

# 실규모 실험을 이용한 그라운드 앵커의 거동 특성 평가

## Evaluation of Characteristics of Ground Anchor Using Large Scale Laboratory Test

이 상 래<sup>†</sup> · 설 승 환<sup>1)</sup>

Sangrae Lee · Seunghwan Seol

Received: September 14<sup>th</sup>, 2023; Revised: September 27<sup>th</sup>, 2023; Accepted: October 24<sup>th</sup>, 2023

**ABSTRACT** : Ground anchor has been widely used specially for maintaining stability on reinforced cut slope in expressway. While the durability of the ground anchors should be ensured over the service life. However, the long-term loss of tensile force has occurred in most of field-installed anchors. Main causes are not clearly identified and very few studies have been made for analyzing long-term behavior of ground anchor in slopes. In this study, full-scale model tests and long-term measurements were made to obtain the load-displacement data and identified the causes of the long-term behaviors of ground anchor. As a result, the bond strength decreases exponentially with increasing water-binder ratio. Especially, groundwater is the most influencing factor to the bond strength. In the long-term behavior, the load decreases sharply until the initial settlement stabilized, and thereafter the tension force decreases constantly.

**Keywords** : Ground anchor, Long-term behavior, Model test, Load loss

**요 지** : 그라운드 앵커 공법은 최근 깎기 비탈면과 교대 등의 보강을 목적으로 사용이 증가하고 있다. 그라운드 앵커는 구조물의 사용연한 이상의 내구성을 확보하여야 하지만 국내 고속도로에 시공된 대부분의 앵커에서 장기적인 긴장력 손실이 발생하여 안정성이 문제가 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 실규모 모형실험을 통하여 긴장력 감소원인에 대한 분석을 수행하였다. 실험결과 물-결합재 비가 55%가 되는 시점부터 부착력의 감소현상이 나타났으며, 인장썩기의 영향으로 강연선 파단강도의 14%의 감소현상이 나타났다. 지반강도, 앵커형식, 지하수의 유무에 따라 극한인발력이 차이를 보였으며, 특히 지하수의 유무는 그라우트의 강도 및 품질에 관여하여 앵커의 거동특성에 미치는 영향이 가장 높은 것으로 나타났다. 장기거동에서는 초기 정착이 안정되는 시점까지 급격하게 하중이 감소하다가 이후에는 일정하게 긴장력이 감소하는 것으로 나타났다.

**주요어** : 그라운드 앵커, 장기거동, 모형실험, 긴장력 감소

## 1. 서 론

그라운드 앵커 공법은 강연선과 그라우트로 구성된 앵커체에 프리스트레스를 가하여 지반과 구조물의 일체화거동을 통해 구조물의 안정성을 확보하는 공법으로 지반보강, 비탈면 안정, 구조물 보강 등의 분야에 사용이 증가하고 있다. 특히, 비탈면 보강용으로 사용되는 그라운드 앵커는 영구적인 구조물로 가설앵커와는 다르게 그 대상 구조물의 사용연한 이상의 내구성을 확보하여야 하며, 일반적으로 설계시 필요한 앵커하중 외에 지반의 크리프(Creep), 인장재의 릴랙세이션(Relaxation)의 영향에 의해 시간의 경과와 함께 감소하는 응력손실을 고려하여 설계하여야 한다(PTI, 2004; ICE, 2008).

현재 국내에 시공된 비탈면 보강용 앵커를 대상으로 실시한 잔존 긴장력 측정결과, 50% 이상의 대부분 앵커에서 잔존 긴장력이 설계앵커력 대비 10% 이상 감소한 것으로 나타났다(KEC, 2016), 이는 기존의 설계법과 실제 앵커에서 발생하는 거동에 차이가 있어 장기적인 인장력을 발휘하는 그라운드 앵커의 안정을 위해 긴장력 손실을 정확하게 예측하고 예측된 긴장력 손실량을 반영하는 설계가 필요함을 나타내고 있다(Sabatini et al., 1999; Lee & Lee, 2015). 그동안 일반적인 설계에서 국외시방에서 제시된 실험값을 토대로 재료의 파단, 그라우트와 지반의 마찰, 그라우트와 긴장재의 부착력만을 고려하였다(DIN4125, 1976; BSI, 1989; FHWA, 1990). 그러나 이는 단기적 안정성만을 고려한 설계로 실제로 앵커는 지반 내에 근입되어 시공되기에 용수에

