

지진시 사면안정해석에 있어서의 진도법과 지진응답해석의 결과 비교 Compare Seismic Coefficient Method and Seismic Response Analysis for Slope during Earthquake

박성진1), Sung-Jin Park, 오병현2), Byung-Hyun Oh, 박춘식3), Chun-Sik Park, 황성춘4), Seong-Chun Hwang,

- 1) (재)한국건설시험연구소 과장, Manager, Korea Research Institute for Construction Testing
- 2) 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Eng. team, WRI
- 3) 창원대학교 토목공학과 교수, professor, Dept. of Civil Eng. Chang-Won Univ.
- 4) 경주대학교 토목공학과 전임강사, Full Time Lecturer, Dept. of Civil Eng. Kyong-Ju Univ.

SYNOPSIS : Numerical analysis of slope stability is presented using slice method, static seismic analysis methods, and earthquake response analysis methods. Static seismic force is considered as 0.2g while vertical static seismic force is not considered in analysis. For earthquake response analysis, Hachinohe-wave is applied.

Safety factor calculated using slice method for failure surface. Calculating methods are Bishop's method and Janbu's method. Static seismic analysis was applied using Mohr-Coulomb model and earthquake response analysis was applied using non-linear elastic model.

Key words : safety factor, earthquake, static seismic force, slope stability

1. 서론

일반적으로 지진 발생시 지반공학의 입장에서 공학적으로 문제가 되는 것으로서, 사면의 활동을 들 수가 있다. 우리 나라에서도 근래에 들어 지진에 대한 즉, 내진 해석의 관심이 증대하고 있는 것은 사실이나, 그 중요성에도 불구하고 지진시의 지반의 안정성을 다각적인 입장에서 검토한 예는 거의 없다고 할 수 있음을 부인할 수 없다. 따라서, 본 논문은 경북 경주시 양북면에서 발생한 산사태의 경우를 그 예로 인용하여 정적을 포함한 동적 해석을 수행하였다. 본 논문에서 주로 언급하고자 하는 것은 진도법의 적용한계를 분명히 하고, 만약 그 간편성 때문에 진도법을 사용한 경우에는 어떠한 점을 유의해야만 하는가에 대해 서술한 것이다.

2. 해석방법 및 해석조건

2.1 해석방법

본 논문에서는 경북 경주시 양북면에서 발생한 산사태에 대하여 분할법, 정적 F.E.M. 및 동적 F.E.M.에 의한 해석을 실시하여 지진시의 사면활동 안전율을 산정하였다. 각 해석에서 사용한 해석코드는 다음과 같다.

분할법 (Janbu법, Bishop법) - COSTANAK

정적 F.E.M. (Mohr-Coulomb모델의 탄소성해석) - AFIMEX(SANC)

동적 F.E.M. (비선형해석) - AFIMEX(SAMBA)

이 방법들에 대하여 실시하는 해석은 그림-1에서와 같은 흐름에 의해 진행된다. 2차원유한요소모델에 의해 평상시의 초기 응력을 구하고, 여기에 지진을 고려한 동적해석을 행하여 응력분포와 응답과형을 구하고, 가속도성분 등을 출력하였다. 또한, 동적해석에 의해 구한 활동토괴에 대한 등가진도를 구하고, 이 결과를 이용하여 사면의 안정성을 평가하였다.

2.2 해석조건

해석대상으로 하는 사면의 형상 및 토질구분은 그림-1과 같고, 각 지층의 물성값은 표-1과 표-2에서와 같다.

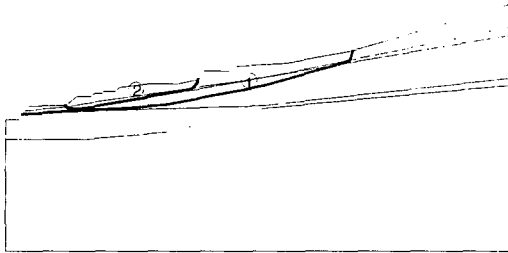


그림-1 지층의 구분과 계산활동면

표-1 정적FEM에 적용한 물성값

재료번호	γ_t (t/m^3)	E (t/m^2)	ν	C (t/m^2)	ϕ ($^\circ$)
1	2.50	100,000	0.2	100.00	40
2	2.00	50,000	0.2	50.00	35
3	1.90	5,000	0.3	2.60	37
4	1.70	3,000	0.3	0.00	30
5	1.70	700	0.35	3.00	20
6	1.70	3,000	0.3	0.00	30

