

지오그리드 보강토 교대의 장기거동에 관한 수치해석 연구

Long-Term Behavior of Geogrid Reinforced Soil Abutment - A Numerical Investigation

유 충 식¹ Yoo, Chung-Sik

전 한 용² Jeon, Han-Yong

Abstract

This paper presents the results of a numerical investigation on the long-term behavior of geosynthetic reinforced soil abutment. The investigation was carried out aiming at identifying the governing mechanisms of the long-term deformation of geosynthetic-reinforced soil abutment subjected to sustained loads during service life. A numerical modeling strategy was first established using the Singh-Mitchell creep model and the power law model, respectively, for the backfill and the geosynthetic reinforcement. A parametric study on the creep properties of the backfill and the geosynthetic reinforcement was then conducted. The results indicated that a geosynthetic reinforced soil structure backfilled with marginal soil may exhibit substantial long-term deformation due to the creep effects caused by both the backfill soil and the geosynthetic reinforcement, the magnitude of which depends largely on the creep properties. This paper highlights the importance of considering the creep effect on load supporting geosynthetic reinforced soil structures when the long-term serviceability requirement is of prime importance.

요 지

본 논문에서는 보강토 구조물의 장기거동에 관한 수치해석 내용을 다루었다. 본 연구는 사용연한동안 지속하중을 받는 보강토 구조물의 장기 변형 관련 메카니즘을 고찰하는데 주 목적을 두었다. 연구를 위해 먼저 Singh-Mitchell 크리프 모델과 멱함수(Power law) 크리프 모델을 이용하여 각각 뒤채움흙과 보강재의 크리프 변형을 모델링하는 방안을 구축하였으며 이를 토대로 뒤채움흙과 토목섬유 보강재의 크리프 특성에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 해석 결과 외부하중을 받는 보강토 구조물이 세립분이 많이 포함되어 있는 흙으로 뒤채움이 될 경우 뒤채움흙과 토목섬유 보강재로부터 발생하는 크리프 효과로 인해 상당한 크기의 장기 변형이 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 본 논문에서는 외부하중을 받는 보강토 구조물에 있어서 크리프 효과가 구조물의 사용성에 미치는 영향을 집중적으로 고찰하였다.

Keywords : Geosynthetic reinforced structures, Long-term deformation, Finite element analysis, Sustained loading

1. 서 론

최근 들어 일본 및 북미, 유럽 등지에서는 교량구조물의 교대를 보강토 구조물로 시공하는 사례가 늘어

고 있다(그림 1). 이러한 교대 구조물은 교량의 상판하중이 지속적으로 작용하고 차량의 반복하중이 구조물의 사용연한동안 반복적으로 작용하는 하중조건에 노출되는데 옹벽이나 기타 토류구조물과 같이 보강토 구

1 정회원, 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.)

2 인하대학교 나노시스템공학부 교수 (Prof., School of Nano Systems Engrg., Inha Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

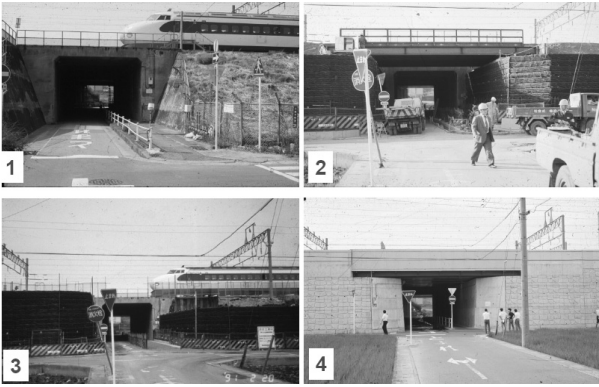


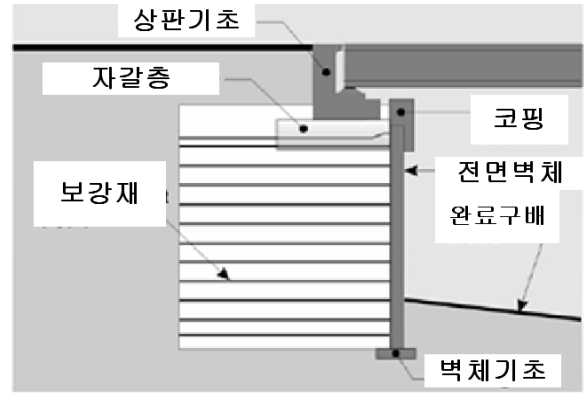
그림 1. 나고야에 시공된 보강토 교대 구조물(Tatsuoka 등 2004)

조물도 사용연한동안 하중이 지속적으로 작용하거나 반복하중이 작용하게 되면 시공중 발생하는 변위이외에 지속하중이나 반복하중으로 인한 잔류변위가 발생하게 된다. 따라서 교대와 같은 중요 구조물은 안정성을 유지하여야 함과 더불어 사용성(serviceability) 또한 확보되어야 하므로 보강토 구조물을 교대부에 적용시에는 이에 관한 고려가 뒤따라야 한다.

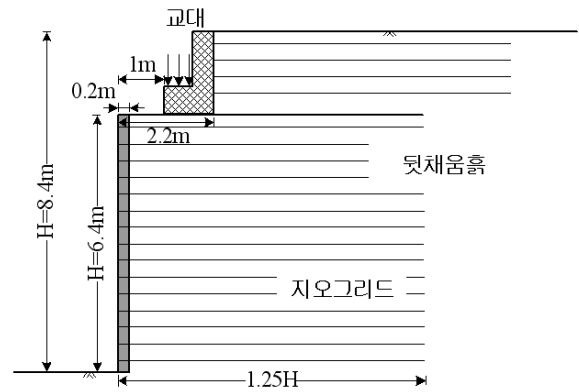
폴리머 합성재료인 지오그리드가 활용되는 보강토 공법에 있어 지오그리드의 크리프 거동에 대한 우려로 인해 장기적 하중지지 구조물로서 활용되는 것에 많은 우려가 있는 것이 사실이다. 특히, 영구 하중지지 구조물은 사용연한 동안 허용변위 이하의 변위가 발생하여야 한다는 사용성 한계 요구조건(serviceability limit requirement)을 만족시켜야 하므로 보강토 구조물의 장기 변형 발생에 대한 우려는 엔지니어링 관점에서 매우 중요한 부분이라고 할 수 있다.

