
불안정사면의 재해방지 예측 사례연구

A Case Study on the Prediction for Disaster Prevention of Unstable Slope

정철호, 심정경, 배철호, 최진국, 권형석
대한주택공사

〈 요 지 〉

부산 택지개발사업지구의 불안정사면에 대한 안정성 여부를 검토하고 현장계측결과를 일강우량과 연관시켜 사면의 변형거동특성을 분석하여, 이를 수치해석에 의해 검증함으로써 재해방지 예측기법을 확립하였다.

〈 Abstract 〉

This paper reviewed safety on unstable slope of site development area in Pusan, and analyzed deformation behavior characteristics of the slope according to the correlation with the results of field measurement and daily rainfalls.

The method of the prediction for disaster prevention was established as being verified by means of numerical analysis as results.

1. 서론

부산 택지개발사업지구의 토목공사에 있어 단지내 계획 평균경사도를 1:1.5~1:2.0으로 계획 하였으나, 동지구가 지형상 급경사지이며 태풍에 의한 집중호우의 영향을 많이 받는 곳으로서 부산지방 특유의 붕적토층에서 발생하는 사면붕괴사고를 고려하여, '89.12월 단지내 설계사면을 포함하여 단지의 남측 상층부 자연사면을 A-A, B-B, C-C, D-D, E-E단면으로 분할하여 안정여부를 검토하고 불안정사면에 대해서는 사면안정 H형강 억지용 줄말뚝으로 보강하여 안정대책을 강구하였다.

'91. 8.22~23일 양일간에 걸쳐 태풍 글래디스호가 동반한 집중호우로 C-C단면 우측의 201 및 202동 후측단지 경계 사면에 설치된 사면안정 H형강 억지용 줄말뚝의 20m 구간이 1.2m정도 전방변위를 일으켰으며, 사면보호공(K-블럭, U형측구, 옹벽등)으로 시공중이었던 구조물의 손상이 발생되었다.

이에 대해 원상태로 수해복구공사를 완료한 후, 사면의 변형거동을 사전에 파악하여 재해예방을 위한 예보체제로 활용하기 위해 '92. 9.23일 지표변위말뚝을 6개소에 설치하고, '93. 3월 해빙기까지 계측을 수행한 결과, 지표변위말뚝에서 발생된 수직변위량이 3.4 ~ 4.9cm로 판명되어, 침투압에 의한 지반의 변형을 고려한 재해방지대책으로 기존의 사면안정 H형강 억지용 줄말뚝을 따라 어스앵카를 추가 보완 시공하였다.

또한, 지표변위말뚝 하부의 토층에서 발생하는 지반내의 변형거동을 알아내기 위해 '93. 6.17일 사면과 역T형 옹벽에 계측기기를 각각 6개소씩 설치하여 현재까지 계측을 실시하고 있다.

'93. 8.10 일강우량 101.7mm에 의해 101동 측면과 자연사면하단의 E-E단면과 인접한 설계사면(근린공원)의 붕적층으로 구성된 비탈에 강우가 침투되었다. 이 강우침투에 의해 붕적토층지반내에 침투압이 가해져서 지반토괴를 붕괴시키려는 활동력이 증가되었다.

이 활동력으로 인하여 기존의 배수구조물 등이 변형되고, 이 변형된 구조물의 접합부위를 따라 자유지하수가 침투되어 붕적토층이 사면하단으로 밀려나는 지반거동이 발생하였다.

본 논문에서는 앞에서 이미 설명한 바와 같이 불안정사면에 대한 사면안정검토에 따른 대책공법을 논의 하고, 현장 계측자료에 의해 강우침투에 의한 사면의 변형거동특성을 분석하여, 이를 FLAC프로그램에 의한 사면의 수치해석을 통하여 검증함으로써, 보다 합리적인 재해방지 예측기법을 제안하고자 한다.

2. 사면의 현황

동 설계사면의 전체 길이는 약 1,000m, 최대 및 최소폭은 각각 70m, 18m(평균:30m) 정도이고 표고는 60~100m이며, 자연사면의 표고는 100~145m로서 비탈의 전체 현황도는 그림 2.1과 같다.

그리고, C-C단면을 중심으로 201 및 202동 후측 사면의 지층구성상태는 현 지표면하로부터 점토자갈층 및 풍화토, 풍화암 그리고 기반암인 연암의 순으로 형성 분포되어 있다.

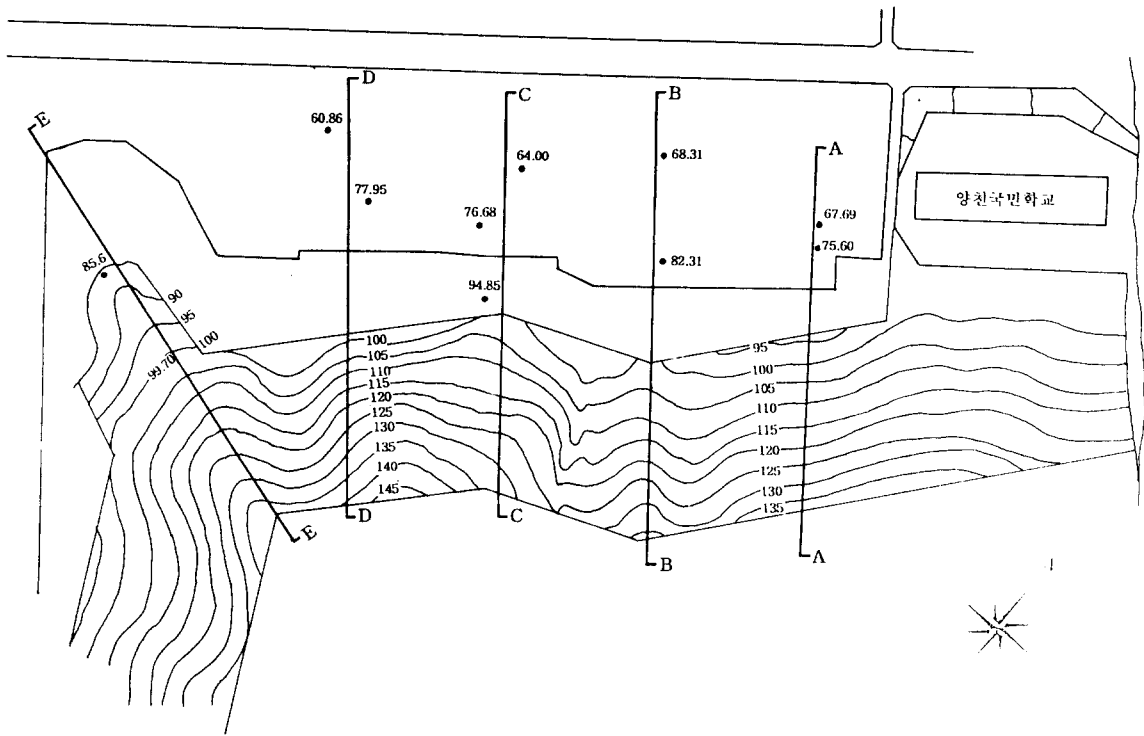


그림 2.1 설계 및 자연사면의 평면도(단위:m)

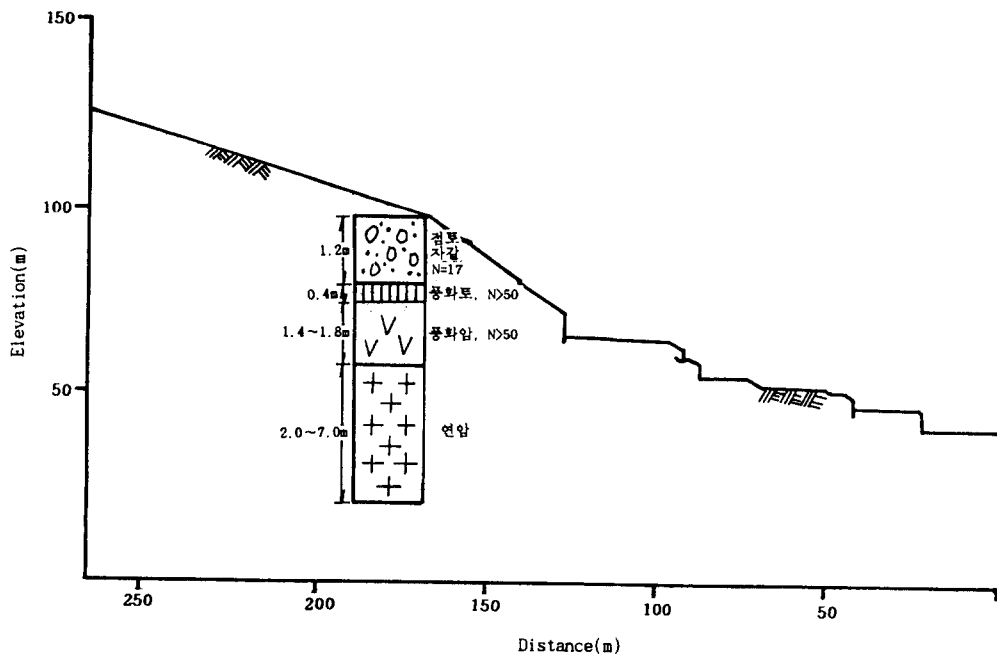


그림 2.2 C-C단면의 201 및 202동 후측 사면의 대표적인 지층단면도

설계사면의 B-B, C-C, D-D단면은 연암층이 지표면부근에 존재하며 붕적토와 풍화토를 지나는 파괴면도 응력을 관통하게 되므로 사면파괴의 가능성이 없을 것으로 판단되어 계산에서 제외시켰다. A-A단면은 안전율 0.92의 파괴면이 아파트 기초를 지나게 되므로 아파트기초에 대한 대책이 필요한 것으로 분석되었으며, E-E단면은 사면안전율이 1.5 이상으로 안전한 것으로 판단되었다.

