

Creep 모델을 이용한 Ground Anchor의 거동해석

전승철, 한희수*
금오공과대학교 토목공학과

Behavior analysis of ground anchor using creep

Seung-Chul Jeon, Heui-Soo Han*
Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

요 약 본 논문은 앵커의 리프트 오프 시험(Lift-off Test) 및 앵커 단기 크립(creep) 시험결과를 이용하여 비탈면 앵커의 성능을 분석한 것이다. 이를 위해, 앵커 리프트 오프 시험 시 하중~변위곡선과 앵커의 탄성곡선을 분석하여 앵커의 성능을 분석하였으며, 단기크립시험에서 구한 변위-시간 곡선으로, 크립 계수를 구하고 크립 발생여부를 판단하였다. 또한, 추후 잔존 긴장력 감소 여부를 판단하기 위해, Rheology model과 쌍곡선 모델을 이용한 장기 크립거동 해석을 하였다. 단기 크립의 경우, 크립 계수값이 1mm 이하면 크립이 발생하지 않는 것으로 간주하고 1mm를 초과하면 크립 가능성이 있으므로 별도 크립 시험을 실시한다. 그러나 앵커의 장기 크립 거동에 대한 시방기준은 현재 제시된 방법이 없어, 본 논문은 이에 대한 기준을 제시하고자 하였다. 본 논문을 위해, 현장의 6개의 앵커(A~F 앵커)에 대하여 단기 크립 시험을 행하였으며, 이 결과를 이용하여 앵커의 ①잔존 긴장력, ②탄성변위 및 ③크립거동을 해석하였다. 본 논문에서 단기 크립 시험 결과를 이용하여 레올로지모델 및 쌍곡선 모델로 장기 크립거동 분석한 결과, 단기 크립 시험결과로, 장기 크립 거동에 대하여서는 정확한 판단을 내릴 수 없었다. 그러므로, 장기 크립 거동에 대한 별도 분석이 필요하다. 앵커의 장기 잔존긴장력 및 비탈면의 장기 안정성 해석을 위해서는 앵커의 장기 크립거동 해석 및 최종 크립량 계산이 필요하며, 분석모델로는 쌍곡선 모델을 제안한다.

Abstract This paper analyzes the performance of a slope anchor using the anchor lift-off test and the anchor short-term creep test results. As part of this analysis, the anchor's performance was studied by analyzing the load-displacement curve and the anchor's elasticity curve from the anchor lift-off test. A long-term creep analysis using a rheology model and a hyperbolic model was performed to check if the residual tension will reduce in the future. In the case of short-term creep, if the creep coefficient value is 1 mm or less, then creep does not occur. On the other hand, if the creep coefficient exceeds 1 mm, a separate creep test has to be conducted. However, there is currently no specific method to test the long-term creep behavior of anchors. So, this research presents a standard for the long-term creep testing of anchors. At first, short-term creep tests were conducted on six anchors (A~F anchors), and using these results, ① residual tension, ② elastic displacement, and ③ creep behavior were analyzed. In any case, it was not possible to make an accurate judgment of the long-term creep behavior with these short-term creep test results. However, to meet the said goals of the research, a hyperbolic model is proposed to analyze the long-term residual tension of the anchor and the long-term stability of the slope.

Keywords : Creep, Ground Anchor, Load-Elastic Displacement Curve, Rheology Model, Hyperbolic Model

*Corresponding Author : Heui-Soo Han(KIT)

email: hanhs@kumoh.ac.kr

Received September 14, 2021

Accepted December 6, 2021

Revised October 27, 2021

Published December 31, 2021

1. 서론

본 논문은 그라운드 앵커의 관리를 위한 앵커의 리프트 오프 시험(Lift-off Test) 및 앵커 단기 크립(creep) 시험결과를 이용하여 비탈면 앵커의 성능을 분석한 것이다. 장기 크립모델은 점근선에 의한 수렴값을 가지는 쌍곡선 모델과 이상물체를 이용하여 구성된 미분방정식을 이용하는 레올로지 모델을 이용하였다.

그라운드 앵커의 시험은 설계조건의 만족여부를 실증하거나 설계에 필요한 정보를 얻기 위해 실시하게 되는데 대표적인 시험은 인발적성시험(Performance Test)과 크립시험(Extended Creep Test) 등이 있으며, 이 중 크립시험은 앵커설치 후 시간의 경과에 따른 하중감소를 예측할 수 있으며 장기거동에 대해 안전성확보 여부를 판단할 수 있는 중요한 시험이다[1,2].

그러나, 현재 단기 크립 거동해석에 대한 시방기준은 있지만 확립된 장기 크립거동 해석 방법 및 시방기준은 없다[3,4]. 본 논문은 앵커 인발시험에 의한 단기 크립 시험 결과에 따른 장기 크립거동을 해석하였다.

크립은 일정한 하중하에서 시간이 증가함에 따라 변위가 증가하는 현상($\Delta\sigma = 0, \Delta t \uparrow; \Delta\epsilon \uparrow$)이므로, 일정한 하중 및 크립진행시간을 결정하는 것이 크립량을 결정하는 중요 요소이다. 본 논문에서는 한국도로공사의 앵커 잔존강력해석에 관한 시방서 기준을 이용하였다. 즉, 시험방법은 시방서 기준 단기크립방법을 이용하였으며, 이에 따른 레올로지모델을 이용한 단기 크립거동해석을 하였다. 또한, 단기 크립 시험 결과를 이용하여 쌍곡선 모델로 장기 크립거동 해석을 하였다. 두 모델을 이용하여 앵커의 장단기 크립거동을 비교한 후 현 크립시험의 문제점을 논의하였다.

2. Creep 거동

Creep 거동해석을 위하여, 레올로지 모델 및 쌍곡선 모델을 분석하고 그라운드 앵커의 크립 모델로써의 적용성에 대해 연구하였다.

앵커 인장시험에서 얻어진 하중-소성변위 곡선은 앵커의 파괴도달여부나 크립 발생여부를 정성적으로 판단하는데 사용한다. 하중증가에 따라 소성변위가 수렴하는 경향(곡선 A)을 나타내면 앵커 파괴나 크립 현상이 없는 양호한 상태로 추정할 수 있고, 선형적으로 증가하는 경향(곡선 B)은 설계하중에서 앵커 파괴나 크립 현상이 없

는 상태로 간주할 수 있다. 소성 변위가 발산하는 형태(곡선 C)는 파괴 또는 크립 현상의 가능성을 시사하므로 별도의 크립 시험을 실시하여 거동을 평가해야 한다(Fig. 1 (a))[3,4].

