

모래다짐말뚝(SCP) 시공 지반의 사면안정해석

Slope Stability Analysis of the Embankment on the SCP Treated Ground

장신남¹⁾, Shin-Nam Chang, 박용원²⁾, Yong-Won Park, 김병일³⁾, Byoung-Il Kim

¹⁾ 대림공업전문대학 토목공학과 교수

²⁾ 명지대학교 토목·환경공학과 교수

³⁾ 명지대학교 토목·환경공학과 조교수

SYNOPSIS : In slope stability analysis, SCP(Sand Compaction Pile) treated ground is generally considered as a composite layer. The shear strength of composite layer largely depends upon the stress distribution ratio, n and the angle of assumed failure surface, θ . And the results of slope stability analysis are affected by methods of stability analysis. In this study, the effects of n and θ value on the slope stability analysis results are examined. And the comparisons of several stability analysis methods are carried out.

KEYWORDS : Slope stability analysis, SCP(Sand Compaction Pile), Composite shear strength, Stress distribution ratio, Angle of failure surface

1. 서론

SCP(Sand Compaction Pile)공법은 느슨한 모래지반이나 연약한 점성토지반을 개량할 목적으로 지층에 모래다짐말뚝을 타설하는 공법이다. 특히, 점성토지반에 모래다짐말뚝을 타설하는 경우, 원지반과 모래다짐말뚝이 함께 거동하는 복합지반을 형성하여 복합강도를 가지게 되므로 지지력증대, 침하저감, 측방유동방지 등을 기대할 수 있다(藤田圭一, 1995).

SCP공법은 주로 도로건설 등 성토를 위한 지반개량의 목적으로 사용되며, 성토사면의 안정성 검토가 실시되는 것이 보통이다. SCP시공시 사면안정해석방법에는 복합지반강도를 사용하는 방법과 모래말뚝을 하나의 지층으로 고려하여 해석하는 방법이 있다. 일반적으로 많이 사용되고 있는 복합지반의 강도는 모래말뚝과 원지반이 분담하는 응력의 비인 응력분담비 n 값과 파괴면의 각도 θ 값에 의존한다(토목공법연구회 역, 1996). 응력분담비 n 값은 모래말뚝의 내부마찰각과 원지반의 점착력, 성토하중강도, 모래말뚝에 의한 지반치환율 등의 영향을 받으며, 점성토지반의 압밀진행에 따라 변하는 값이기 때문에 해석적으로 결정하기가 매우 어려우며, 파괴면의 각도 θ 값은 실제 파괴가 발생된 후 현장계측 등에 의해서 알 수 있는 값으로 현재로서는 가정에 의존하고 있는 실정이다. 이러한 응력분담비 n 값과 파괴면의 각도 θ 값을 어떻게 결정하는가에 따라 사면안전율에 차이가 있고, 또한, 해석방법에 따라 사면안전율에 차이가 있다.

이 연구에서는 점성토지반에 SCP가 시공된 몇가지 예제를 통해 응력분담비와 파괴면의 각도가 복합지반의 강도 및 사면안정해석에 미치는 영향을 검토하였으며, SCP가 시공된 경우 해석방법에 따라 사면안정 해석결과가 어떻게 달라지는지 비교, 분석하였다.

2. SCP 시공시 성토사면의 안정해석 방법

2.1 복합지반강도를 사용하는 방법

SCP가 시공된 지반의 사면안정해석시 보통 쓰이는 방법으로서 응력분담비(n), 전단파괴경사각(θ) 등을 가정하여 모래말뚝과 연약점성토지반을 복합된 하나의 지반으로 생각하여 해석하는 방법이다. 식(1)은 복합지반의 강도를 표현하는 식으로서 주로 응력분담비는 2.5~3.5, 전단파괴경사각은 35° 전후로 가정하여 쓰여져 왔다. 또한 이 식은 치환율이 작은 경우에 주로 사용되나, 모든 치환율에 광범위하게 적용되는 것으로 알려져 있다. 식(2)는 사질지반의 강도를 표현하는 식으로, 치환율이 높은 경우($a_s \geq 0.3$ 이상)에 사용되는 것이 보통이다. 식(1), (2)의 차이는 식(1)의 2항의 μ_s 를 ()밖에 나타낸 것과 $\gamma_s' \cdot z$ 를 $\gamma_m' \cdot z$ 로 변경한 것으로서 식(1)과 식(2)는 $\gamma_s' = \mu_s \cdot \gamma_m'$ 일 때 같아진다(神田 ; 寺師, 1990).

