

현장 그라운드 앵커 장기거동 분석을 통한 잔존긴장력 평가

Evaluation of Residual Tensile Load of Field Ground Anchors Based on Long-Term Measurement

박 성 열¹ Park, Seong-yeol 이 상 래² Lee, Sangrae
정 중 홍³ Jung, Jonghong 조 완 제⁴ Cho, Wanjei

Abstract

For permanent anchors used for slope reinforcement, bearing capacity and durability should be secured during the period of use. However, according to recent domestic and foreign studies, phenomena such as tension fractures, damage to anchorages, deformation and damage to slope and reduction of residual load over time have been reported along the long-term behavior of the anchors. These problems are expected to increase in the future, which will inevitably lead to problems such as increasing maintenance costs and relevant facility collapse. It is necessary to improve maintenance procedures and methods of ground anchors more practically. In this study, the problems and limitations of domestic maintenance methods were analyzed by conducting a literature study, and the measurement data of load cells installed on the install ground anchors were analyzed to determine the change in the residual load with regard to the elapsed date of the anchors. Based on the results, the effect of the construction conditions of anchors and the soil compositions on the increase and decrease of load were identified.

요 지

비탈면 보강 용도로 사용되는 영구앵커의 경우 사용기간 동안 지지력 및 내구성이 확보되어야 한다. 그러나 최근 국내·외 연구 결과에 따르면 앵커의 장기거동에 따라 긴장재 파단, 정착구 파손, 비탈면 변형 및 손상, 시간에 따른 잔존긴장력 감소 등의 현상들이 보고되고 있다. 이러한 문제는 앞으로 증가할 것으로 보이며, 이로 인한 유지보수 비용의 증가, 시설물 붕괴 사고 등의 문제가 불가피할 것으로 보인다. 이에 본 연구에서는 그라운드 앵커의 유지관리 절차 및 방법을 현실적으로 보완하기 위해 문헌연구를 수행하여 국내 유지관리 기법의 문제점 및 한계를 제시하였다. 이후 실제 현장 그라운드 앵커에 설치되어 있는 하중계 측정자료를 분석하여 앵커들의 경과일에 따른 잔존긴장력의 변화를 파악하였고, 최종 분석 결과를 통해 앵커의 시공조건, 구성암반 등이 긴장력의 증감에 미치는 영향을 파악하였다.

Keywords : Ground anchor, Load cell, Long-term behavior, Maintenance, Residual tensile load

1 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Dankook Univ.)

2 정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 안전연구실 수석연구원 (Member, Principal Researcher, Korea Expressway Corporation Research Institute)

3 정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 안전연구실 수석연구원 (Member, Principal Researcher, Korea Expressway Corporation Research Institute)

4 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Dankook Univ., Tel: +82-31-8005-3507, 12090524@dankook.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

그라운드 앵커는 1950년대 일본에서 비탈면 및 구조물의 안정을 위한 목적으로 처음 사용되었으며, 그라우트의 주입에 의해 지반에 조성되는 앵커체, 인장부, 앵커두부로 구성되어 있다(Korea Infrastructure Safety Corporation, 2009). 그라운드 앵커 공법은 앵커체에 프리스트레스를 가하여 지반과 구조물의 마찰력을 통해 지반 및 구조물의 안정성을 확보할 수 있다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010).

국내에서는 1970년대 이후로 비탈면 안정성 확보, 구조물 보강 등의 목적으로 그라운드 앵커 공법을 사용하고 있다. 그중 장기적으로 거동하는 영구앵커의 경우 구조물 사용기간동안 앵커의 지지력 및 내구성 확보가 필수적이거나, 최근 국내·외 연구 결과에 따르면 앵커의 장기거동에 따라 긴장재 파단, 정착구 파손, 비탈면 변형 및 손상, 시간에 따른 잔존 긴장력 감소 현상 등이 발생했다고 보고되고 있다. Korea Expressway Corporation (2016)에 따르면 국내에 시공된 대부분의 앵커에서 잔존긴장력이 설계앵커력 대비 10% 이상 감소한 것으로 보고되었고, 급경사지 안전관리 실태 감사에 따르면 7개 현장을 대상으로 한 잔존긴장력 측정 결과 6개 현장에서 20% 이상의 잔존긴장력이 감소되었다고 보고되었다(The Board of Audit and Inspection of Korea, 2019). 이와 같은 장기거동에 대한 그라운드 앵커의 성능 하락에 대한 원인 조사는 예전부터 수행되어 왔으며, 보통 긴장재의 부식 및 손상, 긴장재의 Relaxation, 그라우트-긴장재 Creep, 지반-그라우트 Creep 등에 의해 발생한다고 알려져 있다. 하지만 이러한 각 요인들의 장기거동에 대한 영향 및 관련성 등에 대해서는 명확히 규명된 바 없다(Weatherby, 1982). 또한, 현재 적용되고 있는 그라운드 앵커의 설계법에 따르면 그라운드 앵커는 장기거동에 의한 긴장력 감소현상, 앵커체의 내구성 확보 등을 고려해야 한다는 일반적인 사항들만 언급되어 있고, 실제 지지력 및 긴장력 선정 시에 단기적인 재료의 파단, 그라우트와 지반의 마찰, 그라우트와 긴장재의 부착력 등만을 고려하여 설계하고 있는 실정이다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016).

그라운드 앵커의 장기거동에 따른 잔존긴장력 감소 문제는 앞으로 지속적으로 증가할 것으로 보이며, 이로 인한 유지보수 비용의 증가, 부실한 유지관리에 의한 시설물 붕괴 사고 등의 문제가 불가피할 것으로 보인다.

이러한 문제는 그라운드 앵커 유지관리 절차 및 방법이 보다 현실적으로 보완되어야 개선될 것으로 보인다.

이에 본 연구에서는 문헌연구를 수행하여 국내외 그라운드 앵커의 유지관리 기법에 대한 자료를 조사하여 국내 유지관리 기법의 문제점 및 한계를 제시하였으며, 앵커의 현 상태를 대표할 수 있는 요소 중 하나인 잔존 긴장력 파악을 위한 하중계 계측기법과 리프트오프 시험에 대하여 문헌연구를 수행하였다. 이를 토대로 실제 현장 그라운드 앵커에 설치되어 있는 하중계 계측자료를 분석하였고, 앵커의 경과일에 따른 잔존긴장력의 변화를 파악하였다. 긴장력의 장기적인 증감 추이를 확인하기 위해 가장 단순한 방법인 선형회귀분석을 수행하였고, 그 결과를 통해 앵커의 시공조건, 구성암반, 앵커 조건, 앵커종류 등이 긴장력의 증감에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 문헌연구

2.1 국내외 그라운드 앵커 유지관리 점검 기법

본 절에서는 국내·외 설계 기준에 대한 문헌연구를 수행하여 그라운드 앵커의 유지관리 점검 기법을 조사하였다. 국내 앵커 설계기준인 국토해양부(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010)에 따르면 그라운드 앵커 시설물의 유지관리를 위한 점검은 크게 육안에 의한 방법과 계측에 의한 방법을 제시하였으며, 일반적으로 육안점검을 수행하여 인장재의 파단, 각종 부재의 부식, 하중을 같이 받는 수압구조물의 파단 등의 이상징후를 조사하나, 육안점검으로 확인이 불가능한 경우 시험이나 계측을 수행하도록 권고하고 있다. 점검 종류로는 초기, 정기, 정밀점검 등이 있으며, 정기적인 점검, 관측, 계측을 통해 이상징후를 확인하고, 이에 대한 적절한 대책을 마련하고 있다. 국토해양부에서 제시한 국내 그라운드 앵커 유지관리 관리 업무 흐름도는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에 따르면 국내 그라운드 앵커 유지관리 점검은 준공 후 6개월 이내에 초기점검을 의무적으로 실시하고, 그 이후 반기별 1회 정기점검을 실시한다고 제시되어 있다. 만약 긴급상황이 발생하거나 이상징후 발견 시 긴급점검을 수행하고, 그렇지 않으면 앵커 준공 5년 후 정밀점검을 실시하고, 그 이후 3년에 1회 주기로 정밀점검을 실시한다. 정밀안전진단이 필요한 경우를 제외하

면 점검 및 진단결과를 검토하여 보수·보강을 실시한다. 각 점검 별 점검항목, 세부사항 및 점검방법은 국토해양부(2010)의 매뉴얼에 제시되어 있으며 주로 앵커, 앵커두부, 수압판 및 하중을 같이 받는 수압구조물에 대한 점검을 수행한다. 정밀안전진단은 앞에서 수행한 점검 결과 재해 및 재난 예방과 안정성 확보 등을 위해

필요하다고 판단되는 경우 실시하며, 선행 점검에서 수행하지 않은 정밀육안조사와 장비조사 및 현장시험을 수행하도록 제시되어 있다.