그라운드 앵커가 사용 연한 동안 하중을 지속적으로 받을 경우 이에 따른 시간 의존적 리프 혹은 잔류변위는 앵커의 크립 변형특성에 좌우된다. 일반적 크립단계는 하중이 작용할 때 시간에 비례하여 변형률속도가 연속적으로 감소하는 Transient Creep(1차 creep)이 발생한 후 steady-state 상태로 진행되며(2차 creep) 변형률 속도가 증가하여 파괴시점에 이르는 Tertiary 양상(3차 creep)으로 진행된다(Fig. 1 (b))[5]. 본 논문의 크립거동 해석을 위해 레올로지모델과 쌍곡선 모델을 사용하였다. 레올로지 모델은 점성 거동(Viscous Behavior)을 표현하는 방법인 dashpot을 이용하기 위함이며, 쌍곡선 모델은 점근선을 가지고 있어 최종값 결정에 유리하기 때문에 선택하였다.

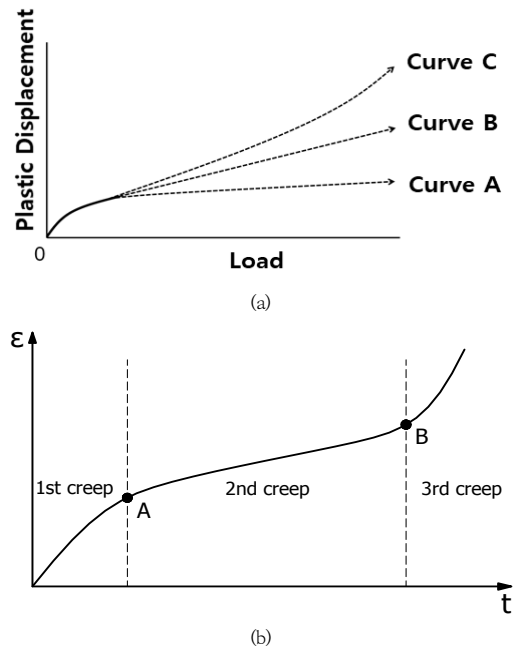


Fig. 1. Creep behavior[5]

(a) Load-Plastic displacement curve (b) Creep behavior

2.1 레올로지 모델

물체의 역학적 거동을 해석하기 위하여 고체 및 액체의 이상적 성질을 모형화하여 물체의 거동을 연구하는 분야인 rheology에서는 완전한 탄성체, 점성체, 소성체

를 각각 Hooke의 고체, Newton의 액체, St. Venant의 소성체라 한다. 맥스웰 물체(Maxwell Body)는 Hooke 고체인 spring과 Newton액체(N)인 dashpot가 직렬로 연결된 모형이다. Kelvin 물체는 spring과 dashpot가 병렬로 연결된 모형이며, 버저스 물체(Burgers Body)는 Maxwell 물체와 Kelvin 물체를 직렬로 연결한 모형이다[6].

Maxwell 및 Kelvin-Voigt물체가 각각 크립 및 응력 완화와 같은 점탄성변형거동을 단독적으로 나타내는데 대하여 3종 이상의 요소가 조합된 점탄성모델은 암석과 같은 점탄성체의 변형거동을 잘 나타내고 있다. Fig. 2 (b)와 같은 $H-(N|H)=\text{Hooke-Kelvin}$ 모델(이하 H-Kel 모델)의 응력, 변형률, 시간의 관계는 식 1~3과 같이 표시된다[6].

$$t = t_1, \varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E_1} \quad (1)$$

$$t = t_1 \sim t_2, \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \cdot \left[1 - \exp\left\{ -\frac{E_2}{\eta} (t - t_1) \right\} \right] \quad (2)$$

$$t \rightarrow \infty, \varepsilon_\infty = \sigma_0 \cdot \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \quad (3)$$

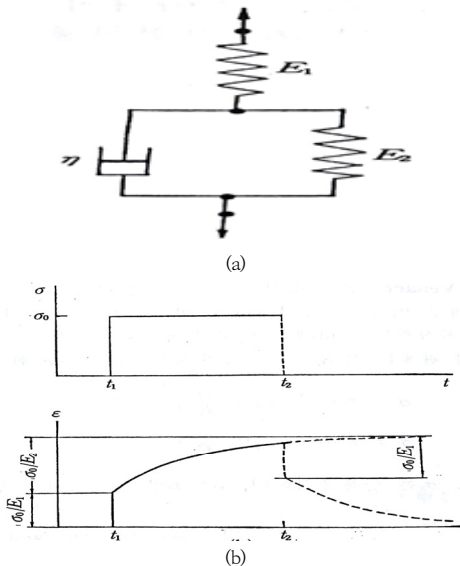


Fig. 2. Deformation behavior of H-Kel three-element viscoelastic materials[6]

(a) H-Kel model (b) t-σ curve and t-ε curve

H-Kel 모델은 켈빈 모델이 스프링을 추가한 모델이다. H-Kel 모델의 시간-변형률 곡선은 Fig. 3과 같이, 1

차 탄성 변위(ε_1)과 2차 탄성 변위(ε_2)으로 구분된다. 1차 탄성 변위는 실험에서 산정된 초기 변위이다. 그리고 2차 탄성 변위는 수렴된 최종변위와 초기 변위의 차이 값이 된다. 여기서, 2차 탄성 변위는 댐퍼의 점성계수에 의해 결정되며, 2차 탄성 구간에서 시간-변형률 곡선의 기울기(α)를 의미한다. 2차 탄성구간의 기울기(α)는 실험데이터에서 시행착오를 거쳐, 최적값을 결정한다. 실험데이터의 2차 탄성구간의 기울기는 초기의 급한 경사에서 완만하게 변하여 최종적으로 수렴값에서는 수렴된다. 따라서 시행착오를 거쳐야 한다. Fig. 3의 H-Kel 모델의 시간-변형률 곡선에서 수렴값(ε_{ult})은 식 3과 같다 [6-8].

레올로지 모델에서 변위가 수렴되는 형상을 나타내는 모델은 켈빈 모델과 H-Kel 모델이다. 켈빈 모델은 스프링과 댐퍼를 수평으로 배치하여, 스프링의 변위가 댐퍼의 특성에 따라 시간에 따라 발생된다. 하지만, 흙의 크립 거동은 1차 초기 탄성구간을 나타내는데 켈빈 모델로는 이를 반영하지 못한다. H-Kel 모델은 켈빈 모델이 스프링을 추가한 모델이다. H-Kel 모델은 Fig. 3과 같이, 1차 크립과 2차 크립 구간을 모두 반영한다[6-8].