$$\tau_{sc} = (1 - a_s)(c_o + \Delta c) + (\gamma_s' z + \mu_s \gamma_t H) a_s \tan \phi_s \cos^2 \theta \quad (1)$$

$$\tau_{sc} = (1 - a_s)(c_o + \Delta c) + (\gamma_m' z + \Delta \sigma_z) \mu_s a_s \tan \phi_s \cos^2 \theta \quad (2)$$

여기서, μ_c : 응력감소계수 [$\mu_c = 1 / \{1 + (n - 1)a_s\}$] a_s : 치환율
 μ_s : 응력증가계수 [$\mu_s = n / \{1 + (n - 1)a_s\}$] τ_{sc} : 복합지반의 전단강도(kg/m²)
 c_o : 초기 연약지반의 점착력(kg/m²) $\Delta \sigma_z$: 성토하중에 의한 연직응력 증가분
 ϕ_s : 모래말뚝의 전단저항각 Δc : 압밀에 따른 점착력의 증분 (= $\mu_c m \gamma_t H U$)
 m : 강도증가율 (= $\Delta c' / \Delta p'$) I : 영향계수 H : 성토고(m) U : 압밀도(%)
 γ_t : 성토의 단위중량(kg/m³) z : 활동면의 심도(m) θ : 지반의 전단파괴경사각
 γ_s' : 모래말뚝의 수중단위중량(kg/m³) γ_m' : 복합지반의 평균수중단위중량(kg/m³)

식(2)로부터 식(3), (4)와 같이 복합지반의 강도정수 c_m, ϕ_m 을 얻을 수 있으며, 여기서 구한 c_m, ϕ_m 이 사면안정해석시 복합지반강도로 사용된다. 즉, 연약지반에 시공된 모래말뚝에 의해서 형성된 복합지반의 강도는 압밀에 의해 증가된 점착력과 모래말뚝의 내부마찰각으로 표현된다.

$$c_m = (1 - a_s)(c_o + \Delta c) \quad (3)$$

$$\tan \phi_m = \mu_s \cdot a_s \cdot \tan \phi_s = \frac{n \cdot a_s}{1 + (n - 1)a_s} \tan \phi_s \quad (4)$$

여기서, c_m : 복합지반의 점착력(kg/m²) ϕ_m : 복합지반의 환산내부마찰각

2.2 각 모래말뚝을 하나의 지층으로 고려하는 방법

SCP가 시공된 지반의 사면안정해석시에 그림 1(a)의 모래다짐말뚝을 하나의 지층으로 고려하여 해석할 수 있다. 모래다짐말뚝을 하나의 지층으로 해석하는 경우에는 길이 방향으로 모래말뚝이 존재하는 것으로 고려하기 위해 그림 1(b)와 같이 모래말뚝 직경을 w 로 줄여서 해석해야 한다. 각 모래말뚝을 하나의 지층으로 고려하여 해석하는 방법은 데이터를 입력하는데 상당한 시간과 노력이 필요하여,

비효율적인 면이 있다.