† Principal Researcher, Safety Innovation & Disaster Prevention Research Division, Korea Expressway Corporation Research Institute (Corresponding Author : [lsr8898@ex.co.kr](mailto:lsr8898@ex.co.kr))

1) Ph.D. Student, Department of Urban Disaster Management Engineering, Kyonggi University

의한 부착력과 마찰력의 감소 등을 고려해야 하고, 시공 시 발생하는 인장썩기의 영향에 의한 긴장력 감소 및 장기거동 등의 복합적인 원인으로 발생하는 앵커하중의 변화를 고려해야 한다.

앵커의 긴장력 감소는 복합적인 원인으로 발생되기 때문에 이를 예측하여 설계에 반영하기는 어려운 실정으로 현재까지의 연구는 주로 정착장의 마찰특성을 규명하기 위해 지반조건, 천공경, 앵커종류 등에 따른 단기적인 마찰력의 증가효과를 확인하였다(Kim, 2003; Lee et al., 2002). 그러나 국내에 시공되는 마찰형 앵커의 경우 정착장 뿐만 아니라 자유장까지 전장에 걸쳐 그라우트가 시공되어 실제 마찰력을 발휘하는 구간이 설계값 보다 매우 커 마찰력 감소로 인한 앵커파괴의 발생사례는 거의 없다. 오히려 암반 내 용수가 많은 구간과 시공 장비의 한계로 인해 그라우트의 품질이 확보되지 못하여 장기적인 긴장력 감소가 발생하는 사례가 보고되고 있으나 이에 관한 연구는 부족한 실정이다(KEC, 2016).

따라서 본 연구에서는 그라우트 품질에 따른 긴장재의 부착거동과 긴장재의 파단강도 실험을 실시하여 영향인자에 따른 앵커의 거동을 분석하였으며, 이를 토대로 실규모 모형실험을 통하여 지반조건과 지하수위 조건을 달리한 하중변위 특성과 장기계측을 통해 그라우트 품질에 따른 장기거동특성을 분석하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 긴장재의 부착 및 파단 특성 실험

그라우트의 압축강도는 앵커의 성능을 결정하는 가장 중요한 인자로, 일반적으로 마찰인장형의 경우 부착력의 저하를 유발하고, 압축형의 경우 그라우트의 압축에 의한 취성파괴를 일으킨다(Kim, 2016). 국내 지방에서는 그라우트의 품질확보를 위해 45%의 물-결합재비를 유지하여 시공하도록 하고 있으나 실제 앵커 시공 시에는 피압수로 인한 지하수의 영향과 소규모 주입관(10mm)의 사용으로 인한 난해한 시공성으로 인해 그라우트의 기준강도를 확보하기 어렵고 그동안의 연구에서도 그라우트의 품질에 따른 부착력의 거동에 대한 평가는 미비한 상태이다(KEC, 2012). 따라서 본 연구에서는 이에 대한 영향을 확인하기 위하여 물-결합재비를 40~55%까지 5%씩 달리한 인발시험을 4개소 실시하여 그라우트의 물-결합재비에 따른 부착력의 변화를 분석하였으며, 실험은 1가닥 강연선을 인장형으로 몰드에 시공하였고, 강연선이 파단하거나 30mm 이상 변위가 발생되었을 때

시험을 종료하였다(KEC, 2016).

