사면파괴 지역의 연약점토에 대한 비배수 전단강도 적용에 관한 연구
A Study of Application of the Undrained Shear Strength of the Soft Clay in the Area of Slope Failure

정진호[1], Jin-Ho Jeong, 이성록[2], Sung-Rok Lee, 임창규[3], Chang-Kyu Lim

[1] 부경대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Pukyong National Univ. : geojh@pknu.ac.kr
[2] 부경대학교 토목공학과 석사, Master, Dept. of Civil Engineering, Pukyong National Univ.
[3] 부경대학교 토목공학과 박사과정, Candidate, Dept. of Civil Engineering, Pukyong National Univ.

SYNOPSIS : This study is to examine slope activity safety ratio on the strength of the natural sample or soil collected through field test in the slope activity region during destruction happened in the course of soil-relocating work planned for ground improvement under strict supervision at the house-building site, using Bishop's slope analysis method and investigate relationship between slope analysis theories and actual destruction so as to compare determining method of clean water of soil essential for slope activity analysis and accuracy of resulting value of clean water of soil.

Key words : Undrained shear strength, Bishop's slope analysis method

1. 서 론

자연사면은 인공적 사면에 비하여 장기간의 자연적 하중에 의한 평형상태를 유지하는 것이지만, 자연사면과 인공사면을 막론하고 모든 안정된 구조물 등도 중력, 침투, 외부의 어떠한 물리적 힘에 의하여 안정성의 균형이 깨어지면 불안정한 상태가 되어 결국 붕괴로 이어지게 된다. 본 연구에서는 주택조성부지에서 엄격한 시공관리아래 지반개량을 위한 계획된 성토작업을 시행하던 중 급작스럽게 발생한 사고현장을 연구의 대상으로 하였다. 사면의 붕괴는 연장 284m이며 추정된 사면활동의 최대깊이는 20m이여 활동의 시점과 종점의 길이는 약 107m로서 연약지반개량을 위한 페이퍼 드레인 공법의 시공구간과 당초 지반조사시 발견되지 못한 연약지반구간이 같이 분포하고 있었다. 결국 지반개량처리구간은 파괴가 발생하지 않도록 설계, 시공되고 있었으나 미처리구간은 과 성토에 의한 하중으로 지반활동이 초래된 것으로 나타났다. 본 연구는 계획된 성토작업에 의한 사면파괴의 원인 규명보다는 이러한 사면활동의 예를 통해 사면활동해석에 반드시 필요한 흙의 토질정수에 대해 그 결정방법과 그로부터 얻어진 토질정수치의 정확성을 Bishop법에 의한 사면안정해석을 수행하여 이론해석과 실제 발생한 현장의 파괴와의 관계성을 비교하고자 함을 목적으로 하였다.

2. 극한 평형법

2.1 Bishop의 간편법

이 방법은 분할편각 작용력이 수평방향으로 작용한다고 가정하고 각 분할편의 작용하는 연직력은 연직방향힘의 평형조건에서 구하며 간극수압을 고려할 수 있다. 또한 가상회전중심을 고려하면 회전중심 0에 대한 모맨트 평행을 취하므로써 식 (1) 및 식 (2)와 같이 구할 수 있다. 식 (1)의 양변에 안전율이 있으므로 안전율은 시행착오법으로 구한다. 즉, 우변의 안전율에 초기치를 가정하고 식 (1)에 의하여 새로운 안전율을 산정한다. 새로운 안전율을 우변에 대입하면서 계산을 반복하되 두 안전율의 차이가 허용범위보다 작아질때의 안전율을 사면의 안전율로 한다. 수렴은 보통 대단히 빠르고 수계산도 가능하다.

$$Fs = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [cb_n + (W_n - u_n b_n)\tan\phi] \frac{1}{m_{(a)n}}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin\alpha_n} \qquad (1)$$

$$m_{(\alpha)n} = \cos\alpha_n + \frac{\tan\phi \sin\alpha_n}{Fs} \qquad (2)$$

여기서, Fs는 안전율, c는 유효응력법에 의한 점착력, ϕ는 유효응력법에 의한 내부 마찰각, W_n은 분할편의 무게 α_n은 분할편의 무게, u_n은 분할편의 간극수압, b_n은 분할편의 폭이다. 전응력으로 얻은 강도정수를 사용하여 안정해석을 할 때에는 위의 공식의 c, ϕ 대신 c_u, ϕ_u를 사용한다. 이때에는 간극수압을 고려하지 않으므로 $u=0$이고, 전체 사면에 걸쳐서 점착력이 동일하면 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$Fs = \frac{c_u L_a}{\sum W \sin\alpha} \qquad (13)$$

여기서, L_a는 활동 원호의 길이이다. 위의 공식은 N_f를 포함하고 있지 않으므로 이 식을 사영하여 구한 Fs의 값은 정해이다.