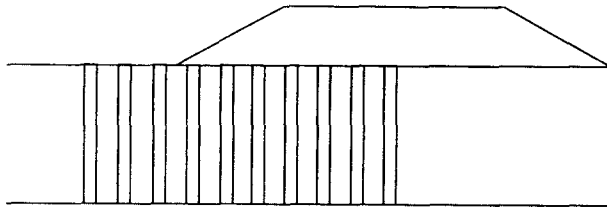


그림 1(a) 시공된 SCP 단면도

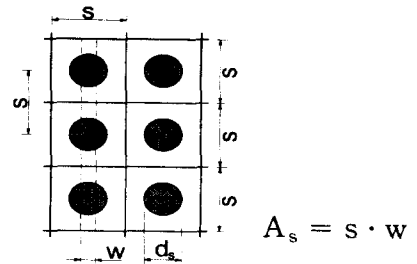


그림 1(b) SCP 평면도

3. 응력분담비(n)와 전단파괴경사각(θ)의 영향

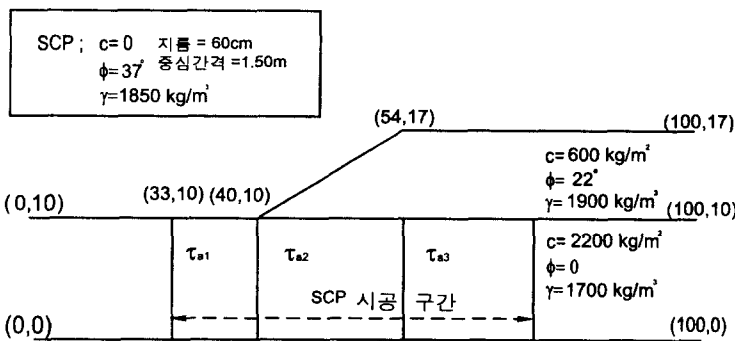


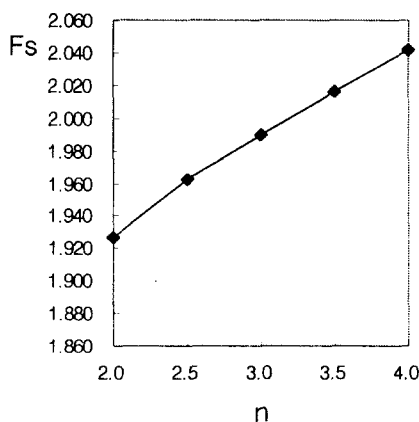
그림 2 n값과 θ 값의 영향을 검토하기 위한 성토사면의 형상

복합강도개념으로 구한 사면안전율은 응력분담비(n), 전단파괴경사각(θ)의 변화에 따라 다양한 값을 보인다. 그림 2는 모래다짐말뚝이 시공된 지반에서 n값과 θ 값의 영향을 검토하기 위한 성토사면의 형상이다(우기형 역, 1994). 여기서는 지반내 파괴 유도를 위해서 특정 파괴면을 설정하여, $U=90\%$ 일 때, 복합강도개념으로 구한 사면안전율을 계산하고, n값과 θ 값에 따른 사면안전율의 변화 추이를 알아보았다. 복합지반의 전

단강도는 식(1)로 구한 값을 점착력 c로 입력하였으며, 계산 과정에서 z값은 점토층 두께를 사용하였고, 영향계수(I)는 고려하지 않았다. 기타 토질정수는 일반적으로 쓰이고 있는 대표적 값들의 범위에서 사용하였고, 그 범위는 표 1과 같다.

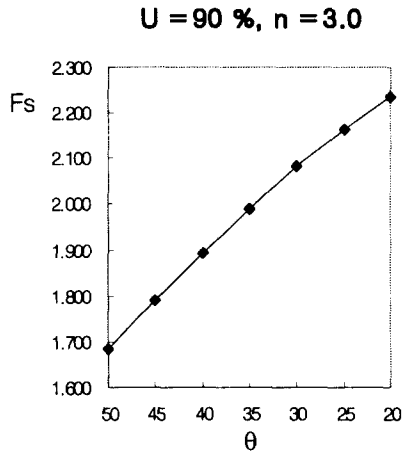
그림 3~4는 SCP가 시공된 사면의 안정해석에서 복합강도개념을 사용한 방법의 결과이다. 결과를 살펴보면, 응력분담비(n)가 커질수록, 전단파괴경사각(θ)이 작아질수록 안전율이 증가함을 알 수 있다. 또한, n(2~4)에 따른 안전율의 변화는 θ 에 따른 안전율의 변화폭보다는 작은 경향을 보였다.