표-2 동적FEM에 적용한 물성값

재료번호	γ_t (t/m^3)	G_0 (t/m^2)	ν	h (%)
1	2.50	41,667	0.2	2
2	2.00	20,833	0.2	3
3	1.90	1,923	0.3	3
4	1.70	1,154	0.3	3
5	1.70	259	0.35	4
6	1.70	1,154	0.3	3

3. 분할법에 의한 안전율 계산

3.1 검토방법

동적 F.E.M.에 의한 해석을 하기에 앞서 분할법에 대한 활동안전율을 계산하였다. 대상 활동면은 그림-1에 나타난 Line-1과 Line-2에 대하여 검토하였다. Line-1은 실제 붕괴가 발생한 면이고, Line-2는 Bishop법과 Tschebotarioff법에 의해 구해진 활동면이다. 이 두 활동면에 대하여 0.12g의 수평진도를 적용하여 활동안전율을 계산하였다.

$$F_s = \frac{R \sum \{ (C' \cos \alpha + W \tan \phi') / m_a \}}{\sum (W \cdot \chi + KhW \cdot y + P \cdot a)} \tag{1}$$

여기서, $m_a: \cos \alpha + \frac{\tan \phi' + \sin \alpha}{F_s}$, C' : 흙의 점착력(tf/m'), ϕ' : 흙의 내부마찰각(도), l : 분할절편

의 주변장(m), W' : 분할 절편의 유효중량(tf/m)(수중부분의 흙에 있어서는 수중단위체적중량을 고려), W : 분할편의 전중량(흙과 물의 전중량)(tf/m), K_h : 설계진도, R : 원의 반경(m), α : 분할절편 저면부의 경사각(도), x : 분할절편의 중심과 활동원 중심간의 수평거리(m), y : 분할절편의 중심과 활동원 중심간의 연직거리(m), P : 활동원내의 토괴에 작용하는 수압(tf/m), a : P 가 작용하는 점과 활동원호의 중심을 통하는 수평선의 연직거리(m)이다.

3.2 검토결과

활동안전율의 계산결과는 그림-2와 그림-3에서와 같은 활동면에 대하여 검토하였다. Bishop법에 의한 원호활동면으로 가정하고 검토한 것은 그림-2와 같은데 평상시에는 최소안전율이 3.65이지만, 지진시에는 2.05로 나타났다. Janbu법에 의한 비원호활동면으로 가정하고 검토한 결과, 평상시에는 안전율이 3.0이었지만, 지진시에는 1.66로 나타났다.

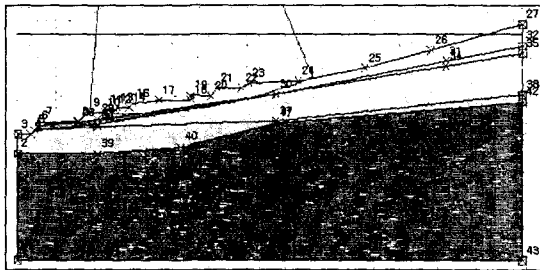


그림-2 원호 활동면

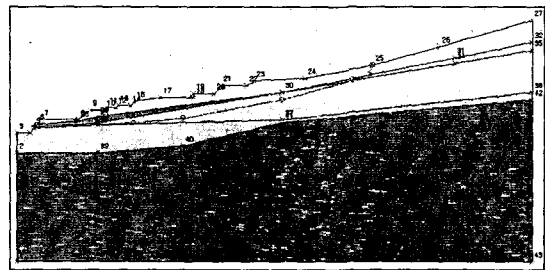


그림-3 비원호활동면

4. 정적FEM에 의한 활동면에 대한 안전율 계산

4.1 검토방법

판성력을 고려하여 정적FEM해석으로 구한 지진시의 응력으로 활동안전율을 계산하였다. 또한 본 논문에서는 지진력은 수평진도 0.12g를 고려하였으며, 연직진도는 고려하지 않았다. 초기응력해석 및 지진시의 응력상태를 해석하기 위해 Mohr-Coulomb의 파괴규준에 따른 탄소성모델을 사용하였다. 경계조건은 초기응력 해석시에는 저면을 완전고정으로 하고 측면을 연직로울러로 하였으며, 지진시에는 저면을 완전고정으로 하고 측면을 수평로울러로 지정하였다.