국의 기준은 BS 8081(영국), GEOSPEC1(홍콩), FHWA(미국), DIN-4125(독일)를 조사하였다. 조사 결과 국외 기준 모두 전반적으로 국내의 기준과 유사하다고 판단

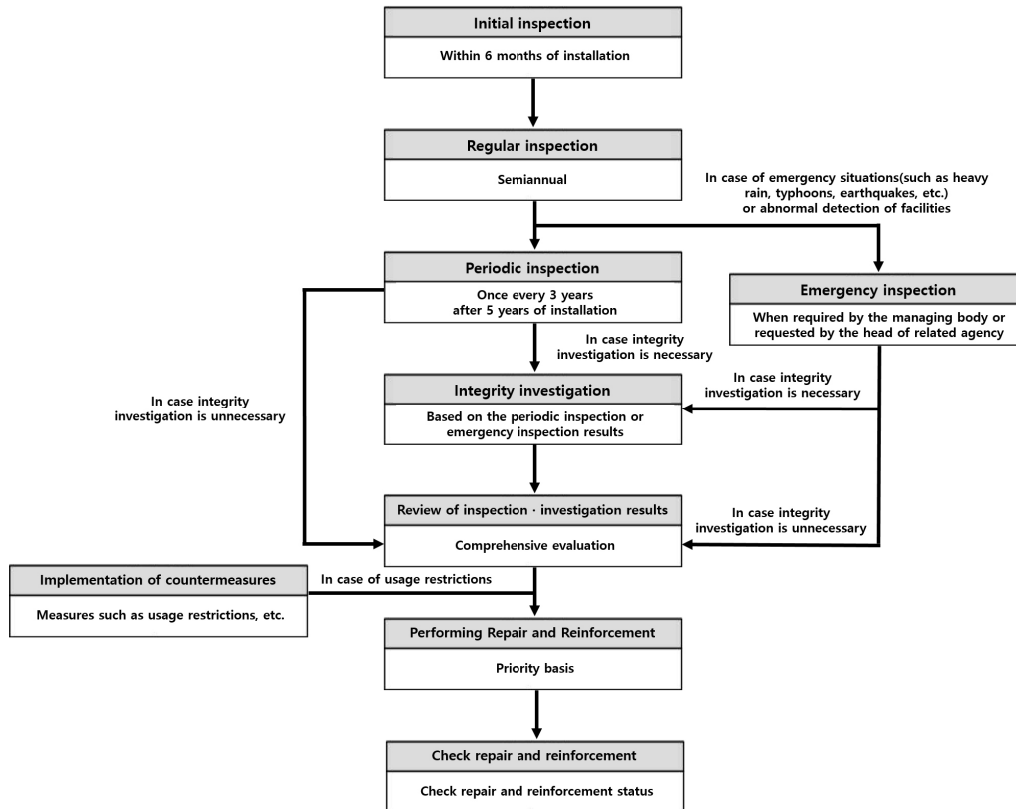


Fig. 1. Maintenance Management Flow Diagram (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010)

Table 1. Frequency and duration of maintenance based on anchor risk classification (Geotechnical Control Office, 1989)

Anchor Class	Frequency of Visual Survey	Monitoring of Individual Anchors		
		Number of Anchors for Monitoring to Nearest Whole Anchor Number	Frequency of Anchor Inspection and Residual Load Measurements after Locking-off	Extent and Frequency of Special Grease Checks
1 4	Monthly, up to the end of the Maintenance Period, then yearly thereafter	7% of first 50 anchors 3% of additional anchors	2weeks, 1month, 3months, 6months, 1year, 18months, 2years, 5years, then every 5years thereafter	one anchor every 5 years
2 5	Fortnightly, up to the end of the maintenance Period, then yearly thereafter	10% of first 50 anchors 7% of second 50 anchors 5% of additional anchors	2weeks, 1month, 3months, 6months, 9months, 1year, 18months, 2years, then every 2years thereafter	two anchors 2years, 5years, then every 5years
3 6	weekly, up to the end of the Maintenance Period, then every 6 months thereafter	15% of first 50 anchors 12% of second 50 anchors 10% of additional anchors	2weeks, 1month, 3months, 6months, 9months, 1year, 18months, 2years, then every year thereafter	three anchors 2years, 5years, then every 5years thereafter
Risk Category		Anchor Class		
		Temporary Anchor		Permanent Anchor
High		3		6
Low		2		5
Negligible		1		4

Table 2. Maintenance check detail of the anchors and anchor components (Deutsche Norm, 1990)

Object of test	Scope of test/check	Item to be checked/requirement (s)	Frequency
Prestressed steel	Consignment (steel grade and diameter) against certificate of approval	Marking : proof of quality Control : no damage, no excessive staining	Every consignment
	Transport vehicles	Steel supplied dry : no soiling	Every consignment
	Storage facilities	Stored under dry conditions : no soiling, no contact with potentially corrosive media	Every consignment
Reinforcing steel bars	Check of consignment for steel grade and diameter	Marking as in DIN 488 Part 1 or submission of an agreement	As required
Structural steel	Consignment (steel grade and size)	As specified in DIN 17 100	Every consignment
Anchor heads, couplers	-	Proof of serviceability (cf. subclauses 6.3 and 6.5)	Every consignment
Grouting material	Constituents	Identification of constituents	Every consignment
Stressing and measuring equipment	Stressing and measuring equipment	As specified in subclause 10.5 or 11.4	Once a year
Stressing	Loads and displacements	As specified in clause 10 or 11	Every anchorage
Grouting	Records	As specified in subclause 7.6.6	Every anchorage
Corrosion protection system	-	Proof of serviceability	Every consignment

하였으나, 홍콩 기준의 경우 앵커의 이상징후 혹은 이전 시공 자료에 대한 정보를 바탕으로 앞으로 발생할 수 있는 위험 가능성을 미리 판단하여 이에 따른 앵커를 분류하였고, 이를 통해 분류된 앵커에 해당되는 육안조사의 빈도, 점검대상 앵커의 수량, 잔존긴장력 측정 빈도, 그리스(Grease) 점검 빈도 등을 상세히 명시하였다. 또한, 독일 기준의 경우 앵커 자체의 유지관리 뿐만 아니라 앵커 부재 및 시험 장비에 대한 점검, 품질기준을 명시하였고 이에 해당하는 각각의 점검빈도도 상세히 명시하였다. 홍콩 기준과 독일 기준의 유지관리 점검에 대한 세부사항은 각각 Table 1, Table 2와 같다.

국내 기준과 국외 기준을 비교 검토한 결과, 국내에서도 독일 기준과 같은 앵커 부재에 대한 통일된 규격 또는 품질기준이 필요하다고 판단되었고, 홍콩 기준과 같이 이전 시공자료 및 시험자료를 통해 앵커의 위험도를 분류하여 위험발생 가능성이 높은 앵커를 미리 판단하고 이러한 앵커들에 대한 추가 조치 및 정량적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

2.2 하중계를 이용한 잔존긴장력 측정

본 절에서는 문헌연구를 통해 하중계를 부착한 그라운드 앵커의 장기적인 잔존긴장력 계측방법에 대하여 조사하였다. 현재 앵커의 잔존긴장력을 측정하는 방법으로는 하중계 부착을 통한 계측과 리프트오프 시험 등

이 있다. 국내 앵커 설계 기준인 국토해양부(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010)에 의하면 하중계는 일부 앵커에 설치되어 점검(긴급점검, 정기점검 등) 수행 시 축적된 계측자료를 통해 잔존긴장력을 평가한다. 하지만 정밀안전진단 수행 시 ‘정밀안전진단이 필요한 앵커와 그 상하·좌우 및 그것을 뺀 앵커의 10% 또는 3본 이상’의 앵커에 리프트오프시험을 수행하도록 명시되어 있다.

