

# 수치해석을 이용한 연약지반 성토 안정관리법 평가

## Evaluation of the Stability Management Methods for Embankments on Soft Clay Using Numerical Analysis

김 종 렬\*      박 화 정\*\*      황 성 원\*\*\*      강 희 복\*\*\*\*  
Kim, Jong-Ryeol    Park, Hwa-Joung    Hwang, Soung-Won    Kang, Hee-Bog

### Abstract

In Korea it tends to rely on foreign standards for the stability management of the embankment slope on the soft clay layer. The Matsuo-Kawamura's method, the Kurihara's method, the Tominaga-Hashimoto's method and the Shibata-Sekiguchi's method are generally employed at site. In this study these slope stability methods are investigated and the applicability of the stability management methods is evaluated through numerical analysis. It is evaluated that stability is overestimated to some degree by the Matsuo-Kawamura method. According to the result by the Tominaga-Hashimoto method there is some risk of sudden failure. This implies that the careful attention is necessary for the management of monitoring the field data. Even though the stability tends to be underestimated by the Kurihara's method, however, it is estimated that this method is applicable to the field when the probable uncertainty at site is considered. For the Shibata-Sekiguchi's method, there is some difficulties in determining the failure index for the practical application, it is considered as safe when the existing estimated failure index is greater than  $\Delta q/\Delta\delta$ . In this study, however, it is evaluated to be safe as well when  $\Delta q/\Delta\delta$  to load shows the tendency of constant increase.

### 요 지

현재 국내에서는 연약지반의 성토를 실시할 경우 성토사면의 안정을 관리하는데 있어 외국의 기준에 의존하는 경향이 있다. 현장에서 일반적으로 사용되고 있는 방법으로 곡선안정관리법, 변위속도안정관리법, 직선안정관리법, 성토하중관리법 등이 사용되고 있다. 본 연구는 수치해석을 통해 사면안정과 성토 안전관리법의 적용성을 검토하였다. 연구결과 곡선안정관리법은 다소 과대한 것으로 평가되었으며 직선안정관리법은 갑작스런 파괴의 위험이 있는 것으로 계층관리에 세심한 주의가 필요할 것으로 평가되었다. 그러나 변위속도안정관리법은 과소평가되는 경향이 있으나 이는 현장의 불확실성을 고려할 때 현장적용에 적합한 것으로 평가되었다. 성토하중관리법은 파괴기준 값이  $\Delta q/\Delta\delta$ 의 값보다 클 경우 안정하다고 평가하는 방법으로 실무에 적용할 경우에는 파괴기준 값의 산정에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 성토하중에 대한  $\Delta q/\Delta\delta$ 값이 지속적인 증가 경향을 보일 경우 안정한 것으로 평가되었다.

**Keywords :** soft clay layer, slope stability, numerical analysis, stability management

**핵심 용어 :** 연약지반, 사면안정, 수치해석, 성토안정관리

\* 전남대 토목공학과 교수, 공학박사

\*\* 전남대 토목공학과 공학석사

\*\*\* 전남대 토목공학과 박사과정

\*\*\*\* 한영대학 토목환경과 조교수, 공학박사

E-mail: kang4104@hanmail.net, 061-650-4104

• 본 논문에 대한 토의를 2005년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2006년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

최근 산업의 발달과 더불어 대규모 공사의 급증으로 인해 지지력이 부족한 연약점토 지반에 성토 및 복토를 실시하여 건설하는 현장이 늘고 있다. 연약지반 위에 성토시 지반의 거동은 압밀침하와 동시에 전단변형이 발생되므로 양자를 고려한 안정성 판단이 매우 중요하다. 외국의 경우 시험성토를 통한 자료축적과 현장계측 수행을 통해 활발한 연구가 지속적으로 이루어 왔으나 국내의 경우 아직 축적된 자료가 부족하고 특히 파괴시 현장관련 자료들은 현장여건으로 인해 축적된 자료가 많이 미흡한 실정으로 외국의 자료에 의존하고 있는 실정에 있다. 국내의 연구동향을 살펴보면 엄진현(2003) 등은 연약지반 성토시 안정관리기법에 관한 기초적 연구로서 연직침하량과 수평 변위량을 현장계측 자료를 중심으로 해석결과와 계측자료를 비교하여 파괴시점에서의 형상계수를 제안하고 더 나아가 기존의 안정관리기법의 적용성을 검토하였다. 정육진(2003)은 제체하부 연약지반의 거동에 관한 실험적 연구에서 실내모형실험을 통해 재하시간에 따른 안정성 검토와 단계 성토 및 계측을 통하여 역학적 거동을 규명하였다.