한편, 현재 앵커의 설계하중은 긴장재 극한인장하중의 60% 수준에서 결정되기 때문에 강연선의 극한강도는 설계에서 중요한 인자이다. 현재 긴장재로 사용되는 PC강연선은 국가기준으로 규정되어 있으나 앵커공법의 특성 상 긴장 시에 정착썩기로 인한 손상이 발생하게 되고 재료강도의 저하를 일으킨다. 이에 본 연구에서는 긴장 중 썩기의 영향에 의해 발생하는 강연선의 파손특성을 분석하였다. 실험은 1가닥, 강연선 20개에 대하여 썩기의 크기를 다르게 하고 강연선이 파단할 때까지 실험을 실시하고 종료하였다.

### 2.2 실규모 모형실험

그라운드 앵커의 그라우트 품질에 따른 정착부 거동 특성을 분석하기 위해 실규모 모형에 대한 인발시험, 인장시험 및 장기계측을 수행하였다. 실험은 Table 1과 같이 앵커의 종류, 지하수위의 유무, 그리고 지반강도를 변화시켜 총 24회를 실시하였다. 암반에 정착된 앵커를 모사하기 위하여 직경 1.0m, 높이 1.2~1.5m의 파형강관을 경계로 레디믹스 콘크리트를 타설하여 암반을 조성하였으며, 모사된 콘크리트의 28일 압축강도는 8.3~13.1MPa이었다. 지반조성 시 파형강관 내부에 직경 100mm의 강관을 거치하여 천공홀을 확

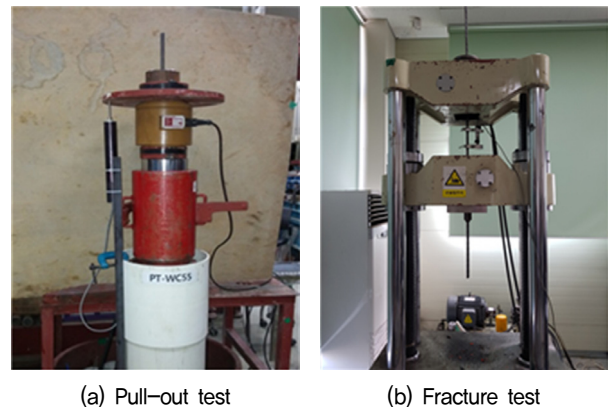


Fig. 1. Strand test

Table 1. Summary of the anchor used model tests

No.	Anchor type	Groundwater status	Ground strength	Test type
1	Tension type (T)	Exist (W)	8.3MPa	Pull-out test, Performance test, long-term measurement
2			13.1MPa	
3		Not exist	8.3MPa	
4			13.1MPa	
5	Compression type (C)	Exist (W)	8.3MPa	
6			13.1MPa	
7		Not exist	8.3MPa	
8			13.1MPa	

보하였으며, 강관에 의한 구속효과를 배제하기 위하여 강관의 직경을 정착부 직경의 10배로 충분히 이격시켰다. 정착장은 직경 100mm, 길이 1m의 천공홀에  $\phi 12.7\text{mm} \times 3\text{EA}$ 의 앵커체가 시공되었고, 지하수위 모사를 위해 천공홀 및 모형지반의 상부까지 수위를 유지한 상태로 24시간 이상 수침하고 그라우트를 주입하였다. 그라우트는 압력의 영향을 배제하기 위하여 중력식으로 주입하였으며, 물-결합재비 45%로 설정하였고 그라우트의 28일 압축강도는 19MPa로 확인되었다(KEC, 2016).

본 연구에서 사용된 마찰인장형 앵커는 현장에서 시공되는 앵커와 동일하게 간격재를 이용하여 부착효과를 극대화하였으며, 압축형 앵커는 선단에 내하체를 두고 강연선 전체에 피복을 씌워 자유거동을 할 수 있도록 모사하였다.

앵커의 인발까지 시험을 실시하였으며, 인장시험은 한국도로공사에 제시되어 있는 시험방법에 따라 최대시험하중을 설계 하중의 120%로 하여 5-cycle 반복재하로 실시하였다. 시험 종료 후 장기계측은 총 75일 동안 7일의 간격으로 하중변화를 계측하였으며, 계측은 로드셀 및 LVDT를 사용하여 하중변위 결과를 측정하였다. Fig. 2는 시험에 사용된 압축 및 인장형 앵커와 압축시험 전경을 나타낸 사진이다.