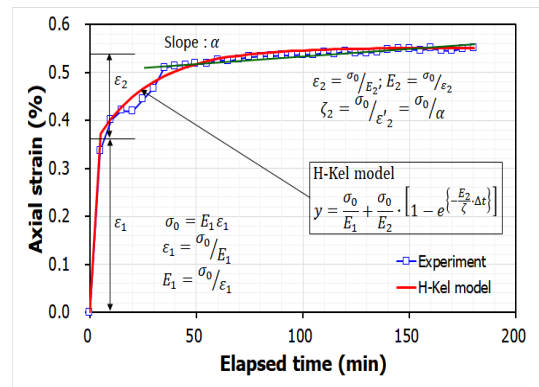


Fig. 3. Time-strain curves of the H-Kel model[6]

2.2 쌍곡선 모델

지반공학적 관점에서의 장기 침하량(변형률)을 예측하기 위해 다양한 침하모델들이 제안되었다. Gibson & Lo 모델은 주로 이토(peat)의 이차 압밀거동을 예측하는데 사용하였다[6-9]. 쌍곡선 모델(Hyperbolic model)은 주로 연약지반 성토 시 장기 침하량 산정에 주로 사용되어 온 예측방법으로서 Hoe 등(1998)이 쓰레기 매립지의 장기침하 예측에 처음 사용하였다[10].

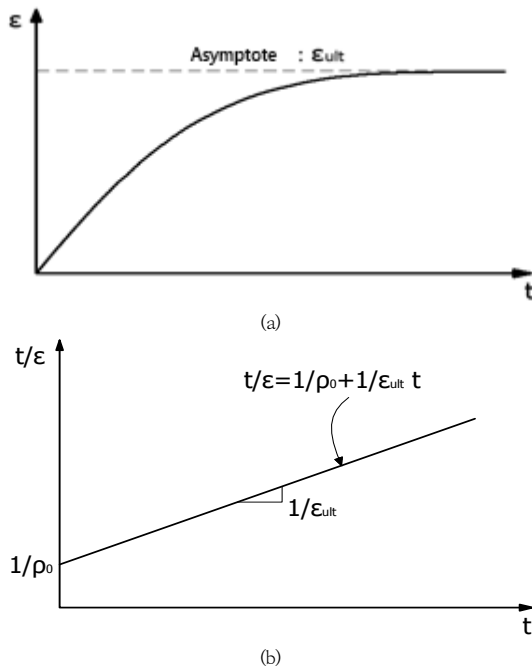


Fig. 4. Hyperbolic model[6,9]

(a) Hyperbolic model's asymptote (b) $t/S - t$ curve

쌍곡선 모델은 Fig. 4 (a)와 같이 점근선을 가지고 있어, 최종 크립 변형률을 쉽게 구할 수 있고 회귀분석을 통해 모델의 계수값을 쉽게 산정할 수 있는 장점이 있다. 쌍곡선 모델은 식 4와 같다.

$$\epsilon = \frac{t}{\frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{\epsilon_{ult}}} \quad (4)$$

여기서, ρ_0 는 탄성변형률, ϵ_{ult} 는 수렴값이며, 최종 크립 변형률이다. 크립 시험 데이터를 토대로 회귀분석을 수행하여 계수값을 산정하게 된다.

ϵ_{ult} (수렴값)을 구하기 위하여 식 4를 변형하면, 식 5와 같다.

$$\frac{t}{\epsilon} = \frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{\epsilon_{ult}} \quad (5)$$

이는 $y = ax + b$ 의 형태로 크립 시험 결과를 1차 방정식으로 변형한다. 1차 방정식의 형태로 변환된 시험 결과 그래프의 기울기 $1/\epsilon_{ult}$ 에서 역수값을 취하여 수렴값을 구할 수 있다. 이 수렴값에 도달하는 시점을 크립

완료시점으로 정하면 크립의 극한수렴값(점근선) 및 크립 종료시점을 구할 수 있다. 쌍곡선 모델은 지반 재료에 따른 특성과 무관하고 실험이나 현장 변형계측을 통해 산정되는 변형데이터만으로 모델링이 가능한 장점이 있다. 그리고 탄성침하량과 장기 크립변형량을 바로 산정할 수 있는 장점이 있다[6].

3. 앵커크립시험

본 연구를 위하여 현장의 앵커 크립시험이 행하여졌다. 본 논문은 도로공사 00 현장의 앵커 크립거동을 해석한 것이다.

지속적인 크립은 앵커의 잔존긴장력을 감소시키므로, 앵커의 크립거동 여부를 확인해야한다. 크립거동을 해석하기 위해 앵커단기 크립 시험을 실시하였다.

시험위치는 붕괴가 발생한 주변의 앵커, 시공된 앵커가 불안정해 보이는 앵커, 기타 전체앵커를 대표하여 평가할 수 있도록 적절하게 분산하여 해당 현장의 5개소에서 실시하였다. 즉, 해당 현장의 5개의 앵커(A~E앵커)에 대하여 단기 크립 시험을 실시하였으며, 이 결과를 이용하여 앵커의 ①잔존 긴장력, ②탄성변위 및 ③크립거동을 해석하였다.

3.1 하중-탄성변위곡선

앵커 인장시험에서 얻어진 시험 결과를 이용하여 앵커의 특성과 성능을 판단한다. ①하중-변위 곡선은 앵커의 거동파악, ②하중-탄성변위 곡선은 앵커의 성능 판단, ③하중-소성변위 곡선은 앵커의 파괴 또는 크립 발생의 정성적 판단, ④변위-시간 곡선은 크립 발생의 정량적 판단을 하기 위함이다. 하중-변위 곡선은 인장시험 결과 전체를 한꺼번에 나타낸 것이며, 하중-변위 곡선의 형태로부터 앵커의 거동을 판단할 수 있다. 하중변위 곡선으로부터 각 하중cycle별 탄성변위(S_e)와 소성변위(S_p)을 산정하며 하중-탄성변위곡선과 하중-소성변위 곡선을 작성한다.

탄성변위(S_e)는 식 6과 같다. 그 후 식 7~8을 이용하여 인장형 앵커와 압축형 앵커의 탄성변위 상한선과 하한선을 도식한다.

$$S_e = \frac{(P_t - P_i)l_f}{EA_p} \quad (6)$$

여기서, A_p =단면적, l_f =앵커자유장길이, l_a =정착길이, E =변형계수, P_i = 앵커 초기긴장력

(i) 인장형 앵커

$$0.8 \times \frac{(P - P_i)l_f}{EA_p} \leq S_e \leq \frac{(P - P_i)(l_f + 0.5l_a)}{EA_p} \quad (7)$$

(ii) 압축형 앵커

$$0.8 \times \frac{(P - P_i)l_f}{EA_p} \leq S_e \leq 1.1 \times \frac{(P - P_i)l_f}{EA_p} \quad (8)$$

여기서, 압축형 앵커의 경우, l_f 는 앵커전체길이

그 후 앵커의 마찰손실을 고려하여 탄성변위의 수정하한선을 도식한다. 수정하한선은 Table 1의 두 점을 이은 선으로 한다. Fig. 5는 하중-탄성변위 곡선의 예를 보여 주며, 상한선 및 수정 하한선 사이에 현장의 하중-탄성변위시험 곡선이 위치하면 안정측에 존재함을 의미한다[6].