또한 최용규(2004) 등은 4가지 안정관리기법 중 신뢰성이 떨어지는 일부방법을 제외한 2가지 방법으로 단계별 성토된 제방의 침하안정관리 사례연구를 발표하였으며 안종필(2004) 등은 연약지반의 변위량 분포에 관한 연구와 연약지반과 오염지반의 안정관리 방법에 대해 연구한 바 있다. 지금까지의 연구는 많은 계측 자료에 의존하기보다 대표적인 현장사례를 중심으로 연구가 이루어져 신뢰성에 한계가 있는 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 우선 기본적인 이론 연구로서 대표적인 단면을 설정하고 성토폭과 성토고를 변화시키면서 안전율에 따른 연직침하량과 수평 변위량을 산정하여 기존의 안정관리기법의 적용성을 검토하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 일반적으로 설계에서 사용되고 있는 사면안정해석 Program을 이용하여 안전율의 변화와 이에 따른 지반정수를 산정하고 이로부터 얻어진 지반정수를 통해 유효요소 해석을 실시하였다. 이를 바탕으로 일반적으로 행해지고 있는 연약

지반 안정관리기준과 비교 분석함으로써 기존의 연약지반 성토사면 안정관리기준을 평가하고자 하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 지반조건

연약지반 성토사면의 안정성을 검토하기 위해 Fig. 1과 같은 표준단면을 가정하였다. 성토체의 지반정수는 일반적으로 사용되고 있는 토사를 기준으로 하였으며 Table 1과 같다. 또한 하부의 연약지반점토층의 지반정수는 전남 남해안 지역을 중심으로 대표적인 값을 사용하였으며 Table 2와 같다.

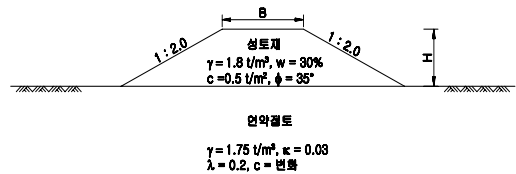


Fig. 1 성토사면 표준단면도

Table 1 성토체의 지반정수

성토체	$\gamma_r$ (t/m <sup>3</sup> )	w (%)	c (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
	1.8	30	0.5	35

Table 2 하부지반의 토질정수 및 매개변수

연약점토	$\gamma_r$ (t/m <sup>3</sup> )	w (%)	e	$\lambda$	$\alpha$	c (t/m <sup>2</sup> )
	1.75	45.38	1.485	0.2	0.03	변화

### 2.2 사면안정검토

본 연구에서는 사면 안정에 가장 많은 영향을 미치는 성토사면의 사면고, 성토폭을 변화 시켜 가면서 성토 사면의 안정성을 검토하였다. 먼저 사면고(H)는 10m, 15m, 20m로 각각 변화시키고 성토폭(B)은 20m, 30m, 40m로 변화시켰다. 또한 점토지반의 지반정수들 가운데 지지력 및 변형에 많은 영향을 미치