(a) Compression and tension type anchor



(b) The whole view of the tension test

Fig. 2. Ground anchor type

### 3. 실험결과

#### 3.1 부착강도 실험결과

Fig. 3은 물-결합재비(W/B)에 따른 강연선의 인발시험 결과로 인발초기에 자유장부의 강연선에 의한 탄성거동을 보였으며, 변위가 증가할수록 물-결합재비에 따른 그라우트 압축강도의 영향으로 강연선이 인발되는 부착과파괴가 나타나는 거동을 보였다. 시험결과, 일정 구속압 조건에서 부착력은 그라우트의 압축강도에 따라 거동이 다르며, 인발변위를 30mm로 동일하게 하였을때 최대 약 15% 이상의 극한인발하중의 차이를 보여 물-결합재비에 따른 그라우트의 품질이 앵커의 부착거동에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다.

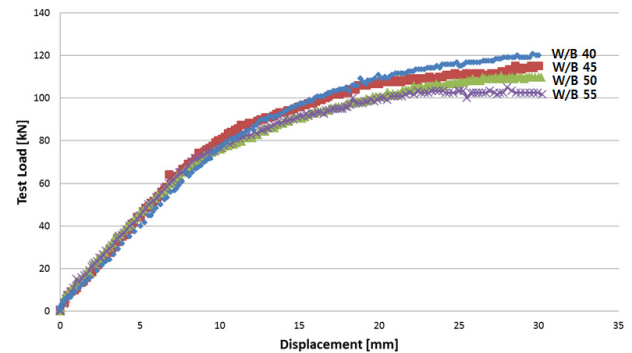
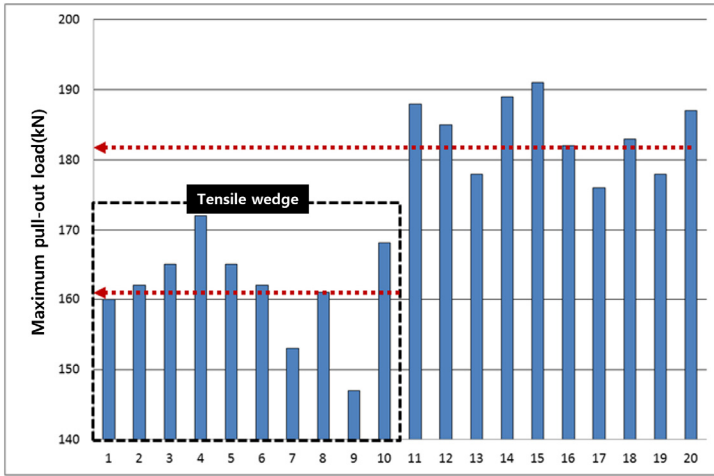


Fig 3. Pull-out test results

#### 3.2 파단강도 실험결과

Fig. 4는 인장썰기의 크기에 따른 강연선의 인장강도 시험의 결과로 인장썰기를 사용한 강연선의 인장강도가 평균 약 161.5kN으로 측정되었고, 정착썰기의 경우에는 평균 183.7kN으로 측정되었다. 이는 현재 KS-D-7002에 규정된 12.7mm (SWPC 7 wire low relaxation)의 강연선의 극한인장강도인 183.4kN의 기준에 정착썰기는 만족하였으나, 인장썰기는 만족하지 못하는 결과로 약 14%의 인장강도가 저하되었다. 강연선의 파단은 대부분 썰기의 사용으로 인해 손상된 강연선의 끝부분에서 한 가닥씩 파단되는 거동으로 나타났다. 강연선의 극한인장강도는 앵커의 설계하중 및 최대시험하중을 결정하는 중요한 영향인자로 현재 시공 편의성을 위해 사용되는 인장썰기로 인해 강연선의 극한인장강도가 저하될 수 있음을 나타내며 강연선의 파단형상이 대부분 썰기로 인해 손상된 부분에서 발생되어 앵커 썰기로 인한 강연선의 손상이 앵커의 긴장력을 저하시키는 중요한 영향임을 확인하였다. Table 2는 강연선의 화학·기계적 성분분석을 통해 재료자체의 결함을 분석하기 위한 시험결과로 제작위치가 다른 3개의 강연선에 대한 성분분석을 통해 재료의 결함을



