0	1.0	6.0	564	219.6
T-2	3	6.0	1.0	7.0	392	329.4

Notes : The elasticity modulus (E) and moment of inertia (I) of steel casing are 2.0×10^5 (MPa), 3.6×10^{-6} (m⁴), respectively

Table 4. The maximum tension load condition of test anchors

Test condition	Initial jacking pressure (σ _p , MPa)	Hydraulic jack cross section (A _p , m ²)	Initial max. tensile load (P _o , kN)
T-1	20.0	1.06×10^{-2}	211.7
T-2	30.0	1.06×10^{-2}	317.6

Notes.1 : Tensile load $P_o = \sigma_p \times A_p$

Notes.2 : Axial stiffness per one strand of free length, EA = 19,742 (kN)

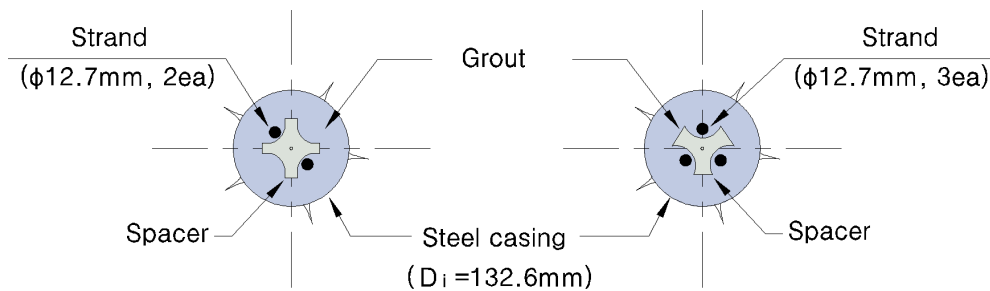


Fig. 5. Cross section condition of steel casing hole and strand

(L_f=5.0m조건), 392kN(L_f=6.0m조건)으로 산정되었으며 인장재의 허용하중은 각각 219.6kN(2가닥 조건)과 329.4 kN(3가닥 조건)으로 산정됨에 따라 최대시험하중은 인장재의 허용하중 범위 내에서 적용하였다. 이를 고려한 각각의 시험조건은 Table 3, 4와 Fig. 5에 나타내었다.

4.2 실험결과

T-1, T-2 시험앵커체의 초기(최대)인장하중은 Table 4에 나타난 바와 같이 유압잭킹압력을 고려하여 각각 211.7kN, 317.6kN으로 적용하였으며 본 시험하중 조건으로 인장시험을 실시한 결과, 앵커 자유장부에서 좌굴 변형은 발생하지 않음을 확인하였다. 또한 초기 인장하중 재하후 단계별 인장하중을 변화시키면서 이에 대응하는 자유장 길이의 변화량(ΔL_f)을 시험앵커체 내부에

장착된 상대변위측정기를 통해 측정하였다. 여기서 Fig. 6은 상대변위측정기를 이용한 인장시험 전경을 나타낸 것이며, Fig. 7은 정착구내의 상대변위측정기와 시그널 캡(signal cap)의 상세도를 나타낸 것으로서 여기서 상대변위측정기 두부에 장착된 시그널캡(signal cap)은 상대변위측정기가 일정 변위 초과시에 자동 탈락되도록 알림기능을 위한 것이다.

한편 인장하중의 변화는 T-1조건과 T-2조건을 각각 다르게 설정하여 실험을 실시하였다. 즉 T-1조건 경우에는 초기 인장하중(P_o)=211.7kN으로 인장후 잭킹압력(σ_p)을 20MPa씩 감소시키면서 이에 해당하는 인장력을 측정하였고, T-2조건에서는 초기 인장하중(P_o)=317.6kN으로 인장후 잭킹압력(σ_p)을 50MPa씩 감소시키면서 이에 해당하는 인장력을 측정하였다. 이에 대해 각각의 인장하중 변화에 따른 앵커보유하중 측정결과는 Fig. 8에