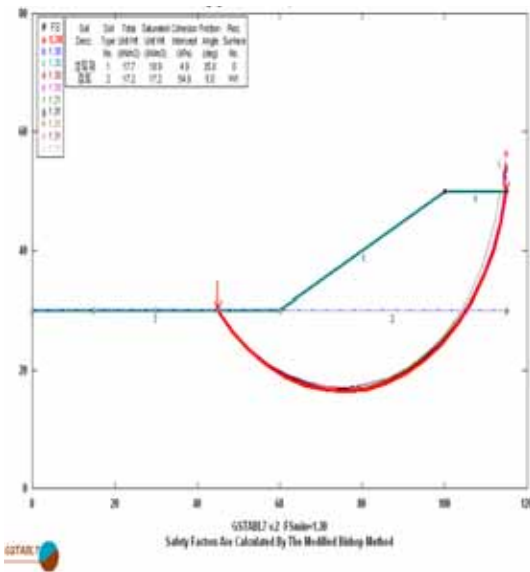


Fig. 2 사면안정해석결과(B=30m, H=20m, FS=1.3)

는 점착력(c)을 안전율과 성토고의 변화에 따라 각각 구하였으며 여기에서 얻어진 점착력을 사용하여 유한요소해석에 적용하였다.

사면안정해석에 사용한 프로그램은 Indiana주 Purdue University에서 개발한 GSTABL7을 사용하였다. Fig. 2는 검토 단면 중 폭 B=30m, H=20m에 대한 안전율이 1.3일 경우의 사면안정해석결과를 나타낸 것이다. 또한 Table 3은 성토폭과 성토고를 변화시키고 안전율을 0.8~1.5까지 변화시키면서 얻어진 점착력(c)의 변화를 나타낸 것이다. 적용한 안전율은 일반적으로 파괴가 발생할 것으로 예상되는 0.8과 약간의 불안정요소가 있는 1.0, 그리고 일반적으로 사면

Table 3 성토폭(B), 성토고(H), 안전율(FS)에 따른 점착력(c, t/m<sup>2</sup>)의 변화

안전율(FS) \ 성토고(H)	B = 20m			B = 30m			B = 40m		
	10m	15m	20m	10m	15m	20m	10m	15m	20m
0.8	1.2	1.8	2.2	1.2	1.8	2.4	1.2	1.8	2.4
1.0	1.8	2.6	3.4	1.8	2.8	3.6	1.8	2.8	3.6
1.2	2.4	3.6	4.7	2.5	3.8	4.9	2.5	3.8	5.0
1.3	2.7	4.1	5.3	2.8	4.3	5.6	2.8	4.3	5.7
1.5	3.4	5.1	6.6	3.5	5.3	6.9	3.5	5.3	7.0

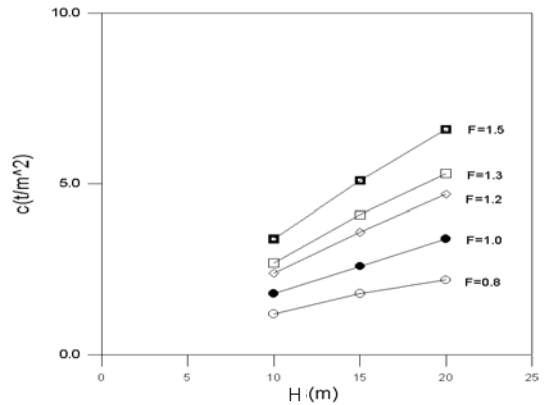


Fig. 3 성토고와 안전율에 따른 점착력의 변화(B=30m)

안정 검토 시 채택하고 있는 1.2, 1.3, 1.5에 대해 검토하였다. Table 3에서 알 수 있는 바와 같이 점착력의 변화는 성토폭에는 큰 영향이 없음을 알 수 있으며 Fig. 3은 폭이 30m이고 성토고에 따른 점착력의 변화를 도시한 것으로 안전율을 유지하기 위해서는 성토고가 증가함에 따라 점착력이 크게 됨을 알 수 있었다.