(a) Tensile load

(b) Failure Shape

Fig. 4. Fracture test results

Table 2. Mechanical properties and chemical composition of strand

Test No.	Unit weight	Max. diameter	Max. diameter	Twist length	C	P
1	783	12.8	12.6	13	0.8	0.73
2	780	12.8	12.6	13	0.8	0.71
3	786	12.9	12.8	14	0.8	0.70

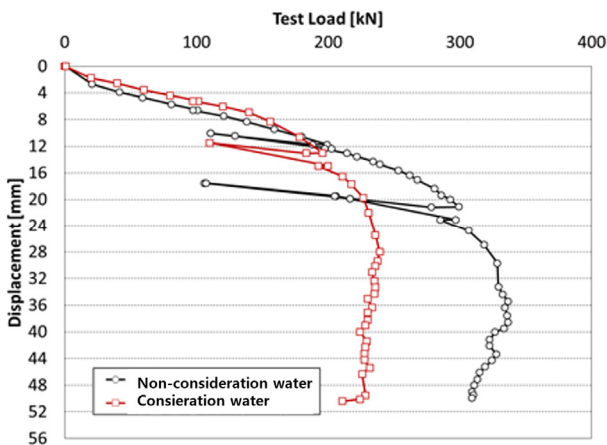
을 분석하였으며, 오차범위 내로 나타나 강연선 재료자체의 결함으로 인한 파단영향은 적은 것으로 판단된다.

### 3.3 모형인발 시험결과

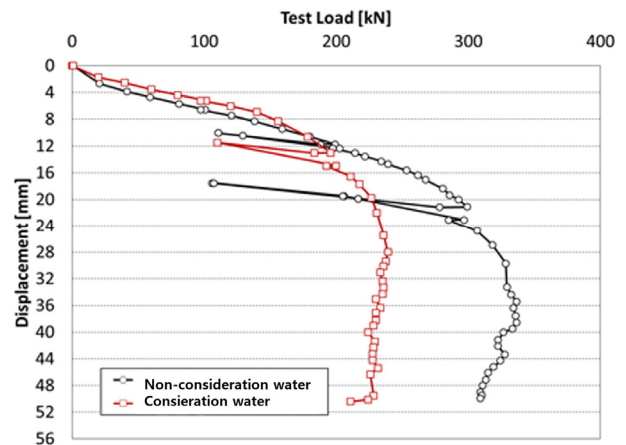
Fig. 5에는 마찰인장형과 마찰압축형으로 구분된 앵커의 지하수위(W) 존재 여부에 따라 구분하여 수행한 앵커의 하중-변위 곡선을 나타내었다. 인장형 앵커의 경우 극한주면 마찰력에 도달하기 전에 부착응력을 초과하여 강연선이 인발되는 부착파괴 형상이 나타났으며, 압축형의 경우 선단의

내하체에 의해 저항하는 그라우트의 압축강도가 파괴를 지배하는 요소이기 때문에 재하된 하중범위 내에서 앵커의 파괴는 관찰되지 않았다. 시험결과 앵커의 종류에 관계없이 지하수위가 존재하는 경우에 극한인발저항력이 현저히 낮아지는 것을 확인할 수 있었고, 전하중(P)-침하(S)곡선법을 통해 극한인발저항력을 계산하였을 때 인장형에서 65%, 압축형에서 90%의 하중감소율을 나타냈다. 또한 잔류변형량을 기준으로 분석하였을 때 지하수위가 존재하는 경우 잔류 변형량이 39~78% 까지 증가하는 것으로 나타나 지하수위에 따른 영향이 매우 큰 것을 확인하였다.