$U = 90\%, \theta = 35^\circ$



n	Fs
2.0	1.927
2.5	1.962
3.0	1.990
3.5	2.016
4.0	2.042

그림 3 $U = 90\%, \theta = 35^\circ$ 일 때, n에 따른 안전율의 변화 추이



θ°	F_s
50	1.684
45	1.789
40	1.891
35	1.990
30	2.082
25	2.164
20	2.236

그림 4 $n = 3.0, U = 90\%$ 일 때, θ 에 따른 안전율의 변화 추이

4. 사면안정 해석 방법에 따른 비교 및 고찰

연약 점성토지반에 SCP를 시공하는 몇가지 예제를 선정하여 복합강도개념을 사용하는 방법과 모래 말뚝을 하나의 지층으로 입력하여 해석하는 방법에 대해서 비교, 분석을 실시하였다. 복합강도개념을 사용하는 방법에서는 식(1)에 의해 계산되는 복합지반의 전단강도를 점착력 c 값으로만 고려하는 방법과 식(3), (4)에 의해 계산되는 c_m, ϕ_m 을 복합지반강도로 고려하는 방법을 사용하였다. 첫 번째 방법에서 전단파괴경사각(θ)은 35° 하나의 값을 사용하는 방법과 성토사면 아래 3부분으로 나누어 θ 값을 가정한 후, 시행착오법으로 처음에 가정한 θ 에 근접한 파괴면이 나오면 해석을 종료하는 방법을 비교, 분석하였다. 모든 예제 해석에는 STABL5M을 사용하였으며, Bishop방법에 대해서만 고찰하였다.

4.1 비교 분석에 사용된 예제

비교 분석에 사용된 예제에서 단순 성토사면의 연약지반, 성토재, SCP의 강도정수는 일반적으로 사용되고 있는 값으로서 표 1의 범위 내에서 사용하였으며, 성토 높이와 연약층의 두께가 다른 3가지의 예제를 선정하여 해석하였다. 선정된 예제는 그림 5, 6, 7과 같으며, 치환율은 3가지 예제 모두 약 10% 정도이다. SCP가 시공되기 전 원지반의 사면안정해석 결과는 표 2와 같다.

표 1 해석에 사용된 일반적인 강도정수의 범위 (NAVFAC, 1982)

	c (t/m^2)	γ (t/m^3)	ϕ°
연약지반	1.2 ~ 2.5	1.6 ~ 1.8	0
성토재	0.3 ~ 0.7	1.8 ~ 2.0	15 ~ 25
SCP	0	1.7 ~ 1.9	30 ~ 37

표 2 SCP 시공전 원지반의 해석 결과 (STABL5M)

	중심	반지름	FS_{min}
예제 1	47.59, 21.74	17.29	0.693
예제 2	50.38, 32.29	30.00	0.736
예제 3	49.07, 53.28	50.37	0.823

4.2 복합지반 강도를 사용하는 방법

그림 8은 3가지 예제에 사용된 영향계수(I)를 구하기 위해서 가정한 단순성토사면의 형상이다. 영향계수(I)는 Osterberg의 도표를 사용하였고(김상규, 1994), 그림 8에서 보는 바와 같이 층의 중간을 평균값으로 보고 계산하였다. 식(1)의 2항에서 사용된 활동면의 깊이(z)도 그림 8에서와 같이 평균값을 취해서 계산하였다.