이와 관련된 연구로는 Tatusoka 등(2004), Hirakawa 등(2002), 유충식 등(2005), 유충식 등(2007)의 연구를 들 수 있는데 이들은 평면변형률압축시험, 모형실험, 수치실험 등을 통해 보강토의 시간 의존적 잔류변형 특성에 대한 지속적인 연구를 수행한 바 있다. 이들 연구에서 밝혀진 주 내용은 보강토 구조물의 장기 변형은 지오그리드의 크리프 특성 보다는 뒤채움흙의 시간 의존적 변형 거동이 큰 역할을 한다는 점이고 따라서 세립분이 많이 포함되어 있는 화강풍화토를 뒤채움흙으로 많이 적용하는 국내 보강토 시공 환경에서는 잔류변형에 대한 충분한 고려가 있어야 한다(유충식 등 2007). 최근 들어 Liu 등 (2009)은 수치해석 연구를 통해 세립분이 다량 포함되어 있는 흙을 뒤채움흙으로 활용할 경우 보강토 옹벽의 장기거동이 문제가 될 수 있음을 보인다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 보강토 옹벽 공법의



(a) 보강토 교대 예시



(b) 고려대상 교대 제원

그림 2. 대상 구조물

도로 및 철도분야의 하중지지 구조물로서의 적용성 제고를 위한 연구의 일환으로 보강토 옹벽 형태의 교대의 장기거동 특성에 관한 연구내용을 다루었다. 이를 위해 먼저 Singh-Mitchell 크리프 모델과 멱함수(Power law) 크리프 모델을 이용하여 각각 뒤채움흙과 보강재의 크리프 변형을 모델링하는 방안을 구축하였으며 이를 토대로 뒤채움흙과 토목섬유 보강재의 크리프 특성에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 외부하중을 받는 보강토 구조물에 있어서 크리프 효과가 구조물의 사용성에 미치는 영향을 집중적으로 고찰하였다.

2. 유한요소해석

2.1 대상구조물

본 연구에서는 그림 2(a)에서와 같은 보강토 교대를 단순화 하여 그림 2(b)와 같은 제원의 보강토 교대 구조물을 대상으로 하였다. 보이는 바와 같이 높이 6.4m의 보강토 옹벽 상부에 높이 2m의 상판기초가 1m 이격되어

위치하고 상판기초에는 길이 30m의 상판이 거치되는 조건을 고려하였다. 교대 구조물은 도로교를 기준으로 하여 상판의 사하중과 차량하중으로 인한 활하중이 작용되는 경우를 아래와 같이 고려하여 산정하였다.

- 고정하중 - 교대부 철근콘크리트 슬래브 바닥판 자중(0.25m 두께의 철근콘크리트 슬래브) - 슬래브 두께(0.25m의 철근콘크리트), 교대~교각 지간(30m)
- 도로교 활하중 - 교량등급 1등교와 2등교를 대상으로 DB-24와 DB-18하중 적용

한편, 상판기초 지지 보강토 교대는 축강성 $J=500kN/m$ 의 지오그리드가 길이 1.25H(즉, 8m), 연직간격 0.4m로 설치되는 경우를 고려하였다.

2.2 유한요소해석 모델

해석에서는 지반공학 분야에 적용성이 뛰어난 범용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus(2007)를 사용하였다. 그림 3은 유한요소해석 모델을 보여주고 있는데 뒤채움 및 블록벽

체, 그리고 기초는 가감적분 8절점 평면변형률 요소(CPE8R)를 이용하여 이산화 하였으며 보강재는 2차원 트리스 요소를 이용하여 모델링하였다. 한편, 벽체와 뒤채움사이의 경계면에는 얇은 경계면 요소를 설치하여 상호거동을 모사할 수 있도록 하였다. 아울러 수직경계조건은 벽체높이(H)의 약 3.5배되는 지점에 설치하여 해석결과에 영향이 미치지 않도록 하였으며 바닥부는 힌지를 설치하여 고정하였다.

2.3 크리프 모델링

가) 뒤채움흙의 크리프 특성 모델

보강토 구조물이 지속하중을 받을 경우 이에 따른 시간 의존적 잔류변위는 보강토 구조물을 이루고 있는 구성요소의 크리프 변형특성에 좌우된다. 따라서 보강토의 주 구성요소인 뒤채움흙의 크리프 특성은 잔류변위에 지대한 영향을 미치므로 해석 모델링에 있어서 뒤채움흙에 대한 적절한 크리프 특성 모델을 적용하여야 한다.

Singh와 Mitchell (1968)은 Power 함수를 토대로 흙의 크리프 특성을 모델링하는 Singh-Mitchell 모델(이하 SM 모델로 칭함)을 제시한 바 있다. 그림 4는 카울린과 모래

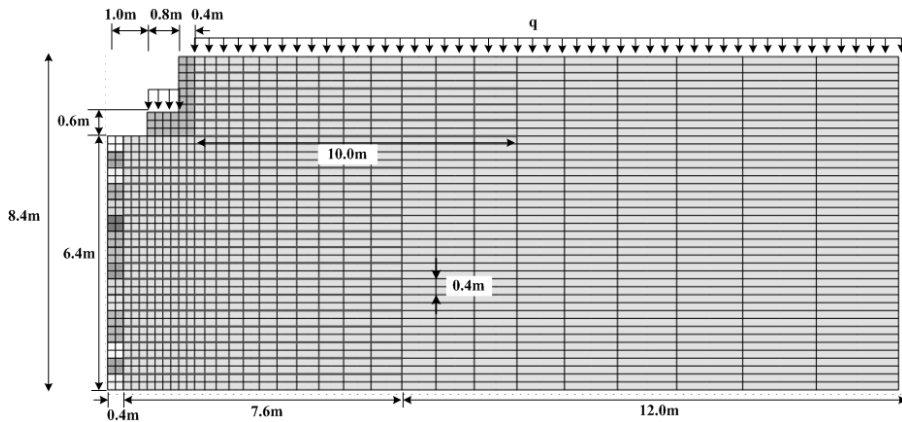


그림 3. 유한요소해석 모델

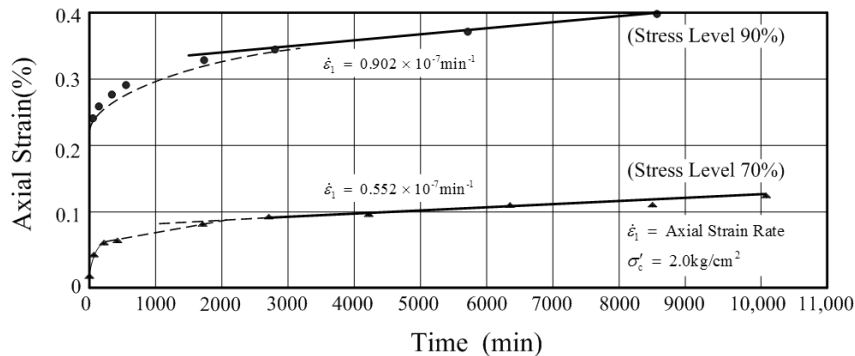


그림 4. 시간에 따른 크리프 변형률(after Mitchell and Soga 2005)

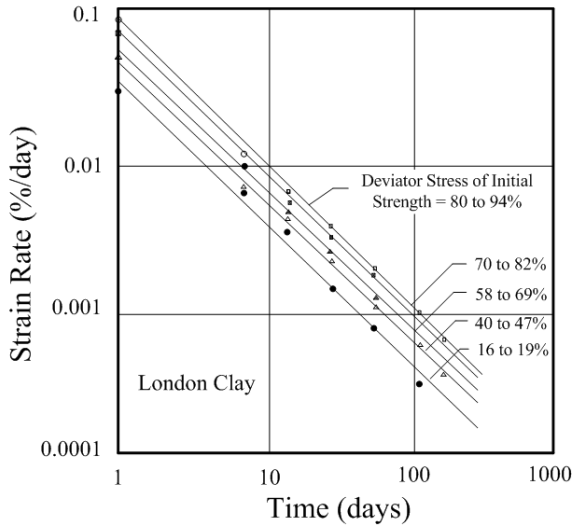


그림 5. 런던 점토의 크리프 변형을 속도와 시간과의 관계(after Mitchell and Soga 2005)