3. 지반조사 및 실험

3.1 지반조사 및 토질구성

국도 00호선 사면활동의 원인규명을 위해 시행된 지반조사 내역은 다음과 표 1과 같다. 그리고 다수의 지중경사계와 간극수압 측정 및 지하수위 측정을 수행하였다. 그러나 대규모적인 지반조사를 시행하였으나 사면활동이 발생한 구간내에서 대표단면으로 지반개량 미처리된 지역 중 대표단면과 페이퍼 드레인으로 연약지반을 개량하던 대표단면을 표 2에 나타내었다. 사면활동이 발생한 구간 내 여러 흙에 대해 물리시험을 수행한 결과는 표 3에 나타내었다.

표 1. 지반조사 내역

내역	시추조사 공	표준관입시험	불교란 시료 채취	원추 콘 관입시험	현장베인 시험
횟수	29	374	163	10	10

표 2. 각 시추공에서의 토질분포

구간	시추공 No.	매립	퇴적층						풍화토	풍화암	계
			상부 점토질 모래	점토	하부 점토질 모래	자갈질 모래	하부 모래	모래 자갈			
미개량구간	BH-6	4.3	-	2.8	-	6.5	-	4.9	-	-	18.5
	BH-8	8.6	7.4	2.0	5.0	-	-	3.0	-	-	26.0
	BH-5	2.8	-	23.6	-	-	1.2	3.9	-	-	31.5
	BH-4	1.6	-	33.5	-	-	2.3	1.6	-	-	39.0
	SH-9	0.9	-	35.1	-	-	2.2	1.8	-	-	40.0
	SH-6	-	-	32.4	-	-	2.9	2.2	-	-	37.5
개량구간	BH-9	6.3	4.8	9.2	-	-	-	3.2	-	-	23.5
	BY-2	5.5	-	17.1	-	-	4.8	4.1	1.5	-	33.0
	BH-12	1.9	-	35.8	-	-	0.9	2.4	-	-	41.0
	BH-13	3.8	-	32.2	-	-	2.1	2.9	-	-	41.0
	SH-2	5.1	-	28.1	-	-	4.1	1.7	-	-	39.0
계		40.8	12.2	251.8	5.0	6.5	20.5	31.7	1.5	-	370

표 3. 물리시험 결과

구 분	사질토	점성토
함수비(%)	21.7 ~ 26.1	27.5 ~ 63.6
비중	2.64 ~ 2.65	2.68 ~ 2.72
액성한계(%)	32.8 ~ 34.6	27.5 ~ 73.3
소성지수	10.2 ~14.2	12.2 ~ 53.1
#200 통과량	28 ~47	78 ~ 97

3.2 비배수 강도의 결정

지반조사 결과에 의하면 상당히 많은 실험결과에서 과압밀비가 1.0보다 작은 결과를 나타내고 있다. 따라서 정규압밀된 점토구간에는 비배수 강도의 깊이에 따른 증분이 발생하나 과압밀비가 1.0보다 작은 점토구간에는 그 증가율의 경향이 나타나지 않거나 또는 그 증분이 미약한 결과를 보이고 있다. 따라서 해석에 이러한 비배수 강도의 분포를 해석에 직접 적용하기 위해 1.5~2.0m 깊이별로 채취한 자연시료에 대해서 비압밀 비배수 삼축압축 전단시험과 일축압축시험을 수행하였고 그 결과로 구해진 깊이별 비배수 전단강도(c_u) 값들을 이용하여 해석상 유효한 점토층의전 깊이에 대한 평균값을 구하였다. 또한 소성지수를 이용한 비배수 전단강도, 소성지수를 이용한 평균 비배수 전단강도, 현장베인시험으로 구한 평균 비배수 전단강도, 일축압축시험으로 구한 평균 비배수 전단강도, UU삼축압축시험으로 구한 평균 비배수 전단강도, 표준관입시험의 N값으로 구한 평균 비배수 전단강도 등을 표 4에 나타내었으며 사면활동이 발생한 구간 중 페이퍼 드레인으로 지반개량중이던 구간은 표준관입시험의 N값으로 구한 평균 비배수 전단강도값을 표 5에 나타내었다. 성토재료의 강도정수는 소량의 점토와 실트가 혼합된 자갈질의 모래로 불교란 시료의 채취도 불가능할 뿐만 아니라 시험용 공치체의 제조도 어려워 경험적인 자료를 이용하여 다음과 같이 결정하였다. 점착력 C = 0, 내부마찰각 ϕ = 29 , 단위중량 γ는 강우시 포화상태를 고려하여 2.0t/m^{3}을 적용하였다.