하중계를 사용한 계측은 추가적인 장비 없이 앵커 긴장력의 주기적인 측정이 가능하지만, 자연재해에 의한 하중계 노화 및 유실 위험이 존재하고 기존 설치된 앵커의 경우 하중계 설치를 위한 긴장재의 충분한 길이 확보가 어렵다. 또 기 시공된 앵커의 대부분은 하중계 미설치 및 손·망실된 경우가 많아 자료 획득이 어렵다는 단점이 있다. 이러한 하중계 설치가 어려운 앵커에 대해서는 리프트오프 시험을 수행하여 잔존긴장력을 추정하고 있다. 이처럼 리프트오프 시험은 필요시 언제나 확인할 수 있다는 장점이 있으나 재인장형 정착구의 적용이 필수적이며 별도의 시험비용이 발생한다(Kim, 2016).

홍콩 기준의 경우 국내 기준과 달리 앵커 위험도별 하중계 계측 시기를 제시하고 있다. 이는 Table 1과 같으며, 위험도가 높은 앵커들의 경우 하중계 설치 직후 초기값, 2주, 1개월, 3개월, 6개월, 9개월, 12개월, 18개월, 이후 매년 1년 측정을 원칙으로 하고 있다. 이에 국

내에서도 이와 같이 하중계 계측 시기를 정량적으로 제시하여, 앵커의 유지관리를 위한 잔존긴장력 자료를 주기적으로 획득하는 것이 적절하다고 판단된다.

2.3 리프트오프시험을 통한 잔존긴장력 측정

본 절에서는 국내·외 문헌연구를 통해 리프트오프시험을 통한 잔존긴장력 측정 방법에 대하여 조사하였다. 국토해양부의 경우 리프트오프 시험을 통해 하중~앵커두부량 관계를 작도하여 초기 직선 구간에서의 접선과 변곡점 이후의 직선 구간에서의 접선을 잔존긴장력으로 정의하고, 이 잔존긴장력과 설계긴장력을 비교하여 앵커의 안정성을 평가하도록 제시되어있다. 미국 FHWA(Sabatini et al., 1999)의 경우 하중~변위 곡선에서 하중증가비가 급격히 감소하는 부분의 하중을 잔존긴장력으로 정의하였으며, 이 잔존긴장력과 설계긴장력을 비교하여 앵커의 안정성을 평가하고 있다. 홍콩 기준의 경우 국내, 미국과 유사하게 기울기가 급하게 변하는 지점을 잔존긴장력으로 정의하였다. 이처럼 국내·외 모두 하중증가비가 급격하게 감소하는 구간을 잔존긴장력으로 정의하였으며, Fuziwara와 Sakai(2016)는 계측 결과를 종합하여 Fig. 2와 같은 평가 방법을 제안하였다.

Song 등(2019)은 위와 같은 잔존긴장력 평가방법을 적용하여 도로공사 도로교통연구원 내에 기 시공된 앵커에 리프트오프 시험을 수행하였고, 국내·외 기준 문헌연구와 시험 결과 분석을 통해 초기하중, 하중 증분방

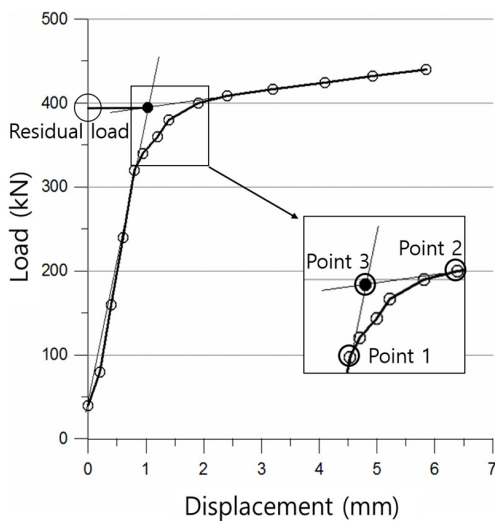


Fig. 2. Evaluation of residual load by lift-off test (Fuziwara and Sakai, 2016)

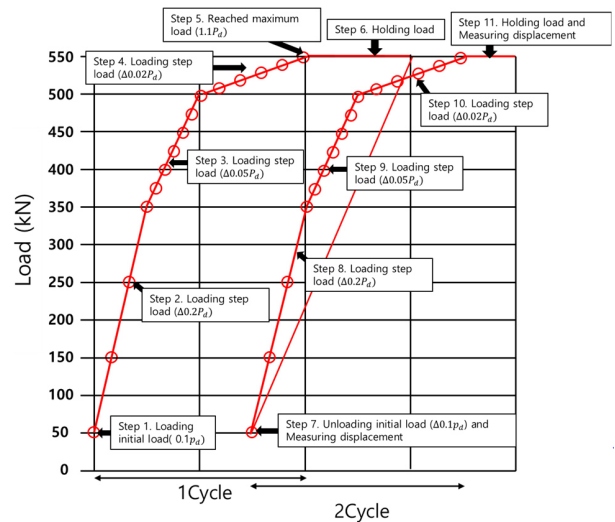


Fig. 3. Suggested lift-off test method for site (Song et al., 2019)

법, 하중 사이클, 긴장방식 등을 고려한 Fig. 3과 같은 리프트오프 시험 수행방안을 제시한 바 있다.

본 시험방법은 초기 하중을 10%로 가하여 하중 초반에 발생할 수 있는 시험장비 간의 이격 및 압축에 의한 변위의 영향을 제거하여 정확한 앵커의 거동을 확인할 수 있도록 하였으며, 이는 잔존긴장력 평가 시 발생할 수 있는 오차의 원인을 줄일 수 있을 것으로 판단하였다. 하중 증분은 초기하중에서 설계하중의 70%까지는 설계하중의 20%, 설계하중의 70%~100%는 설계하중의 5%, 설계하중의 100%~110%는 설계하중의 2%로 적용하여, 리프트오프가 발생하는 지점에서 정확한 잔존긴장력을 파악할 수 있도록 하였다. 또 시험 결과를 통해 1 사이클 이후의 곡선 거동이 인장재의 탄성거동을 정확하게 대표하는 것을 확인하였고, 사이클의 횟수가 증가하여도 잔존긴장력 평가의 차이는 크지 않음을 확인하였다. 이에 2 사이클의 시험방법을 적용하여 현장에서의 시간적 소요를 줄이면서 정확한 잔존긴장력을 평가할 수 있도록 하였다(Song et al., 2019).

3. 그라운드 앵커 하중계 계측자료 분석

3.1 계측 현황

본 연구는 국내 비탈면 6개 현장에서 하중계가 설치된 99개의 그라운드 앵커 중 망실에 의해 계측이 중단된 1개와 재긴장을 수행한 2개의 앵커를 제외한 96개 앵커에 대한 장기계측 자료를 분석하였다. 본 앵커들은 절토비탈면 혹은 터널갱구부에 설치된 앵커들이며, 모

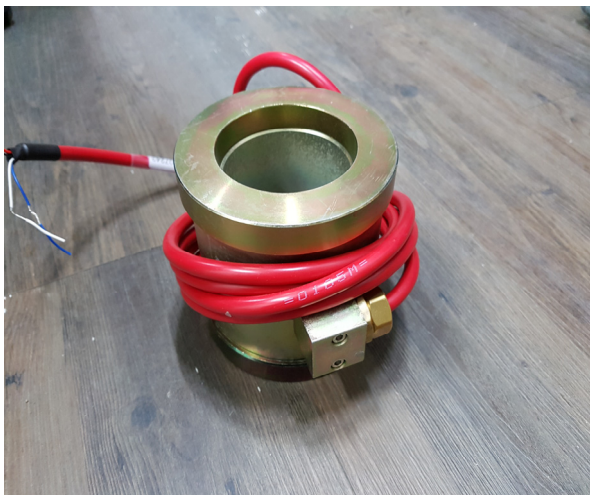
Table 3. Information of the anchors testd in this study

Site	A	B	C	D	E	F	All
The number of Section	3	3	1	2	2	1	12
The number of anchors	46	15	8	13	12	5	99

두 앵커헤드를 직접 긴장하는 방식으로 재긴장을 수행하였으며, 해당 앵커들의 정착하중은 설계하중의 1.2배로 가하였다. 앵커조건은 격자블록, 패널식옹벽, 앵커+지압판, 기대기옹벽으로 구분하였다. 본 앵커들에 대한 하중증감 허용범위는 국토해양부(2010)에서 제안한 적용하중의 10%의 범위 기준을 적용하였다. 하중계 계측을 수행한 앵커의 현장 및 구간, 개수에 대한 정보는 Table 3과 같다.