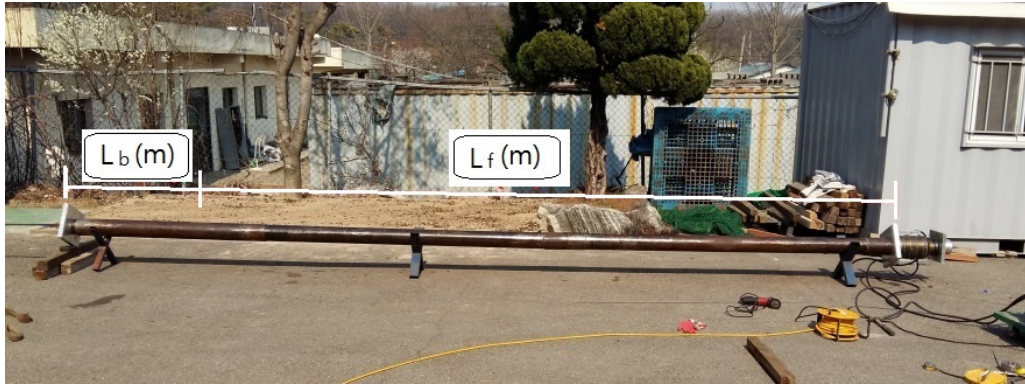


Fig. 6. Model test diagram for tension tests of anchors

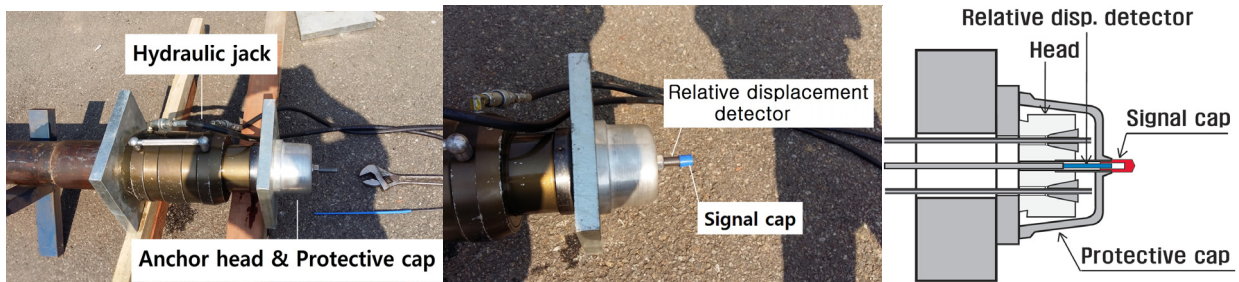


Fig. 7. Anchor head and self indicator details

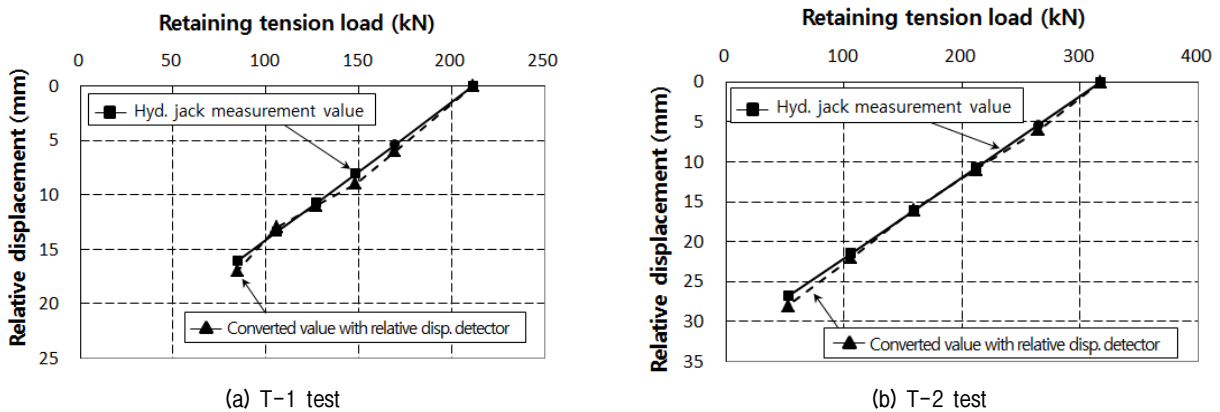


Fig. 8. Comparison of measured values of tension test and relative displacement detector

나타내었다. 즉 Fig. 8은 유압잭 압력을 통해 측정된 인장하중 값과 상대변위측정기를 통해 측정된 변위량을 식 (2)에 의해 계산된 인장하중 값을 상호 비교하여 나타낸 것이다. 검토결과 유압잭을 통한 측정값과 상대변위측정기를 통한 분석값이 거의 유사함을 알 수 있으며, 이는 지반앵커의 보유응력을 측정함에 있어 별도의 인장시험 없이 앵커내에 부착된 상대변위측정기를 통해서도 비교적 용이하게 앵커 인장력의 측정이 가능함을 나타낸다.