단지외곽의 자연사면은 무한사면으로서 이러한 무한사면의 파괴는 이질적인 토층의 경계면을 따라서 발생하는 것이 보통이므로 붕적토층과 풍화토층 및 풍화암층과 연암층을 파괴면으로 보고 이들 두개의 파괴면에 대해 사면안전율을 구하여 보면 표 3.2 및 표 3.3과 같이 산정된다.

갈수기에는 충분히 안전한 것으로 판단되나 우기시에 지하수위가 상승하여 지표면과 일치할 경우 사면의 안전율이 현저히 작아지므로 산사태 방지를 위한 조치가 필요함을 알 수 있다.

표 3.1 지층별 토질정수

구분	점착력 $C(t/m^2)$	내부마찰각 $\theta(^{\circ})$	습윤단위중량 $\gamma_t(t/m^3)$	포화단위중량 $\gamma_{sat}(t/m^3)$
붕 적 토 층	2.0	10	1.80	1.90
풍화잔적층	7.0	0	1.79	1.85
연 암 층	0	45	2.00	-

표 3.2 자연사면의 최소안전율

단면	최소안전율	
	갈수기	우기
A-A	1.26	1.18
B-B	1.38	0.94
C-C	1.43	0.88
D-D	1.60	0.99
E-E	1.80	1.72

표 3.3 설계사면의 최소안전율

단면	최소안전율
A-A	0.92
E-E	1.58

3.2 대책공법

위에서 검토한 바와 같이 단지내 설계사면은 A-A단면의 일부분에서 안전율 0.92의 파괴면이 아파트 기초를 지나게 되므로, 아파트 기초면을 연암층까지 낮추던가 기초지반을 보강시켜줄 필요가 있으며 기타 단면은 안정한 것으로 분석되었다.

단지 외곽 자연사면의 A-A, E-E단면은 안정하게 판단되며 B-B, C-C, D-D단면은 집중호우시 지하수위의 상승에 의해 불안정할 것으로 판단된다. 이에 대한 대책으로 지하수위가 지표면에 도달할 경우에는 B-B, C-C, D-D단면의 단지 남측 배수로 외측에 사면안정 H형강(300×300×10×15mm) 역지용 줄말뚝을 0.8~1.0m간격으로 설치하고, 지하수위가 붕적토층내에 존재할 경우에는 1.5m 간격으로 연암층에 충분한 근입장을 갖도록 설치하고, 이들 말뚝의 두부는 띠장(250×250×9×14mm)으로 서로 연결하여 어스앵카로 지지하는 것으로 결정하였다.

4. 집중호우에 의한 사면의 변형거동

4.1 변형원인 및 형상

본 지구는 '91. 8.22~23일 양일간에 걸쳐 태풍 글래디스호가 동반한 집중호우(누계 강우량 : 505.5mm, 일강우량:439mm, 시간 최대강우량:37.7mm)로 그림 2.1의 C-C단면 우측의 201 및 202동(그림 5.1) 후측 단지 자연사면에 1.5m 간격으로 설치된 사면안정 H형강 억지용 줄말뚝의 20m 구간이 1.2m정도 전방변위를 일으켰으며, 사면보호공으로 시공중이었던 K-블럭과 U형측구의 파손, 시공중인 옹벽구조물의 매몰 등의 상당한 피해가 발생하였다.

또한 그림 2.1의 E-E단면의 설계사면은 안정성검토 결과 안전율이 1.5 이상으로 안전한 것으로 판단되었다. 그러나, '93. 8.10 일강우량 101.7mm에 의해 101동 측면(그림 5.14)에 인접한 근린공원의 붕적토층으로 구성된 지반에 강우가 침투되었다. 이 강우는 불투수층인 풍화잔적토층에 침투되기 이전에 붕적토층과 풍화잔적토층 사이로 침투압이 가해져서 지반토괴를 붕괴시키려는 활동력이 증가되었다. 이 활동력으로 인하여 기존의 사면보호블럭과 횡방향으로 설치된 기성콘크리트 배수구조물인 플룸관($b \times h \times l = 0.6 \times 0.6 \times 2.0\text{m/본}$)이 변형되고, 이 변형된 구조물의 접합부위를 따라 자유지하수가 침투되어 붕적토층이 사면하단으로 밀려났다.

4.2 대책공법

C-C단면 우측의 201 및 202동 후측 단지 자연 및 설계사면의 변형거동을 사전에 파악하여 재해예방을 위한 예보체제로 활용하기 위해 원상태로 수해복구공사를 완료한 후, '92. 9.23일 지표변위말뚝($5 \times 5 \times 150\text{cm}$)을 6개소에 설치하고(그림 5.1), 계측을 수행한 결과, '93. 3월 6본의 지표변위말뚝에서 발생한 수직변위량이 '92.9.23일 측정치에 비해 지반고의 변위가 3.4(No.1)~4.9(No.3)cm로 판명되어, 침투압에 의한 지반의 변형을 고려한 재해방지대책으로 기존의 사면안정 H형강 억지용 줄말뚝을 따라 어스앵카 10공을 1.5m간격으로 추가 보완 지지시키므로서, '93. 7.29일 114mm의 강우직후에도 안정성을 확보할 수 있었다.

또한, 자연 및 설계사면의 보다 과학적인 유지관리방안으로서 지표변위말뚝 하부의 붕적토층, 풍화토층 및 풍화암층과 연암층에서 발생하는 지반내의 변형거동을 알아내기 위해 '93. 6.17일 지중경사계, 지하수위계와 사면하단의 역T형 옹벽(H-6.0m)에 구조물 기울기 측정기를 각각 6개소씩 설치한 이후 현재까지 정기 및 특별점검(집중호우 및 태풍이 지난후, 지반의 동결 및 융해기간)으로 구분하여 계측을 실시하고 있다.

E-E단면의 설계사면은 향후 활동의 진행이 있을 것으로 예상하여, 이미 밀려난 부위의 붕적토를 일정 깊이까지 제거한 후, 지하배수공법으로 최소 30cm두께의 잡석 또는 쇄석(최대입경 15cm, 5cm 보다 작은 체의 통과율 30% 이하, 0.64cm체의 통과율 10% 이하) 사면보호용 맹암거를 설치하고 기존의 사면보호블럭과 배수구조물인 플룸관을 정착시키면 안전율이 10% 정도 증가하는 것으로 분석되었다.

5. 현장계측 및 결과분석

5.1 201동 및 202동 후측 사면

동사면의 변위말뚝 및 계측기기 설치위치도는 그림 5.1과 같다. 우선, 대표적인 3본의 변위말뚝(No. ①, ②, ④)에 대하여 '92. 9.23 설치 이후 '94. 8월 까지 8회 계측을 실시한 결과를 시간의 경과에 따른 지반의 변위량으로 나타내면 그림 5.2~5.4와 같이 표시할 수 있다. 이를 검토하여 보면 수직변위량이 최대 5.3cm(No. ② 변위말뚝 '94.8.4), 최소 2.6cm(No. ④ 변위말뚝 '93.9.13), 평균 3.95cm로 분석되어 비탈의 부분적인 변형이 진행중인 것으로 판단되므로 변위말뚝의 지속적인 측정을 실시하고 있으며, '93.9월 이후 전반적으로 지표면의 변화가 둔화되고 있는 것으로 나타나고 있다.