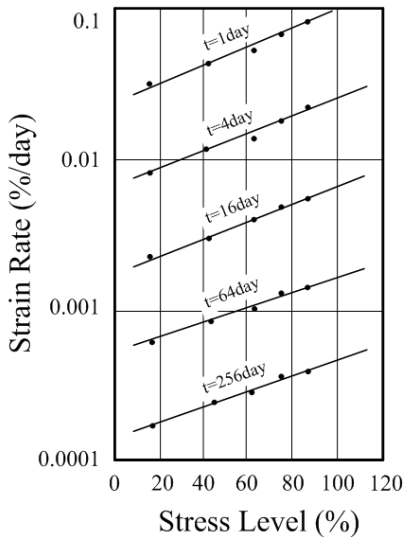


그림 6. 런던 점토의 축차응력에 따른 변형률 속도 변화(after Mitchell and Soga 2005)

혼합토의 크리프 특성 곡선을 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 흙의 크리프 특성 곡선은 쌍곡선 혹은 Power 함수로 잘 묘사되는 것으로 알려져 있다(Mitchell, 1976). 한편 그림 5와 그림 6은 각각 시간(t)와 변형률속도($\dot{\epsilon}$) 관계 곡선 ($t-\dot{\epsilon}$ 곡선)과 $\dot{\epsilon}$ 와 응력수준(D) 곡선($D-\dot{\epsilon}$)을 보여주고 있는데 이들 곡선은 아래 식과 같이 표현될 수 있다.

$$\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}(t, D_0)}\right) = \alpha D \quad (1)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln(\dot{\epsilon}(t, D_0)) + \alpha D \quad (2)$$

여기서 D_0 는 $D=0$ 에서의 $\dot{\epsilon}$ 이며 위 식을 정리하면 식

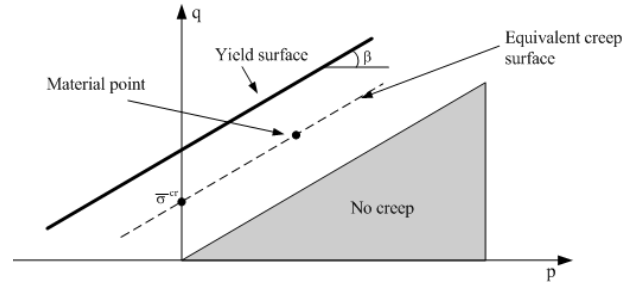


그림 7. 크리프 항복면의 정의

(3)과 같다.

$$\dot{\epsilon} = Ae^{\alpha D} \left(\frac{t_1}{t}\right)^m \quad (3)$$

위 식 (3)은 Singh-Mitchell 모델(이하 SM 모델로 칭함)로 불리며 여기서 A, α, m 은 크리프 시험을 통해서 결정되는 재료 상수이다.

일반적으로 세립분 함유량이 증가할 수록 크리프 특성이 증가하며 따라서 점착력이 큰 흙일 수록 크리프 변형률 발생 속도를 나타내는 A 가 증가하는 경향을 보이는 것으로 알려져 있다 (Singh와 Mitchell, 1968).

Abaqus에서는 위의 SM 모델을 Extended Drucker-Prager 모델과 연계하여 하중 작용에 따른 소성거동과 크리프 거동의 연계 해석이 가능하다. 이때 크리프 포텐셜은 쌍곡선 형태로 정의되며 그림 18에서와 같이 소성 항복면과 아울러 크리프 항복면을 설정하여 임의 지점에서의 $p-q$ 응력 상태가 크리프 항복면을 벗어나게 되면 크리프 변형이 발생하는 것으로 간주하며 여기서 $\bar{\sigma}^{cr} = q - p \tan \beta$ 로 정의되는데 여기서 d 와 β 는 Drucker-Prager 모델의 점착력과 내부마찰각을 의미한다. 각각 본 연구에서는 뒤채움흙의 크리프 변형 모델링에 있어 Extended Drucker-Prager 모델에 SM 모델을 연계하여 시간영역(time domain)에서의 해석을 수행하였다.

나) 보강재의 모델링

Polymer 재질의 지오그리드의 하중응답 특성은 열-점성-탄소성, 이방성 거동을 보인다. 특히 하중이 재하되는 속도나 온도에 따라 하중응답 특성이 달라지는 점성(viscous) 특성이 매우 강하며 시간 의존적 크리프 특성을 배제할 수 없으므로 설계시에도 크리프 특성을 감안하여 설계인장강도를 설정하는 방법을 채택한다. 따라서 지오그리드가 적용되는 보강토 구조물의 장기 거동에 대한 현실적인 모델링을 위해서는 해석모델링에 이를

표 1. 매개변수연구 조건

해석조건	뒤채움흙 전단특성		뒤채움흙 크리프 특성	보강재 크리프 특성	보강재 강성 J (kN/m)
	d (kPa)	β (°)			
S-1	15	45	$A = 3.5 \times 10^{-8} s^{-1}$ $\alpha = 0.05, m = 0.85$	$A = 9 \times 10^{-8} s^{-1}$ $n = 1.9, m = -0.7$	500
S-2	30	35	$A = 1.2 \times 10^{-5} s^{-1}$ $\alpha = 0.22, m = 0.85$		
S-3	40	30	$A = 2.4 \times 10^{-5} s^{-1}$ $\alpha = 0.25, m = 0.85$		
G-1	16	30	$A = 3.5 \times 10^{-6} s^{-1}$ $\alpha = 0.1, m = 0.85$	$A = 9 \times 10^{-10} s^{-1}$ $n = 1.7, m = -0.7$	
G-2				$A = 9 \times 10^{-8} s^{-1}$ $n = 1.7, m = -0.7$	
G-3				$A = 9 \times 10^{-6} s^{-1}$ $n = 1.2, m = -0.4$	

충분히 반영하여야 한다.

Perkins(2000)는 토목합성재료의 모델링에 관한 연구에서 보강재의 크리프 변형을 앞서 언급한 Singh-Mitchell 모델의 근간을 이루고 있는 Power-Law 모델의 적용성을 검토한 결과 적용성이 매우 뛰어난 것으로 보고한 바 있다. 본 연구에서는 Power-Law 모델을 이용하여 보강재의 크리프 거동을 모델링하였다.

Power Law 모델(이하 PL 모델로 칭함)은 시간경화(time-hardening)와 변형률 경화(strain-hardening) 모델이 있는데 지오그리드와 같은 폴리머재료의 재료에는 변형률 경화 모델이 적절한 것으로 알려져 있으며(Perkins 2000), 시간 의존적 크리프 변형률 속도($\dot{\epsilon}^{cr}$)는 아래 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\dot{\epsilon}^{cr} = \left(A(\bar{\sigma}^{cr})^n \left[(m+1)\bar{\epsilon}^{cr} \right]^m \right)^{\frac{1}{m+1}} \quad (4)$$

여기서 A, n, m 는 재료상수로서 크리프 시험을 통해 결정할 수 있다. 크리프 재료상수 중 특히 변형률 발생 속도를 나타내는 A 는 크리프 특성이 커질수록 증가한다.