3.3 단계성토 이력

성토기간은 1994.12~1997.4.5(2년5개월)까지였으며 단계성토는 표 6과 표 7에 나타내었다. 또한 개량구간 내에서 우선 단계 성토 시공에 대한 타당성 검토를 수행한 결과를 표 8에 나타내었다. 각 단계의 성토고는 각 단계시의 한계성토고보다 모두 낮게 시공이 되었으므로 기초지반의 지지력 부족으로 인한 전단파괴는 발생하지 않을 것임을 알 수 있다. 사면활동이 발생한 시점에서 단계성토에 의해 증가된

점토의 비배수 강도값은 4.75t/m^{2}이었으며 활동파괴직후 이 지점의 활동위치에서 측정한 현장 베인시험의 결과는 4.12t/m^{2}로 비교적 일치하는 값을 확인하였다.

표 4. 미개량구간의 비배수 전단강도(c_u, t/m^2)

구 분 / 시험방법	점토1 (BH-6)	점토2 (BH-8)	점토3 (BH-5)	점토4 (BH-4)	점토5 (BH-9)	점토6 (BH-6)
소성지수 이용	c_u=1.44+0.114Z	c_u=2.36+0.116Z	c_u=0.88+0.100Z	c_u=1.18+0.102Z	c_u=1.11+0.126Z	c_u=0.74+0.100Z
	평균 1.60	평균 2.55	평균 2.07	평균 2.69	평균 2.95	평균 2.05
현장베인시험	-	3.57	2.27	2.36	-	-
일축압축시험	-	1.40	1.39	2.71	2.98	2.72
비압밀 비배수 전단시험	-	-	2.30	3.74	4.38	2.48
표준관입시험	5.05	3.57	6.02	-	3.22	1.00

표 5. 개량구간의 비배수 전단강도(c_u, t/m^2)

구 분 / 시험방법	점토1 (BH-9)	점토2 (BY-2)	점토3 (BY-12)	점토4 (BH-13)	점토5 (SH-2)
소성지수 이용	c_u=2.16+0.150Z	c_u=2.87+0.110Z	c_u=2.36+0.078Z	c_u=2.55+0.057Z	c_u=2.41+0.092Z
	평균 3.08	평균 3.56	평균 3.38	평균 3.51	평균 3.62
현장베인시험	4.73	4.12	2.39	2.11	-
일축압축시험	4.20	-	1.96	2.53	3.16
비압밀 비배수 전단시험	6.20	1.78	2.74	3.20	4.28
표준관입시험	5.56	3.30	2.50	-	0

표 6. 미개량구간 성토 이력

	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계
표고	6.1m	7.1m	8.0m	9.1m	10.6m
성토높이	6.1-4.8=1.3m	7.1-6.1=1.0m	8.0-7.1=0.9m	9.1-8.0=1.1m	10.6-9.1=1.5m
성토기간	30일	31일	31일	30일	26일

표 7. 개량구간 성토 이력

	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	5단계
최대성토높이	5.4-3.6=1.8m	6.6-5.17=1.43m	7.8-6.6=1.2m	8.7-7.7=1.0m	9.5-8.5=1.0m	10.3-9.5=0.8m
최소성토높이	5.17-3.66=1.51m	6.5-5.4=1.1m	7.7-6.5=1.2m	8.3-7.7=0.6m	0m	9.6-8.8=0.8m
평균성토높이	1.66m	1.27m	1.2m	0.8m	0.5m	0.8m
성토기간	56일	30일	31일	31일	30일	26일