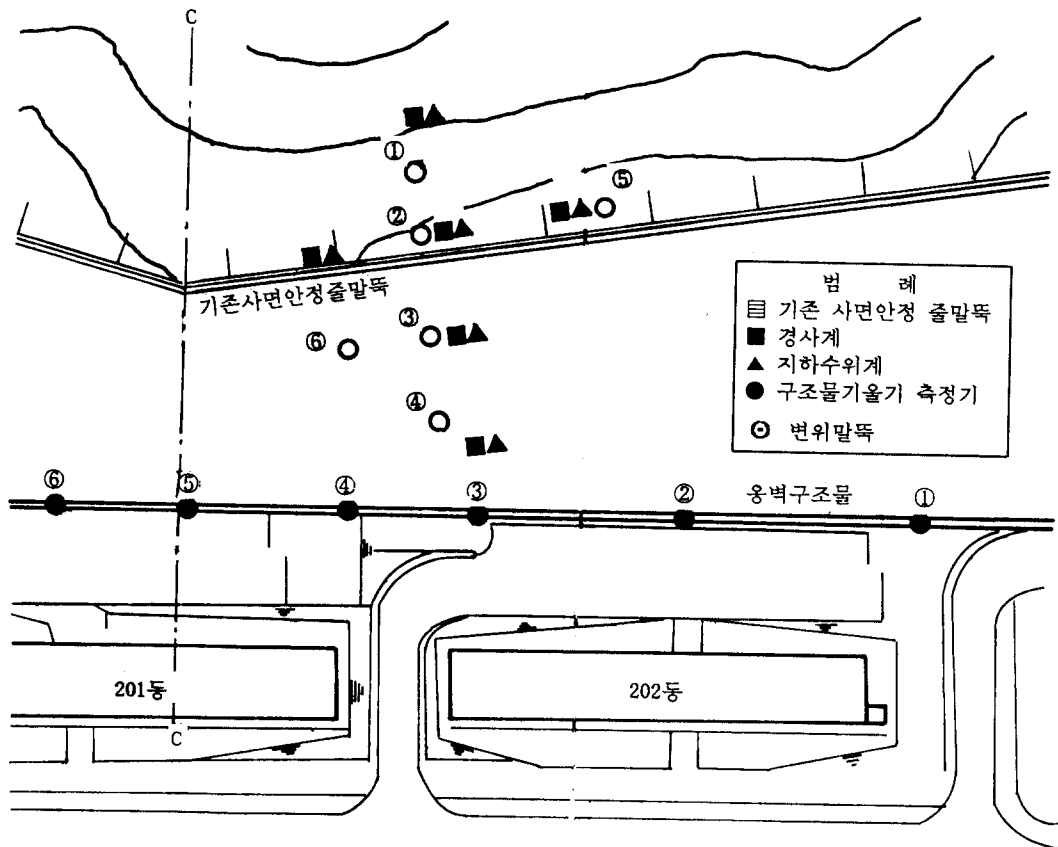


그림 5.1 201 및 202동 후측 사면의 변위말뚝 및 계측기기 설치위치도

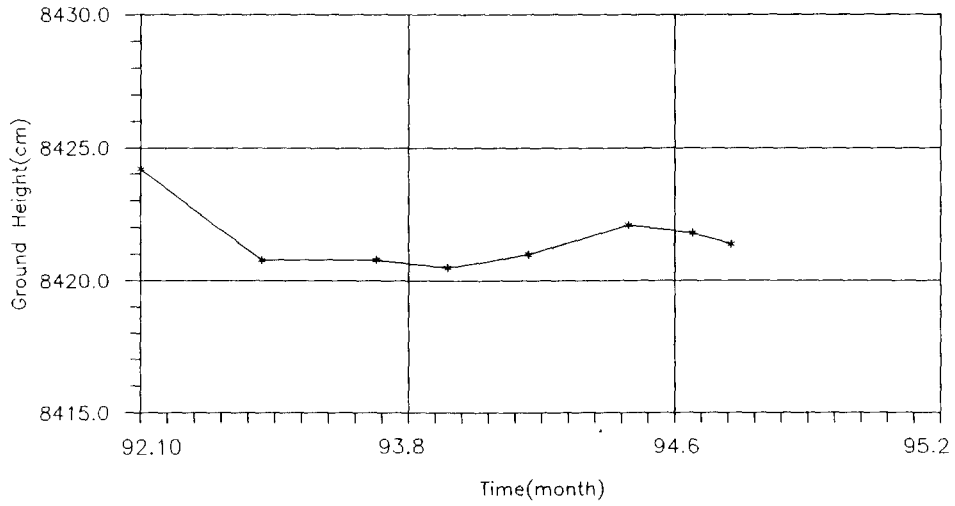


그림 5.2 201 및 202동 후측 사면 ①번 변위말뚝의 지반고 변화

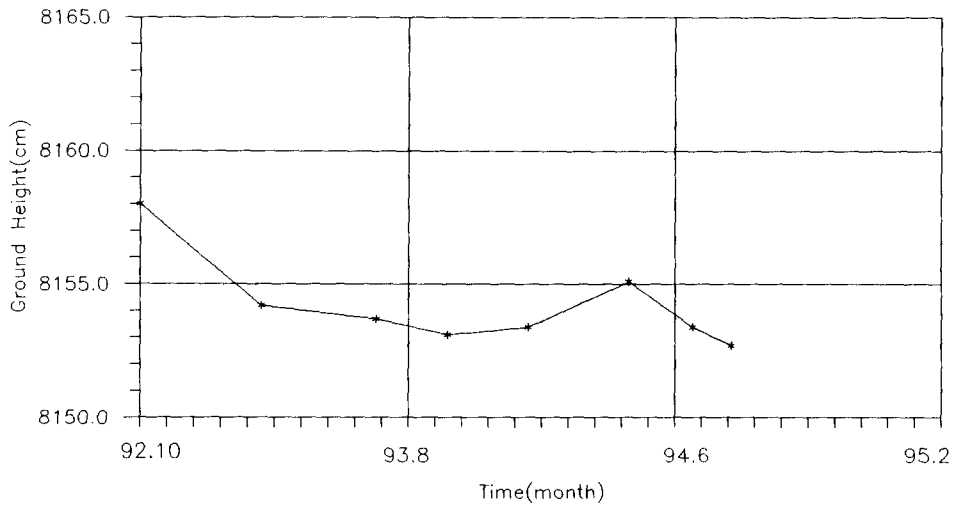


그림 5.3 201 및 202동 후측 사면 ②번 변위말뚝의 지반고 변화

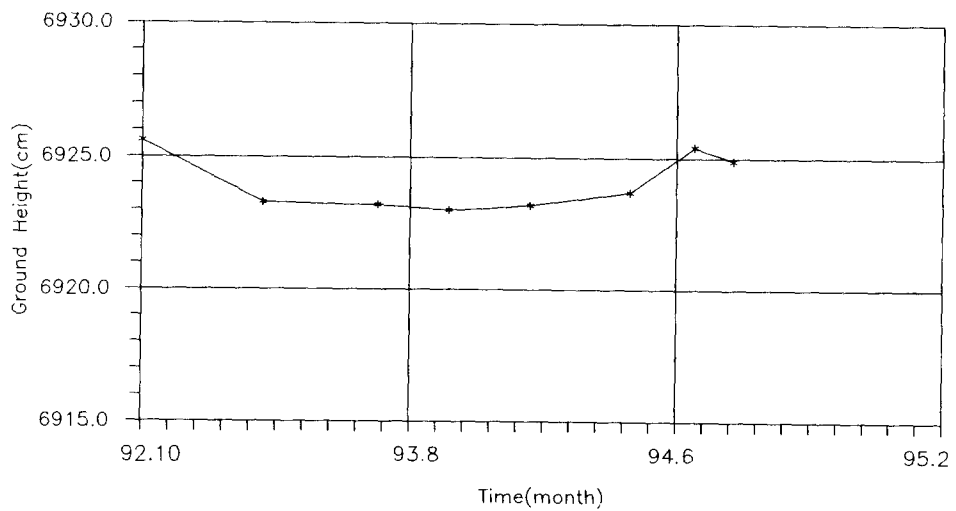


그림 5.4 201 및 202동 후측 사면 ④번 변위말뚝의 지반고 변화

그림 5.5는 사면과 역 T형옹벽(H=6.0m)에 각각 설치된 계측기기의 배치평면도를 보인 것이며, 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

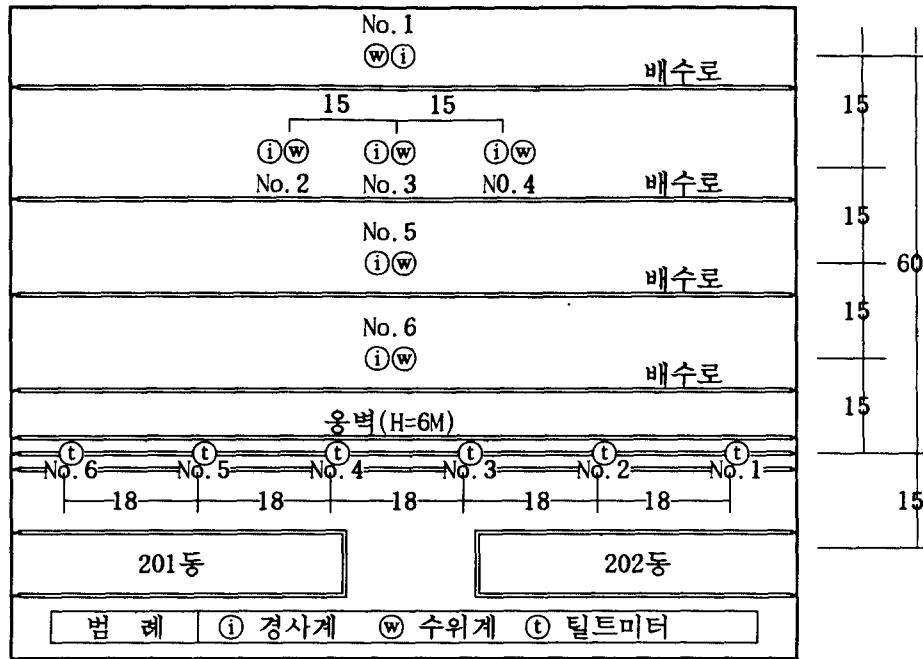


그림 5.5 201 및 202동 후측 사면의 계측기기의 평면도(단위 : m)

먼저, 지중경사계의 최대 종방향 변위량 및 최대 횡방향 변위량은 각각 6.2mm(No. ④ 경사계 '94.3.3), 8.5mm(No. ⑥ 경사계 '94.7.4)로 나타났다. 그림 5.6 및 5.7은 시간의 경과에 따른 경사계의 대표적인 종방향 변위량을 보인 것이다.