2.4 매개변수 연구

본 연구에서는 앞에 제시한 보강토 교대옹벽을 대상으로 뒤채움흙 및 보강재의 크리프 특성에 따른 장기 거동 특성을 고찰하는데 주 목적을 두었다. 따라서 뒤채움흙으로는 양질의 조립토와 세립분이 다량 함유되어 통일분류법으로 실트질 모래(SM)로 분류되는 흙이 사용되는 경우를 고려하였다. 표 1은 뒤채움흙과 보강재의 기본 특성을 나열하고 있다. 뒤채움흙의 크리프 특성은 Liu

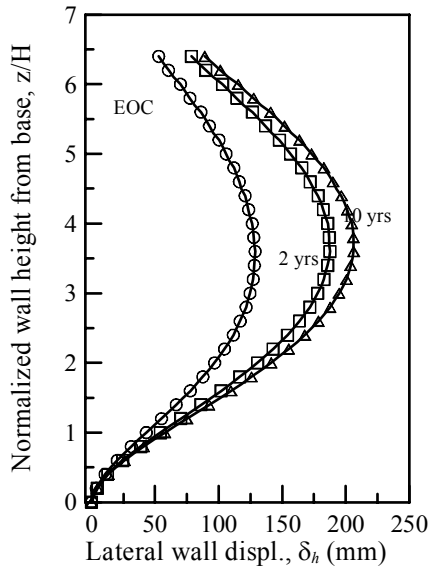
등(2009) 연구결과를 참조하여 선정하였으며 보강재의 크리프 특성은 지오그리드에 대한 크리프 시험으로부터 결정된 파라미터를 사용하였다(김재왕, 2010). 본 연구에서 채택한 매개변수 조건을 나타내고 있으며 표 1에서 보이는 바와 같이 다양한 뒤채움흙의 종류와 지오그리드 크리프 특성을 고려하였다.

표 1에서 선정된 해석 조건은 점착력이 큰 흙일 수록 크리프 변형률 발생 속도를 나타내는 A 및 α 가 증가하는 경향을 고려하여 선정하였다.

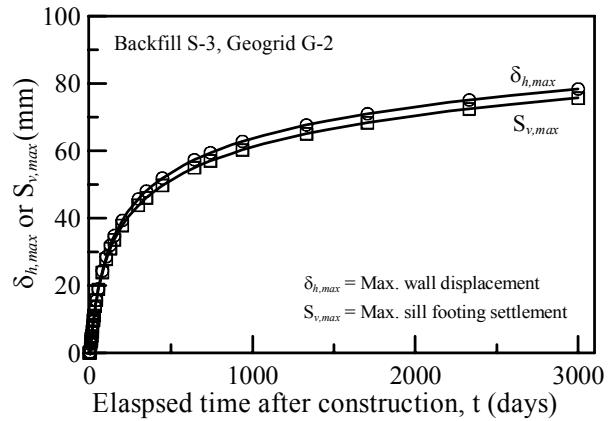
3. 결과 분석 및 고찰

3.1 장기거동 특성

본 절에서는 표 1에 기술한 S-3 시공조건에 대한 보강토 교대구조물의 해석 결과를 토대로 보강토 교대의 장기거동 특성을 고찰하였다. 먼저 그림 8(a)는 보강토 교대의 시공완료 및 시간경과 단계에서의 벽체 변위 프로파일을 보여주고 있다. 여기서 EOC(end of construction)는 [보강토 옹벽 및 상판기초, 상판설치]의 전 시공과정이 완료된 상황을 의미한다. 이 그림에서 관찰할 수 있는 바와 같이 벽체 변위 형태는 벽체 하단부로부터 2/3 지점에서 최대 변위가 발생하는 경향을 보여주고 있으며 EOC 단계에서 약 120mm 정도의 최대 변위가 발생한 후 지오그리드 및 뒤채움흙의 크리프 변형으로 인해 시간이 경과함에 따라 10년 경과시 최대 80mm 정도의 추가 변위가 발생하는 것으로 나타났다. 한편, 그림 8(b)는 시공완료 후 시간경과에 따른 벽체 최대 변위 및 상판기초 침하 발생 경향을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 크리

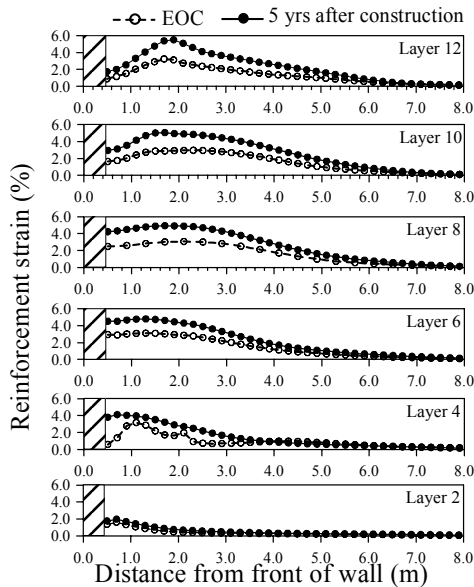


(a) 벽체 변위 프로파일

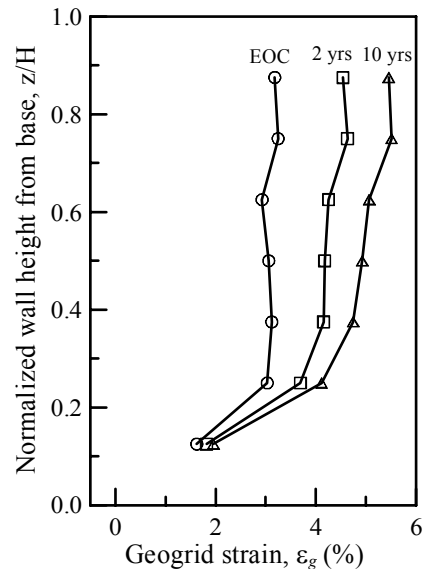


(b) 시공완료 후 벽체 최대 변위 및 상판기초 침하

그림 8. 보강토 교대의 시공완료 후 변위 거동



(a) 보강재 층별 변형률 프로파일



(b) 시공완료 후 층별 최대 크리프 변형률

그림 9. 보강토 교대의 시공완료 후 보강재 크리프 변형률

프 현상으로 인한 변위 발생 경향은 멱함수(power function)의 형태를 따름을 알 수 있으며 크리프 변위는 시공완료 후 약 2년 이내에 대부분이 발생하는 것으로 검토되었다.

그림 9(a)와 9(b)는 각각 지오그리드 보강재의 포설 층별 축방향 변형률 변화경향 및 최대 축방향 변형률 변화 경향을 시간 경과에 따라 보여주고 있다. 먼저 지오그리드 포설 층별 축방향 변형률을 보여주고 있는 그림 9(a)를 관찰하면 지오그리드의 크리프 거동으로 인한 변형률 증가 범위가 벽체 상단으로 갈수록 넓어지는 경향을 보이고 있으며 정량적으로는 그림 9(b)에서 관찰할 수

있는 바와 같이 시공완료시점 대비 약 80%정도가 증가하여 약 3% 정도의 추가 변형률이 뒤채움흙 및 보강재의 크리프 현상으로 발생하는 것으로 분석되었다.