### 2.3 유한요소해석

사면안정해석에서 성토폭과 사면고의 변화와 안전율을 변화시키면서 얻어진 점착력을 이용하여 유한요소해석을 실시하였다. 유한요소해석에 사용된 프로그램은 네델란드 Technical University에서 개발한 Plaxis (Ver 7.17)를 사용하였다. 성토 속도는 1m/day로 가정하였으며 성토 지반은 탄성모델이며 연약점토지반은 탄소성모델인 Modified Cam-Clay Model을 적용하였다. 해석을 통하여 성토 중앙점의 변위( $\rho$ )와 성토사면 선단의 측방유동( $\delta$ )값을 구하였으며 기존의 안정관리 기법에 적용함으로써 안정관리법 평가에 대한 연구를 수행하였다. Fig. 4는 여러 해석 단면 중 성토폭(B)이 30m이고 사면고가 20m인 경우의 안전율이 1.3인 단면에 대한 성토 단계별 해석결과를 도시한 것이다. 또한 Fig. 5는 유한요소 해석결과와 사면안정해석 결과를 중첩하여 나타낸 것으로 연성기초 하부의 파괴양상은 지지력 부족에 의한 형상과 비교되는 사면파괴 형상과 유사함을 나타내었다.

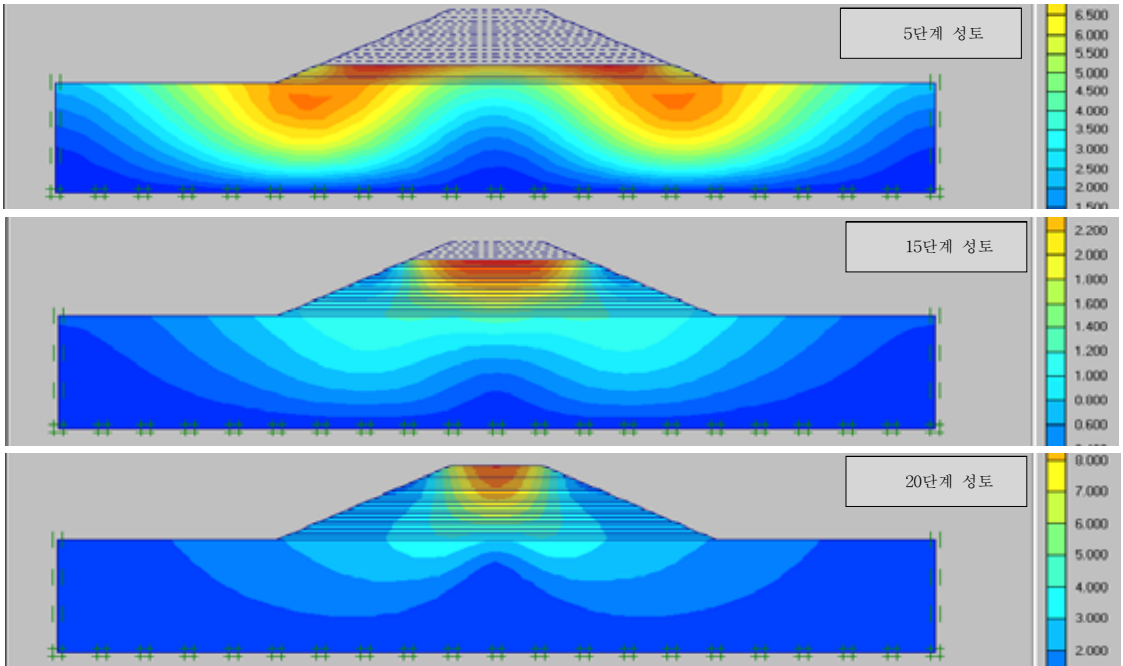


Fig. 4 단계 성토에 따른 지반의 변화(B=30m, H=20m, FS=1.3)

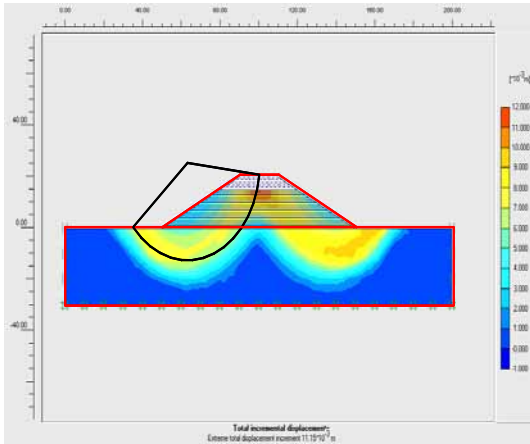


Fig. 5 성토폭(B=30m), 사면고(H=20m), 안전율(FS=0.8)