그리고 일강우량과 지중경사계에서 측정된 최대변위량의 관계를 검토해 보면, 그림 5.8~5.10에 표시한 바와 같이 지반의 변위량이 6~9월의 우기시에는 예측한대로 증가되었으며 건조기인 2~5월에는 감소되었다.

지하수위계를 10회 측정('93.6.30~'94.9.27)한 결과 그림 5.5의 No. ③ 지점에서 2회 계측시에 지하수위의 변동이 그림 5.11에서 보는 바와 같이 최대 3.85m('93.7.29, 일강우량:114mm)로 나타났으며, 건조기('93.9~'94.2)에는 지하수위가 계측심도(9.0m)하에 존재하여 측정이 불가능할 경우가 있었다. 또한 '93.7.29일 114mm의 강우 직후 그림 5.9의 No. ③ 지점의 지하수위계와 경사계(종방향)를 비교하여 보면, 지하수위의 상승($\Delta h=3.85m$)에 따라 종방향으로 3.9mm의 변위량이 발생되었음을 확인할 수 있다.

역 T형 옹벽에 부착된 구조물기울기측정기의 계측결과 그림 5.5의 No. ④('94.3.25)지점에서 전방변위량이 5.68mm로 분석되었으나, 검토결과 $\Delta La/H = 5.68mm/1,000mm = 0.006$ 으로써 허용회전 변위량(사질토:0.001H~0.004H, 점성토:0.01H~0.02H) 이내 이므로 구조상 안전한 것으로 판단되었다. 그림 5.12~5.13은 구조물기울기측정기의 대표적인 계측결과를 보인 것으로 전방변위량이 3.0mm 범위이내에 있는 것으로 나타났다.

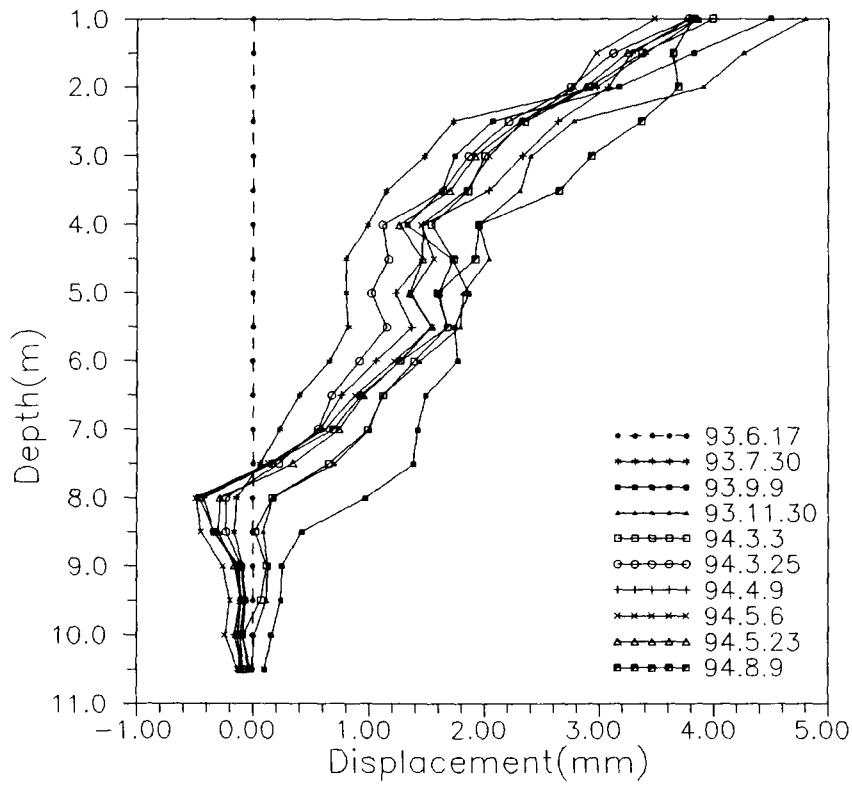


그림 5.6 ③번 경사계의 종방향 변위량

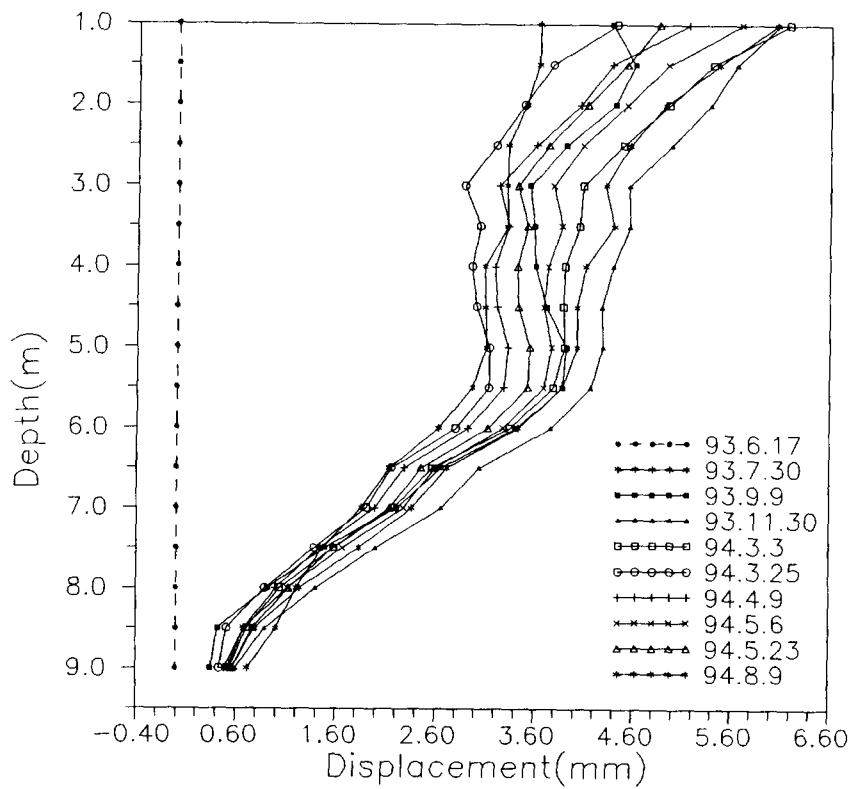


그림 5.7 ④번 경사계의 종방향 변위량

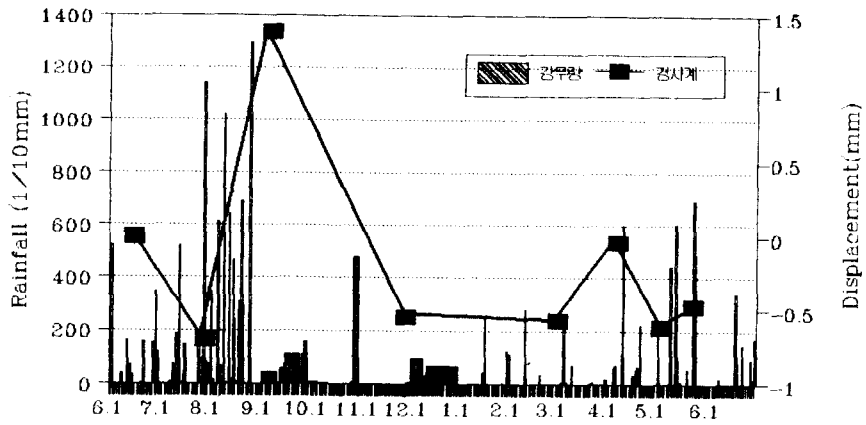


그림 5.8 강수에 의한 사면의 변위량(①번 경사계)