5. 현장실험을 통한 앵커 인장력 변화 검증

5.1 실험개요

기설치된 지반앵커가 유지하고 있는 앵커 인장력을 확인하기 위하여 본 연구에서는 상대변위측정기가 장착된 실제 현장의 지반앵커를 대상으로 앵커 인발시험을 실시하였으며 또한 본 측정결과를 별도의 리프트오프 시험을 통해 측정된 인장력과 비교, 분석하였다. 즉 실제 현장에 적용된 앵커를 대상으로 상대변위측정기

를 통해 앵커가 확보하고 있는 인장력을 측정함으로써 본 측정기법의 정밀도를 검증하였다.

이를 위한 시험조건은 시험앵커 2개소(FT-1, 2)를 설정하여 각각 시험을 실시하였으며 이때 현장시험 앵커의 제원과 현장시공 조건은 각각 Fig. 9와 Table 5에 나타내었다. 한편 당 현장 시험앵커의 초기(최대)인장력(P_0)은 370kN 조건으로 정착시켰으며 이후 일정기간 경과후의 인장력을 측정하였다.

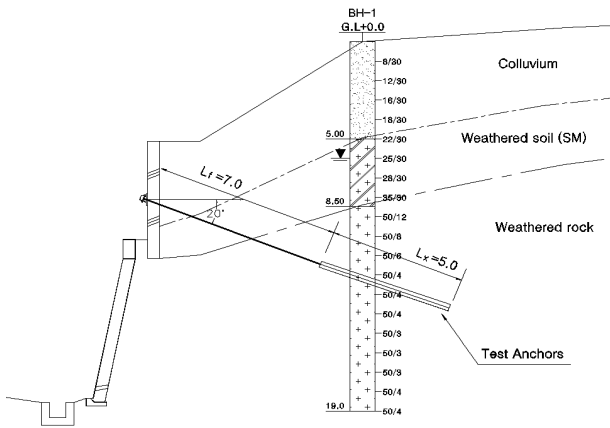


Fig. 9. Soil condition for field test of ground anchors

Table 5. Field pull out test condition

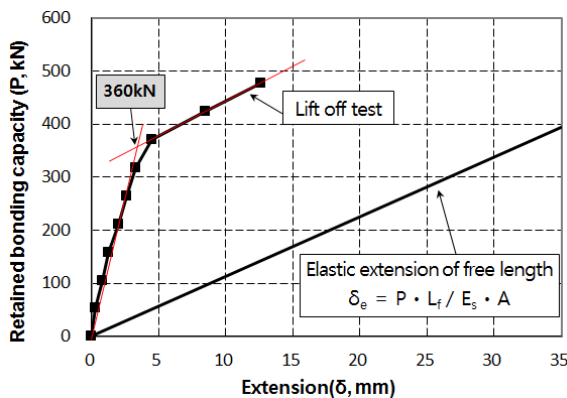
Test classification	FT-1, FT-2
Initial tensile load (P_0)	370kN
Strand specifications	12.7mm×4
Free Length (L_f)	7.0m
Fixed Length (L_x)	5.0m
Total Length (L_t)	12.0m
Bore hole Dia. (D_b)	127mm