### 3. 안정관리기법 고찰

#### 3.1 곡선안정관리법(Matsuo-Kawamura법)

지금까지 유한요소해석에서 얻어진 연직침하량과 수

평변위량으로부터 기존에 제시된 안정관리기법에 적용하여 검토하였다. Matsuo-Kawamura는 파괴시 성토중양부의 최대침하량  $\rho$ 와  $\delta/\rho$ 의 관계로부터 성토체의 진행과정에 따라 파괴기준선의 근접여부를 판단하여 안정관리의 위험여부를 제시하였다. Fig. 6은 각각의 안전율에 따른  $\rho \sim \delta/\rho$ 를 도시한 것으로 그림에서 알 수 있는 바와 같이 사면안정에 대한 안전율이 0.8일 때 파괴선(Failure line),  $q/q_f = 1.0$  위에 위치하고 있다. 또한 안전율이 1.0일 때는  $q/q_f = 0.8$  선의 아래에 위치하고 있으며 FS = 1.2, 1.3, 1.5인 경우는 모두 파괴선 아래에 위치하고 있다. 그러나 시공 시 사면의 안전율이 1.0인 경우는 여러 불확실성 때문에 불안정으로 평가하지만 유한요소 해석결과에서는 모두 가능한 것으로 평가 되었다. 이는 유한요소 해석 시 현장에 존재하는 지반상태의 변화나 힘의 불균형 등이 고려되지 못한 때문으로 판단된다. 따라서 유한요소해석 결과로 평가할 때 곡선안정관리기법은 안전측을 고려한 것으로 판단된다.

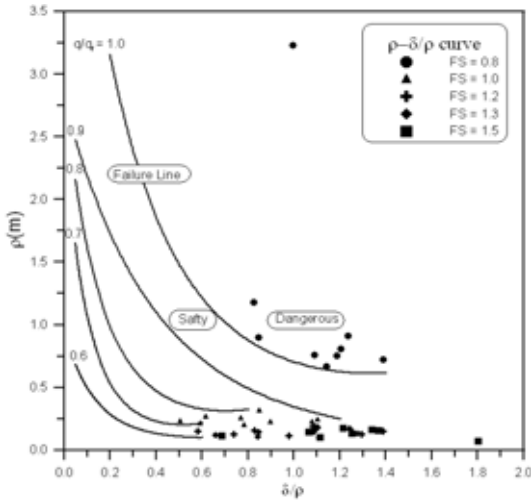


Fig. 6  $\rho \sim \delta/\rho$  관계

### 3.2 변위 속도 안정 관리법(Kurihara법)

Kurihara가 제안한 변위속도 안정관리법은 성토시 측방변위속도  $\Delta\delta/\Delta t$  가 어느 일정값에 도달 시 불안정하며 이를 초과하지 않도록 시공 관리하는 기법이다. 일본의 Kurihara는 성토 천단면에 crack이 발생한 시점에서의 측방변위속도  $\Delta\delta/\Delta t$  값이 20mm/day 임을 발견하였으며 이 값을 초과하지 않도록 성토속도를 제어함으로써 안전한 성토의 축조가 가능하다고 보았다. Fig. 7과 Fig. 8은 대표적인 단면에서의 시간에 따른  $\Delta\delta/\Delta t$  의 관계를 도시한 것으로 폭이 20m인 경우 안전율이 0.8일 때  $\Delta\delta/\Delta t$  값이 점점 증가하다 7일이 경과하여 급격하게 증가하였으며 폭이 40m인 경우도 14일 이후 증가하여 파괴의 징후를 보이고 있다. 이는 유한요소해석결과 다소 안전측을 고려한 것으로 평가되나 연약지반에서 파괴가 발생시 기존의 강도를 회복하는 틱소트로피 현상으로 강도를 회복하기 까지 수개월이 걸리게 되는바 공사기간 및 시공의 경제성을 고려할 때 적절한 평가로 판단된다.