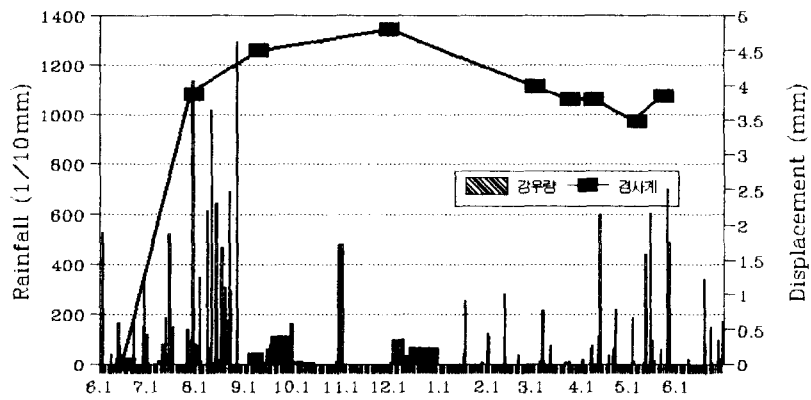


그림 5.9 강수에 의한 사면의 변위량(③번 경사계)

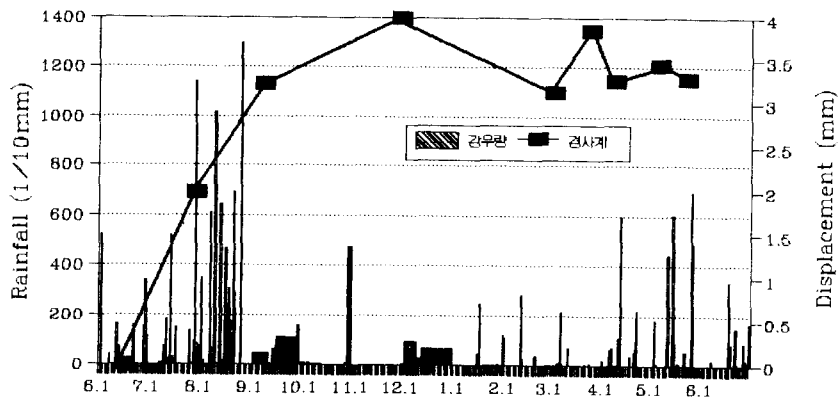


그림 5.10 강수에 의한 사면의 변위량(⑤번 경사계)

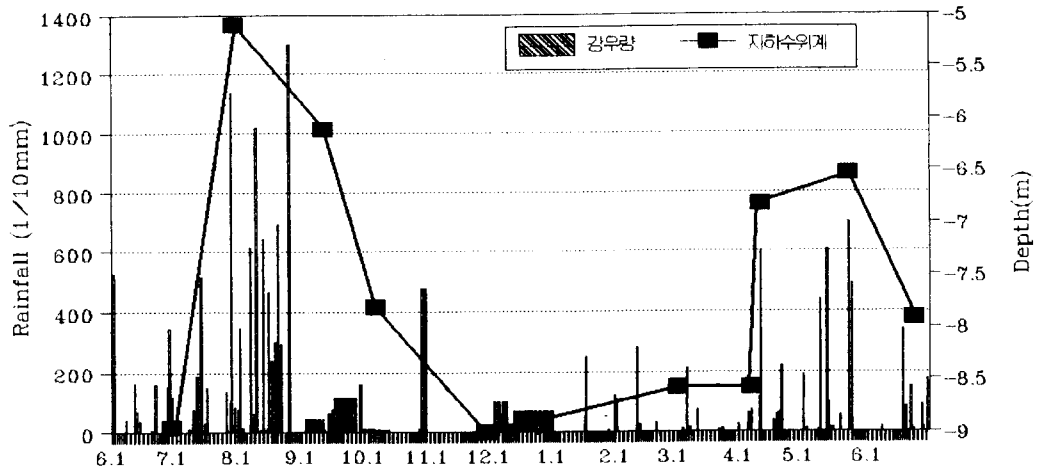


그림 5.11 강수에 의한 지하수위의 변위량(③번 지하수위계)

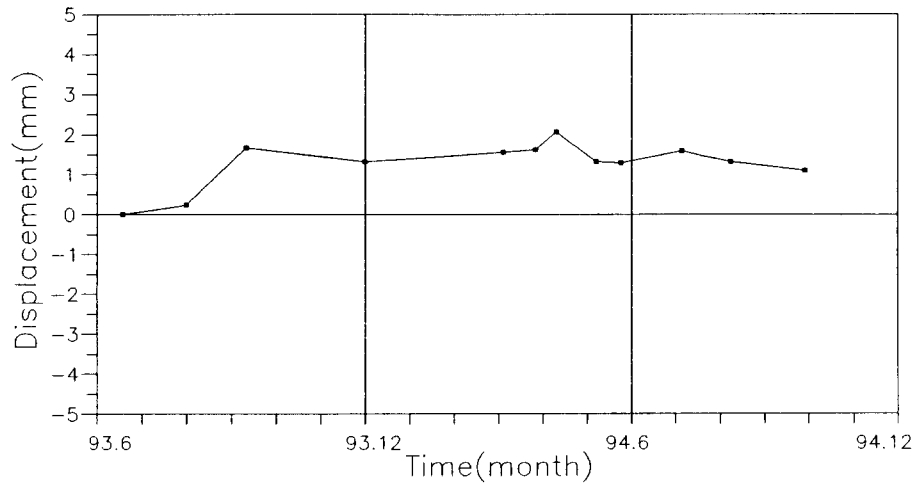


그림 5.12 ①번 구조물기울기측정기의 변화량

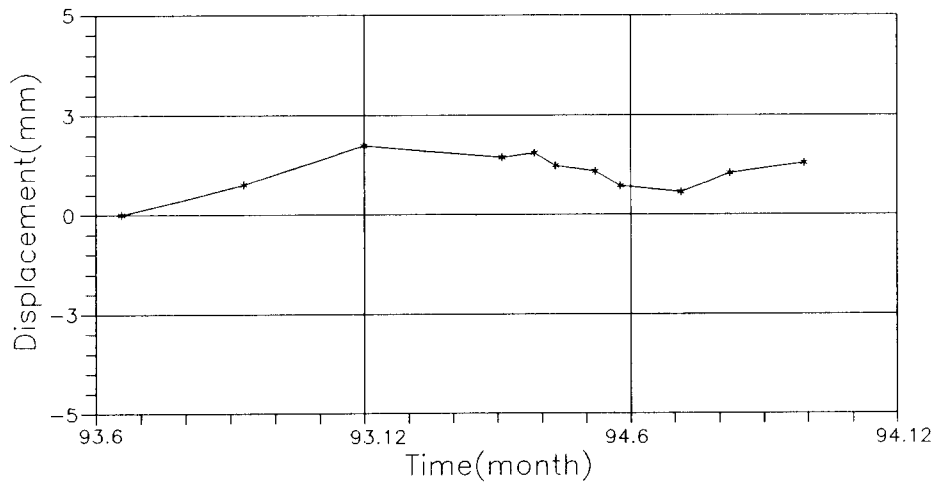


그림 5.13 ⑤번 구조물기울기측정기의 변화량

5.2 101동 측면의 설계사면

'93. 8. 10일 집중호우에 의한 사면의 변형활동이 있는 후, 동사면에 '93. 9. 13 지표 변위말뚝(5×5×150cm) 8본을 설치하여 현재까지 5회 계측을 실시해오고 있다. 이들 변위말뚝의 설치위치도는 그림 5.14와 같으며, 대표적인 변위량을 표시하여 보면 그림 5.15~5.17과 같이 최대수직변위량이 No.8의 1.3cm로 나타난다.

