

강제치환 상부 성토체체의 안정성에 관한 연구

Stability of embankment above Compulsory Replacement layer

신현영* 김병일** 정승용*** 김수삼****

Shin, Hyun-Young Kim, Byeung-Il Jung, Seung-Yong Kim, Soo-Sam

Abstract

When soft ground improvement is proceeded in costal area using compulsory replacement method, it is very important that the method of stability of embankment above replacement layer can be obtained if non-replaced soft layer is remained, and there are a lot of influence factors which affect the stability of embankment, such as replacement depth, the water content of dredged soil and the width of replacement layer, etc. If soft layer was replaced completely by good quality materials, there would be no problems about stability of embankment, but practically non-replaced layer would be remained as the strength of soft layer will be increased. So another consideration is required to get the stability of embankment. In this study, stability of embankment among these factors was compared, and from that results, the better way that could obtain the stability was presented.

1. 서론

강제치환공법을 이용하여 연약지반 개량을 시행하는 경우, 연약점토의 물리역학적 특성의 차이로 인해 그 치환심도에는 다소간의 차이가 존재한다. 치환이 종료된 이후에는 치환된 층의 상부에 제방 성토를 시행한 후 배면을 매립하여 부지 확보를 기하게 되는데, 미치환 심도가 잔류하는 지역의 경우 안정적이고 경제적인 매립을 진행하기 위해서는 성토 체체의 안정성 확보를 위한 방안을 우선적으로 강구하여야 한다. 이러한 성토체체의 안정성에 영향을 미치는 인자로는 강제치환심도를 비롯하여 치환사석의 폭, 뒷채움 매립재의 함수비(단위중량) 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 우선 실제 강제치환공법이 적용된 바 있는 여천지역의 현장 데이터를 중심으로 RPL과 SMAP2D 프로그램을 사용하여 강제치환 진행시 연약지반의 토질 변화특성을 살펴보고 이를 바탕으로 안정성 해석프로그램인 PCSTABL5M을 사용하여 강제치환 시행 전·후의 안정성과 월류방지벽 축조를 위한 추가성토에 의한 안정성, 뒷채움 준설토 투기시 함수비 차이에 의한 안정성, 치환사석층의 폭에 따른 안정성 등을 비교 검토하여 미치환 심도가 잔류하는 경우 체체의 안정성에 영향을 미치는 요인을 제시하고, 최종적으로 불안정 요소를 해소할 수 있는 효과적인 방법을 제시하였다.

* 중앙대학교 토목공학전공 박사과정, 비회원

** 중앙대학교 토목공학전공 석사과정, 비회원

*** 지구환경전문가그룹 선임연구원, 비회원

**** 중앙대학교 건설환경공학과 교수, 정회원

2. 치환심도 결정의 영향 인자

2.1 해석방법

안정성 해석을 위한 준비 작업으로 강제치환의 진행에 따른 원지반 변화 특성을 정확히 파악할 필요가 있다. 지름이 20~30cm 정도의 사석을 투입하여 강제치환을 진행하는 본 연구 대상지역의 경우 확인보링을 통해서도 정확한 토질특성 파악이 난해하므로 수치해석 기법을 이용한 간접적인 방법을 통해 토질 변화특성을 예측하였다. 해석에 사용된 단면을 그림1.에 제시하였는데, 이 구간은 연약지반 총심도가 10.4m이고 치환심도는 6.0m인 지역으로 치환층의 단면은 강제치환의 진행에 따라 주변 토압의 영향을 받아 점차 감소하는 것으로 가정하였다.

해석에는 Roscoe et al.(1965)이 제시한 수정 Cam-clay 모델을 사용하였으며 입력상수는 도표1.에 제시하였다.

강제치환은 시간의존적 압밀침하와는 달리 단계적인 사석의 투입으로 인한 즉시침하의 연속적 발생에 해당하므로 이의 효과적인 묘사를 위해 하부 연약지반을 총 10개의 층으로 나누고 매 1m 치환이 진행되는 시점에서 프로그램을 종료하고 이때 주변 지반의 토질상수를 재입력한 후 다시 1m 치환시까지 프로그램을 진행하여 사석성토체 좌단과 중앙, 그리고 우단 하부에서의 각 데이터를 누적하여 plot하는 방식으로 해석을 진행하였다.