3.2 계측 방법 및 기기

본 연구의 계측에 사용된 하중계는 E/A 하중계(Load Cell)이며, 본 기기는 스트럿, 그라운드 앵커, 락볼트 등에 부착하여 굴착진행으로 인한 하중 및 긴장력의 증감량, 변화속도 등을 계측하는 용도로 사용된다. 계측 데이터는 설계인장력 및 축력과 비교·검토를 통해 안전도 및 공사 시 지반상황을 예측하여 안전관리를 위한 자료로 활용하기 위한 용도로 사용된다. 하중계에 의한 계측은 케이블을 Dial Gauge와 연결하여 초기치, 계측치를 측정하였고, 이를 계기상수 환산공식에 적용하여 인장력 및 하중을 계산하였다. 계측에 사용된 장비는 Fig. 4와 같다.



3.3 분석 방향

본 연구는 앵커의 긴장력 증감을 뚜렷하게 확인하기 위해 각 앵커들의 초기하중, 최대변화량과 초기계측일로부터 100일, 200일, 300일, 400일, 500일, 600일 경과 일자 및 가장 최근 계측일자에서의 긴장력 변화량을 산정하였다. 계측이 수행된 일자가 각각 100일, 200일, 300일, 400일, 500일, 600일에 정확히 일치하지 않았을 경우, 해당 일자와 가장 근접한 이전 이후 데이터에 대한 선형 보간을 수행하여 해당 일자의 긴장력 변화량을 예측하였다.

추가로 긴장력의 장기적인 증감 추이를 확인하기 위해 가장 단순한 방법인 선형회귀분석을 수행하였다. 선형회귀분석 식의 기울기를 통해 해당 현장 앵커들의 긴장력 증감 방향을 파악하였고, 선형회귀분석 결과를 통해 산정된 결정계수 값으로 선형회귀분석 식의 적합성을 판단하였다. 이를 통해 국토해양부(2010)의 기준인 적용하중의 ±10%의 범위에서 벗어날 것으로 예측되는 일자를 평가하였다.

4. 계측자료 분석을 통한 잔존긴장력 감소 원인 파악

4.1 전체 앵커 계측 결과 및 평균 변화율 분석

본 절에서는 재긴장을 수행한 앵커 및 망실된 앵커를 제외하고 계측을 수행한 96개 앵커의 평균 변화율을 분석하여 앵커들의 전체적인 거동 및 잔존긴장력 증감 여

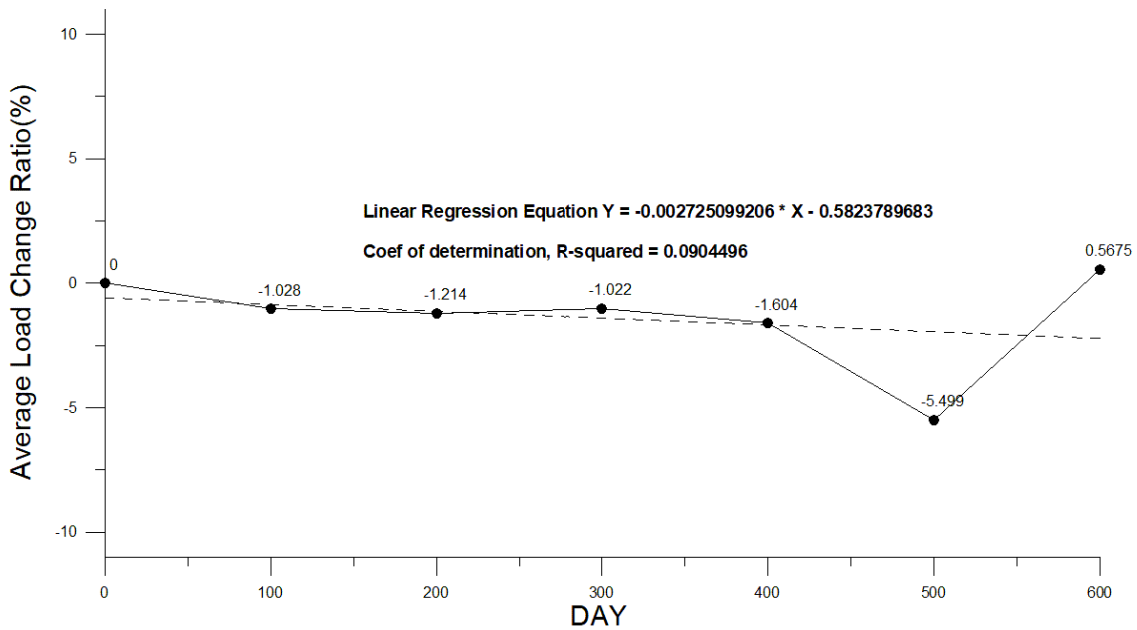


Fig. 4. Load Cell used for this study

부를 파악하였다. Fig. 5는 전체 앵커의 경과일에 따른 평균 긴장력 변화율 및 선형회귀분석 결과를 나타내고 있다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 전체 앵커 평균 긴장력 변화율은 경과일 400일까지는 초기하중으로부터 1.6% 정도 감소하였고, 100일이 지난 경과일 500일에는 초기하중 대비 -5.5%에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 600일에 도달하였을 때는 +0.57%로 변화하는 것을 확인하였다. 본 데이터의 선형회귀 분석 결과 적합도를 판단할 수 있는 결정계수의 값은 0.094로 매우 낮게 측정되었다. 결정계수의 값은 1에 가까울수록 회귀식의 적합도가 높다고 평가할 수 있기에, 본 선형회귀분석 결과는 적합성이 매우 떨어진다고 판단되었다. 결과의 적합성이 떨어지는 원인은 경과일 500일, 600일에 해당하는 자료의 개수가 부족하였기 때문으로 판단되었고, 500일

이후의 거동을 확인하기 위해서는 전체의 평균이 아닌 500일 이후의 데이터가 측정된 앵커들의 거동을 확인할 필요가 있을 것으로 판단되었다. 측정 결과에 의하면 총 6개 현장의 14개 구간 중 경과일 500일 이상까지 측정한 구간은 총 3개, 경과일 600일 까지 측정한 구간은 총 4개가 있으며, 이러한 장기측정을 수행하고 데이터의 개수가 많은 구간에 대하여 재분석을 수행하였다. 재분석을 수행한 구간들에 대한 경과일에 따른 긴장력 평균 변화율은 Table 4와 같다. A현장의 ②번 구간의 경우 경과일 400일까지, ④번 구간의 경우 200일까지의 기록만 존재하여 분석에서 제외하였으며, B현장의 경우 전체 구간이 경과일 200~300일까지의 기록만 존재하여 분석에서 제외하였다. 또 D현장의 ③번 구간의 경우, 100일 이전의 기록만 존재하여 분석에서 제외하였다.



$$\text{Load Change Ratio}(\%) = \text{Residual Tensile Load} / \text{Initial Load} \times 100$$

Fig. 5. Result of linear regression and average load change ratio for all the tested anchors

Table 4. Average load change ratio of the anchors in the long-term measurement

Site	Section	Days elapsed since the initial point (Days)					
		100	200	300	400	500	600
A	①	3.96	2.98	2.89	-2.87	-8.32	-
A	③	0.01	0.02	4.1	3.75	-14.19	-
D	①	-2.14	-3.04	3.95	1.65	-7.97	-
D	②	1.37	4.12	5.81	3.85	3.83	4.66
E	①	-6.88	-6.78	-6.95	-8.83	-9.14	-9.55
E	②	-11.56	-18.97	-20.8	-18.92	-18.65	-

4.2 A현장 앵커 계측 결과 및 평균 변화율 분석

본 절에서는 A현장 앵커들의 계측 자료에 대한 분석을 수행하였다. A현장 ①번, ③번 구간 앵커들은 경과일 500일까지 계측되었으며 해당 앵커들의 경과일에 따른 평균 변화율 및 회귀분석 결과는 Fig. 6과 같다.