4.2 검토결과

평상시의 활동 예상면은 사면의 표면에서 얇은 깊이로 발생하며, 안전율은 부분적으로 1.0~2.0사이의 값을 나타내었다. 하지만, 해석결과 전체적으로는 2.0이상의 안전율을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 지진시의 안전율은 국소적으로 1.0이하로 되는 영역도 있으며, 또한, 활동 예상면에 대한 안전율이 2.0보다 낮은 영역이 많이 발생하고 있음을 알 수 있었다.

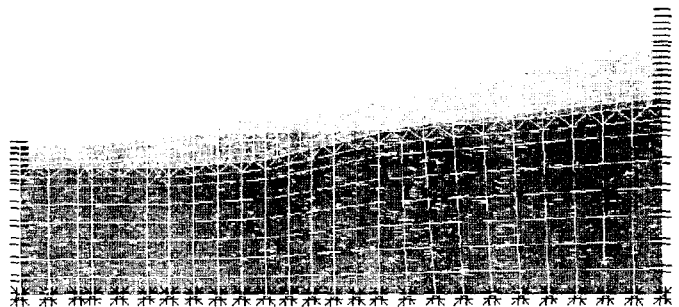


그림-4 정적FEM 모델도

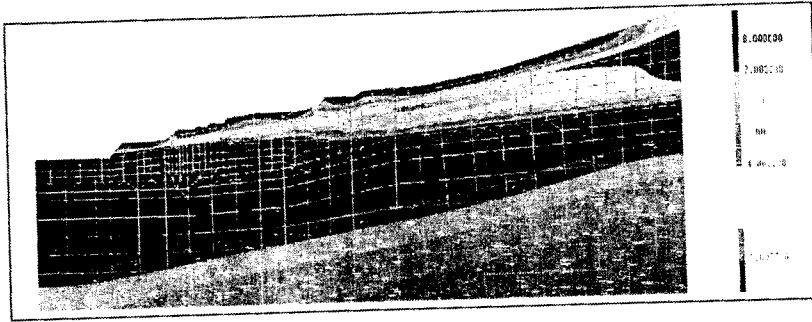


그림 5 정적FEM해석의 점안전율도(정상시)

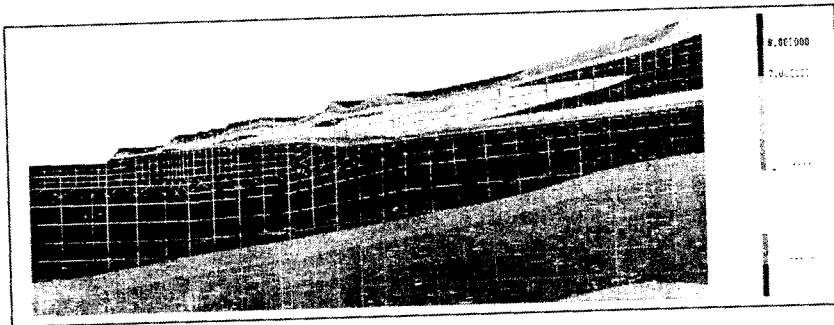


그림 6 정적FEM해석의 점안전율도(지진시)

5. 동적FEM에 의한 활동면에 대한 안전율 계산

5.1 검토방법

가속도 파형을 입력한 지진응답해석을 행하여 활동안전율을 평가하였다. 해석은 비선형해석으로 실시하였다. 또한 본 논문에서는 해석에 사용한 지진동의 원파형은 그림-7과 같으나 실제 해석에 적용한 최대 가속도는 117.6 (Gal)로 조정하여 사용하였다. 지반은 탄·완전소성체로 보았고 각 재료의 강성은 초기강성을 사용하였다. 경계조건은 측방을 전달경계(점성경계)로 하고, 저면은 완전고정으로 하였다.