표 8. 페이퍼 드레인 처리구간 내에서의 단계성토 검토

페이퍼 드레인	유효경 de(cm)	n	$F_{(n)}$	단계성토고(m)	t(일)	Th=0.015t	U(%)
1.0	113	17.1	2.13	1단계:1.66	56	0.84	95.7
				2단계:1.27	30	0.44	80.8
				3단계:1.20	31	0.46	82.2
				4단계:0.60	31	0.46	82.2
				5단계:0.50	30	0.44	80.8
				6단계:0.80	26	0.39	76.9

4. 사면의 안정해석

4.1 지반개량 미처리 구간의 사면안정해석

표 4에 주어진 연약점토의 비배수 전단강도를 이용하여 Bishop법에 의한 사면안정해석을 한 결과를 표 9와 같다.

표 9. 지반개량 미처리 구간에서의 사면해석 결과

구 분 / 시험방법	점토1 (BH-6)	점토2 (BH-8)	점토3 (BH-5)	점토4 (BH-4)	점토5 (BH-9)	점토6 (BH-6)	사면의 안전율(Fs)
소성지수 이용	c_u=1.44+0.114Z	c_u=2.36+0.116Z	c_u=0.88+0.100Z	c_u=1.18+0.102Z	c_u=1.11+0.126Z	c_u=0.74+0.100Z	0.712
	평균 1.60	평균 2.55	평균 2.07	평균 2.69	평균 2.95	평균 2.05	1.138
현장베인시험	-	3.57	2.27	2.36	-	-	1.254
일축압축시험	-	1.40	1.39	2.71	2.98	2.72	9월성토시:1.026 10월성토시:0.964
비압밀 비배수 전단시험	-	-	2.30	3.74	4.38	2.48	1.427
표준관입시험	5.05	3.57	6.02	-	3.22	1.00	1.538

4.2 지반개량 구간의 사면안정해석

표 5에 주어진 연약점토의 비배수 전단강도를 이용하여 Bishop법에 의한 사면안정해석을 한 결과를 표 10와 같다.

표 10. 지반개량 구간에서의 사면해석 결과

구 분 / 시험방법	점토1 (BH-9)	점토2 (BY-2)	점토3 (BY-12)	점토4 (BH-13)	점토5 (SH-2)	사면의 안전율(Fs)
소성지수 이용	c_u=2.16+0.150Z	c_u=2.87+0.110Z	c_u=2.36+0.078Z	c_u=2.55+0.057Z	c_u=2.41+0.092Z	1.009
	평균 3.08	평균 3.56	평균 3.38	평균 3.51	평균 3.62	1.287
현장베인시험	4.73	4.12	2.39	2.11	-	1.358
일축압축시험	4.20	-	1.96	2.53	3.16	1.245
비압밀 비배수 전단시험	6.20	1.78	2.74	3.20	4.28	1.505
표준관입시험	5.56	3.30	2.50	-	0	1.066

5. 사면활동 파괴면의 추정

5.1 대표단면의 결정 및 활동파괴면의 추정

주택조성부지에서의 성토사면활동으로 인해 00호선 국도를 포함한 지반파괴 및 변형은 광범위한 지역에서 발생하였다. 현황조사측량과 현장답사 결과를 종합적으로 검토한 결과 사면활동파괴는 지반개량 미처리 구간에서 발생하여 지반개량 구간으로 확산된 것으로 판단되며 성토사면의 붕괴된 형상은 원호활동이다. 따라서 사면활동 파괴면의 추정을 위해 지반개량 미처리 구간을 대표단면으로 설정하였다. 표 4에 수록된 6가지 방법에 의해 결정된 연약점토의 비배수 전단강도값을 적용하여 사면을 해석한 결과

일축압축시험에 의해 결정된 비배수 전단강도값이 실제 파괴상황과 근사하게 일치됨을 알았다. 따라서 지반조사결과와 경사계 계측결과를 토대로 활동파괴면을 추정한 형태와 수치해석 프로그램인 FLAC에서 일축압축시험에 의해 결정된 비배수 전단강도값을 적용한 해석결과를 그림 1과 그림 2에 나타내었다.