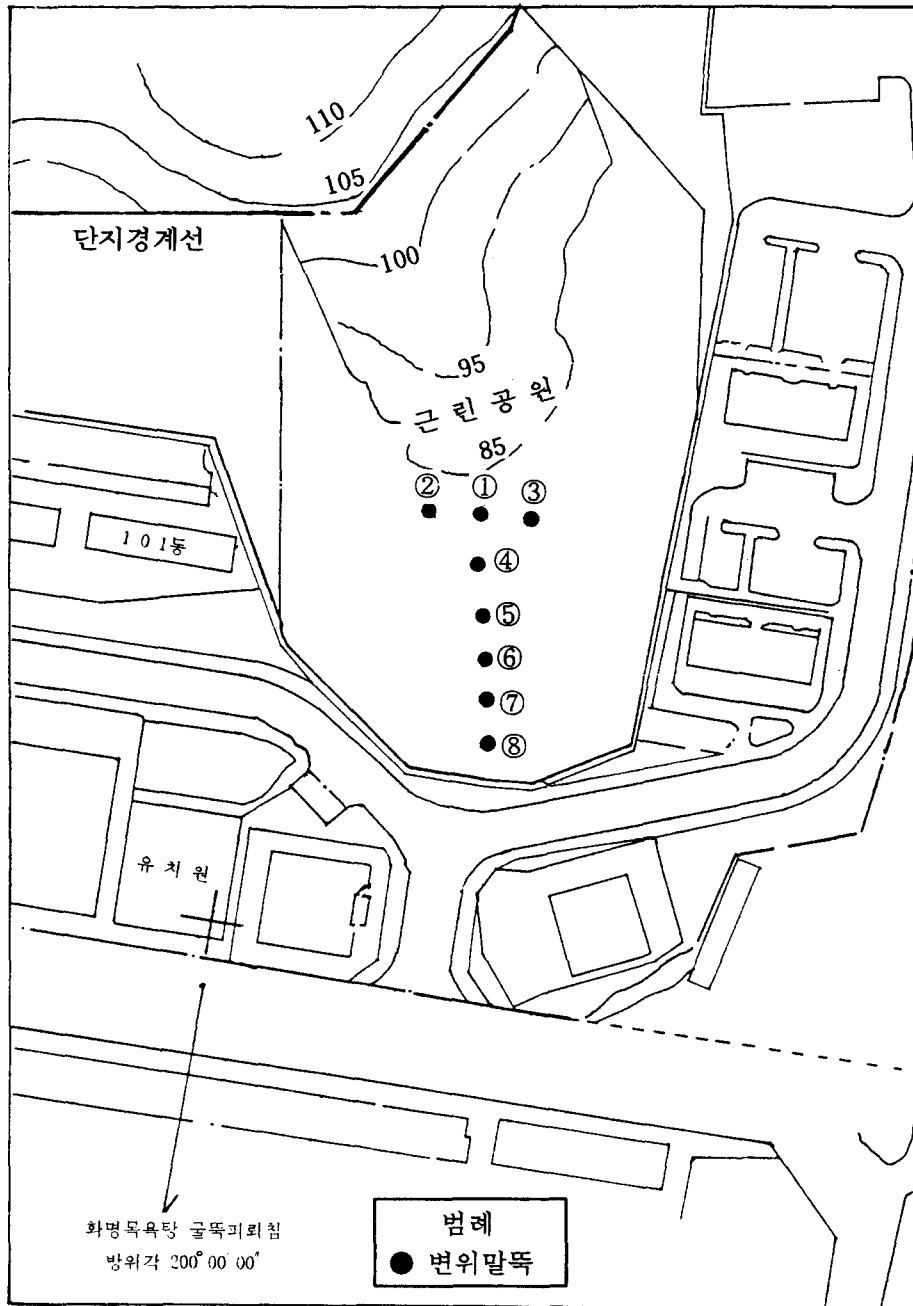


그림 5.14 101동 측면 사면의 변위말뚝 설치위치도

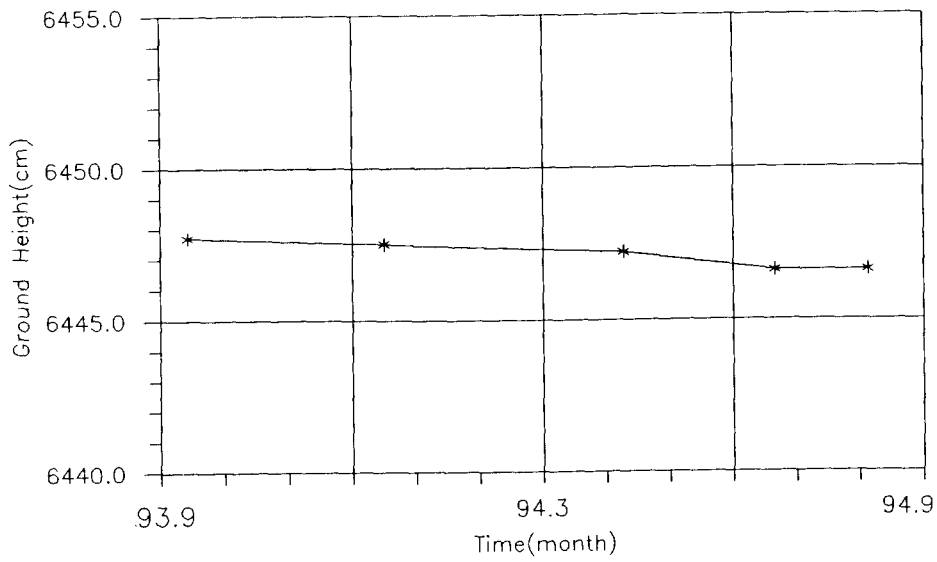


그림 5.15 101동 측면 사면의 ①번 변위말뚝의 지반고 변화

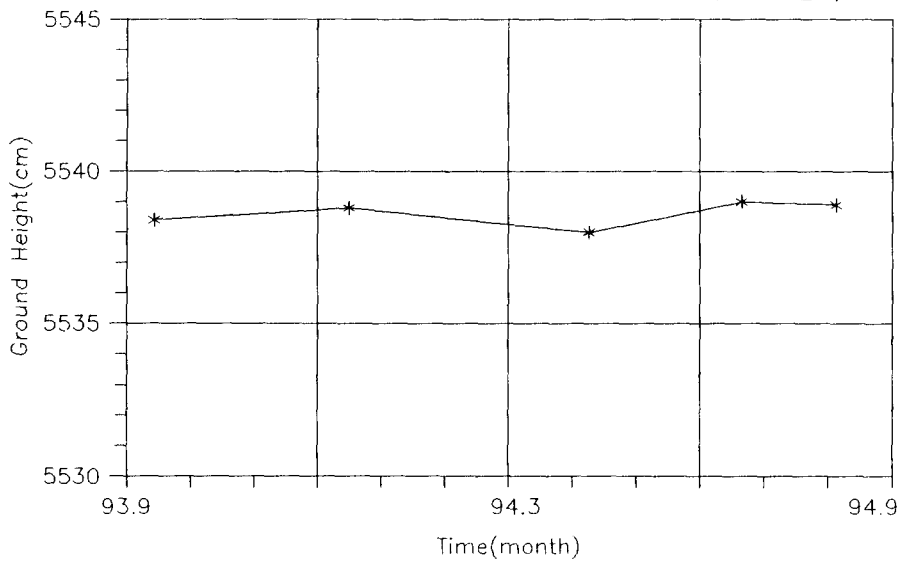


그림 5.16 101동 측면 사면의 ⑤번 변위말뚝의 지반고 변화

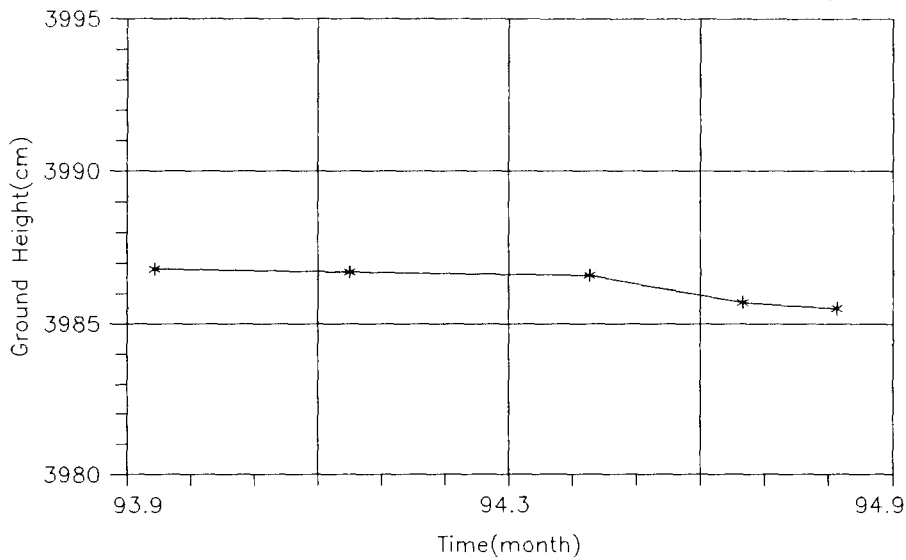


그림 5.17 101동 측면 사면 ⑧번 변위말뚝의 지반고 변화

6. 사면의 수치해석

앞에서 이미 검토한 A-A 및 E-E단면의 설계사면에 대한 검증 확인을 위하여 사용된 수치해석 프로그램은 FLAC(3.02)이며, 지반구성모델은 Mohr-Coulomb모델을 사용하였다. 이에 적용된 제반 물성치는 표 2.1에 보인 바와 같다. 수치해석을 행한 결과를 검토하여 보면 지반 전체의 상태는 비교적 안정된 것으로 판단되나, 일부구간에서는 변형의 가능성이 있음을 알 수 있다.

그림 6.1~6.3에서 보인 A-A단면 하부의 아파트 기초지반 부지에서는 약 12.5cm의 변위가 발생될 수 있는 것으로 나타났는데, 이는 3.1절의 STABLE프로그램의 해석결과에서 보인 안전율 0.92와 잘 일치하는 것이다. 또한 그림 6.4~6.6과 같이 단지내 E-E단면의 북측 설계사면에서 약 10.5cm의 변위가 발생될 수 있는 것으로 판명되었는데, 이는 4.1절의 집중호우에 의한 사면의 변형거동형태와 유사하며 활동면은 풍화토층과 연암층의 경계면을 따라 발생될 가능성이 있는 것으로 나타났다.