위에서 기술한 보강토 교대 구조물의 시공 완료 후 시간 의존적 변위거동은 지오그리드의 크리프 거동뿐만 아니라 뒤채움흙의 크리프 거동의 복합적인 작용에 의한 것으로 볼 수 있다. 즉, 그림 10은 시공완료 후 시간경과에 따른 뒤채움흙의 크리프 변형률 발생 경향을 칸투어의 형식으로 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 시공 완료 직후에는 매우 미소한 크리프 변형률이 발생하나

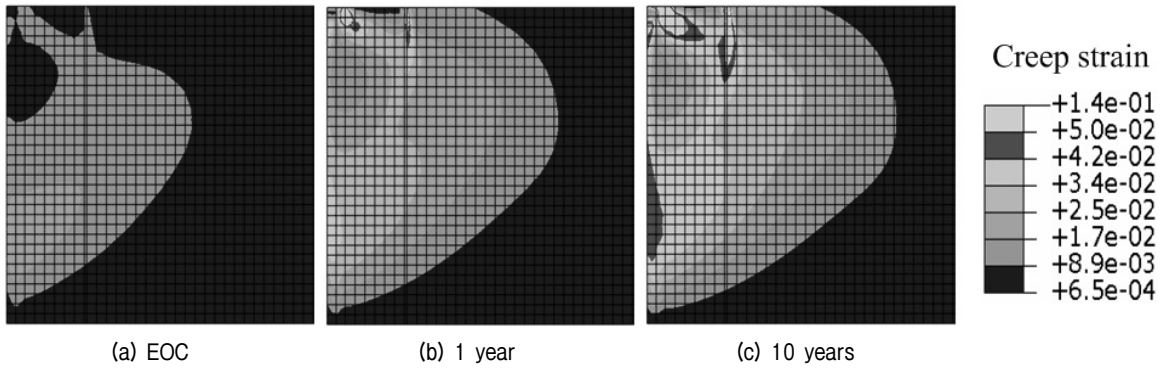
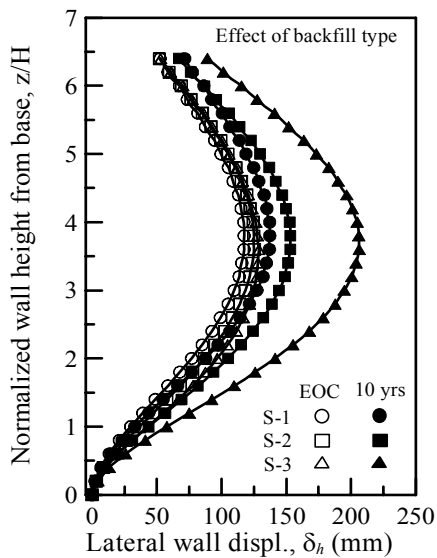
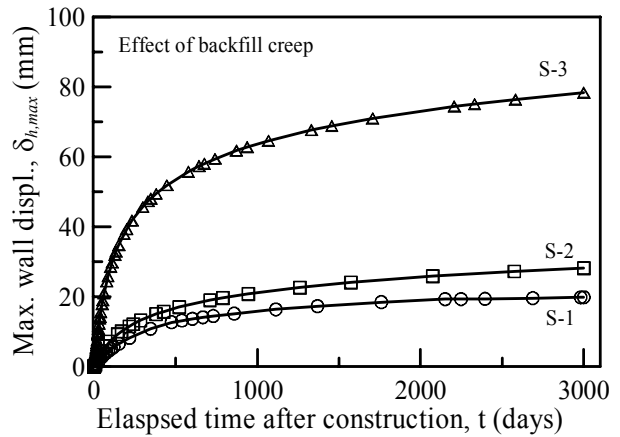


그림 10. 뒤채움흙의 시공완료 후 크리프 변형률



(a) 벽체 변위 프로파일



(b) 시공완료 후 최대 벽체 변위 및 상판기초 침하

그림 11. 뒤채움흙의 크리프 특성에 따른 보강토 교대의 시공완료 후 변위 거동

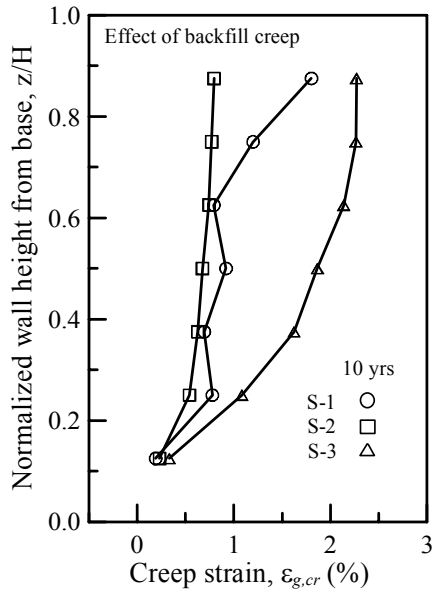
10년경과 후에는 최대 14% 정도의 크리프 변형률이 발생하는 것으로 분석되었다. 이러한 경향은 보강토 구조물의 주 구성요소는 옹벽을 구성하는 뒤채움흙이므로 결국 시간 의존적 크리프 변위의 주된 부분은 뒤채움흙에서 발생할 수 있음을 시사 하는 것으로서 교대 구조물과 같이 장기적인 변위를 제어하여야 할 필요성이 있는 경우에는 크리프 거동이 미소한 양질의 뒤채움흙을 사용하여 할 필요성을 의미한다고 하겠다.

3.2 뒤채움흙 크리프 특성 영향

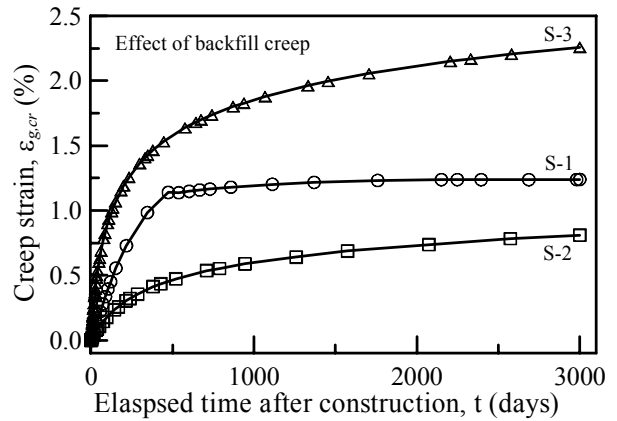
뒤채움흙의 크리프 특성에 따른 교대 옹벽의 거동 특성이 그림 11~13에 제시되어 있다. 여기서 고려된 뒤채움흙(S-1, S-2, S-3)의 지반공학적 특성과 크리프 특성 파라미터는 표 1에 정리되어 있다. 먼저 시공 완료 10년 후 전면벽체의 수평변위 프로파일을 정리하고 있는 그림

11(a)를 관찰하면 시공완료 직후(EOC)에는 뒤채움흙 종류별 전면벽체 수평변위가 별 차이를 보이지 않고 있으나 10년 후에는 뒤채움흙의 종류에 따라 최대 130mm~200mm의 벽체 변위가 발생하는 것으로 분석되었다. 한편, 시공 완료 후 시간 경과에 따른 수평변위 발생경향을 제시하고 있는 그림 11(b)에서는 위와 같은 경향을 보다 구체적으로 관찰할 수 있는데 보이는 바와 같이 세립분 함유량이 많아 큰 점착력 성분을 보유하는 뒤채움흙 S-3의 경우 시공완료 후 최대 80mm 정도의 크리프 변위가 발생하는 것으로 나타나 보강토 구조물의 장기변위 측면에서 보강재의 크리프 거동뿐만 아니라 뒤채움흙의 크리프 거동도 중요하게 다루어 져야 함을 보여 주고 있다.