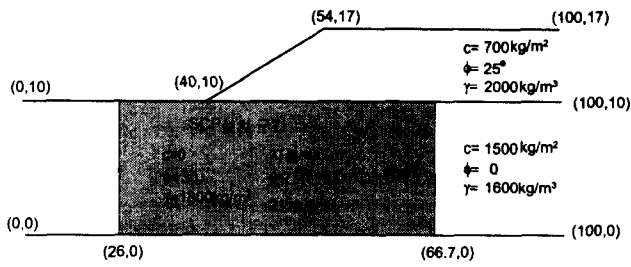


그림 5 예제 1

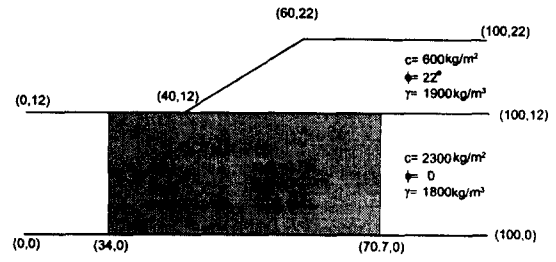


그림 6 예제 2

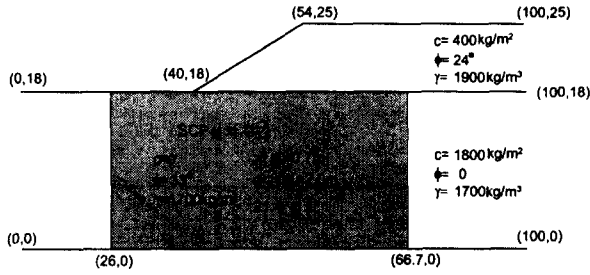


그림 7 예제 3

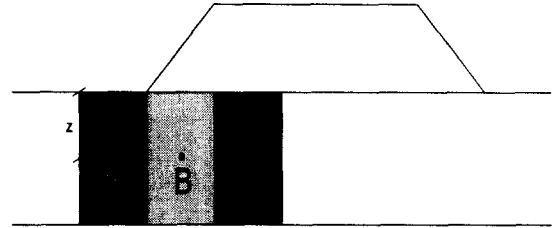


그림 8 Osterberg의 도표 사용을 위한 단순성토사면

4.2.1 c로 고려한 해석

(1) 하나의 θ 만 사용하는 경우

응력분담비(n)는 3.0, 전단파괴경사각(θ)은 35° 로 가정하고, 압밀도(U) 90%에 대하여 해석하였다. 식(1)을 사용해서 구한 τ_{sc} 값은 사면안정해석시 c값으로 사용하였으며, 그 계산 결과를 정리하면 표 3과 같다. 표 4는 표 3의 값을 사용하여 사면안정해석을 실시한 결과를 나타낸다.

표 3 U=0% 및 U=90%일 때 τ_{sc} 의 값 (t/m^2) 표 4 U=90%일 때 사면안정해석 결과

압밀도	예 제 1			예 제 2			예 제 3		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0%	1.691	2.346	3.001	2.566	3.645	4.723	2.267	2.967	3.668
90%	1.691	2.776	4.696	2.566	4.299	6.993	2.267	3.376	5.212

예 제 1			예 제 2			예 제 3		
중심	반지름	FS _{min}	중심	반지름	FS _{min}	중심	반지름	FS _{min}
42.7, 19.9	14.7	1.187	50.0, 45.4	45.4	1.159	49.6, 53.8	51.1	1.197

(2) 3부분으로 나누어 해석하는 경우

(1)에서 사용된 해석방법에서는 전단파괴경사각(θ)을 평균적인 값(35°)으로 가정하여 사면안전을 산정하였다. 그러나, 그림 9에서 보는 바와 같이 동일 파괴면이라고 하더라도 θ 값은 위치별로 다를 수밖에 없다. 이러한 문제의 보정을 위하여 구역별(그림 8의 A, B, C)로 θ 를 다르게 가정하여 c로 고려한 해석 방법으로 사면안전을 산정하였다.

여기에서 응력분담비(n)는 3.0으로 가정하고, 압밀도 90%에 대하여 해석하였다. 처음 단계에서는 구역 A, B, C의 θ 를 35° , 0° , -45° 로 가정하여 프로그램을 실행하였다. 그 결과는 표 5와 같다.

가정된 θ 와 STEP-1에서 최소안전율로 산정된 파괴면의 각도는 차이가 있었으며, 산정 결과는 표 6

과 같다. 표 6의 각도로 다시 τ_{sc} 를 구하여, 프로그램을 실행한 결과는 표 7과 같다. 표 5와 표 7을 비교해보면, 3가지 예제 모두 다 동일한 중심과 반지름이 산정되었으므로 계산을 종료하였다. 해석시 사용된 강도의 변화값은 표 8과 같다.

표 5 가정한 값을 사용한 결과 (STEP-1)

	중심	반지름	FS _{min}
예제 1	43.3, 42.4	42.2	1.206
예제 2	50.0, 45.4	45.4	1.185
예제 3	49.6, 53.8	51.1	1.217

표 6 STEP-1에서 산정된 파괴면의 각도

	예제 1	예제 2	예제 3
A	15°	20°	25°
B	10°	0°	5°
C	-30°	-30°	-15°

표 7 STEP-1에서 산정된 θ 를 사용한 결과 (STEP-2)

	중심	반지름	FS _{min}
예제 1	43.3, 42.4	42.2	1.273
예제 2	50.0, 45.4	45.4	1.235
예제 3	49.6, 53.8	51.1	1.315

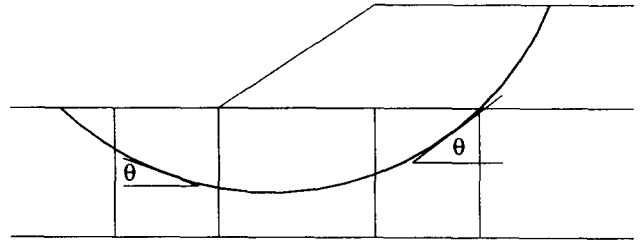


그림 9 3부분으로 나누어 가정한 전단파괴경사각(θ)