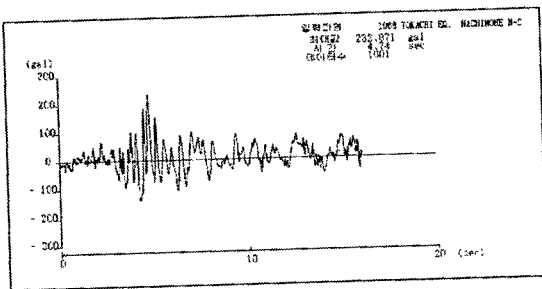


그림 7 지진동의 원파형

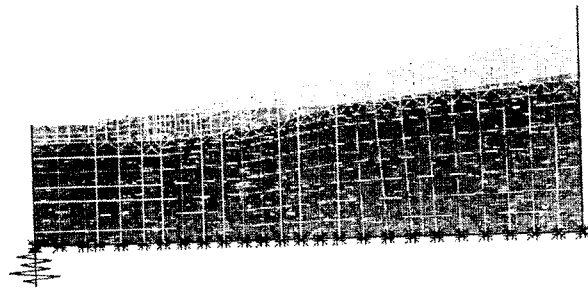


그림 8 동적FEM의 모델도

지반과 구조물의 연성진동방정식은 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$[M] \ddot{u} + [K] u = -m \ddot{y} (t) + F - T + B_b \quad (2)$$

여기서, $\{u\}$: 절점의 상대변위, \ddot{y} : 지반에서의 입력가속도, $\{m\}$: 각 좌표 성분방향에 대응하는 하중 매수, $[M]$: 질량매트릭스, $[K]$: 강성매트릭스, $\{F\}$: 자연지반에서의 구속, $\{T\}$: 반무한효과를 표시하는 경계력, $\{B_b\}$: 저면 점성경계력을 나타내고 있다.

단, $\{F\}, \{T\}, \{B_b\}$ 는 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\{F\} = [G]\{u\}_f \quad (3)$$

$$\{T\} = ([R] + [L])(\{u\} - \{u\}_f) \quad (4)$$

$$B_b = -C_b \begin{pmatrix} \dot{u} \\ u_b \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서, $[G]$: 복소강성매트릭스, $[R]$: 주파수에 의존하는 전달 경계 매트릭스(우변), $[L]$: 주파수에 의존하는 전달 경계 매트릭스(좌변), $[C_b]$: 저면 점성 경계 매트릭스이다.

5.2 검토결과

그림-9에서 가속도의 수평방향성분 최대값을 보여주고 있다. 맨 윗 층과 세 번째 층이 만나는 부분에서 응답이 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 그림-10의 전단변형율의 최대값의 분포에서 보듯이 전체적으로 0.01 ~ 0.07정도의 범위에 존재하며, 상부 표층 부근에서 응답값이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림-11에서 보듯이 입력과가 최대값에 도달할 때 응답값이 최대가 되는 것이 아니고, 최대값 이후의 응답값이 최대가 됨을 알 수 있다. 동적해석에 의해 계산된 안전율은 다음 표와 같다.

표-3 계산 안전율

구분	1번활동면	2번활동면
분할법(정상시)	3.00 (Janbu법)	2.45 (Bishop법)
분할법(지진시)	1.66 (Janbu법)	1.05 (Bishop법)
정적FEM해석(정상시)	3.03	2.58
등가정적FEM해석(지진시)	1.80	1.49
동적해석	0.52	0.28