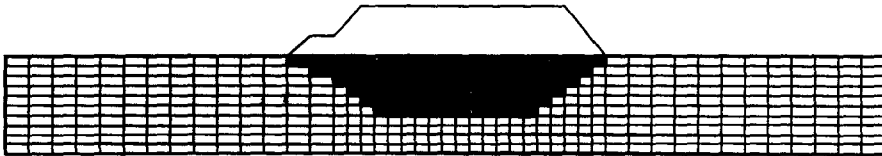


그림1. 해석단면

도표1. 해석방법

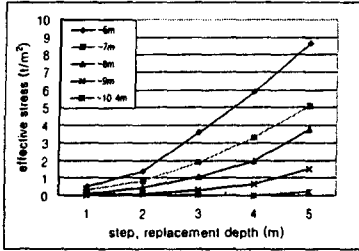
입력상수		값	비고
선행압밀하중	Pc	0.47 kg/cm ²	보고서
초기간극비	e ₀	2.771	보고서
Poisson 비	ν	0.5	가정
압축지수	Cc	1.31	보고서
팽창지수	Cr	0.04	가정
강도정수	M	0.57	$M = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi}$

2.2 치환에 의한 원지반 변화특성

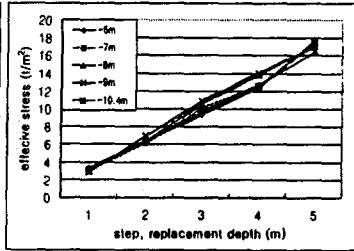
해석결과 강제치환의 단계별 진행에 따른 연약지반의 유효응력 변화는 그림2.와 같다. 총 5단계의 치환이 진행되면서 사석층 하부 미치환지반의 유효응력이 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 위치별로 보면 상부로의 배수가 가장 원활한 제체 중앙 하부에서의 유효응력이 가장 크게 상승하였고 제체의 좌단과 우단 하부에서는 투수계수가 낮은 주변 점성토의 영향으로 과잉간극수압이 발생하여 유효응력의 상승은 중앙에 비해 작게 나타났다. 도표2.는 치환 전·후의 토질상수 변화를 나타낸 것으로 이러한 전반적인 유효응력 상승의 경향은 치환의 진행에 따른 미치환 지반의 강도가 증가로 판단할 수 있으며, 이러한 강도 증가로 인해 미치환층이 어느 정도의 안정한 상태로 변화되고 있음을 알 수 있다.

도표2. 치환 전·후의 토질변화 특성

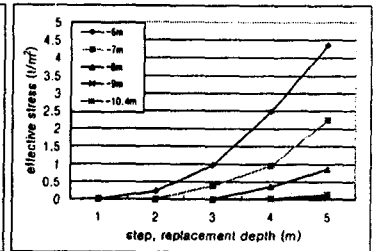
구분		치환 전	치환 후	치환전후
파라미터	단위	토질정수	토질정수	증감비교
압축지수	-	1.3	0.406	감소
점착력	t/m ²	1.0	1.7	증가
건조단위중량	t/m ³	0.8	1.33	증가
포화단위중량	t/m ³	1.5	1.84	증가
간극비	-	2.3	1.05	감소
자연함수비	%	85	38.7	감소
압밀계수	cm ² /sec	5 × 10 ⁻⁴	3.6 × 10 ⁻³	증가
투수계수	cm/sec	9 × 10 ⁻⁸	2.8 × 10 ⁻⁸	감소