표 8 STEP-1과 STEP-2의 τ_{sc} 의 값 (t/m²)

	예제 1			예제 2			예제 3		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
STEP-1	1.691	3.261	4.276	2.566	4.996	6.319	2.267	4.033	4.692
STEP-2	1.821	3.217	4.889	2.720	4.996	7.304	2.411	4.018	6.009

(3) 3부분으로 θ 를 나누어 구한 결과에 유사한 사면안전율을 보이는 θ 의 산정

하나의 θ 값만을 사용하는 경우에 θ 를 3부분으로 나누어서 구한 표 7의 사면안전율과 유사한 사면안전율이 산정되는 θ 를 구한 결과를 표 9에 나타내었다. 표 10은 해석시 강도의 변화값을 나타낸다. 표 7과 표 9를 비교해 보면 θ 를 3부분으로 나누어서 해석한 결과와 유사한 사면안전율을 보이는 θ 의 범위는 15° ~ 23°임을 알 수 있다.

표 9 θ 의 변화에 따른 해석 결과

		예제 1			예제 2			예제 3		
		중심	반지름	FS _{min}	중심	반지름	FS _{min}	중심	반지름	FS _{min}
θ°	28	40.5, 30.3	29.3	1.236	50.0, 45.4	45.4	1.196	49.6, 53.8	51.1	1.250
	26	40.5, 30.3	29.3	1.249	50.0, 45.4	45.4	1.208	-	-	-
	24	40.5, 30.3	29.3	1.267	50.0, 45.4	45.4	1.218	-	-	-
	22	-	-	-	-	-	-	49.6, 53.8	51.1	1.284
	20	-	-	-	50.0, 45.4	45.4	1.237	-	-	-
	18	-	-	-	-	-	-	49.6, 53.8	51.1	1.302
	16	-	-	-	-	-	-	49.6, 53.8	51.1	1.311

표 10 θ 산정에 사용된 τ_{sc} 의 값 (t/m^2)

		예 제 1			예 제 2			예 제 3		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
θ°	28	1.745	2.936	4.962	2.645	4.482	7.420	2.371	3.593	5.542
	26	1.759	2.978	5.031	2.666	4.548	7.532	-	-	-
	24	1.772	3.017	5.097	2.685	4.610	7.637	-	-	-
	22	-	-	-	-	-	-	2.447	3.753	5.786
	20	-	-	-	2.720	4.723	7.828	-	-	-
	18	-	-	-	-	-	-	2.490	3.842	5.922
	16	-	-	-	-	-	-	2.509	3.881	5.981

4.2.2 c, ϕ 를 고려한 해석

이 방법에서는 식(3), (4)를 사용하여 모래다짐말뚝 시공 지반의 강도 정수를 c_m 과 ϕ_m 으로 입력해서 해석하였다. 즉, 연약지반의 c값과 모래다짐말뚝이 발휘하는 ϕ 값이 모래다짐말뚝이 시공된 지반에 평균적으로 작용하는 것으로 해석하였다. 3가지 예제에 대해서 응력분담비(n)는 3.0으로 가정하고, 압밀도 (U) 90%에 대하여 해석하였다. 해석한 결과는 표 11과 같다.

표 11 c, ϕ 를 고려한 해석의 사면안정해석 결과

예 제 1			예 제 2			예 제 3		
중심	반지름	FS _{min}	중심	반지름	FS _{min}	중심	반지름	FS _{min}
45.0, 20.7	14.7	1.377	46.7, 31.0	20.9	1.481	44.2, 37.4	23.0	1.633

4.3 각 모래말뚝을 하나의 지층으로 해석하는 방법

각 모래말뚝을 하나의 지층으로 해석할 때는 3차원 효과를 고려해야 한다. 3차원 효과를 고려하는 해석이 사면안전율에 어떤 영향을 미치는 지 알아 보기 위해서, U=90%일 때, 3차원 효과를 고려한 해석과 무시한 해석을 실시하여 비교하였다. 3가지 예제에 대해서 각 모래말뚝을 하나의 지층으로 해석한 결과는 표 12와 같다.