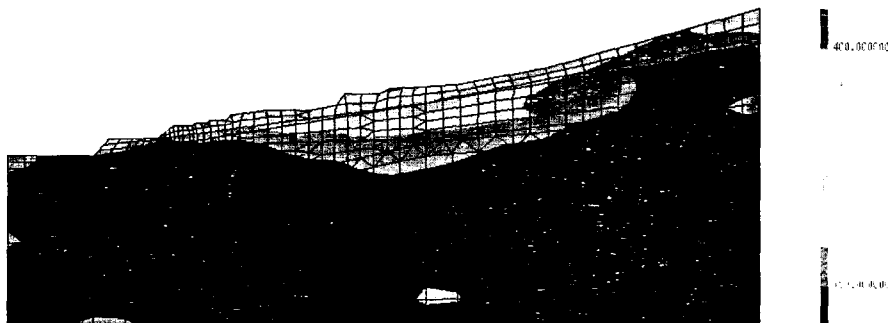


그림 9 가속도의 수평방향성분 최대값

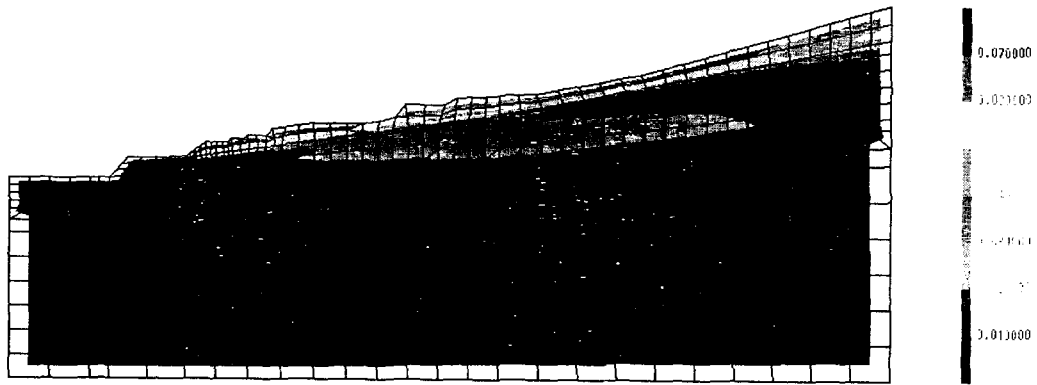


그림 10 전단변형을 최대값

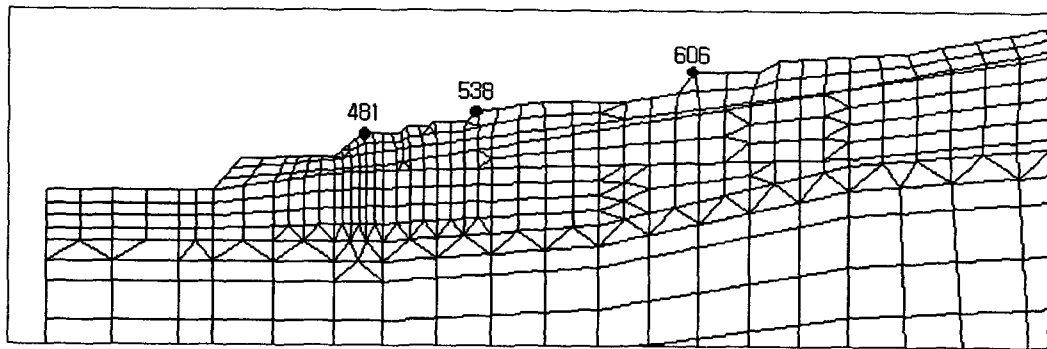


그림 11 응답가속도, 응답변위도의 추출위치

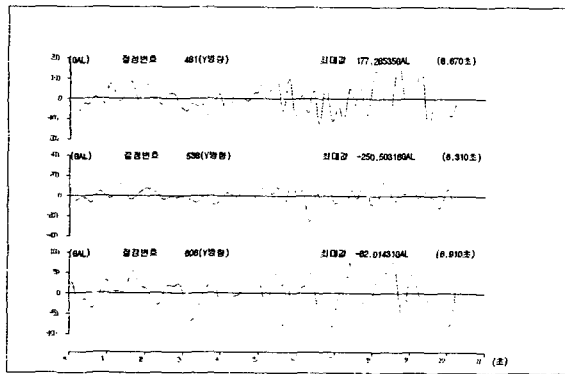


그림 12 수평가속도응답

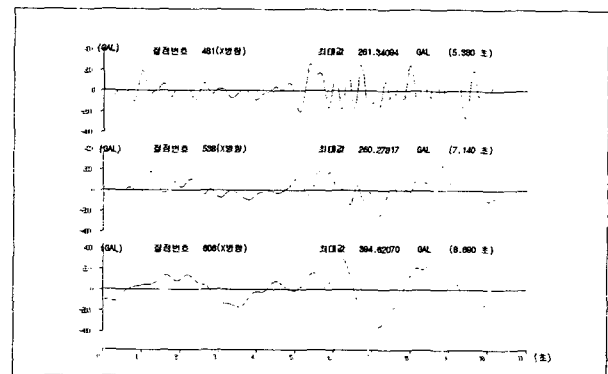


그림 13 수직가속도응답

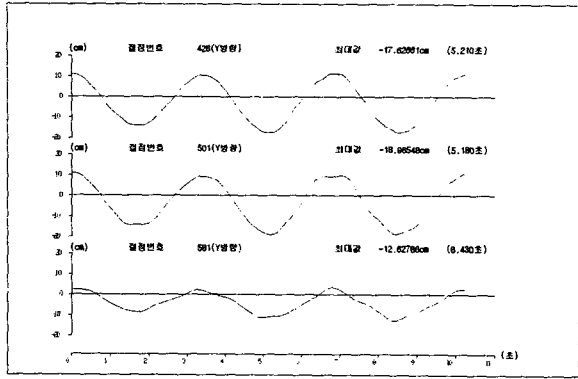


그림 14 수직변위응답

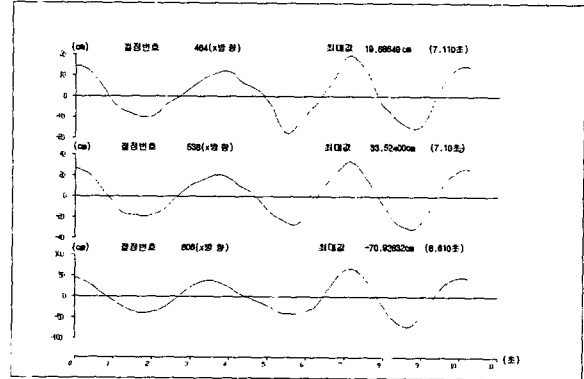


그림 15 수평변위응답

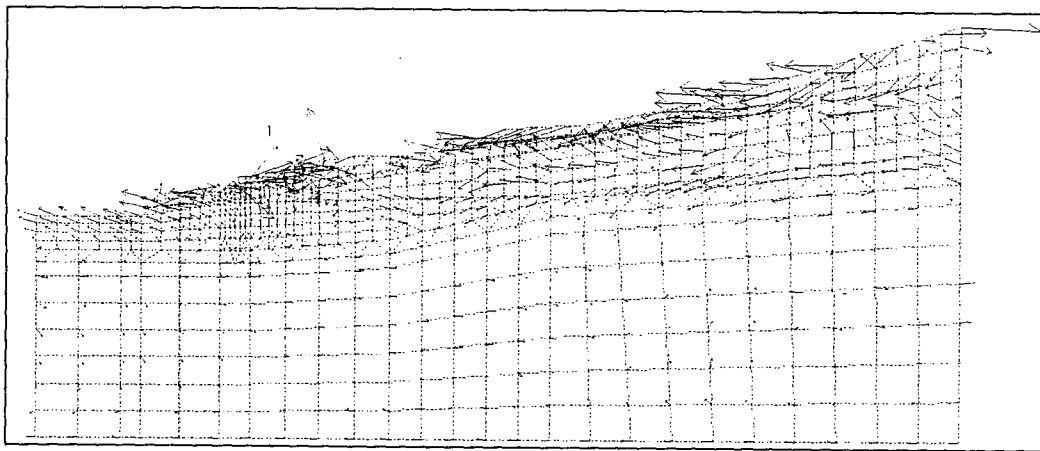


그림 16 추후의 가속도 벡터도

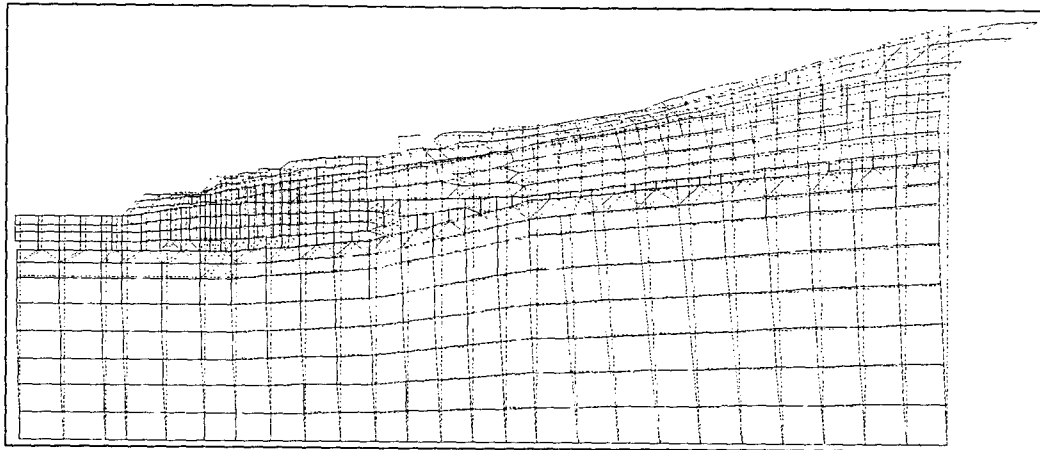


그림 17 추후의 변형도

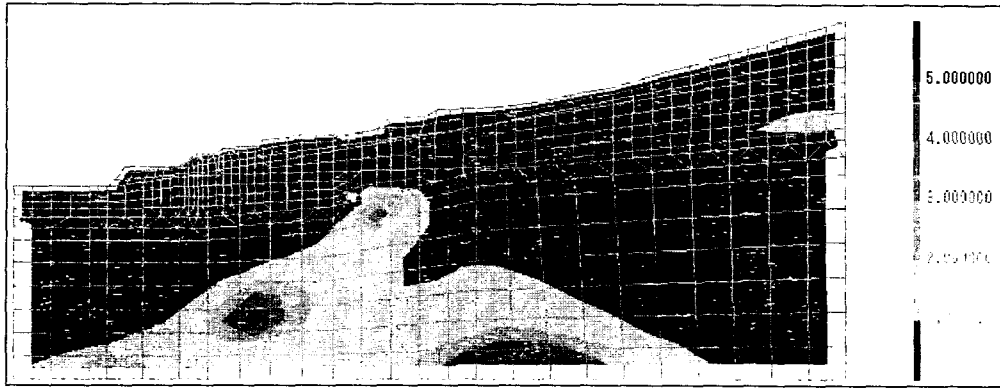