Fig. 6에서 지반강도와 앵커형식에 따른 마찰형 앵커의 하중-변위 곡선을 나타내었다. 앵커의 부착응력에 지하수위가 미치는 영향이 크기 때문에 두 경우 모두 지하수위가 존재하는 조건에서 분석을 실시하였고, 앵커형식에 따른 시험에서는 주변지반강도가 낮은 조건에서의 앵커의 거동을 분석하였다. 실험결과 지반강도에 따라 발생하는 하중-변위

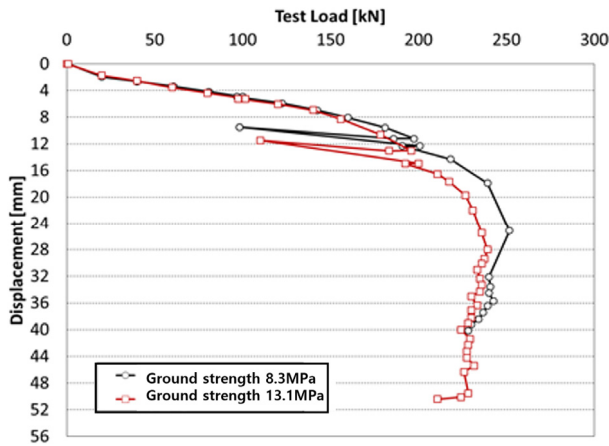


(a) Tension type

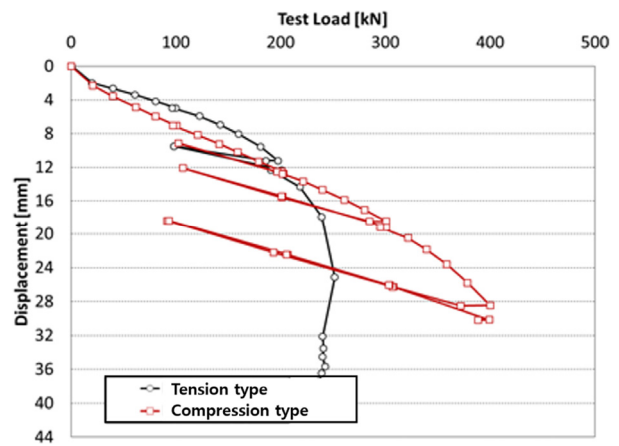


(b) Compression type

Fig. 5. Load-displacement curve with ground water level



(a) Ground strength



(b) Anchor type

Fig. 6. Load–displacement curve with ground strength and anchor type

곡선은 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며 이는 앵커의 파괴거동을 부착거동이 지배하여 나타난 결과로 판단된다. 압축형 앵커의 경우에는 파괴가 관찰되지 않았으며, 극한인발저항력이 크게 산정된 이유는 선단의 내하체로 인한 그라우트의 압축강도가 파괴거동을 지배하였고, 그라우트의 압축파괴가 발생되지 않은 상태에서 주변 마찰저항력이 크게 작용하였기 때문으로 판단된다.