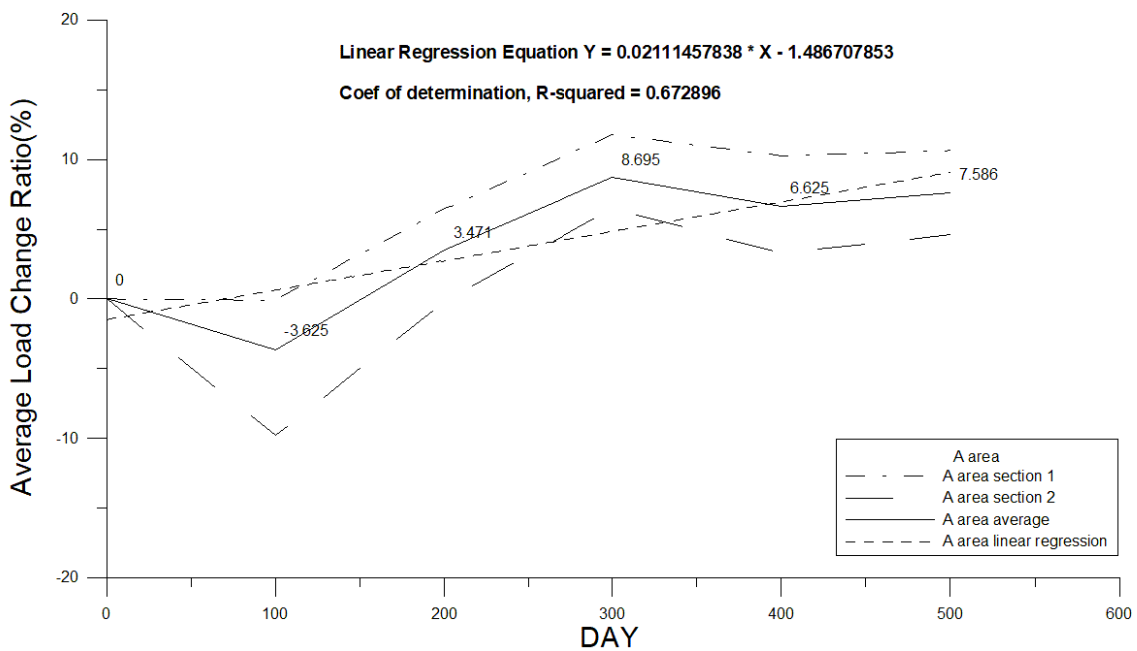
앞선 전체 96개 앵커의 선형회귀분석 결과 경과일에 따른 변화율은 Fig. 5와 같이 음의 방향으로 거동하였지만, Fig. 6에서 볼 수 있듯이 A현장의 경우 기울기는 양수로 추출되었다. 본 결과의 적합성을 확인하기 위해 결정계수를 확인해본 결과, A현장의 결정계수는 0.67로 전체 앵커에 대한 선형회귀분석 결정계수인 0.094에 비해 훨씬 1에 근접하였다. 이에 A현장 앵커들의 경과일에 따른 변화율 거동은 시간이 경과함에 따라 증가하는 경향을 보이며, 전체 앵커의 경과일에 따른 변화율 거동보다 적합성이 높을 것으로 판단되었다.

다음은 A현장 앵커들의 향후 거동을 예측하기 위하여 Fig. 6의 선형회귀식을 검토하였다. 선형회귀식의 X와 Y는 각각 경과일수, 변화율을 뜻하며, 허용범위는 국토해양부 기준을 적용하였다. 적용하중의 ±10%를 벗어나는 경과일을 추적하기 위하여 역계산 수행한 결과 경과일 545일에 허용범위를 벗어남을 확인하였다.

4.3 D현장 앵커 계측 결과 및 평균 변화율 분석

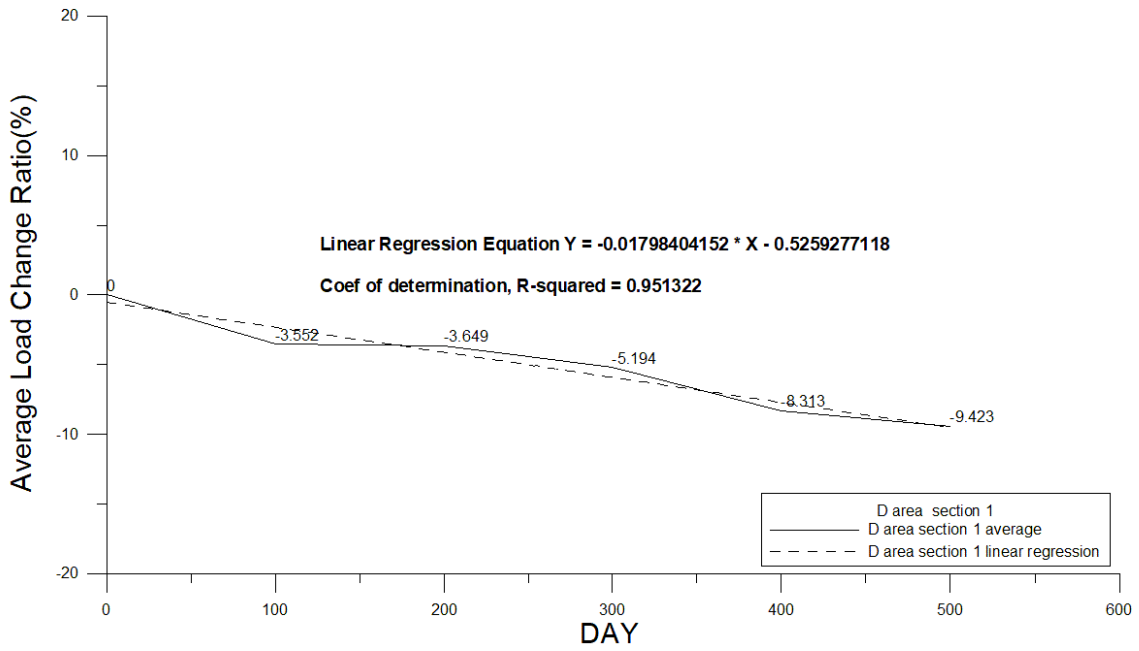
본 절에서는 D현장 앵커들의 계측 자료에 대한 분석을 수행하였다. D현장의 ①번 구간은 절토비탈면에 시공된 앵커이며 경과일 500일까지 계측을 수행하였지만, ②번 구간은 터널갱구부에 설치되었으며 경과일 600일까지 계측을 수행하였다. 이에 본 현장은 ①번 구간과 ②번 구간에 대한 분석을 나누어 수행하였다.