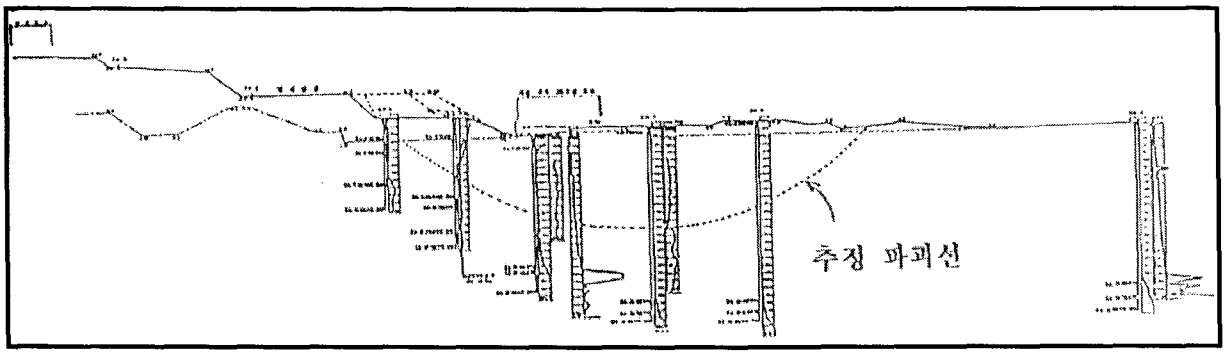

그림 1. 활동파괴면의 추정 형태

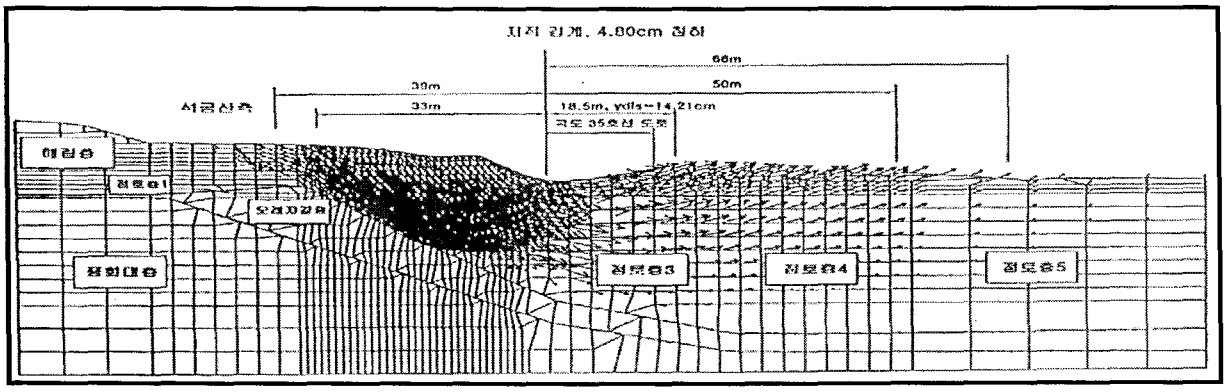

그림 2. 해석결과 변위벡터 분포도

6. 결 론

본 연구에서는 주택조성부지를 위해 지반개량을 시행해오던 단계성토과정에서 발생한 대규모 사면활동지역에 대해 대표단면을 선정하여 Bishop법에 의한 이론해석결과와 실제 발생된 사면활동파괴 형상을 비교한 결과에 의하면 해석을 위한 연약점토의 비배수 전단강도결정 방법 중 일축압축시험에 의한 방법이 본 사면파괴현상과 가장 일치하는 것으로 나타났다. 일축압축시험으로 결정된 점토의 비배수 전단강도값을 적용하여 해석한 결과 지반개량 미처리 구간에서는 안전율 0.964, 지반개량 구간에서는 안전율이 1.245에서 사면활동파괴가 발생하였다.

참 고 문 헌

1. Ashok, K.(1982), "Slope Stability Analysis for Earthquakes", *International Journal for Numerical and Analytial Method in Geomechanics*, Vol. 6, pp. 307-322.
2. Baker, R.(1977), "Determination of the Critical Slip Surface on Slope Stability Computation", *Geomechanics*, Vol. 4, pp. 333-359.
3. Huang, Y. H.(1983), "Stability Analysis of Earth Slope", Van Nostrand, p. 305.