Table 1. Modified lower bound formula

classification	deflection	load
starting point (A)	0	$P_i + 0.15P_m$
end point (B)	$\frac{0.6 \times P_m \times l_f}{EA_p}$	$P_i + 0.75P_m$

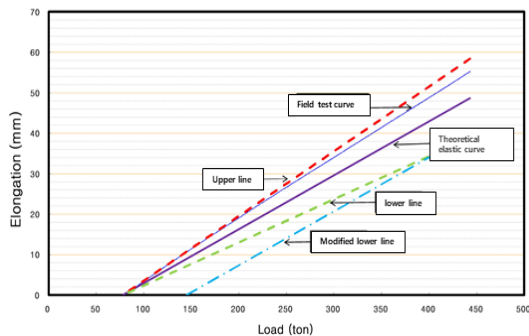


Fig. 5. Load-elastic displacement curve[6]

4. 앵커 크립 분석

현장의 앵커 크립 시험결과를 분석하여 앵커의 성능을 분석하였다. 앵커의 현재 잔존긴장력 확인 및 앵커의 거동이 탄성영역에 위치하는 지 여부판단을 위해 하중-탄성변위곡선을 작성하였다. 또한, 추후 잔존 긴장력 감소 여부를 판단하기 위해 앵커의 단기 크립 시험을 실시 후 분석하였다.

4.1 앵커탄성변위의 상한선과 하한선

앵커의 탄성변위에 대한 상한선 및 하한선을 구하여 현장시험결과를 비교하여 시험결과가 상한선 및 하한선 범위내에 있으면 앵커의 성능은 정상적인 것으로 판단하며, 이 범위를 벗어나는 경우 정상적이지 않은 것으로 판단한다. 앵커의 탄성변위에 대한 상한선 및 하한선을 구하여 현장시험결과와 대비하였으며 또한 탄성변위 계산을 하여 앵커의 탄성거동을 분석하였다.

4.1.1 하중-탄성변위곡선

앵커 확인시험시 하중~변위곡선과 앵커의 탄성곡선을 분석하여 앵커의 성능을 분석하였으며 앵커 성능분석은 이론탄성곡선, 상한선, 하한선을 분석하고 시험결과를 대비 분석하였다. 앵커의 탄성변위를 계산하는 과정은 3.1 절의 식 6에 따른다. 예를 들어, 본 현장의 ㉠~㉦앵커 중 ㉠앵커의 탄성변위의 경우, P_i = 앵커 초기긴장력(78kN), l_f = 앵커자유장 길이(10m), l_a = 앵커정착장 길이(4m), P =443kN일 때 탄성변위 S_e =48.659mm 이다. 앵커 탄성변위의 상, 하한선의 계산은 3.1절의 식 7,8에 의한다.

$$S_e = \frac{(P_i - P_i)l_f}{EA_p} = \frac{(P - 78) \times (10 \times 1,000)}{(190 \times 10^6) \times (4 \times 0.987 \times 10^{-4})} = 0.133(P - 78) = 48.659(\text{mm}) \quad (9)$$

$$0.8 \times \frac{(P - P_i)l_f}{EA_p} \leq S_e \leq \frac{(P - P_i)(l_f + 0.5l_a)}{EA_p} \quad (10)$$

상한선은 $S_e = 0.160(P - 78)$, $P=443\text{kN}$ 일 때,

$$S_e = 58.391\text{mm}$$

하한선은 $S_e = 0.107(P - 78)$, $P=443\text{kN}$ 일 때,

$$S_e = 38.927\text{mm}$$

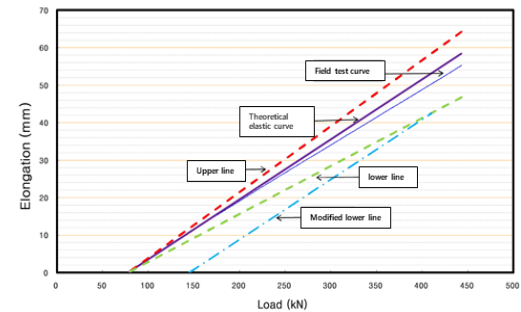
수정하한선 계산식은 Table 1에 보인바와 같다. 이에 따른 수정하한선 계산결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Modified lower bound result

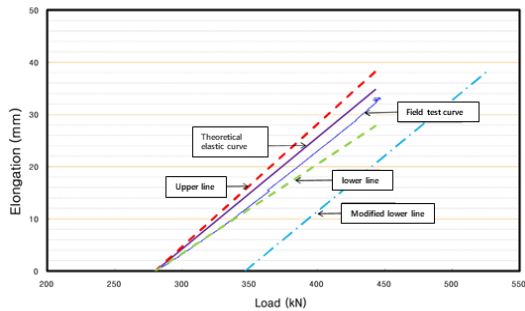
Classification	Displacement	Load
starting point	0	$P_i + 0.15P_m$ = 78+66.45=145.0kN
end point	$\frac{0.6 \times P_m \times l_f}{EA_p} = 35.434\text{mm}$	$P_i + 0.75P_m = 410.3 \text{ kN}$

앵커의 설계인장력까지 하중을 재하하여 시험을 실시하고, 탄성영역 이상 Lift off 시험하중 이상에 대한 하중~변위곡선을 분석한 결과는 Fig. 6과 Table 3과 같다.

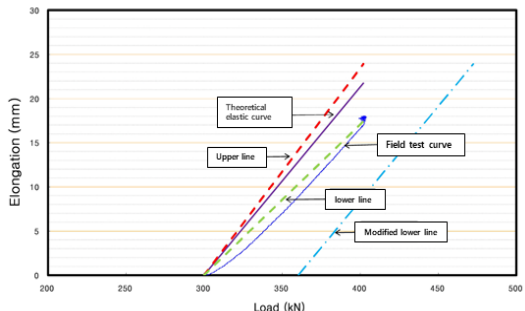
43tf 앵커(Ⓐ, Ⓑ, Ⓔ 및 Ⓕ 앵커) 및 39 tf 앵커(ⓒ와 Ⓓ 앵커) 모두 하중~변위곡선의 상하한선 내에 존재하였다. 하중~변위곡선 분석결과 모든 앵커는 탄성영역 범위 내에 있으며, 향후 앵커의 재인장이 가능하며, 소성변형이 발생하지 않아 앵커로서의 기능을 유지하고 있음을 알 수 있다.