그림 12는 시공완료 후 발생하는 지오그리드 크리프 변형률을 보여주고 있다. 이 그림에서 관찰할 수 있는 흥미로운 경향은 세립분이 가장 적게 함유된 S-1으로

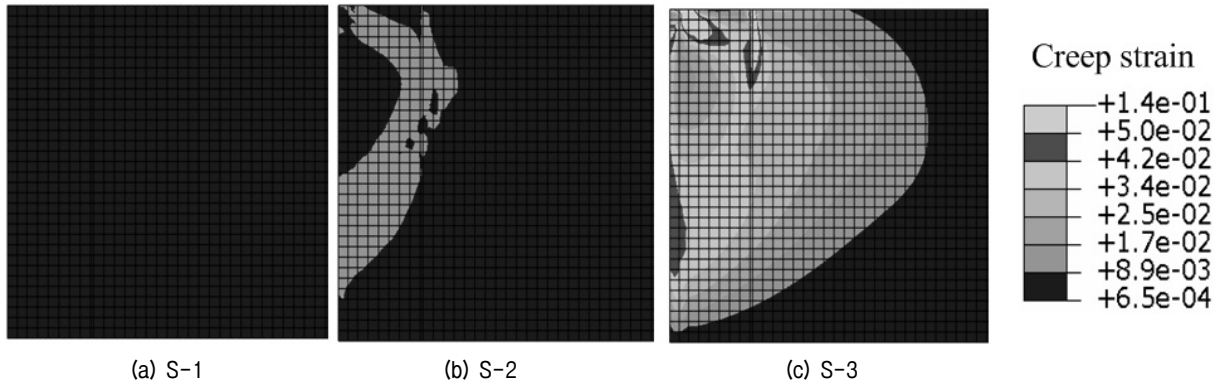


(a) 보강재 층별 최대 크리프 인장변형률



(b) 시공완료 후 보강재 크리프 변형률

그림 12. 뒤채움흙의 크리프 특성에 따른 보강재 크리프 변형률



(a) S-1

(b) S-2

(c) S-3

그림 13. 뒤채움흙의 종류에 따른 뒤채움 구간 크리프 변형률

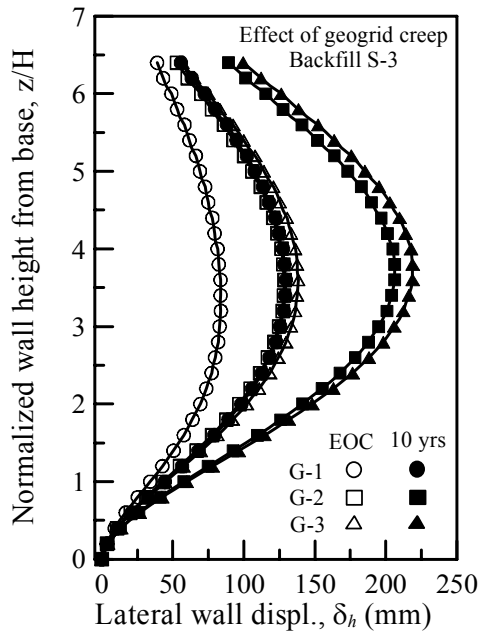
뒤채움한 경우가 S-2로 뒤채움한 경우 보다 지오그리드 크리프 변형률이 더 크게 발생하였다는 점이다. 즉, 뒤채움흙 S-2가 사용된 경우가 S-1으로 뒤채움한 경우보다 더 큰 크리프 변위가 발생하는 것으로 나타났으나 보강재 수준에서는 그 경향이 역전되어 S-1이 적용된 경우에 지오그리드의 크리프 변형률 수준이 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 점착력이 작은 S-1이 뒤채움흙의 전단저항 능력 측면에서 S-2보다 작기 때문에 시공완료 직후(EOC) 지오그리드에는 더 큰 축력이 발생되고 이에 따라 더 큰 수준의 크리프 변형률이 발생하기 때문으로 이해할 수 있다.

위에 제시된 뒤채움흙에 따른 보강토 교대의 시간 의존적 거동 특성을 정리하면 시공완료 직 후의 거동 측면에서는 뒤채움흙에 따라 별다른 차이를 보이지 않으나 시간이 경과함에 따라 뒤채움흙의 세립분 함유량이 증

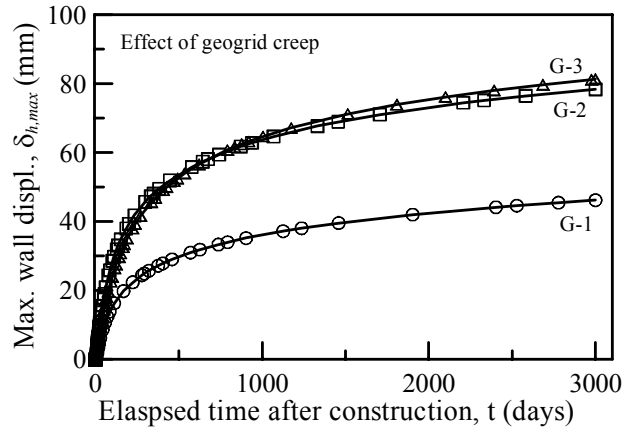
가할수록 구조물 수준의 장기거동 측면에서 변위가 크게 증가하여 사용성 측면에서의 문제가 발생할 수 있는 것으로 검토되었다. 이러한 경향은 보강토 교대와 같이 높은 수준의 외부하중을 지지하는 경우 뒤채움흙과 보강재의 크리프 거동으로 인해 시간 의존적 변형이 발생하므로 사용성 측면의 설계에서는 이에 대한 예측과 반영이 필요함을 의미하며 이를 최소화하기 위해서는 그림 13에서 제시된 바와 같이 무엇보다 크리프 변형이 작게 발생하는 뒤채움흙의 선정이 무엇보다 중요한 것으로 나타났다.