(a) 제체 좌단하부



(b) 제체 중앙하부

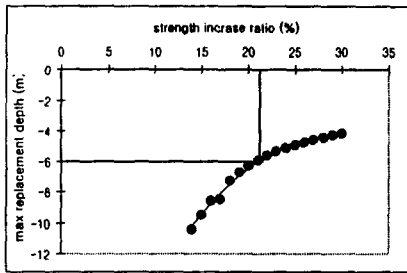


(c) 제체 우단하부

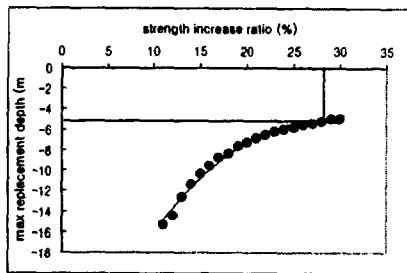
그림2. 유효응력변화

2.3 강도증가 효과

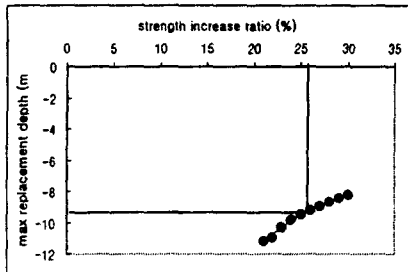
점성토 지반의 강도 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ 이고 마찰계수 ϕ 의 값을 0이라고 하면 결국 강도는 점착력의 함수로 표시할 수 있다. 치환에 따른 미치환 층에서의 강도 증가 경향을 파악하기 위해 미치환 심도가 크게 발생한 4개의 지역을 선정하여 초기 점착력 값에 대한 최종 치환심도 도달시의 점착력 값의 증가비를 강도 증가율로 표시하면 강도 증가율의 변화에 따른 치환심도는 그림3.과 같이 역추적이 가능하다.



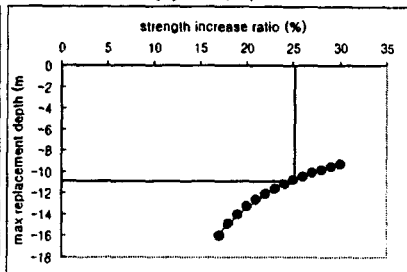
(a) A지역



(b) B지역



(c) C지역



(d) D지역

그림3. 치환의 진행에 따른 원지반 강도증가 효과

즉, 각 선정 지점에서의 강도증가율은 대략 20% 이상의 값을 나타내고 있으며, 이로부터 최종 치환심도에 도달시 최소한 20% 이상의 점착력 증가를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 강제치환에 의한 지반의 강도 증가율 20%를 안정성 해석에 적용함으로써 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

3. 제체의 안정성 평가

3.1 이론적 배경 및 방법

사면 안정 검토에 이용되는 해석 방법은 크게 유한사면 안정 해석과 무한사면 안정 해석으로 구분할 수 있으며, 유한사면 안정 해석은 극한 평형법, 극한 해석법, 수치 해석법, 모형 실험 등으로 나눌 수 있다. 이 중에서 극한 평형법이 가장 많이 사용되는 방법으로 활동 경계면에서의 극한 평형을 고려하여 안전율을 평가하는 방법이다. 이 때 자유 물체를 흙 전체로 보느냐, 여러 부분으로 나눈 조각으로 보느냐에 따라서 Culmann의 방법 또는 마찰원법과 같은 일체법(mass procedure)과 Fellenius법, Bishop법(간편법 포함), Janbu법, Morgenstern-Price법, 일반 극한 평형법(GLE) 등과 같은 절편법(slice method)으로 나뉜다.

본 연구에서는 실무에서 가장 많이 쓰이고 있는 Janbu의 간편법과 Bishop의 절편법을 이용하여 해석을 수행하였고 이 때의 입력 파라미터는 도표3.과 같다. 또한 앞서 치환에 의한 강도 증가율 20%를 평균적으로 적용하여 해석을 수행하였으며, 최소 안전율을 표시하기 위해 가장 작은 안전율을 나타내는 값을 결과 그래프로 출력하였다.