5.2 실험결과

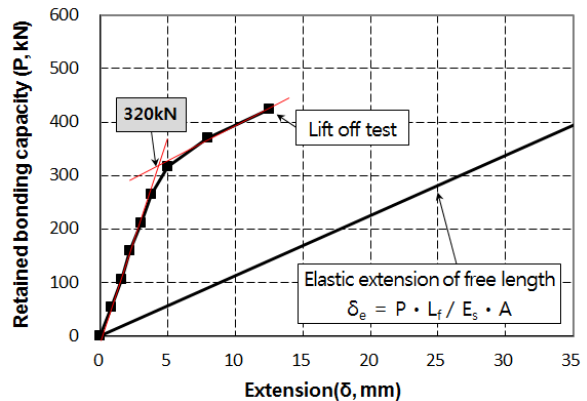
지반앵커가 설치된 이후 기설치된 상대변위측정기를 통해 일정기간 경과별로 지반앵커의 거동을 측정하기 위해 앵커 정착후 32일 경과후와 75일 경과후 각각 측정하였다. 이때 초기 정착후 32일 경과시에 리프트오프 시험을 실시한 결과 초기(최대)인장력(P_0)=370kN을 그대로 유지하고 있음을 확인하였으며 또한 상대변위측정기의 변위 또한 발생되지 않은 관계로 특별히 초기(최대)인장력의 변화는 없는 것으로 나타났다. 한편 2차적으로 앵커 정착후 75일 경과시에 상대변위측정기를 확인한 결과 어느 정도의 변위가 발생됨에 따라 리프트오프 시험을 통한 보유인장력(P_s)과 상대변위측정기를 통한 보유인장력(P_s)을 각각 측정하여 상호 비교하였다. Fig. 10은 리프트오프 시험을 통한 앵커 보유 인장력을 확인한 결과를 나타낸 것이다.

즉 리프트오프 시험을 이용하여 FT-1 및 FT-2 앵커의 보유인장력(P_s)은 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 각각 360.0kN, 320.0kN으로 측정되었으며, 리프트오프 이후의 신장량은 인장재의 탄성신장량과 거의 유사하게 나타남에 따라 현재 보유하고 있는 인장력이 적절하게 측정되었음을 보여주고 있다.

한편 Fig. 11은 상대변위측정기의 측정치(상대변위, $\Delta\delta$)와 식 (2)를 이용하여 앵커 정착력을 확인한 결과를 나타낸 것이다. 즉 Fig. 11에서 식 (2)는 상대변위($\Delta\delta$)가 증가할수록 지반앵커의 보유 인장력 크기가 점차 감소함을 보여주며 FT-1, 2앵커의 상대변위측정치(1.34mm, 5.12mm)와 식 (2)를 이용한 보유 인장력(P_s)은 각각 353.3 kN, 312.5kN으로 산정되었다.

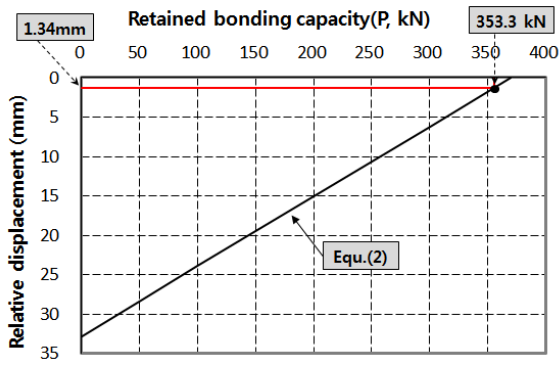


(a) FT-1 test

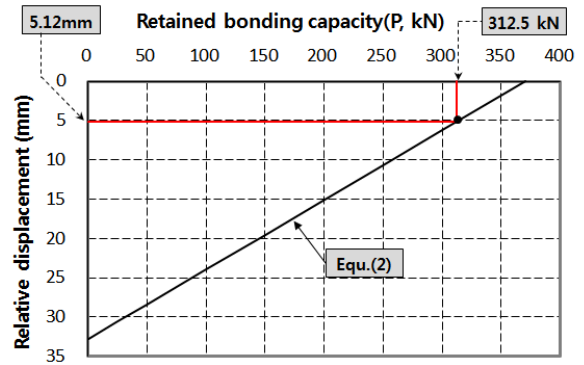


(b) FT-2 test

Fig. 10. Tensile load measurement result of test anchors by lift off test



(a) FT-1 test



(b) FT-2 test

Fig. 11. Calculation of working load with measured value of relative displacement detector

Table 6. Comparison a converted relative displacement detector value with lift off test result

Test classification	Anchor load by lift off test	Retained bonding capacity of anchor by relative displacement detector	
		Measured relative displacement detector value ($\Delta\delta$, mm)	Converted test load (P_t , kN)
FT-1	360.0	1.34	353.3
FT-2	320.0	5.12	312.5