3.3 보강재 크리프 특성 영향

본 절에서는 보강토 구조물의 장기변위를 야기시키는 인자 중 보강재의 크리프 특성에 따른 장기거동 메카니

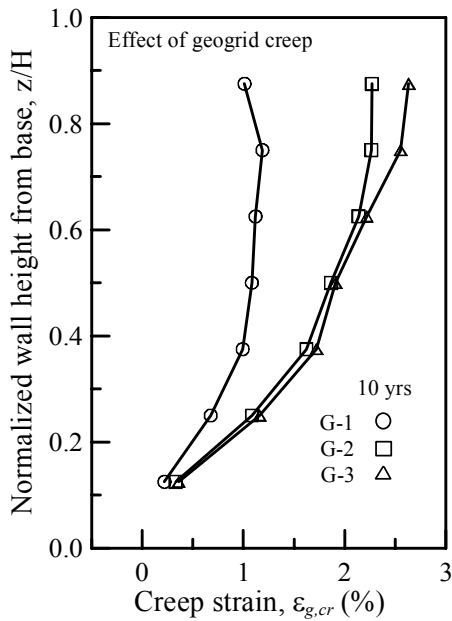


(a) 벽체 변위 프로파일

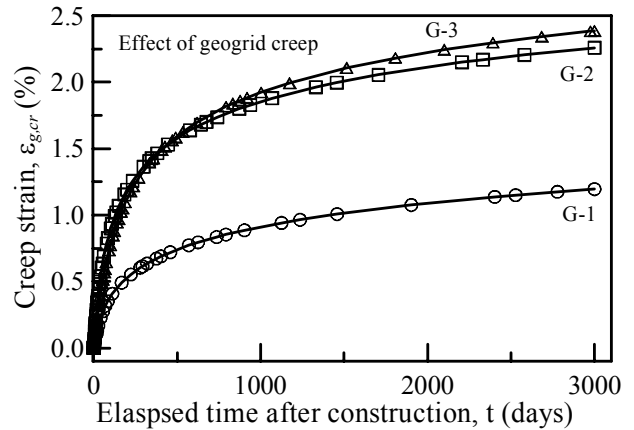


(b) 시공완료 후 최대 벽체 변위

그림 14. 보강재의 크리프 특성에 따른 벽체 변위



(a) 시공완료 후 층별 최대 크리프 변형률



(b) 시공완료 후 최대 크리프 변형률

그림 15. 보강토 교대의 시공완료 후 보강재 크리프 변형률

증을 고찰하였다. 전면벽체의 변위거동을 보여주고 있는 그림 14에서는 크리프 특성이 큰 보강재가 적용될수록 10년 경과 후 벽체 변위 증가량 또한 증가 하는 경향을 잘 관찰할 수 있다. 주목할 만한 점은 보강재 G-3가 G-2에 비해 보강재의 크리프 변형속도가 10배 이상 클에도 불구하고 10년 경과 후 벽체 변위는 거의 동일하게 나타나는 경향이라고 할 수 있는데 이는 보강토 구조물

의 크리프 변형이 단지 보강재의 크리프 특성만으로 발생하는 것이 아니라 뒤채움흙의 크리프 특성과의 상호작용으로 인해 결정되기 때문이라고 이해할 수 있다.

위에서 관찰된 경향은 그림 15에 제시된 보강재에 유발되는 크리프 변형률 경시변화에서 또한 관찰할 수 있는데 보이는 바와 같이 10년 경과 후 발생하는 보강재 크리프 변형률은 G-3와 G-2 공히 거의 차이가 발생하

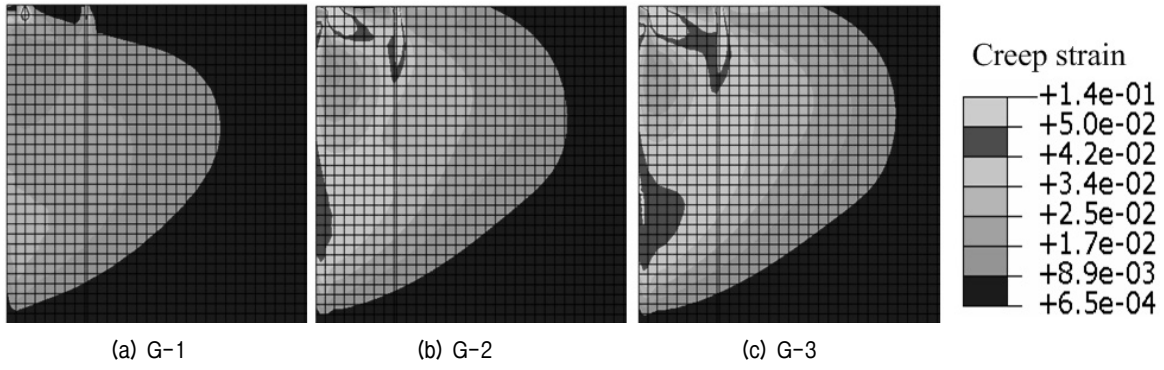
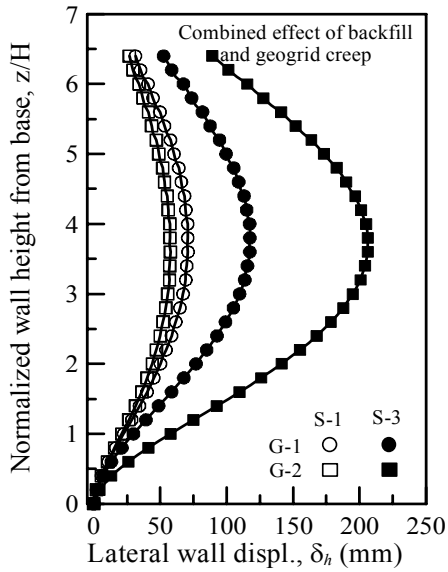
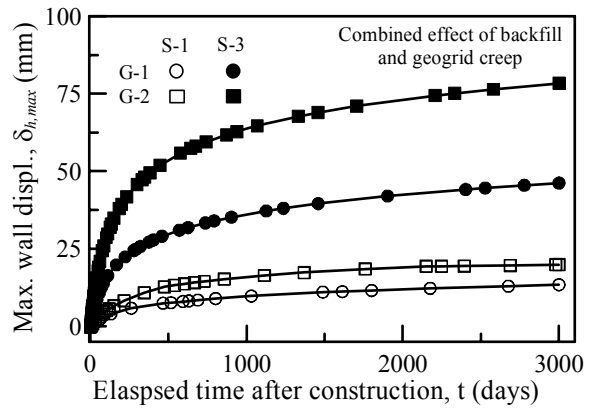


그림 16. 보강재의 크리프 특성에 따른 뒤채움 구간 크리프 변형률



(a) 10년 후 벽체 변위 프로파일



(b) 시공완료 후 최대 벽체 변위 경시변화

그림 17. 뒤채움흙과 보강재의 크리프 거동 상호작용

지 않는 것으로 나타났다. 반면 뒤채움영역에서의 크리프 변형률을 보여주고 있는 그림 16에서는 G-3가 적용된 경우에 크리프 변형률 수준이 가장 높게 발생하는 것으로 나타났는데 이는 G-3를 적용한 경우 크리프 변형이 크게 발생하므로 뒤채움흙으로의 하중전이가 발생하여 뒤채움영역에서 더 큰 크리프 변형이 발생하기 때문으로 이해할 수 있다(Liu 등 2009).