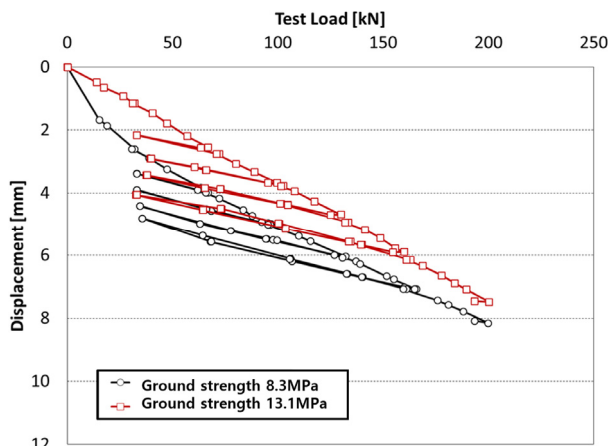
### 3.4 모형인장 시험결과

Fig. 7은 마찰인장형 앵커의 지반강도와 지하수위(W) 존재 여부에 따라 구분하여 수행한 앵커의 인장시험의 하중-변위 곡선이다. 인장시험의 경우 장기계측을 위하여 탄성변위 내로 최대시험하중을 낮춰서 시험을 실시하였다. 시험결과 모든 조건에서 하중-변위 곡선이 거의 선형을 나타내어 탄성거동을 하였으며, 최대 잔류변형량이 2~3mm 이내로 측정되었다. 인발시험과 마찬가지로 지반강도가 클수록

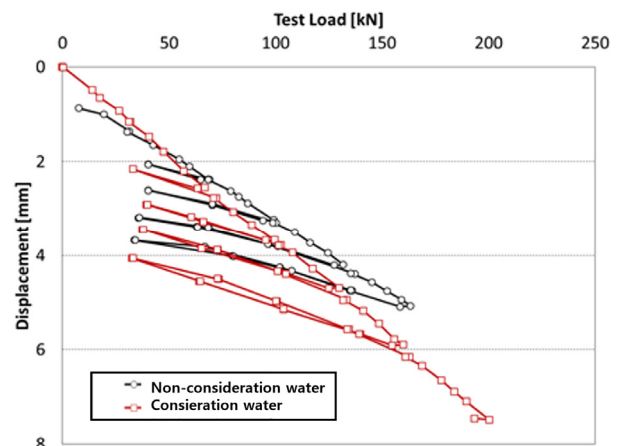
구속효과가 증대되어 탄성거동의 기울기가 작게 평가되었으며, 마찰인장형의 경우 지하수위가 있을 시 하중-침하곡선의 기울기가 없는 경우에 비해 급하게 형성되었고, 이는 지하수위의 영향에 따라 긴장재의 부착응력에 차이가 발생했음을 나타내는 결과이다.

### 3.5 장기계측 결과

Fig. 8은 인장시험을 수행한 앵커에 대해 장기 하중감소를 분석결과를 나타내었다. 앵커의 초기하중은 정착 시 두부의 활동에 의한 손실의 차이로 인해 상이하게 설정되었으며, 정착된 초기하중대비 감소율을 비교하였다. 앵커 형식별로 초기정착하중 대비 마찰압축형의 경우 8~14%, 마찰인장형의 경우 10~21%의 하중감소율이 나타났다. 특히 마찰인장형의 경우 초기 정착하중이 압축형의 50% 수준임에도 불구하고 손실률이 압축형에 비해 약 1.5배 크게 발생하였다. 특히 초기 손실률을 제외하고 비교하였을 때는 대부분

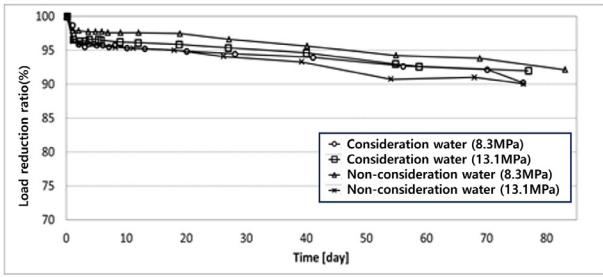


(a) Ground strength

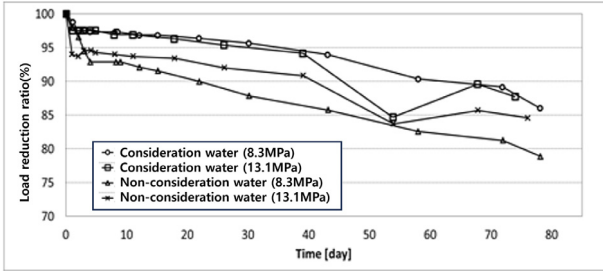


(b) Ground water

Fig. 7. Performance test results of the tension type anchor



(a) Compression type



(b) Tensile type

Fig. 8. Results of long-term measurement

분의 앵커에서 비슷한 기울기로 하중이 감소되는 것으로 나타나 콘크리트의 탄성침하가 일정하게 발생하여 긴장력에 영향을 미친 결과로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 앵커의 장기거동에 영향을 미치는 인자에 대한 실험모형을 조성하여 인장, 인발시험, 그리고 장기계측을 수행하였으며, 이로부터 도출한 결론들은 종합하면 다음과 같다.