Table 6은 리프트오프 시험결과와 상대변위측정기의 측정값을 통한 앵커 보유인장력의 산정결과를 정리한 것으로서 상대변위측정기를 통한 인장력은 리프트오프 시험결과 대비 다소 작게 측정되었으나 전반적으로 보유 인장력 측정치가 거의 유사함을 확인할 수 있었다. 즉 FT-2 앵커조건에서는 초기인장 이후에 하중손실이 비교적 크게 발생함을 확인할 수 있었는데 이는 본 시험 앵커의 시공중에 그라우트 손실로 인한 것으로 판단되며 특히 현장 리프트오프 시험중에 앵커 정착력의 감소로 인해 정착장이 다소 인발됨에 따라 측정인장력이 작게 발현된 것으로 판단된다.

한편 리프트오프시험 및 상대변위측정기를 통한 앵커보유 인장력을 확인한 결과, FT-2 앵커는 초기인장 이후에 하중손실이 비교적 크게 발생하는 것을 확인함에 따라 본 현장시험에서 FT-2 앵커를 대상으로 앵커 인발하중에 대한 소성거동을 확인하고자 각 단계별로 인발하중을 가하여 이에 대한 변위를 측정하였다. 이때 인발하중은 현재 앵커가 유지하고 있는 인발력(P_p)=320kN 이상으로 적용하기 위하여 다음과 같이 설정하였다. 즉 초기 정렬하중(alignment load) P_{al} =52.9kN(σ_{al} =5.0MPa) 조건에서 초기 인발하중 P_1 =317.6kN을 적용하였으며 이후 다시 정렬하중(alignment load) P_{al} =52.9kN으로 제하(unloading)한 후 이를 시작으로 각 단계별 21.2kN~52.9kN(2.0~5.0MPa)씩 증가시켜 최종 529.3kN(6단계,

σ_6 =50.0MPa)까지 적용하였다. 또한 각 하중 단계별 재하(loading)와 제하(unloading)에 따른 인발하중과 인장재의 신장량 관계를 검토하기 위해서 각 단계별 재하시에 수렴변위를 확인 후에 정렬하중(alignment load)으로 제하하였으며 이후 다음 단계의 하중조건으로 재재하(reloading) 하였다. 이에 따른 측정결과는 Fig. 12, 13에 나타내었다.

Fig. 12에서 점선은 앵커 자유장부(L_f =7.0m)의 탄성곡선을 나타내며 그 하부의 실선은 각 하중 단계별(재하-제하-재재하)의 탄성변위와 소성변위의 관계를 나타낸 것이다. 즉 현장 측정치(실선)은 인장재의 탄성곡선보다 아래에 위치하고 있어 인발하중에 따른 탄성변위