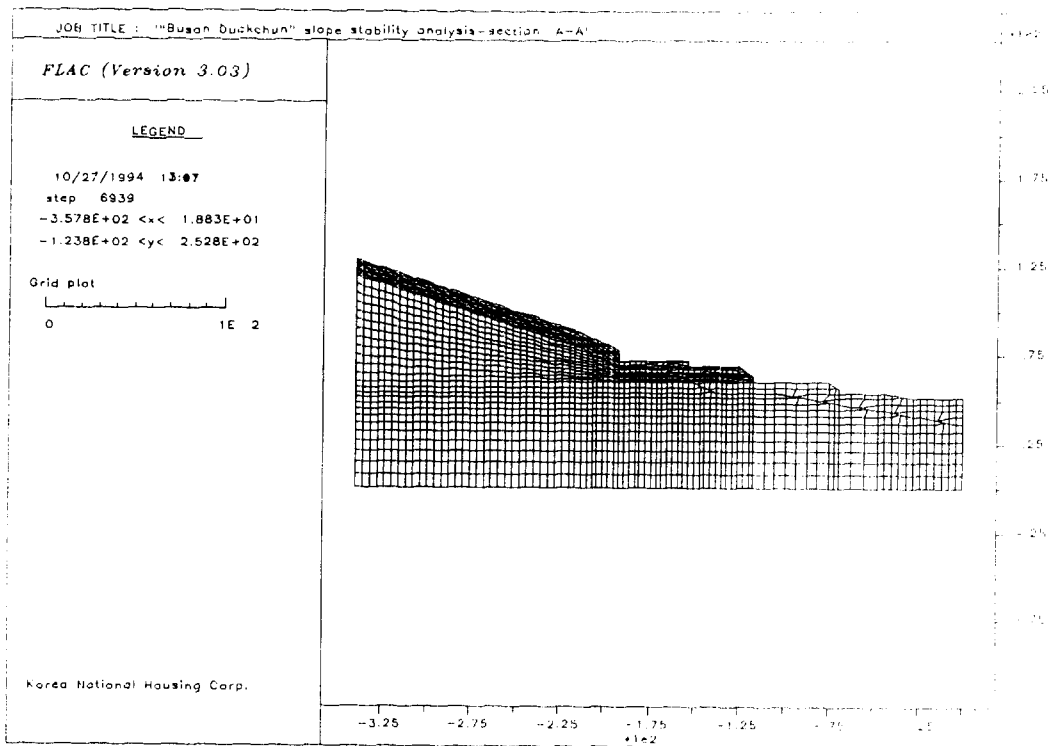


그림 6.1 A-A단면 해석에 사용된 단면도

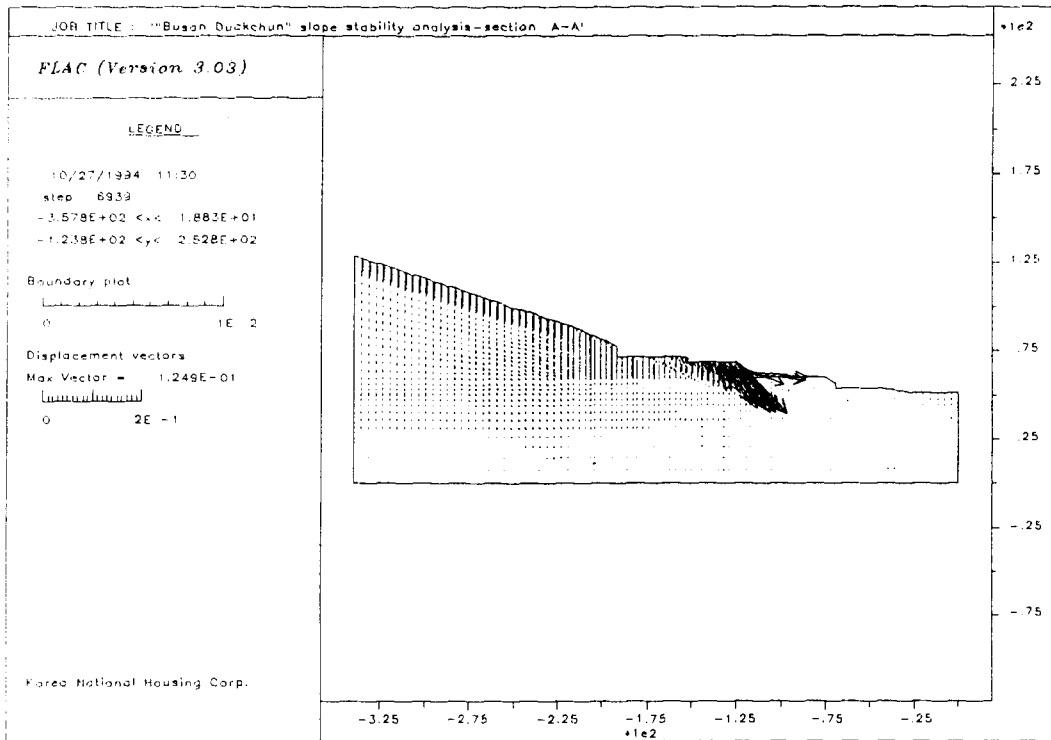


그림 6.2 A-A단면 전체의 변위도

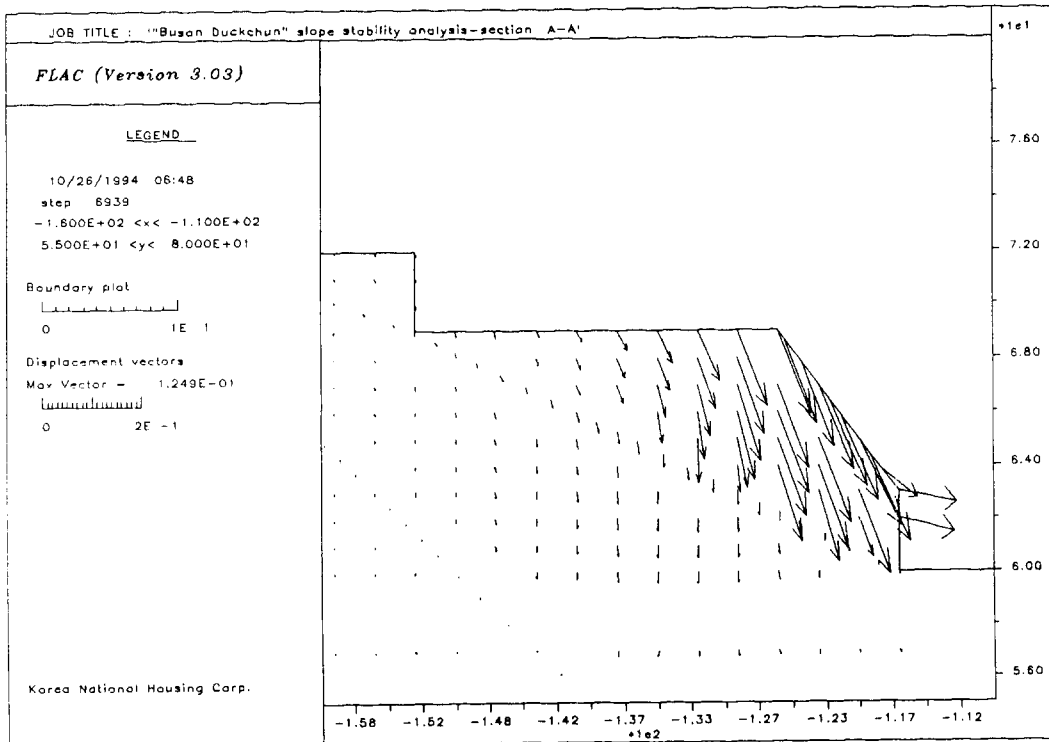


그림 6.3 A-A단면 아파트기초부지의 확대 변위도

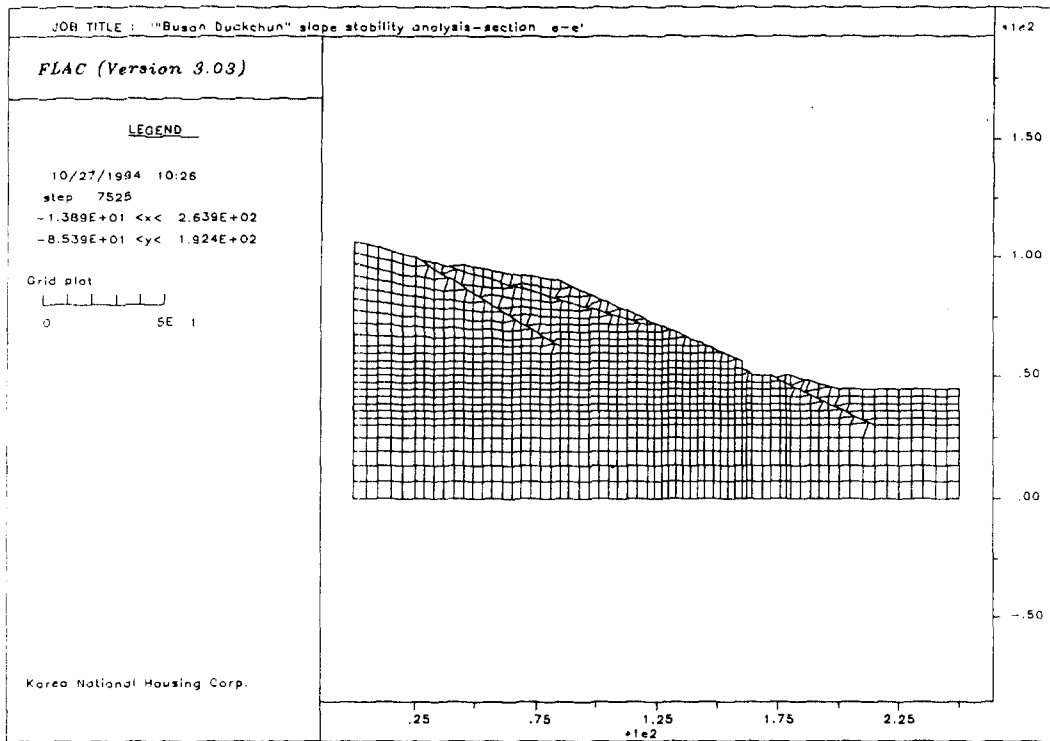


그림 6.4 E-E단면 해석에 사용된 단면도

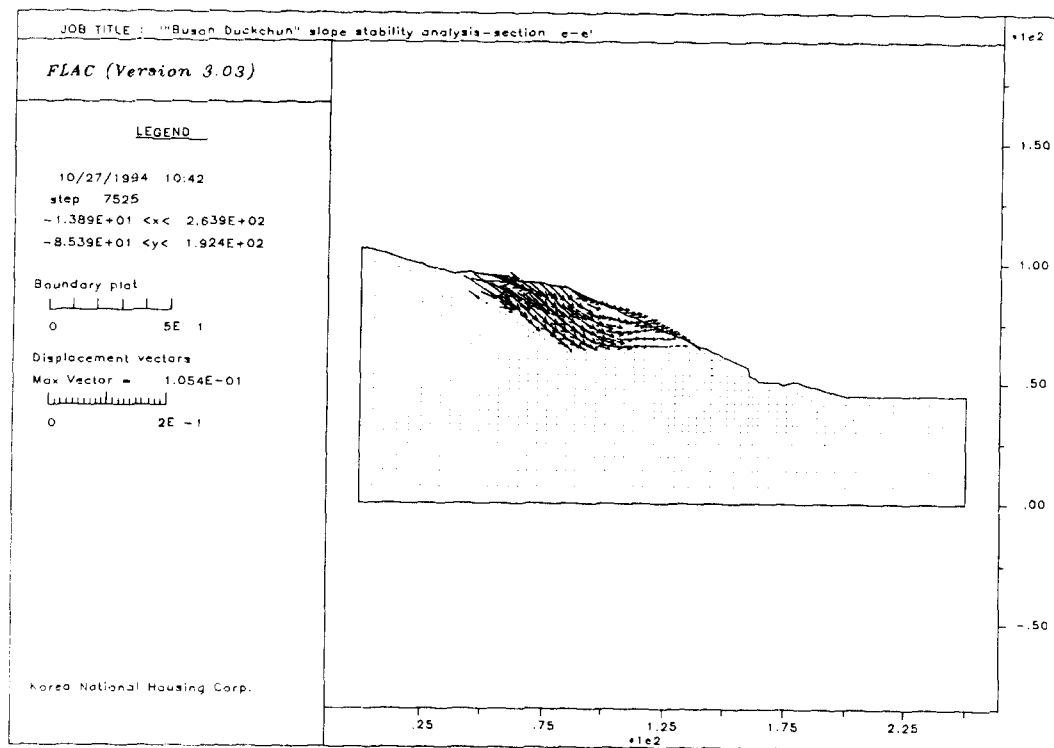


그림 6.5 E-E단면 전체의 변위도

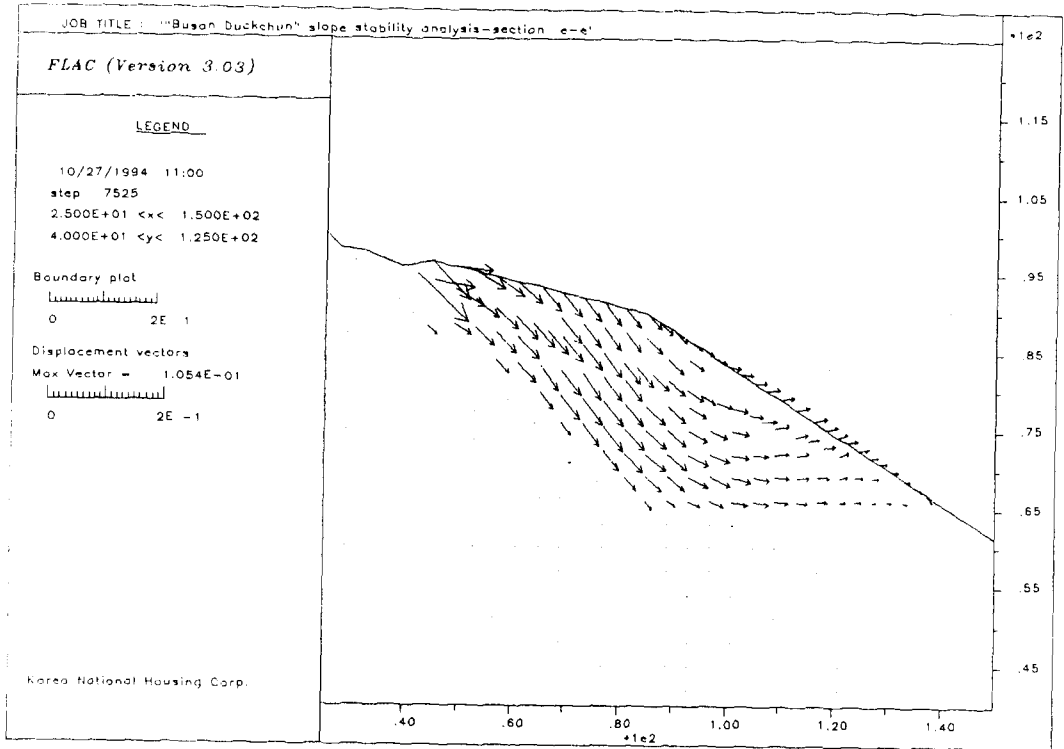


그림 6.6 E-E단면 단지 경계점 부근의 확대 변위도

7. 결론

부산 택지개발사업지구의 불안정사면에 대한 안정성 여부를 검토하고 현장계측결과를 일강우량과 연관시켜 사면의 변형거동특성을 분석하여, 이를 수치해석에 의해 검증하므로써 재해방지 예측기법을 제안한 본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 설계사면의 A-A단면은 안전율이 0.92로서 불안정한 것으로 분석되어 아파트기초에 대한 보강이 필요한 것으로 판단되었다. 이는 수치해석을 통하여 나타난 아파트기초지반에서의 변형발생가능성과 잘 일치하는 것이다.