### 3.3 직선안정관리법(Tominaga-Hashimoto법)

Tominaga-Hashimoto의 직선안정관리법은 현장 측정자료로부터  $\rho$  와  $\delta$  를 도시하여 안정 관리하는 방

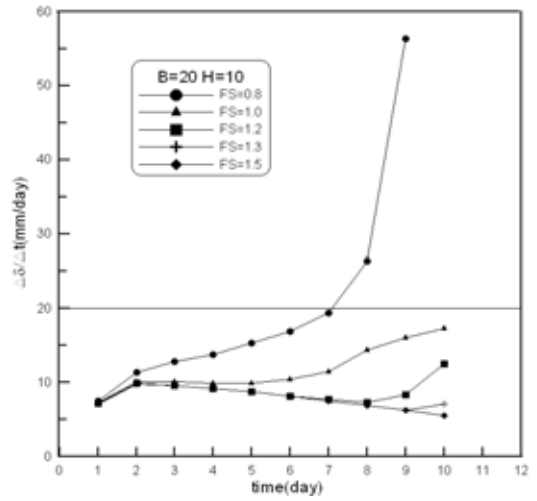


Fig. 7  $\Delta\delta/\Delta t$  관계(B=20m, H=10m)

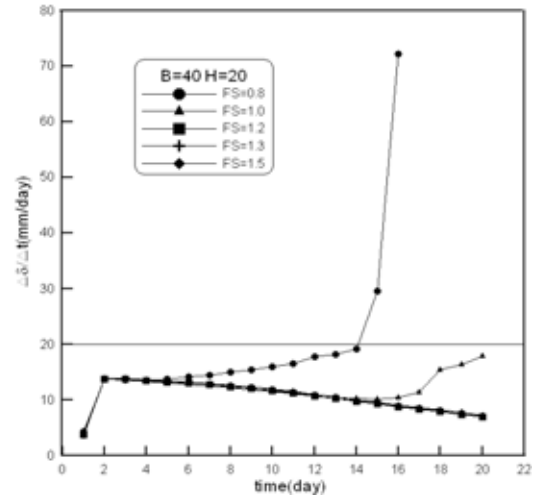


Fig. 8  $\Delta\delta/\Delta t$  관계(B=40m, H=20m)

법으로 성토중앙부의 침하량  $\rho$  와 측방변위  $\delta$  값의 증가가 뚜렷하면 전단파괴가 발생되는 것으로 관리한다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 안전율이 0.8일 경우 침하량에 비해 측방변위량(120mm 이상)의 증가가 현저하게 나타나고 있다. 또한 Fig. 10은 폭이 40m인 경우  $\rho$  와  $\delta$  를 도시한 것으로 침하량 150mm이후부터 측방변위량(230mm이상)의 증가가 뚜렷하게 나타나고 있어 지반의 소성화에 의한 불안정이 증가됨을 알 수 있다. 이는 사면안정해석결과에서 최소안전율이

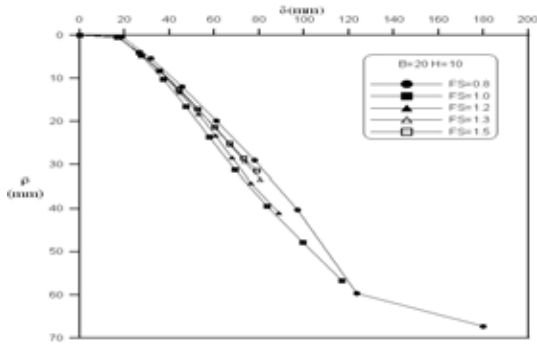


Fig. 9  $\rho-\delta$  관계(B=20m, H=10m)

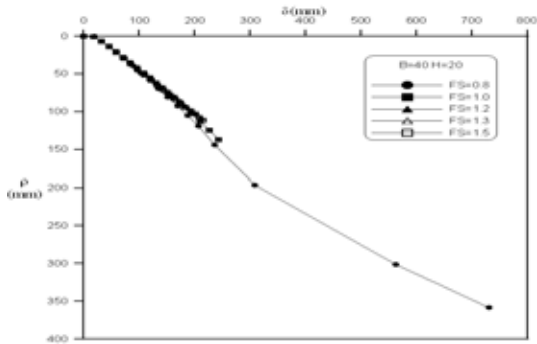


Fig. 10  $\rho-\delta$  관계(B=40m, H=20m)