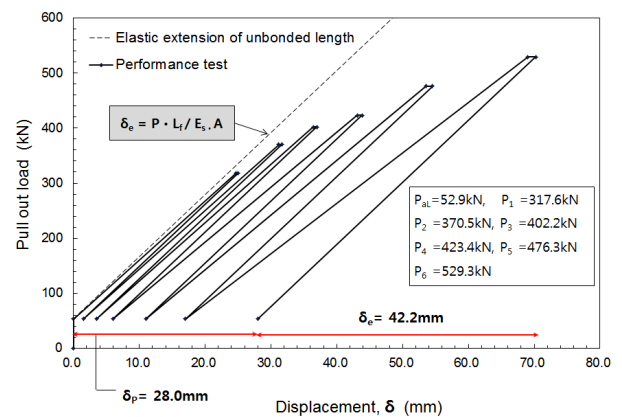


Fig. 12. Plotting of performance test data of FT-2 test anchor

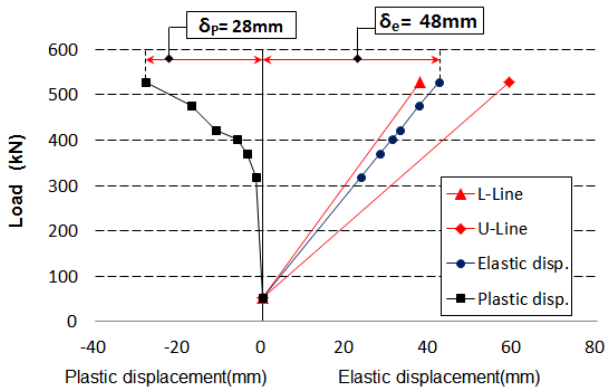


Fig. 13. Plotting of elastic & plastic displacement of FT-2 test anchor

와 소성변위가 발생함을 알 수 있으며 이때 소성변위는 앵커 인장시 측정된 총변위에서 인장재의 탄성변위를 차감하여 산정하였다. 한편 인발하중 3단계($P_3 = 370.5\text{kN}$) 이후부터는 소성변위가 급격히 증가함을 확인할 수 있는데 이는 사실상 앵커가 인발되는 단계로서 그림 13에서 보다 더 명확하게 나타난다. 즉 최종 6단계 인발하중 $P_6 = 529.3\text{kN}$ 조건에서 탄성변위와 소성변위는 각각 42.2 mm와 28.0 mm로 측정됨에 따라 앵커가 완전히 인발되는 경향을 보였다. 또한 이때 상대변위측정기를 이용한 소성변위(δ_p)는 31 mm로 측정되어 인발시험결과와 거의 유사함을 확인할 수 있었다.

한편, Fig. 13의 U-line과 L-line은 마찰(인장)형 앵커의 신장량 관리기준인 식 (3)과 식 (4)을 나타낸 것으로 측정된 탄성신장량은 신장량 관리기준에 부합하는 것으로 나타났다(FHWA, 1999).

$$\text{U-line} : \delta \leq \frac{(P_j - P_{al}) (L_f + \frac{L_b}{2})}{E_s A_s} \quad (3)$$

$$\text{L-line} : \delta \geq \frac{(P_j - P_{al}) 0.9 L_f}{E_s A_s} \quad (4)$$

6. 결론

지반앵커는 요구되는 설계하중을 확보하기 위하여 정착헤드의 정착조건과 인장자재의 특성에 따른 인장력 손실분을 고려하여 초기인장력(P_0)에 해당하는 프리스트레스를 가하여 정착시키는 구조체이다. 이때 초기인장력은 시간경과와 함께 어느 정도의 인장하중으로 수렴되며 이후에는 지반 크리프와 기타 정착조건 등의 내

외적인 요인들에 의해 장기적인 손실이 발생하게 된다. 본 논문에서는 이러한 지반앵커의 특성을 고려하여 운영중인 지반앵커의 보유인장력(retained bonding capacity)을 보다 쉽게 측정할 수 있고 또한 이를 통해 앵커의 유지관리를 보다 용이하게 할 수 있는 기술에 대하여 논하였으며 본 논문의 검토결과는 다음과 같다.

- (1) 후 법칙(Hooke's law)과 상대변위측정기를 이용하여 실규모 모형시험을 실시하였으며 이를 통해 자유장에서의 탄성신장량에 대응하는 보유 인장력의 측정결과는 유압잭을 이용한 측정값과 유사함을 확인할 수 있었다.
- (2) 풍화암에 정착된 지반앵커를 대상으로 현장시험을 실시하였으며 상대변위측정기와 리프트오프 시험에 의한 보유인장력을 초기인장후 32일 경과시에 측정한 결과 인장력의 변화가 거의 없음을 확인할 수 있었는데, 이는 초기인장이후의 정착단계로서 정착헤드의 정착조건과 인장자재의 특성에 따른 인장력 손실이 미발생됨에 따른 것으로 판단된다.
- (3) 그러나 75일 경과후의 보유인장력은 감소됨을 확인할 수 있었는데 이때 리프트오프 시험을 통해 측정된 인장력은 320.0~360.0 kN으로 측정되었으며 상대변위측정기를 통해 측정된 인장력은 312.5~353.3 kN으로 측정됨에 따라 전반적으로 이 두 방법에 의한 인장력은 대체로 유사함을 확인할 수 있었다.
- (4) 보유인장력이 작게 발현되는 FT-2 앵커를 대상으로 추가적인 앵커 인발시험을 실시하였으며 이를 통해 풍화암에 정착된 인장형 앵커의 인발하중과 소성변위와의 관계를 분석한 결과 리프트오프 시험 또는 상대변위측정기를 통해 측정된 보유인장력 이후의 추가 인발하중 작용시 소성변위가 급격히 증가함을 확인하였다.