표 12 각 모래말뚝을 하나의 지층으로 해석한 결과 (U=90%)

		예제 1			예제 2			예제 3		
		중심	반지름	FS _{min}	중심	반지름	FS _{min}	중심	반지름	FS _{min}
3차원 효과	무시	45.6, 21.4	13.7	1.517	46.7, 31.0	20.9	1.549	45.8, 27.2	12.1	1.611
	고려	45.0, 20.7	14.7	1.222	50.0, 45.4	45.4	1.346	46.1, 27.3	12.3	1.345

4.4 결과 분석

3가지 예제에 대한 각 해석 방법에 따른 안전율 산정 결과를 정리하면 표 13과 같다. 표 13에서 보는 바와 같이 c, ϕ 를 고려한 해석의 결과를 보면 c로 고려한 해석보다 더 큰 사면안전율을 나타내었다. ϕ 값이 존재함으로써 사면안전율이 c값만 고려한 해석의 결과보다 더 크게 산정되었다. 또한, θ 를 3부분으로 나누어 해석한 결과와 각 모래말뚝을 하나의 지층으로 고려한 해석 결과가 유사함을 보였다. 또한, 각 해석방법에 따라 사면안전율이 다르게 산정됨을 알 수 있었다.

표 13 SCP 시공후 해석 방법에 따른 사면안전율 (STABL5M)

			예 제 1			예 제 2			예 제 3		
			중 심	반지름	F _{Smin}	중 심	반지름	F _{Smin}	중 심	반지름	F _{Smin}
복합지반 강도를 사용하는 방법	c로 고려한 해석	하나의 θ 값 사용	42.7, 19.9	14.7	1.187	50.0, 45.4	45.4	1.159	49.6, 53.8	51.1	1.197
		구역별 θ 가정	43.3, 42.4	42.2	1.273	50.0, 45.4	45.4	1.235	49.6, 53.8	51.1	1.315
	c, ϕ 를 고려한 해석		45.0, 20.7	14.7	1.377	46.7, 31.0	20.9	1.481	44.2, 37.4	23.0	1.633
모래말뚝을 하나의 지층으로 고려한 해석 (3차원효과 고려)			45.0, 20.7	14.7	1.222	50.0, 45.4	45.4	1.346	46.1, 27.3	12.3	1.345

5. 결 론

SCP로 처리된 연약 점성토지반에 성토사면이 놓이는 몇가지 예제를 통해 응력분담비와 파괴면의 각도가 복합지반의 강도 및 사면안정해석에 미치는 영향과 사면안정 해석방법에 따라 사면안전율이 어떻게 달라지는지 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 복합지반 강도개념을 사용하는 방법에서 응력분담비(n)가 커질수록, 전단파괴경사각(θ)이 작아질수록 사면안전율은 증가하였으며, n에 따른 안전율 변화 보다는 θ 에 따른 안전율 변화폭이 더 큰 경향을 보였다.
2. 복합지반강도를 사용하는 방법 중 c, ϕ 를 모두 고려한 해석은 대체로 사면안전율이 크게 산정되는 경향이 있어, 저치환율인 지반에 사용하는 경우 위험측 해석이 될 수 있다.
3. 또한, 복합지반강도 τ_{sc} 를 c로 고려한 해석 중 하나의 θ 값을 사용하는 방법은 적절한 θ 값 선정이 어려운 경향이 있으며, 따라서 이 경우에는 θ 값을 구역별로 나누어 시산법에 의하여 θ 를 선정하는 방법으로 해석할 필요가 있다.
4. 모래말뚝을 하나의 지층으로 해석하는 방법은 시간과 노력이 많이 필요하여 비효율적면이 있으나, 3차원 효과를 고려하는 경우 대체로 다른 해석 방법들의 평균값 정도로 사면안전율이 산정되는 것으로 나타났다.
5. 해석방법에 따라 사면안전율에 차이가 있었으며, 어떤 방법이 타당한 방법인지는 현장계측 등을 통해 재검토할 필요가 있다.

참고문헌

1. 김상규(1994), "토질역학", 청문각, pp. 59~61
2. 우기형 역(1994), "새로운 연약지반 처리공법", 기술경영사, pp. 126~150
3. 토목공법연구회 역(1996), 지반개량공법, 창우출판, pp. 157~200.
4. 藤田圭一(1995), "연약지반대책공법 총기술", 동화기술, pp. 701~717
5. 神田勝己, 寺師昌師(1990), 粘性土地盤を對象とするSCP工法の實用設計法(感度分析と實態調査), 港滿枝研資料, No.669
6. NAVFAC(1982), "Soil mechanics Design Manual", pp. 7.1-148~150