0.8일 경우 불안정한 값으로 사면안정해석결과와 유한요소 해석결과가 일치한 것으로 평가된다. 본 연구의 해석에서는 1m/day의 성토속도로 시공한 것으로 가정하고 1일 간격으로 그 값을 분석하였기 때문에 유한요소해석에서는 파괴이전단계에서 어떤 징후 없이 갑작스런 파괴가 발생되고 있다. 이러한 결과로 미루어 보아 직선안정관리법으로 관리 시 지속적인 계측을 통한 안정관리가 필요하다.

### 3.4 성토하중관리법(Shibata-Sekiguchi법)

Shibata-Sekiguchi는 성토의 파괴하중을  $q_f$ (또는 성토한계고  $h_f$ )라 하면 안전율  $q_f/q$ (또는  $h_f/h$ )가 1.4보다 작을 때에 성토하중증분( $\Delta q$ )과 측방변위 증분( $\Delta \delta$ )의 비  $\Delta q/\Delta \delta$ 가 비배수 조건하에서 하중  $q$ 에 대해서 거의 직선적으로 감소하는데 착안하여  $\Delta q/\Delta \delta$ 에 어떤 기준치를 설정함으로써 성토하중 또는 성토고

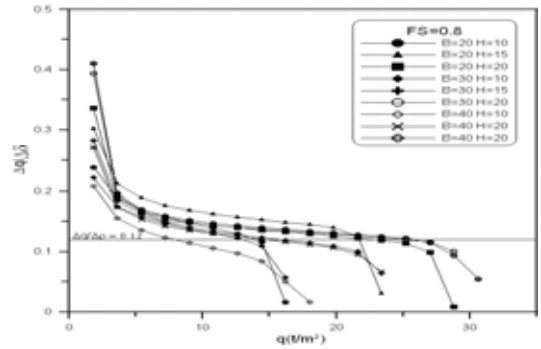


Fig. 11  $\Delta q/\Delta \delta$ 와  $q$ 의 관계(FS=0.8)

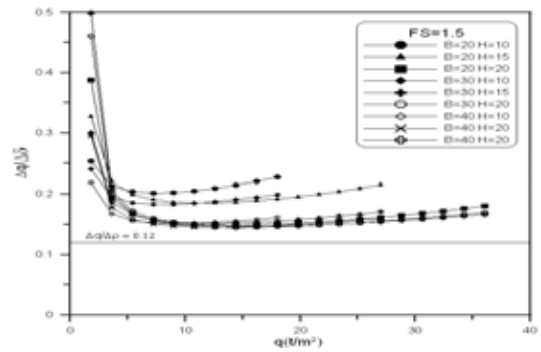


Fig. 12  $\Delta q/\Delta \delta$ 와  $q$ 의 관계(FS=1.5)

를 관리하였다. 본 연구에서는 최소안전율(FS)이 0.8인 경우 최초 파괴가 발생한  $\Delta q/\Delta \delta = 0.12$ 를 기준으로 하여 분석을 실시하였다. Fig. 11은 안전율이 0.8인 경우로  $\Delta q/\Delta \delta = 0.12$ 의 기준으로 살펴볼 때  $\Delta q/\Delta \delta$  기준 이하로 증가하고 있는 점으로 미루어 보아 파괴가 발생됨을 알 수 있다. Fig. 12는 안전율이 1.5인 경우의 결과로서 최초 파괴 기준  $\Delta q/\Delta \delta = 0.12$ 선의 위쪽에 분포하여 증가하고 있다. 이러한 경향은 안전율이 1.0, 1.2, 1.3인 경우에도 나타나고 있어 성토하중 관리도법의 적용에 있어 안정 평가에 적용할 수 있을 것으로 평가된다.