Jangu의 간편법

$$F_s = \frac{\sum [c' l + (P - ul) \tan \Phi'] \sec \alpha}{\sum W \tan \alpha} \quad (1)$$

여기서, $P = [W - \frac{1}{F} (c' l \sin \alpha - ul \tan \Phi' \sin \alpha)] / m_a$

$$m_a = \cos \alpha + \sin \alpha \tan \frac{\Phi'}{F}$$

c', Φ' : 강도정수, u : 간극수압

$$\therefore F_s = f_0 \cdot F_0 \quad (f_0 = 1 \sim 1.13) \quad (2)$$

Bishop의 절편법

$$F_s = \frac{\sum [c' l + (P - ul) \tan \Phi']}{\sum W \sin \alpha} \quad (3)$$

도표3. PCSTABL5M 입력 파라미터

파라미터	사석	연약층	
		치환전	치환후
γ_t (t/m ³)	1.8	1.48	1.84
γ_{sub} (t/m ³)	2.03	1.5	1.84
γ_w (t/m ³)	해수의 경우 1.02~1.03		
c (t/m ²)	-	1.0	1.7
Φ (deg)	40	-	15

그림4.는 전심도가 치환되었다고 가정한 경우로 안전율은 $F_s=1.825$ 로 이 경우 전도과파에 의한 불안정성이 존재하지 않아 가장 이상적인 형태라고 할 수 있으나 앞서 제시한 바와 같이 실제 지반에서는 연약층의 강도 증가 효과로 인한 치환심도 저하 효과가 발생하여 전심도의 치환이 이루어지지 않는 경우가 빈번히 발생하고 있다.

그림5.와 그림6.은 지반의 강도 증가효과를 고려하지 않은 경우와 이를 적절히 반영한 경우의 안정성을 나타내었다. 실제 설계 예측치는 $F_s=1.2$ 로 강도증가가 발생하지 않는 경우의 $F_s=0.974$ 와 20%의 강도증가를 도입한 경우의 $F_s=1.930$ 사이에 존재하고 있었다. 실제로는 확인이 불가능한 제체 중앙하부의 강도증가를 값에 따라 제체의 안정성이 두배 이상 차이가 나고 있으며 이로부터 정확한 강도 증가의 예측에 대한 중요성을 실감할 수 있다.

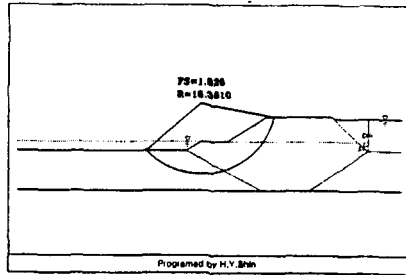


그림4. 전심도가 치환된 경우 안정성

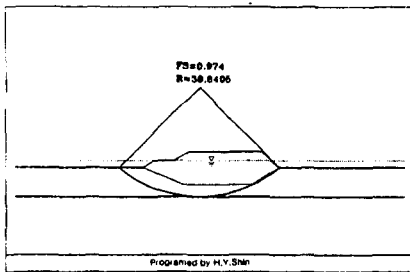


그림5. 강도증가를 고려하지 않은 안정성

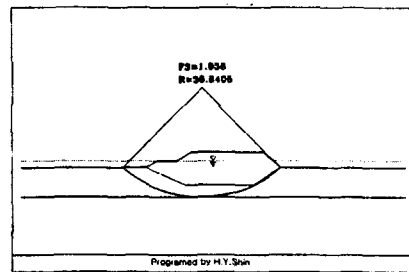


그림6. 강도증가를 고려한 안정성

3.2 월류방지벽 축조에 의한 안정성

그림7.은 치환 종료후 제체에 다시 3m 가량의 월류방지벽을 축조한 경우로 강도증가율을 20%로 책정한 결과 기존의 $F_s=1.930$ 에 비해 안전율이 다소 감소하기는 하였지만 여전히 $F_s=1.373$ 으로 실제 현장에서 예측했던 제방 붕괴의 위험성과는 달리 여전히 높은 안전율을 나타내고 있는 것을 알 수 있었다. 이로부터 강도 증가에 대한 정확한 예측을 수행함으로써 치환사석층의 안정성은 물론 치환사석층 상부로의 추가 성토를 시행한 경우에도 제체의 안정성은 유지되는 것을 파악할 수 있다.