3.4 뒤채움흙과 보강재 크리프의 복합적 영향

앞서 기술한 바와 같이 보강토 구조물의 크리프 거동은 뒤채움흙과 보강재의 크리프 특성의 복합적인 작용에 의해 좌우된다. 그림 17과 18은 뒤채움흙 및 지오그리드 종류별 벽체 변위 및 지오그리드 크리프 변형 발생 경향을 보여주고 있다. 이 그림에서 관찰할 수 있는 경향은 동일한 지오그리드를 사용하더라도 뒤채움흙의 크리프

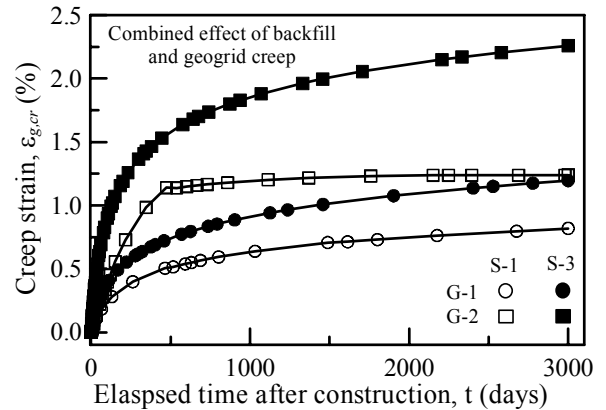


그림 18. 시공완료 후 보강재의 크리프 변형을 경시변화

특성에 따라 보강토 구조물 수준의 장기 변위가 달라질 수 있다는 점이며 각각의 크리프 특성이 클수록 상대 재료의 크리프 거동이 가속화 되는 경향을 관찰할 수 있다.

즉, 그림 17 및 18에서 관찰할 수 있는 바와 같이 동일

한 크리프 특성을 보유하는 보강재를 사용하더라도(예를 들어 $G-1$) 보강재의 크리프 변형률은 크리프 특성이 훨씬 큰 $S-3$ 으로 뒤채움된 경우가 $S-1$ 으로 뒤채움된 경우보다 벽체 변위가 두 배 이상 크게 발생하는 것으로 나타났으며 보강재 크리프 변형률 또한 거의 유사한 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 보강토 구조물 수준의 크리프 변형은 뒤채움흙과 보강재의 크리프 거동의 복합적인 상호작용으로 결정됨을 의미하는 것으로서 크리프 특성이 작은 보강재를 사용하더라도 세립분을 다량 함유한 크리프 특성이 큰 뒤채움흙을 사용하여 뒤채움할 경우 보강토 구조물 수준에서는 우려할 수준의 시간 의존적 장기 거동이 발생할 수 있음을 의미한다고 하겠다.

4. 결론

본 논문에서는 보강토 옹벽 공법의 도로 및 철도분야의 하중지지 구조물로서의 적용성 제고를 위한 연구의 일환으로 보강토 옹벽 형태의 교대의 장기거동 특성에 관한 연구내용을 다루었다. 이를 위해 먼저 Singh-Mitchell 크리프 모델과 멱함수(Power law) 크리프 모델을 이용하여 각각 뒤채움흙과 보강재의 크리프 변형을 모델링하는 방안을 구축하였으며 이를 토대로 뒤채움흙과 토목섬유 보강재의 크리프 특성에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 교대 보강토 옹벽 벽체의 장기 변위 형태는 벽체 하단부로부터 2/3 지점에서 최대 변위가 발생하는 경향을 보였으며 지오그리드 및 뒤채움흙의 크리프 변형으로 인해 발생하는 시간 의존적 장기 변위는 쌍곡선 내지 멱함수(power function)의 형태를 보임과 아울러 본 해석조건에 있어 크리프 변위는 시공완료 후 약 2년 이내에 대부분이 발생하는 것으로 검토되었다.
- (2) 뒤채움흙에 따른 크리프 거동을 검토한 결과 시공완료 직후의 거동 측면에서는 뒤채움흙에 따라 별다른 차이를 보이지 않으나 시간이 경과함에 따라 뒤채움흙의 세립분 함유량이 증가할 수록 구조물 수준의 장기 변위가 크게 증가하여 사용성 측면에서의 문제가 발생할 수 있는 것으로 검토되었다. 이러한 경향은 보강토 교대와 같이 높은 수준의 외부하중을 지지하는 경우 뒤채움흙과 보강재의 크리프 거동으로

인해 시간 의존적 변형이 발생하므로 사용성 측면의 설계에서는 이에 대한 예측과 반영이 중요한 것으로 나타났다.

- (3) 동일한 지오그리드를 사용하더라도 뒤채움흙의 크리프 특성에 따라 보강토 구조물 수준의 장기 변위가 달라 질 수 있는 것으로 나타났으며 각각의 크리프 특성이 클수록 상대 재료의 크리프 거동이 가속화 되는 경향을 보였다. 이러한 경향은 보강토 구조물 수준의 크리프 변형은 뒤채움흙과 보강재의 크리프 거동의 복합적인 상호작용으로 결정됨을 의미하는 것으로서 크리프 특성이 작은 보강재를 사용하더라도 세립분을 다량 함유한 크리프 특성이 큰 뒤채움흙을 사용하여 뒤채움할 경우 보강토 구조물 수준에서는 우려할 수준의 시간 의존적 장기 거동이 발생할 수 있음을 의미한다. 따라서 보강토 구조물의 장기거동의 제어를 위해서는 뒤채움흙의 선정이 매우 중요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2004-000-10953-0) 및 한국연구재단 일반연구자 지원사업(과제번호 20100008227)에 의한 것이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김재왕 (2010) 보강토의 크리프 특성의 모델링에 관한 연구, 석사학위논문, 성균관대학교.
2. 유충식, 김선민 (2007) “하중지지 구조물로서의 보강토 옹벽 - 장기거동 측면에서의 고찰”, 2007 가을 토목섬유학회 학술발표회 논문집, pp.61-74.
3. 유충식, 김선민, 김영훈, 한 대희 (2007) “지속하중 및 반복하중 재하시 보강토 옹벽의 잔류변형 특성”, *한국지반공학회는논문집*, 제23권, 제6호, pp.5-21.
4. 유충식, 김선민, 이봉원 (2005) “평면변형압축시험을 이용한 보강토의 시간 의존적 변형 특성 연구”, *한국지반공학회는논문집*, 제21권, 제10호, pp.1-13.
5. Abaqus, Inc. (2007) ABAQUS user's manual, version 6.7. Abaqus, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
6. Abu-Hejleh, N., Wang, T., Zornberg, J.G. (2000). Performance of geosynthetics-reinforced walls supporting bridge and approaching roadway structures. *ASCE Geotechnical Special Publication No. 103, Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems using Geosynthetics*: 218-243.
7. Hirakawa, D., Uchimura, T., Shibata, Y. and Tatsuoka, F. (2002) “Time-dependant deformation of geosynthetics and geosynthetic-reinforced soil structures”, *Proc. of the 7th International Conference*

- on *Geosynthetics*, Nice, Vol.4, pp.1427-1430.
8. Liu, H., Wang, X., and Song, E. (2008) "Long-term behavior of GRS retaining walls with marginal backfill soils", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 27. 295-307.
 9. Mitchell, J.K and Soga, K. (2005) *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley & Sons, INC. 577p.
 10. Perkins, S.W.. (2000) "Constitutive modeling of geosynthetics", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 18. 273-292.
 11. Singh, A. and Mitchell, J.K. (1968) "General stress-strain-time function for soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 94, No. SM 1, pp.21-46.
 12. Tatsuoka, F., Kongkitkul, W, and Uchimura, T. (2004) "An Old but New Issue; Viscous Properties of Polymer Geosynthetics Reinforcement and Geosynthetic-Reinforced Soil Structures", Keynote Lecture, Proc. of the 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics, Seoul, 2004, Shim et al. (eds.), Korean Geosynthetic Society, pp.29-77.

(접수일자 2010. 9. 2, 심사완료일 2010. 12. 29)