그림 18 동적FEM해석의 점안전율도

6. 결론

본 논문에서는 지진시의 사면의 안정성을 평가하기 위하여, 지진력을 고려한 사면활동에 대한 안전율을 계산하였다. 먼저 분할법을 이용하여 최소안전율을 가지는 면과 실제 붕괴가 발생한 면에 대한 안전율을 산정하였으며, 정적FEM해석과 지진응답해석을 실시하여 분할법에서 계산한 활동면에 대한 안전율과 비교하였다. 그 결과 다음 같은 결론을 얻었다.

1. 분할법에 의해 진도를 적용하여 계산한 결과, ①번 활동면에 대한 안전율은 1.66, ②번 활동면에 대한 안전율은 1.05이었다. 관성력을 적용한 정적 FEM에 의해 산출된 안전율은 ①번 활동면에 대한 안전율은 1.80, ②번 활동면에 대한 안전율은 1.49로 관성력을 적용하여 해석한 정적FEM의 해석값이 더 크게 산출되었다. 지진응답해석으로 산출한 활동에 대한 안전율을 ①번 활동면이 0.52이고, ②번 활동면은 0.28이었다.
2. Hachinohe 파를 입력하여 지진응답해석을 하는 경우, 활동에 대한 안정성은 아주 낮게 나타났으며, 입력파의 최대값에서 가장 위험한 것이 아니라 최대값 이후에 가장 위험함을 알 수 있었다. 즉, 입력파형에서는 3.7초 후가 가장 큰 힘으로 작용하지만, 응답값은 7.3초에서 최대값을 보여 주고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 日本土木學會(1989), 動的解析と 耐震設計(地震動・動的物性) Vol. 1
2. 石原研而(1976), 土質 動力學의 基礎
3. Drnevich, V. P. and Massarsch, K. R.(1979), Sample disturbance and stress-strain behaviour, Proc ASCE, Vol. 105, No. GT9, pp. 1001 - 1016
4. Hardin, B. O. and Black, W. L.(1968), Vibration modulus of normally consolidated clay, Proc. ASCE. Vol. 94, No. SM2, pp 353 - 369
5. Kokusho, T.(1987), In-situ dynamic soil properties and their evaluations, Proc. 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineerings, Vol. 2