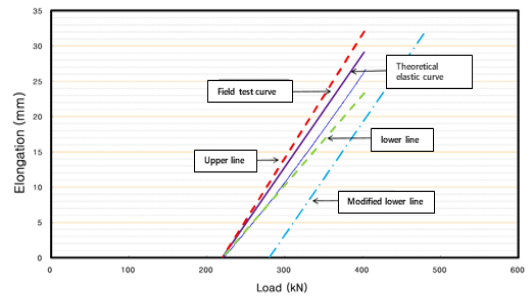
(a)



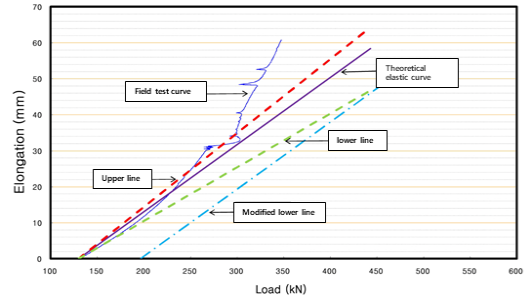
(b)



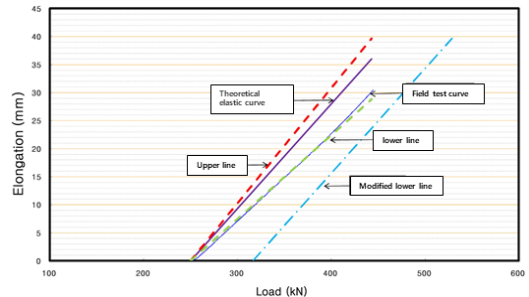
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 6. Load-elastic displacement curve according to lift-off test

(a) Ⓐ Anchor (b) Ⓑ Anchor (c) ⓒ Anchor
(d) Ⓓ Anchor (e) Ⓔ Anchor (f) Ⓕ Anchor

Table 3. Load-elastic displacement test results according to lift-off test

Classification	Design axial force	Initial prestressing	Anchor free field length	Elastic displacement	Maximum test load
Ⓐ	43.00tf	19.8tf	10.0m	48.7mm	44.30tf
Ⓑ	43.00tf	27.8tf	14.0m	30.4mm	44.30tf
ⓒ	39.00tf	31.5tf	14.0m	19.0mm	40.20tf
Ⓓ	39.00tf	21.2tf	10.0m	24.3mm	40.20tf
Ⓔ	43.00tf	13.0tf	12.0m	50.0mm	34.60tf
Ⓕ	43.00tf	30.5tf	12.0m	30.9mm	44.30tf

* Anchor Elastic modulus : $1.9 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$,
 $4 \times 0.987(\text{cm}^2)$

fragmentary :

4.1.2 시간-변위곡선 및 크립계수의 산정

변위-시간 곡선은 각 cycle의 최대하중단계에서 시간에 따른 변위를 나타낸 것으로서, 이로부터 크립 계수를 구하고 크립 발생여부를 판단한다. 한국도로공사에서는 앵커 인발에 따른 단기 크립 시험 시, 크립 계수값이 1mm이하면 크립이 발생하지 않는 것으로 간주하고 1mm를 초과하면 크립 가능성이 있으므로 별도 크립 시험을 실시한다[4]. 식 11은 Creep 계수값을 구하는 공식을 보여준다.

$$\Delta C = \frac{S_{t_2} - S_{t_1}}{\log(t_2/t_1)} \quad (11)$$

여기서, t_1, t_2 : 최대하중하에서의 하중유지시간 (min),
 S_{t_2}, S_{t_1} : 시간 t_2, t_1 에서의 변위량(mm)

크립시험은 크립 가능성이 있는 지반조건(점성토, 점성토성분이 많은 토사지반, 이암, 세일 등)이나 또는 인장 시험에서 크립 현상이 발생하는 경우에 실시한다. 크립 시험은 인장시험과 동일하나, 각 단계별 최대하중에서 하중유지시간을 Table 4에서 제시한 시간까지 유지시키며 변위를 측정한다.

Table 4. Step-by-step load holding time and displacement measurement time

Load steps	Maximum test load by step	Load holding time (min)	Displacement measurement time(min)
1	$P_i + 0.2P_d$	10	1,2,3,4,5,6,10
2	$P_i + 0.4P_d$	30	1,2,3,4,5,6,10,15,20,25,30
3	$P_i + 0.6P_d$	45	1,2,3,4,5,6,10,15,20,25,30,45
4	$P_i + 0.8P_d$	60	1,2,3,4,5,6,10,15,20,25,30,45,60
5	$P_i + 1.0P_d$	300	1,2,3,4,5,6,10,15,20,25,30,45,60,300

Table 5. Creep test result

Classification	Maximum test load (ton)	1min displacement (mm)	2min displacement (mm)	3min displacement (mm)	4min displacement (mm)	5min displacement (mm)	6min displacement (mm)	10min displacement (mm)	$\Delta C = \frac{S_{t_2} - S_{t_1}}{\log(t_2/t_1)}$	decision
①	44.30	57.85	58.07	58.23	58.35	58.45	58.55	58.84	0.99	OK
②	44.30	37.69	37.77	37.89	37.97	38.04	38.07	38.19	0.50	OK
③	40.20	20.84	20.88	20.91	20.95	20.99	21.01	21.07	0.23	OK
④	40.20	31.22	31.38	31.54	31.74	31.96	32.02	32.38	1.16	NG
⑤	No test (Excessive displacement occurs before design load is applied)									NG
⑥	44.30	35.14	35.66	36.40	36.99	37.79	37.83	38.55	3.41	NG

특정 하중단계에서 1mm이상의 크립 계수값이 발생하면 해당 단계의 하중은 크립하중(T_{CR})으로 간주하며 크립으로 인한 긴장력 손실이 발생할 수 있다. 크립이 발생하는 경우, 앵커설계력을 크립 하중 이하로 감소시키는 등의 조치를 취해야 한다.

본 현장에 적용된 단기 크립시험은 하중 1단계만 적용되었다.

즉, 단계별 최대시험하중은 $P_i + 0.2P_d$, 하중유지시간은 10분, 변위측정시간은 1,2,3,4,5,6,10분을 사용하여 재하하였다. 시방서기준에 의하면, 하중을 5단계까지 시험해야하나 일반적으로 1단계까지만 하고 있다.

앵커의 최대시험하중단계에서 시간에 따른 변위량 및 크립 계수를 이용한, 각 앵커별 크립시험결과는 Table 5와 같다.

설계하중까지 인장력을 가한 후 Creep시험을 병행 실시하였으며 2개소에서 Creep변형 허용치를 초과하는 것으로 나타났다. 시험결과 ①앵커와 ⑥앵커는 설계하중 작용시 크립 거동을 하는 것으로 나타났으며 ⑥앵커는 설계하중 작용전에 과다변위가 발생하여 크립 시험이 불가능하여 결과를 도출할 수 없었다. 나머지 앵커는 크립 거동을 하지 않는 것으로 나타났다.