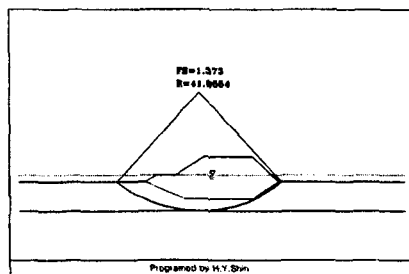


그림7. 월류방지벽 축조 후의 안정성

3.3 준설토의 함수비에 따른 안정성

제체 뒷면에 준설토로 뒷채움하는 경우에는 제체의 횡방향 활동변위가 증가하여 안정성은 보다 크게 감소한다. 그림8.~그림10.은 각각 200%, 400%, 1000%의 준설토로 뒷채움한 경우에 대한 안전율을 나타낸 것으로 이 경우 안전율은 200%와 400% 준설토에 대해 $F_s < 1.0$ 으로 불안정한 것으로 나타났고, 1000%의 준설토에 대해서는 $F_s=1.041$ 로 나타났다.

그림11.은 이러한 준설토의 함수비를 2000%까지 변화시키면서 안전율을 파악한 것으로 대략 600%의 함수비 정도에서 1.0 정도의 안전율을 나타내고 이후 함수비가 증가함에 따라 점차 안정성이 증가함을 알 수 있으나, 그 변화폭은 그다지 크지 않은 것을 알 수 있다. 현장에서 고함수비의 준설토를 사용하는 것은 그만큼 매립 후의 지반 개량에 대해 불리한 여건으로 적용되는 것을 의미하므로, 뒷채움 준설토의 함수비를 무한히 증가시켜 안정성을 확보하는 방안은 타당성이 결여 될 것으로 판단된다.

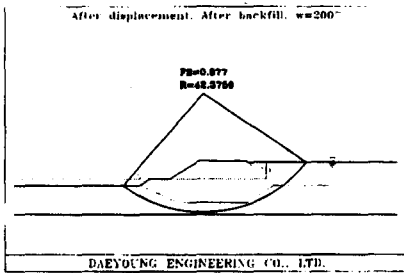


그림8. 200% 준설토 뒷채움

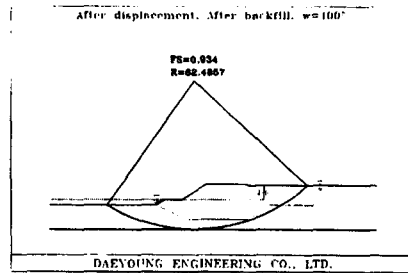


그림9. 400% 준설토 뒷채움

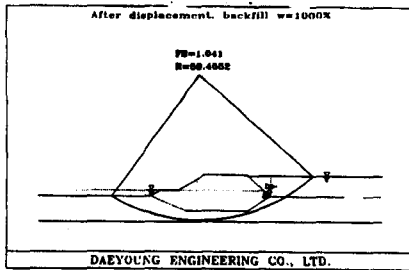


그림10. 1000% 준설토 뒷채움

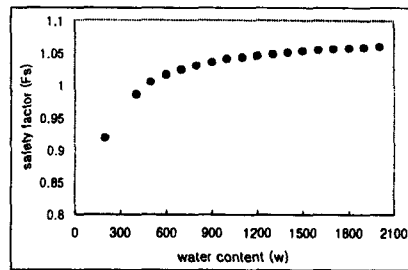


그림12. 준설토의 함수비에 따른 안전율

3.4 제체폭 증가에 따른 안정성

그림11.과 그림12.는 최종 치환심도를 보다 크게 확보하기 위해 사석투입의 폭을 증가시킨 경우의 치환심도와 안전율의 변화를 나타내고 있다. 치환심도가 크게 증가하리라는 예상과는 달리 그림11.에서의 치환심도는 사석투입폭을 10m까지 증가시킨 경우에도 그다지 큰 차이를 보이지 않고 있으며, 이는 앞서 제시한 연약층의 강도가 최고강도에 도달해 이로 인한 지지력이 확보되었기 때문으로 사료된다.