- (1) 그라우트와 강연선의 부착강도 실험 결과, 물-결합재비의 증가에 따라 부착강도가 감소하고 특히 물-결합재비가 55%를 초과하면 강도감소가 현저하게 발생하는 것으로 나타났다.
- (2) 강연선의 인장시험 결과, 앵커의 시공을 위해서 사용되는 인장썰기에 의해 강연선이 파단강도보다 현저히 낮은 하중에서 파단되는 것을 확인하였다. 이는 앵커의 설계하중 산정 시 인장썰기의 영향을 고려하여 항복 및 파단강도를 선정해야 함을 의미한다.
- (3) 인발시험결과, 주변지반의 강도와 앵커의 극한인발저항력과의 상관관계는 도출이 힘들었으나, 지하수의 유무에 따라 그라우트의 품질이 영향을 미치며 이에 따라 앵커

의 극한인발저항력에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 앵커의 형식별로는 동일한 지반조건일 경우에 마찰압축형이 마찰 인장형에 비해 높은 인발저항력을 발휘하였다.

- (4) 인장시험 및 장기계측 결과, 초기정착 후 약 3일이 되는 시점까지 하중손실이 급격하게 발생되었으며, 이후 70일 간에는 비슷한 기울기로 하중이 감소되는 경향을 보였다. 특히 마찰인장형의 경우 마찰압축형에 비해 초기정착하중이 50% 임에도 손실률은 1.5배 이상 큰 것으로 나타나 앵커의 장기거동에 불리한 형식으로 판단된다.

## References

1. British Standards Institution (1989), British Standard Code of Practice of Ground Anchorages, BS. 8081.
2. Deutsche Industrie Normen (1976), Ground Anchorages Design, Construction and Testing, DIN, 4125.
3. Federal Highway Administration (1990), Permanent Ground Anchors, FHWA-DP-90-068-003.
4. ICE (2008), Ground anchorages and anchored structures in service, Proc. Int. Conf. Organised by the Institution of Civil Engineers (editor G S Littlejohn), Thomas Telford, London.
5. Kim, N. K. (2003), Performance of tension and compression anchors in weathered soil, The Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 129, No. 12, pp. 1138~1150 (in Korean).
6. Kim, J. H. (2016), Characteristics of Multi Load Transfer Ground Anchor System, Ph.D. Thesis, Kunkuk University (in Korean).
7. Korea Expressway Corporation (2016), Investigation of application condition and making the performance improvement technique of permanent ground anchor, Korea Expressway Corporation Research Institute Report, KECRI-2016-59-534.9607 (in Korean).
8. Korea Expressway Corporation (2012), Groundanchor Performance and Proof test guideline, Korea Expressway & Transportation Research Institute (in Korean).
9. Lee, B. J. and Lee, J. K. (2015), Evaluation of loss of prestress force of tensile anchor by long term measurement, Journal of the Korean Geoenvironmental Society, Vol. 16, No. 10, pp. 15~22 (in Korean).
10. Lee, J. D., Choi, Y. G. and Bang, S. T. (2002), Pull out characteristics of compression ground anchors in granite soil, Proc. of Korean Geo-environmental Society, pp. 207~212 (in Korean).
11. Post Tensioning Institute (2004), Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors, 4th edition, Post-Tensioning Institute.
12. Sabatini, P. J., Pas, D. G. and Bachus, R. C. (1999), Geotechnical engineering circular No. 4 ground anchors and anchored systems, FHWA-SA-99-015, Office of Bridge Technology Federal Highway Administration, Washington, D.C, pp. 6~28.