Creep시험결과 ⑤앵커와 ⑥앵커는 크립 거동을 하는 것으로 나타났으므로, 크립 거동이 발생하지 않는 적정 하중을 찾아내기 위한 인장시험이 필요 할 것으로 판단된다.

크립 시험결과 일부 앵커에서 크립이 발생하는 것으로 나타나므로, 이 앵커들은 설계 내력을 유지할 수 없으므로 현장 상황 및 비탈면 조건 등을 종합적으로 고려하여 비탈면의 추가 보강을 실시하여야 할 것으로 판단된다.

Table 5의 크립시험결과에 의하면, 해당되는 5개 모든 앵커의 10분 크립 변위값들이 아직 수렴되지 않은 상태들이다. 하중 지속 시간 및 하중증가량이 더 크다면, 더 큰 크립 변위값을 보일 것임을 알 수 있다. 그러므로 앵커의 크립시험은 Table 4에 제시된 단계별 하중유지시간 및 변위측정시간 조건에 맞춰 시험이 진행되어야 할

것이다. 즉, 하중 1단계만 고려해서 크립 시험을 해서는 안되며, 정확한 크립거동 해석을 위해서는 각 단계별 하중 및 유지시간이 필요하다. 현재 크립시험을 한 각 앵커들의 거동은 단계적으로 크립변위량이 수렴되지 않았으나, 크립계수에 의한 거동해석을 한 결과, ㉠, ㉡, ㉢ 앵커는 설계내력이 있다고 할 수 있으며, ㉣ 및 ㉤ 앵커는 설계내력이 없다고 할 것이다.

이는 단기 크립 시험이므로, 단기 크립거동 시험 결과에 의하면 ㉠, ㉡ 및 ㉢ 앵커는 현재 설계내력이 있다고 할 수 있으나, 장기 크립 거동에 대하여서는 정확한 판단을 내릴 수 없다. 그러므로, 장기 크립 거동에 대한 별도 분석이 필요하다.

4.2 Rheology Model

H-Kel 모델의 시간-변형률 곡선은 1차 탄성 변위(ϵ_1)과 2차 탄성 변위(ϵ_2)로 구분된다. 1차 탄성 변위는 시험의 초기 변위이다. 2차 탄성 변위는 수렴된 크립 최종변위와 초기 변위의 차이 값이 된다. 2차 탄성 변위는 댐퍼의 점성계수로 2차 탄성 구간에서 시간-변형률 곡선의 기울기(α)를 의미한다. 이는 실험데이터에서 시행착오를 거쳐, 최적값을 결정한다. 사용된 식들은 식 1~3이다. 초기 탄성변위는 Table 3의 탄성변위값을 사용하였으며, 시간은 0.5초(0.0083분)로 하여 계산하였다. 크립 변위는 Table 5의 최대시험하중 및 크립시간에 따른 크립변위를 이용하여 계산하였다. 크립시험된 앵커들의 단면적은 $4 \times 0.987\text{cm}^2 = 3.948\text{cm}^2$ 이다. Table 6은 각 앵커별 하중 및 크립거동해석에 사용된 응력을 보여준다. Table 7은 ㉠ 앵커의 크립시험결과이며, Table 8은 식 1~3에 따른 ㉠ 앵커의 H-K 모델의 계산과정을 보여준다. Table 9는 재하시간에 따른 ㉠ 앵커의 H-K 모델의 장기 크립변위를 보여준다. Fig. 7은 각 앵커별 단기 크립 시험값 및 해석값의 비교한 결과와 해석된 장기 크립 변위를 보여준다.

본 연구에 사용된 레올로지모델(H-K 모델)의 경우, 단기 크립과 장기 크립의 거동차이가 없어 장기 크립거동해석에 레올로지 모델은 사용하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 이는 2차 크립변화량을 시험에서 구한 최종 크립량에서 탄성변위량을 뺀 값을 사용하기 때문이다. 그러나 크립거동과 거의 유사한 Curve fitting을 구할 수 있어 단기 크립 해석에 아주 유용함을 알 수 있다. 또한 앵커의 장기적인 설계 내력을 분석하기 곤란하여, 앵커가 설치된 비탈면의 장기 안정성 해석을 하기가 곤란하다.

Table 6. Stress used in the load and creep behavior analysis for each anchor

Anchor	㉠	㉡	㉢	㉣	㉤
Load(ton)	44.3	44.3	40.2	40.2	44.3
Stress (kg/m ²)	1.122	1.122	1.018	1.018	1.122
Anchor sectional area			3.948cm ²		

Table 7. Creep test result

t(min)	㉠ Anchor
0.0083	48.70
1.00	57.85
2.00	58.07
3.00	58.23
4.00	58.35
5.00	58.45
6.00	58.55
10.00	58.84

Table 8. H-K model calculation process of ㉠ Anchor

stress	1.12
ϵ_1	48.70 (Elastic displacement)
E1	0.02
ϵ_2	10.14 (Last displacement-First displacement)
E2	0.11
η_2	0.07
slope	15.00 (Method of trial and error)

Table 9. Long-term creep displacement of H-K model

t(min)	analysis value	test value
0.0083	48.82	48.70
1	56.53	57.85
2	58.31	58.07
3	58.72	58.23
4	58.81	58.35
5	58.83	58.45
6	58.84	58.55
10	58.84	58.84
60(1hr)	58.84	
720(12hr)	58.84	
1440(1day)	58.84	
10080(1week)	58.84	
20160(2weeks)	58.84	
30240(3weeks)	58.84	
40320(4weeks)	58.84	