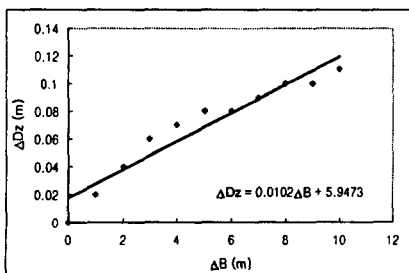


그림11. 제체폭 증가에 따른 치환심도

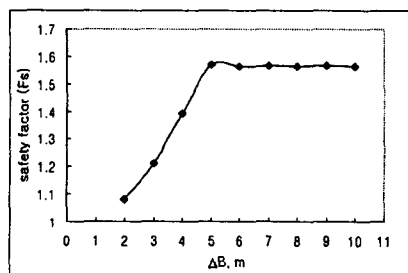


그림12. 제체폭 증가에 따른 안전율

이처럼 치환심도에 큰 차이가 없음에도 불구하고 그림12.에 제시한 안전율은 준설토의 함수비를 조절하는 경우에 비해 큰 폭으로 상승하고 있음을 알 수 있다. 증가 경향은 대략 5m의 체체폭을 증가시킨 경우 $F_s \approx 1.6$ 정도를 유지하고 그 이상의 증가에 대해서는 거의 일정하게 유지되고 있음을 나타내고 있다. 이로부터, 본 연구지역의 경우 횡방향 활동저항력이 이 시점에서 최대치에 도달하였으며 준설토의 함수비에 관계 없이 안정성이 크게 확보될 수 있는 것으로 제시되었다.

4. 결론

강제치환공법을 적용함에 있어서 전심도 치환이 불가능한 지역의 경우 뒷채움 매립에 대한 안정성 확보 방안을 제시하기 위해 치환에 따른 지반변화특성과 안정성 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 강제치환시 전심도가 치환되지 않는 원인은 치환의 진행에 따라 연약지반에 지지력이 형성되어 투입 사석에 대해 저항하기 때문이며, 이러한 강도 증가는 점성토 지반의 경우 20% 이상의 점착력 증가로 나타나고 있음을 알 수 있었다.

(2) 실제 현장에서 불안정한 제체의 안정성 확보를 위한 방법으로 준설토의 함수비를 조절하는 방법을 빈번히 사용하고 있으나 이러한 방법으로는 준설토의 투입으로 인한 활동파괴에 대한 저항성을 크게 확보할 수는 없었다.

(3) 치환사석의 투입폭을 배면으로 증가시킨 결과 치환심도에는 거의 변화가 없었으나, 제체의 활동파괴에 대한 저항력을 증가시켜, 준설토의 함수비를 증가하는 방법에 비해 월등히 큰 안전율의 상승을 확인할 수 있었으며, 이로부터 상대적으로 저렴한 치환사석의 입수가 용이한 경우에는 단순히 사석투입폭을 증가시키는 방법으로 보다 안정적인 시공이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 신현영(1999년), "강제치환 심도산정에 영향을 미치는 인자에 관한 연구", 중앙대학교, 석사학위논문
3. 여천 확장단지 제2공구 조성공사 감리단(1998년), "여천 국가산업단지 확장단지 제 2 공구 조성공사, 업무보고서(월류방지벽 및 제1하천 제방 안정성 검토)"
4. 포스코개발주식회사(1997), "기술매뉴얼-연약지반 개량공법의 설계", POSEC, pp.231- 256,
5. 한국수자원공사(1998), "여천국가공단 확장단지 조성공사 - 구조, 수리 및 제계산서"
6. Perloff and Baron(1976), "Soil Mechanics - Principles and Applications", The Ronard Press Company, New York
7. Terzaghi and Peck(1948), "Soil Mechanics in Engineering Practice", New York, John Wiley & Sons