Fig. 7에서 볼 수 있듯이 D현장 ①번 구간 앵커의 선형회귀식은 음의 기울기를 가지고 있으며, 이는 긴장력이 시간의 경과에 따라 감소함을 뜻한다. Fig. 7에 따르면 본 구간의 결정계수는 0.951로 매우 적합한 데이터임을 검증할 수 있다. 반면에 ②번 구간 앵커의 선형회귀식은 양의 기울기를 가지고 있으며, 0.510의 결정계수 값을 획득하였다. ①, ②번 구간 앵커의 선형회귀식을 역계산하여 국토해양부의 기준인 적용하중의 ±10%를 벗어나는 경과일을 추적해본 결과 각각 527일, 1366일로 산정되었다. ①번 구간 앵커들의 경우 결정계수가 1에 매우 가까운 0.951로 안정성을 확보하기 위해 경과일 527일 이내 해당 구간 앵커들에 대한 재긴장이 수행되어야 할 것으로 판단된다. ②번 구간 앵커의 경우 결정계수가 0.501로 중간 정도의 적합성을 보이거나 전반적인 변화율이 양의 방향으로 거동하며 타 구간에 비해



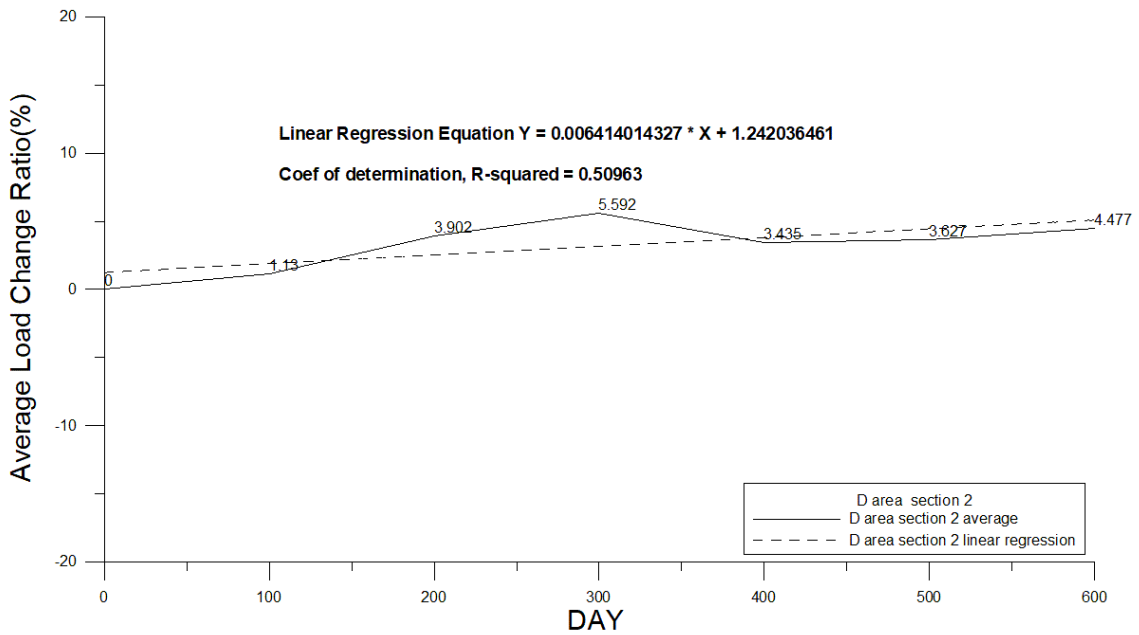
$$\text{Load Change Ratio}(\%) = \text{Residual Tensile Load} / \text{Initial Load} \times 100$$

Fig. 6. Results of linear regression and average load change ratio of the anchors in site A



Load Change Ratio(%) = Residual Tensile Load / Initial Load x 100

D Area Section ①



Load Change Ratio(%) = Residual Tensile Load / Initial Load x 100

D Area Section ②

Fig. 7. Results of linear regression and average load change ratio of the anchors in site D

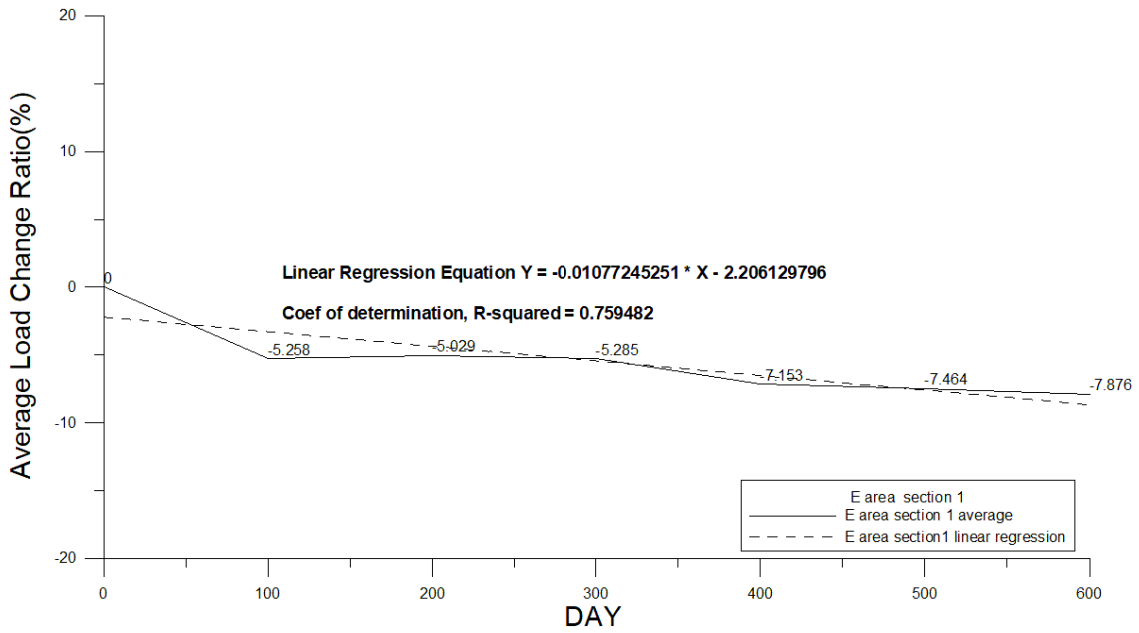
완만하게 거동하는 것을 확인하였고, 이는 해당 앵커들의 안정성이 확보된 것으로 판단하였다.

4.4 E현장 앵커 계측 결과 및 평균 변화율 분석

본 절에서는 E현장 앵커들의 계측 결과에 대한 분석

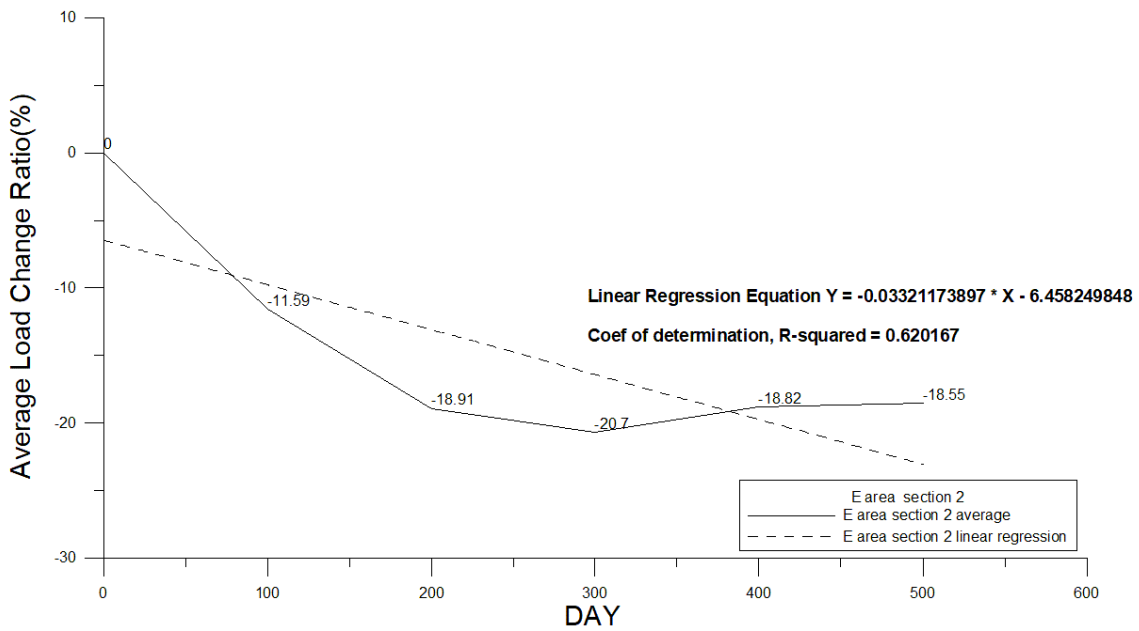
을 수행하였다. E현장의 경우 600일까지 계측을 수행한 ①번 구간과 500일까지 계측을 수행한 ②번 구간에 대한 재분석 및 선형회귀분석을 수행하였으며, 이에 대한 결과는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 E현장 ①번 구간 앵커들의 경우 초기지점으로부터 경과일 100일까지 긴장력이



Load Change Ratio(%) = Residual Tensile Load / Initial Load x 100

E Area Section ①



Load Change Ratio(%) = Residual Tensile Load / Initial Load x 100

E Area Section ②

Fig. 8. Results of linear regression and average load change ratio of the anchors in site E

감소하는 경향을 보이고, 그 이후 일정 긴장력을 유지하다가 재감소하는 경향을 보였다. 선형회귀분석 결과 결정계수는 0.76으로 타 앵커에 비해 상대적으로 높은 적합성을 보였고, 경과일에 따른 긴장력의 변화는 음의 기울기를 보였다. 본 구간 앵커들은 724일에 도달하였을 때 국토해양부의 기준인 정착하중의 $\pm 10\%$ 를 벗어날 것

으로 예측되었다.