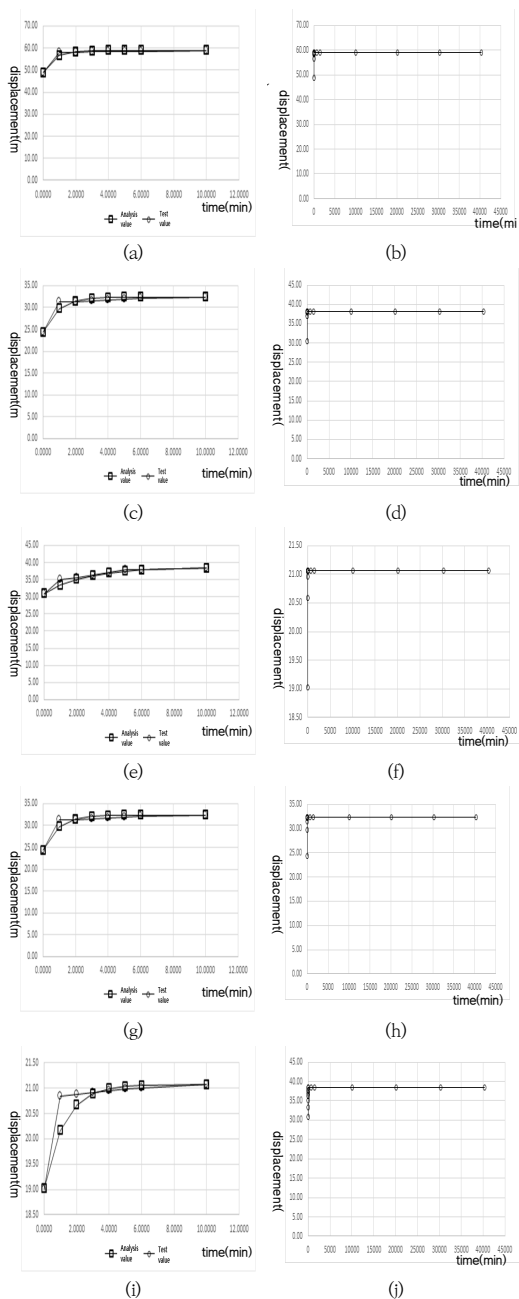


Fig. 7. Short-term creep and long-term creep displacement

(a) ① Anchor short-term creep (b) ① Anchor long-term creep (c) ② Anchor short-term creep (d) ② Anchor long-term creep (e) ③ Anchor short-term creep (f) ③ Anchor long-term creep (g) ④ Anchor short-term creep (h) ④ Anchor long-term creep (i) ⑤ Anchor short-term creep (j) ⑤ Anchor long-term creep

4.3 쌍곡선 모델

쌍곡선 모델은 점근선을 가지고 있어, 최종 크립 변형을 쉽게 구할 수 있고 회귀분석을 통해 모델의 계수값을 쉽게 산정할 수 있다. 일차방정식 형태로 변환된 시험 결과 그래프의 기울기에서 역수값을 취하여 수렴값을 구할 수 있다. 이 수렴값에 도달하는 시점을 크립 완료시점으로 정하면 크립의 극한수렴값(점근선) 및 크립 종료시점을 구할 수 있다.

Table 10은 ①앵커의 쌍곡선 모델을 이용한 계산과정을 보여준다. Fig. 8에 보는 바와 같이 단기 크립 시험결과를 일차방정식으로 변환하여, 식 5와 같이 탄성변위의 역수값을 절편으로 한 추세선을 구한다. 이 추세선의 기울기 역수값이 최종 크립량이 된다. Fig. 8에서 계산과정의 단기추세선의 추세방정식 및 R2값을 볼 수 있으며, 또한 이에 따른 장기 크립거동을 볼 수 있다. Table 11은 각 앵커별로 계산된 추세선의 절편 및 기울기와 이에 따른 최종 장기 크립 변위량을 보여준다.

Table 10. ① Anchor Hyperbolic Model Calculation Process

t(min)	5th 24	t/e	Elastic displacement	remarks
0.0083	48.7	0.000	48.7000	lift off test measurement value
1	57.85	0.017	intercept	
2	58.07	0.034	0.0205	substitute an intercept to trend line
3	58.23	0.052	Find trend line slope	
4	58.35	0.069	0.0137	
5	58.45	0.086	Final convergent displacement	
6	58.55	0.102	72.9927	Trend line slope inverse
10	58.84	0.170		
60(1hr)	71.214			
720(12hr)	72.841			
1440(1day)	72.917			
10080 (1week)	72.982			
20160 (2weeks)	72.987			
30240 (3weeks)	72.989			
40320 (4weeks)	72.990			

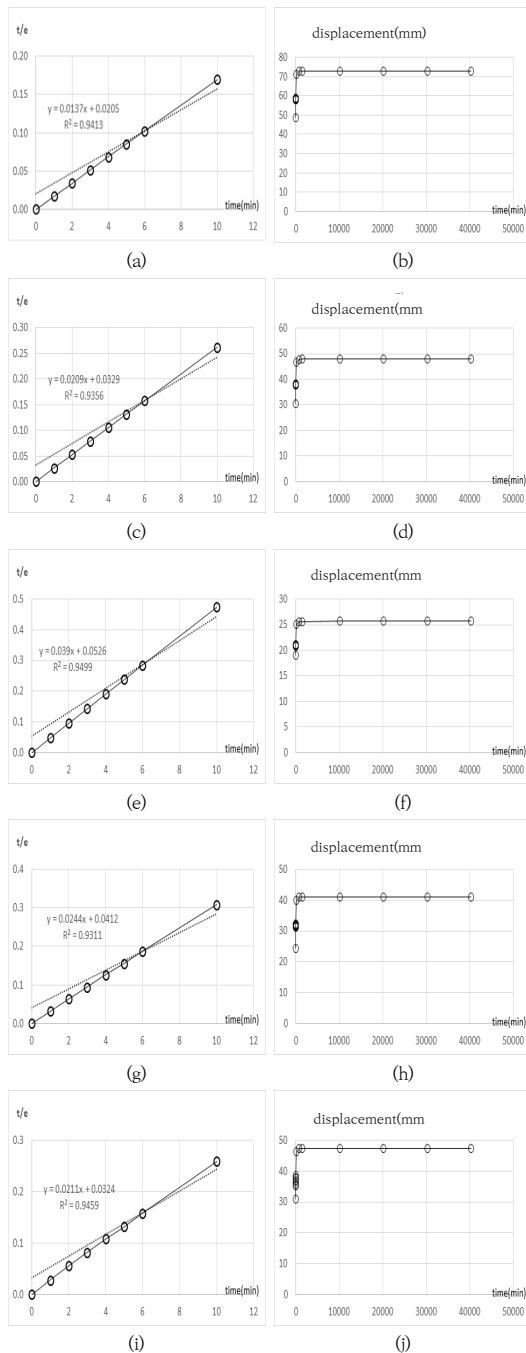


Fig. 8. Short-term trend lines and long-term creep behavior

(a) ① Anchor short-term trend line (b) ① Anchor long-term creep (c) ② Anchor short-term trend line (d) ② Anchor long-term creep (e) ③ Anchor short-term trend line (f) ③ Anchor long-term creep (g) ④ Anchor short-term trend line (h) ④ Anchor long-term creep (i) ⑤ Anchor short-term trend line (j) ⑤ Anchor long-term creep

쌍곡선 모델은 초기 크립 자료 및 점근선을 이용하므로, 앵커 크립시험으로 구한 초기 크립자료를 이용한 장기 크립거동 및 최종 크립량을 해석할 수 있다. 즉, 쌍곡선 모델에 의하면, 단기 크립시험 자료를 이용하여 장기 크립거동을 예측할 수 있으며 최종 크립량을 계산할 수 있다. 그러므로 앵커의 장기크립거동에 따른 잔존 긴장력 예측에 사용함에 있어, 다른 모델에 비해 상대적으로 유리한 모델이다.