본 연구에 적용된 현장 실측치는 2017년 3월에 측정된 값에 기준한 것으로서 향후 본 현장을 대상으로 시험 앵커체의 보유 인장력을 장기간 모니터링할 계획이며, 이를 통해 상대변위측정기를 이용한 보유 인장력 측정 시스템의 검증을 지속적으로 실시할 예정이다.

참고문헌 (References)

1. Manual for Design, construction and maintenance of ground anchors, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of Korea, 2009,

- p.86-101.
2. British standard BS 1237 (2000), "Execution of Special Geotechnical Work - Ground Anchors", pp.30-35.
 3. Coates, D. F. and Yu, Y. S. (1970), "Three Dimensional Stress Distributions Around a Cylindrical Hole and Anchor", Proc. 2nd Int. Conf. on Rock Mech., Belgrade, pp.175-182.
 4. Federal Highway Administration (1999), "Ground Anchors and Anchored Systems", pp.4-10, 46-77.
 5. GEOSPEC-1 (1989), "Model Specification for Prestressed Ground Anchors", Geotechnical control office, Civil Engineering Services Department Hong Kong, pp.46-65.
 6. Hong, S. W. (2002), "The Study on Pullout Resistance Characteristic of the Compression Anchor by Pullout Test on the Field", *Journal of Advanced Research in Ocean Engineering*, Vol.16, No.2, pp. 44-52.
 7. Hong, W. P., Yun, J. M., and Song, Y. S. (2004), "Lateral Earth Pressure acting on Anchored Retention Walls installed in Cut Slope", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.24, No.2C, pp.125-133.
 8. Jeong, H. S., Han, K. S., and Lee, Y. S. (2017), "Numerical Study on the Skin Friction Characteristics of Tension Type Ground Anchors in Weathered Soil", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.1, pp.39-56.
 9. Kim, J. H. and Jeong, H. S. (2014), "Characteristics of Multi Load Transfer Ground Anchor System", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol.16, No.01, pp.25-50.
 10. Kim, J. H. and Jeong, H. S. (2016), "Ground Anchor Technique for Executives", first edition, CIR, pp.17-53, 137-148.
 11. Kim, N. K. (2001), "Load Transfer of Tension and Compression Anchors in Weathered Soil", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.17, No.3, pp.59-68.
 12. Kim, Y. M., Cho, K. W., Kim, W. K., and Kim, H. M. (2004), "Load Distribution and Pullout Capacity of Compression Anchors", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, pp.4219-4224.
 13. Littlejohn, G. S. (1980), "Design Estimation of Ultimate Load Holding Capacity of Ground Anchors", *Ground Engineering*, England, pp.25-39.
 14. Mecsi, J. (1997), "Some Practical and Theoretical Aspects of Grouted Soil Anchors", Institution of Civil Engineers Conference on Ground Anchors and Anchored Structures, London, March 1997, pp.119-130.
 15. Ostermayer, H. (1974), "Construction, Carrying Behavior and Creep Characteristics of Ground Anchors", *ICE Conf. on Diaphragm Walls and Anchorages*, London, pp.141-151.
 16. Ostermayer, H. and Scheele, H. (1977), "Research on Ground Anchors in Non-Cohesive Soils", *Revue Francaise de Geotechnique*, Vol.3, pp.92-97.
 17. Post-Tensioning Institute (2004), "Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors", pp.35-50.
 18. Soiltech Korea. Co., Ltd. (2015), "Technical Manual for Self Diagnosable Ground Anchor System", pp.1-6.
 19. Sung, H. J. (2012), "Tension Force Monitoring of Ground Anchor Using Fiber Optic Sensors Embedded Tendon", Ph D Thesis, Chonnam National University, pp.69-144.
 20. Sung, H. J., Kim, Y. S., Kim, J. M., and Park, G. H. (2011), "Tension Force Monitoring of Tension Type Ground Anchor Using Optical FBG Sensors", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.6, pp.17-26.
 21. Vukotic, G. and Gonzalez Galindo, J. (2013), "The Influence of Bond Stress Distribution on Ground Anchor Fixed Length Design. Field Results and Proposal for Design Methodology", *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, pp.2119-2122.
 22. Xanthakos, P. P. (1991), "Ground Anchors and Anchored Structures", A Wiley-Interscience Publication, pp.123-195.

Received : September 6th, 2017
 Revised : September 26th, 2017
 Accepted : October 10th, 2017