②번 구간 앵커들은 경과일 500일까지 계측이 되었고 초기지점으로부터 200일이 경과할 때 까지는 긴장력이 감소하다가 그 이후 비교적 완만히 감소하여 최종 경과일 부근에서 일정값으로 잔류하는 경향을 보였다. 본 구간의 앵커들은 타 앵커와 상이하게 계측기간 이내에 국

토해양부의 기준을 벗어나 긴장력이 최대 정착하중의 -20.7%까지 변화하였고, 이에 신속한 재긴장이 수행되어야 할 것으로 판단되었다. 선형회귀분석 결과 결정계수는 0.62로 중간정도의 적합성을 가졌으며, 선형회귀식의 기울기가 타 앵커에 비해 매우 크게 나타나 경과일에 따른 긴장력의 변화가 매우 클 것으로 판단되었다.

4.5 A현장, D현장, E현장 선형회귀분석 결과 분석

앞선 절에서는 하중계 계측을 500일 이상 수행한 A현장, D현장, E현장 앵커들에 대한 재분석을 수행하였다. 분석결과 A현장 전체 구간과 D현장의 ②번 구간은 긴장력이 상승하는 경향을 보였고, D현장 ①번 구간과 E구간 전체 구간은 긴장력이 감소하는 경향을 보였다. Fig. 9는 A현장, D현장, E현장 앵커들에 대한 선형회귀분석 결과들을 한 그래프에 종합하여 나타내고 있다.

회귀분석 결과를 살펴보면 시공된 그라운드 앵커들은 모두 초기 지점 이후로 경과일에 따라 긴장력이 증가하거나 감소하는 경향을 보인다. 결정계수가 1에 가장 근접하여 앵커의 실제 거동을 대표적으로 나타낼 수 있었던 D구역 ①번 구간의 경향을 살펴보면 앵커는 시간의 흐름에 따라 긴장력을 감소하는 경향을 보였다. 문헌조사 결과 이와 같이 긴장력의 증감이 발생하게 되는 원인으로는 췌지의 Set량에 대한 영향, 강연선의 노후화 및 부식, 정착지반의 Creep 및 Relaxation, 온도의 영향

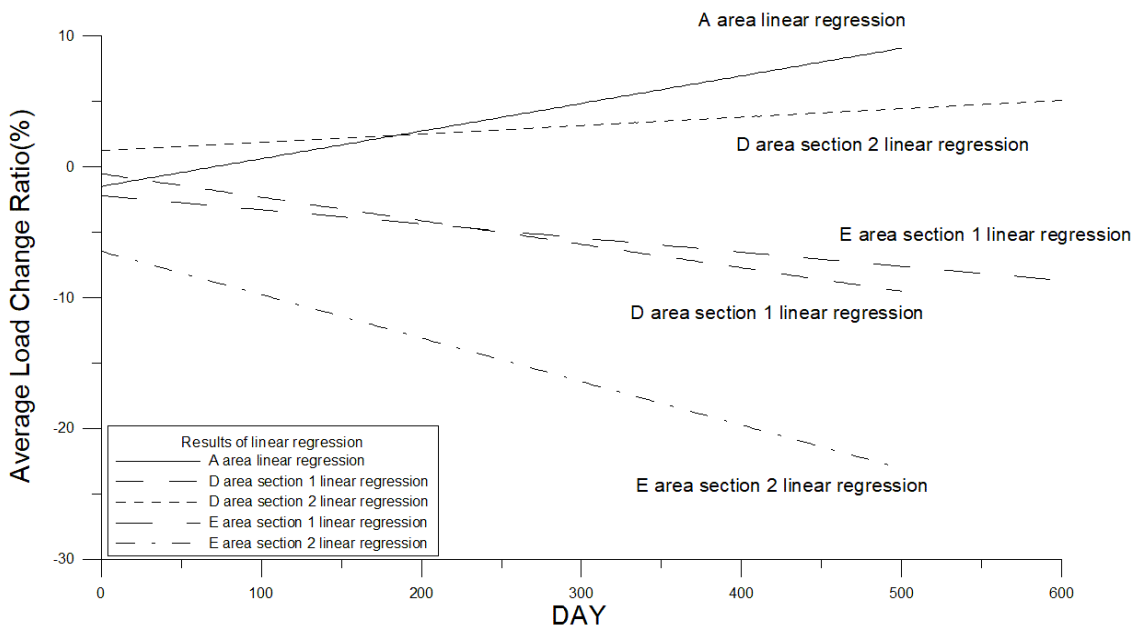
등이 있다고 밝혀진 바 있다(Lee, 2018). 앵커의 긴장력 변화를 대표할 수 있는 실제 거동에 근접한 식을 도출하기 위해서는 본 연구에서 파악한 경과일수에 대한 영향, 문헌연구를 통해 파악된 긴장력 영향 요소 등을 종합하여 분석해야 할 것으로 판단된다.

4.6 계측자료 분석 결과를 통한 잔존긴장력 증감 영향 요소 파악

본 절에서는 긴장력의 증감에 영향을 미치는 요소들을 파악하기 위해 하중계 계측을 수행한 앵커들을 시공 조건, 구성암반 및 앵커조건에 따라 분류하였다. 분석 대상 앵커의 특징 및 지반조건에 따른 분류는 다음 Table 5와 같다.

앞 절에서 수행한 긴장력 분석 결과와 Table 5를 시공 조건 기준으로 살펴본 결과 터널갱구부에 설치된 앵커들은 모두 경과일에 따라 긴장력이 증가하는 것을 확인하였다. 하지만 절토비탈면에 설치된 앵커들은 증가하는 경우와 감소하는 경우 모두 존재하였다. 이에 절토비탈면에 설치된 앵커들만 따로 추출하여 구성암반 및 앵커조건에 대한 영향요소를 재분류하여 확인하였다. 절토비탈면에 설치된 앵커들의 긴장력 증감 영향을 파악하기 위해 Table 6과 같이 정리하였다.

Table 6에서 확인할 수 있듯이 절토비탈면에 설치된 앵커들 중 앵커 조건이 기대기용벽인 앵커들의 경우 긴



$$\text{Load Change Ratio}(\%) = \text{Residual Tensile Load} / \text{Initial Load} \times 100$$

Fig. 9. Results of linear regression of the anchors in site A, D and E

Table 5. Characteristics and ground conditions of the anchor under analysis

Site	Section	Construction condition	Soil composition	Anchor condition	Anchor type
A	①	Cut slope	Weathered zone, Bed rock	Grid block	Tensile type
A	②	Cut slope	Rock crushing zone	Paneled retaining wall	Tensile type
A	③	Cut slope	Weathered soil, Soft rock, Hard rock, Moderate rock	Paneled retaining wall	Tensile type
B	①	Portal of tunnel	Sandstone, Mudrock	Grid block	Tensile type
B	②	Portal of tunnel	Mudrock, Granite, Felsite	Grid block	Tensile type
B	③	Cut slope	Shale rock, Sandstone	Grid block	Tensile type
C	①	Cut slope	Weathered rock, Soft rock, Sandstone, Moderate rock	Grid block	Tensile type
D	①	Cut slope	Weathered soil, Weathered rock, Soft rock	Grid block	Compression type
D	②	Portal of tunnel	Weathered soil, Weathered rock, Soft rock	Paneled retaining wall	Compression type
E	①	Cut slope	Soil zone, Cataclasite	Grid block	Tensile type
E	②	Cut slope	Soil zone, Weathered rock, Fractured zone	Grid block	Tensile type
F	①	Cut slope	Colluvium, Weathered soil, Weathered rock	Leaning retaining wall	Tensile type