Table 11. Long-term creep displacement

Anchor position	A	B	C	D	E
Trend line intercept	0.0205	0.0329	0.0526	0.0412	0.0324
Trend line slope	0.0137	0.0209	0.039	0.0244	0.0211
final displacement	72.9927	47.8419	25.64	40.9836	47.3934

5. 결론

리프트 오프 시험 및 앵커 단기 크립 시험결과를 이용하여 앵커의 성능을 분석하였다. 리프트 오프 시험으로 하중-탄성변위곡선을 작성하였다. 또한, 단기 크립 시험 결과를 이용하여 크립계수를 이용한 크립안정성 평가를 하였을 뿐 아니라, 추후 잔존 긴장력 감소 여부를 판단하기 위해 장기 크립거동 해석을 하였다. 장기크립거동 해석을 위해 Rheology model과 쌍곡선 모델을 이용하였다.

5.1 하중-탄성변위곡선

하중-탄성변위곡선 분석결과, 모든 대상 앵커는 탄성 영역 범위내에 있으며, 향후 앵커의 재인장이 가능할 것으로 판단된다.

5.2 크립거동

- ① 크립시험결과에 의하면, 해당되는 5개 모든 앵커의 10분 크립 변위값들이 수렴되지 않은 상태로, 하중 지속 시간 및 하중증가량이 더 크다면, 더 큰 크립 변위값을 보일 것임을 알 수 있었다.
- ② 그러므로 정확한 크립거동 해석을 위해서는 시방세에서 제시한 각 단계별 하중 및 유지시간에 따라 수행하여야 정확한 장기 크립거동에 따른 잔존 긴장력감소거동을 해석할 수 있다.

5.3 크립계수

- ① 현재 크립시험을 한 각 앵커들의 거동은 단기적으로 크립변위량이 수렴되지 않았으나, ⑤앵커와 ⑥ 앵커는 설계하중작용 시 크립 거동을 하는 것으로 나타났으며, ④, ③, ②앵커는 크립 거동을 하지 않는 것으로 나타났다.
- ② 크립계수에 의한 거동해석을 한 결과, ④, ③, ②앵커는 설계내력이 있다고 할 수 있으며, ⑤ 및 ⑥앵커는 설계내력이 없다고 할 것이다.
- ③ 단기 크립 시험결과로, 장기 크립 거동에 대하여서는 정확한 판단을 내릴 수 없다. 그러므로, 장기 크립 거동에 대한 별도 분석이 필요하다.

5.4 Rheology 모델(H-K 모델)

- ① H-K 모델의 경우, 단기 크립과 장기 크립의 거동 차이가 없어 장기 크립거동해석에 레올로지 모델은 사용하기 어렵다.
- ② 이는 2차 크립변화량을 시험에서 구한 최종 크립량에서 탄성변위량을 뺀 값을 사용하기 때문이지만, 크립거동과 거의 유사한 Curve fitting을 구할 수 있어 단기 크립 해석에 아주 유용하다.
- ③ 그러나, 앵커의 장기적인 설계 내력을 분석하기 곤란하여, 앵커가 설치된 비탈면의 장기 안정성 해석을 하기가 곤란하다.

5.5 쌍곡선 모델

- ① 쌍곡선 모델은 초기 크립 자료 및 점근선을 이용하므로, 앵커 크립시험으로 구한 초기 크립자료를 이용한 장기 크립거동 및 최종 크립량을 계산할 수 있다.
- ② 그러므로 앵커의 장기크립거동에 따른 잔존 긴장력 예측에 상대적으로 유리한 모델로, 비탈면의 장기 안정성 해석에 사용하기에 유리하다.

본 논문에서 단기 크립 시험 결과를 이용하여 레올로지모델 및 쌍곡선 모델로 장기 크립거동 분석한 결과, ① 앵커의 장기 잔존긴장력 및 비탈면의 장기 안정성 해석을 위해서는 앵커의 장기 크립거동 해석 및 최종 크립량 계산이 필요하며, ②분석모델로는 쌍곡선 모델을 제안한다.

References

- [1] M. W. Kim, D. H. Kim, "Prediction of Creep Behavior of Ground Anchor", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.15, No.1, pp.23-29, 2015.
DOI : <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2015.15.1.23>
- [2] D. H. Kim, C. H. Lee, J. S. Mok, J. H. Choi, "Characteristic of Anchor", *Proceedings of 2014 Korean Society of Hazard Mitigation*, Korean Society of Hazard Mitigation, Seoul, pp.357-357, Feb., 2014.
- [3] R. H. Kim, K. H. Lee, W. J. Lee, D. K. Kim, N. K. Kim, "Characteristics of Creep and Short-term Behaviors of Ground Anchor System by Field Test", *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol.22, N0.6-C, pp.585-685, Nov. 2002.
- [4] Korea Expressway Corporation Research Institute, Investigation of application condition and making the performance improvement technique of permanent ground anchor, Research Report, Korea Expressway Corporation Structure Research Center, Korea, pp.30-35.
- [5] S. K. Kim, Theory and application of soil mechanics, p.446, Chungmungak, 2002, pp.203-205.
- [6] Korea Expressway Corporation Research Institute, Research service for experiment and analysis of integral reinforced soil abutment(proposal), Research Report, Korea Expressway Corporation Structure Research Center, Korea, pp. 281-294, 2016.
- [7] H. I. Park, S. R. Lee, "Prediction of Long-term Settlement of Refuse Landfill by Several Proposed Models", *Jouranal of the Korean geotechnical society*, Vol.16, No.2, pp.41-49, 2000.
- [8] Y. S. Jang, K. Y. Lee, Creep of Soil, p.448, Korea Geo-environmental society, Goomibook, 2005, pp.78-85.
- [9] R. E. Gibson, K.Y. Lo, "A Theory of Consolidation for Soils Exhibiting Secondary Compression", *Polytechnic Sczndianavica*, Vol.13, No.1, pp.44-53, 1961.
- [10] I. I. Hoe, D. M. Leshchinsky, Y. Kawabata, "Esyimation of Municipal Solid Waste Landfill Settlement", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.124, No.1, pp. 21-28, 1988.

전 승 철(Seung-Chul Jeon)

[정회원]



- 1988년 2월 : 충북대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 2017년 2월 : 국립금오공과대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2021년 2월 : 국립금오공과대학교 토목공학과 (박사수료)
- 1990년 6월 ~ 2002년 3월 : 신동아건설

- 2002년 3월 ~ 현재 : 계룡건설산업(주)

〈관심분야〉

토질 및 기초, 연약지반, 사면안정

한 희 수(Heui-Soo Han)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 한국과학기술원 토목공학과 (공학석사)
- 1999년 12월 : South Dakota School of Mines Technology (공학박사)

- 2002년 3월 ~ 현재 : 국립금오공과대학교 토목공학과 교수

〈관심분야〉

토질 및 기초, 사면안정, 보강토옹벽