### 4. 결 론

본 연구는 연약지반 성토사면의 안정해석과 유한요소 해석으로부터 연약지반의 성토 시 안정관리법 평가에 대해 고찰하였으며 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 성토사면안정해석 결과와 유한요소 해석결과를 비교해보면 연성기초 하부의 파괴양상은 지지력 부족에 의한 전반전단 파괴의 형상보다는 사면파괴 형상과 유사함을 알 수 있었다.
- 2) 곡선안정관리법의 경우 최소안전율이 1.0이상 일 때  $q/q_f = 0.8$  선의 아래에 위치하고 있어 안정한 것으로 평가된다. 곡선안정관리법에서  $q/q_f = 0.9$ 인 경우 현장시공 중단으로 평가하나 해석에서는 이러한 경우가 존재하지 않았다. 이는 실제 시공의 경우 안전율이 1.0인 경우 불안정으로 평가하지만 유한요소 해석결과에서는 모두 가능한 것으로 평가 되고 있기 때문에 곡선안정관리법은 안전율을 고려한 것으로 판단된다.
- 3) 변위속도안정관리법은 측방변위속도가 20mm/day를 초과할 때 안정관리 시 불안정하게 판정 하며 해석결과 안전율이 0.8일 때 파괴가 도달하기 이전에 파괴의 징후를 보이고 있어 유한요소해석결과 다소 안전율을 고려한 평가법으로 판단된다.
- 4) 직선안정관리법의 경우 안전율 0.8에서 연직침하보다 측방변위의 증가가 뚜렷하면 곡선이 꺾이는 부분이 발생한다. 그러나 유한요소해석에서는 어떤 징후를 보이지 못하고 갑작스런 파괴가 발생하고 있는 점으로 미루어 보아 시공 시 지속적인 계측이 이루어져야 할 것으로 사료된다.
- 5) 성토하중관리도법은  $\Delta q/\Delta\delta$  값의 어떤 기준치를 설정하여 안정관리 하는 것으로 본 연구에서는  $\Delta q/\Delta\delta = 0.12$ 를 기준으로 하였다. 안전율 0.8에서 파괴가 발생하였으며 안전율이 1.0이상인 경우는 기준치의 위에 위치하며  $\Delta q/\Delta\delta$ 가 계속적으로 증가하는 경향을 보였다. 따라서 기존의 기준치

를 사용하여 안정을 평가하는 방법 이외에 성토하중관리도법은  $\Delta q/\Delta\delta$ 가 기준치위에서 계속적으로 증가하는 경향을 보일 경우 안정한 것으로 평가할 수 있다.

- 6) 본 연구결과는 연약지반 안정관리법에 대한 평가에 그 목적이 있었던바 향후 압밀침하량과 병행한 연구 결과가 필요할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. 엄진현, 임종철, 박이근, “연약지반 성토시 안정관리기법에 관한 기초적 연구”, 대한토목학회 학술발표대회 논문집, 2003, pp.3531~3536.
2. 정옥진, “체재하부 연약지반의 안정성에 관한 실험적 연구”, 공학석사학위논문, 부산대학교, 2003.
3. 최용규, 이민희, 황근배, “연약 지반상에 단계 별 성토된 제방의 침하안정관리 사례연구”, 대한토목학회 학술발표대회 논문집, 2004, pp.1734~1740.
4. 안종필, 박병길, 나상훈, “연약지반의 변위량 분포에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표대회 논문집, 2004, pp. 5306~5314.
5. 稻田倍徳, “軟弱地盤の側方流動”, 鹿島出版會, 1994, pp. 1~52.
6. 松尾, 川村, “軟弱地盤上盛土施工に關する施工 管理圖,” 土と基礎, Vol. 27, No. 7, 1978.
7. 副永, 橋本, “側方變位の現地計測 による盛土 の施工管理”, Vol. 22, No.11, 1982, pp.42~51.
8. Asaoka, A., “Observational Procedure of Settlement Prediction”, Soil and Foundation, Vol. 18, No.4, 1978, pp.88~101.

(접수일자 : 2004년 9월 6일)