Table 6. Characteristics and ground conditions of anchors installed in cut slopes

Site	Section	Anchor condition	Soil composition	Anchor type	Change of load
A	①	Grid block	Weathering zone, Bedrock	Tensile type	+
B	③		Shale rock, Sandstone	Tensile type	+
C	①		Weathered rock, Soft rock, Sandstone, Moderate rock	Tensile type	+
D	①		Weathered soil, Weathered rock, Soft rock	Compression type	-
E	①		Soil layer, Cataclasite	Tensile type	-
E	②		Soil zone, Weathered rock, Fractured zone	Tensile type	-
A	②	Paneled retaining wall	Rock crushing zone	Tensile type	+
A	③		Weathering soil, Soft rock, Hard rock, Moderate rock	Tensile type	+
F	①	Leaning retaining wall	Colluvium, Weathered soil, Weathered rock	Tensile type	-

장력이 감소하였다. 반면에 앵커조건이 패널식옹벽인 앵커들의 경우 모두 긴장력이 증가하는 공통적인 경향을 보였다. 앵커조건이 격자블록인 경우에는 압축형 앵커와 구성암반에 토사층이 존재하는 경우 긴장력이 감소하는 경향을 보였다. 토사층이 포함되지 않은 인장형 앵커들의 경우 긴장력이 모두 증가하는 경향을 보였다.

Lee(2018)에 의하면 압축형 앵커의 긴장력 변화는 인장형 앵커의 긴장력 변화보다 작아야 되나 본 연구에서 분석을 수행한 앵커들의 경우 구성암반이 같을 때 인장형 앵커와 달리 압축형 앵커의 경우 긴장력이 증가하는 경향을 보였다. 이는 앵커의 종류 및 구성암반의 영향보다 더 큰 영향인자가 있기 때문으로 판단되었고, 이에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

앞선 선형회귀분석 결과와 앵커의 특징 및 지반조사별 긴장력 증감 분석을 통해서 파악한 바 앵커의 긴장력에 영향을 미치는 요소들은 기간에 따라 다양하게 나타났으며, 이를 파악하여 그에 대한 유지관리가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 그라운드 앵커의 장기거동에 따른 잔존긴장력 증감문제에 미치는 영향인자들을 평가하기 위하여 실제 계측된 자료들을 분석하였다. 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) A현장 앵커들의 계측 자료에 대한 재분석을 수행한 결과 경과일 100일까지 긴장력이 감소하다가 그 이후 증가하는 경향을 보였다. 선형회귀분석 결과 경과일에 따른 긴장력의 변화는 음의 방향으로 파악되었다.
- (2) D현장 앵커들의 ①번 구간은 절토비탈면, ②번 구간은 터널갱구부에 시공되었으며, 각각 초기지점 이후 경과일 500일, 600일까지 계측을 수행하였다. 선형회귀분석 결과 ①번 구간 앵커의 긴장력은 음의 방향으로 거동하였으며, ②번 구간의 앵커의 긴장력은 양의 방향으로 거동하였다.
- (3) E현장 앵커들의 계측 결과 ①번 구간 앵커의 경우

초기지점으로부터 경과일 100일 까지 긴장력이 감소하다가, 이후 일정 긴장력이 유지되고 다시 감소하는 경향을 보였다. ②번 구간 앵커는 타 앵커와 상이하게 계측기간 이내에 국토해양부의 기준을 벗어나 초기하중 기준 최대 -20.7%까지 변화하였고, 이에 대한 신속한 조치가 필요할 것으로 판단된다.

- (4) A현장, D현장, E현장 앵커들의 선형회귀분석 결과들을 종합해본 결과, 시공된 그라운드 앵커들은 모두 초기 지점 이후로 경과일에 따라 긴장력이 증가하거나 감소하는 경향을 보인다. 이와 같이 긴장력의 증감이 발생하게 되는 원인으로는 여러 가지 요인이 있으며, 이는 선형 연구를 통해 밝혀진 바 있다. 앵커의 긴장력 변화를 대표할 수 있는 실제 거동에 근접한 식을 도출하기 위해서는 본 연구에서 파악한 영향 요소들과 선형연구에서 수행된 영향 요소들을 종합할 필요가 있을 것으로 판단된다.
- (5) 긴장력의 증감에 영향을 미치는 요소들을 파악하기 위해 하중계 계측을 수행한 앵커들을 시공조건, 구성암반 등으로 분류한 결과 터널갱구부에 설치된 앵커들은 모두 경과일에 따라 긴장력이 증가하는 것을 확인하였다.
- (6) 절토비탈면에 설치된 앵커들은 기대기용벽인 경우 긴장력이 감소하였고, 패널식용벽인 경우 긴장력이 증가하였다. 앵커조건이 격자블록인 경우 압축형 앵커와 구성암반에 토사층이 존재하는 경우 긴장력이 감소하는 경향을 보였다. 반면에 토사층이 포함되지 않은 인장형 앵커의 경우 모두 긴장력이 증가하는 경향을 보였다.
- (7) 과거 수행된 문헌연구에 따르면 압축형 앵커의 긴장력 변화는 인장형 앵커의 변화보다 작아야 하나 본 연구의 분석결과에 의하면 구성암반이 같을 때 압축형 앵커의 긴장력이 증가하는 경향을 확인하였다. 이는 긴장력의 증감에 앵커의 종류 및 구성암반의 영향보다 더 큰 영향을 미치는 요소가 있기 때문으로 판단되었고, 이에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.
- (8) 본 연구에서는 장기계측을 통해 비탈면 및 터널 갱구부와 같은 영구구조물에 설치된 그라운드 앵커의 잔존긴장력 측정을 수행하였고, 이에 대한 분석 결과 그라운드 앵커에 작용하고 있는 긴장력은 기간 경과에 따라 초기 정착 하중에 비해 감소하거나 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 장기적인

안정성 확보를 위해 영구구조물에 설치된 그라운드 앵커에 대해서는 주기적인 점검 및 계측을 수행하여 해당 앵커의 잔존긴장력 증감여부를 철저히 파악해야 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. British Standards Institution (1989), "British Standard Code of Practice for Ground anchorages", BS 8081.
2. Civil Engineering Department Hong Kong (1997), "Model Specification for prestressed ground anchors", Geotechnical Control Office, GEOSPEC1.
3. Deutsche Industrie Normen (1990), "Ground Anchorages Design, construction and testing", DIN-4125.
4. Fujiwara, Y. and Sakai, T. (2016), "A Study of a Lift-off Test Method for Ground Anchors", *Journal of JSCE*, Vol.4, pp.106-117.
5. Kim, J. H. and Jung, H. S. (2016), "Ground Anchor Method for Practitioners".
6. Korea Infrastructure Safety Corporation (2009), "Ground Anchor Maintenance Manual", In Korean.
7. Korea Expressway Corporation (2016), "A Survey on the Application Actual Condition and Establishment of Performance Improvement countermeasure of Permanent Anchor for Ground Reinforcement", In Korean.
8. Lee, S. R. (2018), "Characteristics of Long-Term Load Loss of Ground Anchors in Rocks".
9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), "Design Practice Know-How for National Highway Construction Projects", In Korean.
10. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010), "Ground Anchor Design·Construction and Maintenance Manual", In Korean.
11. Sabatini, P. J., Pass, D.G., and Bachus, R.C. (1999), "Geotechnical Engineering Circular NO. 4 Ground Anchors and Anchored systems", U.S Department of Transportation, FHWA-IF-99-015.
12. Song, M. K., Park, S. Y., Lee, S. R., and Cho, W. J. (2019), "Improvement of Lift-off Tests via Field Evaluation of Residual Load in Ground Anchor", *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.5, pp.43-51.
13. The Board of Audit and Inspection of Korea (2019), "Audit Report on Safety Management of Disaster Risk on Slope sites".
14. Weatherby, D. E. (1982), "Recommended Practice for Evaluation of Metal-Tensioned Systems in Geotechnical Applications", Vol.477, Transportation Research Board.

Received : May 11th, 2020

Revised : July 10th, 2020

Accepted : July 10th, 2020