(2) 201 및 202동 후측 사면의 계측결과를 통해 변위말뚝에서 일어나고 있는 수직변위량이 다소 증가함에 따라 재해방지대책으로 기존의 사면안정 H형강 억지용 줄말뚝을 따라 어스앵카를 추가 지지시키므로써, '93. 7.29일 114mm의 강우직후에도 안정성을 확보할 수 있었으며, 이후 전반적으로 지표면의 변화가 둔화되고 있는 것으로 나타나고 있다.

(3) 동 사면에 설치한 지중경사계와 지하수위계의 계측결과를 비교하여 보면, 강우에 따라 지하수위 및 종방향의 지중변위량이 상당히 민감하게 발생됨을 확인할 수 있다.

또한 역 T형 옹벽에 부착된 구조물기울기측정기의 계측결과 대표적인 전방변위량이 3.0mm 범위 이내에 있는 것으로 나타났으며 이는 허용회전변위량 이내 이므로 구조상 안전한 것으로 판단된다.

(4) 설계사면의 E-E단면은 안전율이 1.5 이상으로 안전한 것으로 분석되었으나 '93. 8.10 일강우량 101.7mm에 의해 동사면의 배수구조물과 붕적토층 일부구간에서 피해가 발생되었다.

이에 대한 검증 확인을 위하여 수치해석을 통해 검토한 결과, 지반 전체의 상태는 비교적 안정된 것으로 판단되나, 북측 설계사면에서 나타나는 변위발생의 가능성은 집중호우로 발생한 사면의 변형거동형태와 유사하며, 활동면은 풍화토층과 연암층의 경계면을 따라 발생할 가능성이 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

- (1) 대한주택공사(1989), 대한주택공사 부산덕천지구 사면안정검토 연구용역 보고서, 대한토질공학회.
- (2) 정철호, 최진국, 권형석, 김효진(1994), 지반침하 및 토목구조물의 변형거동 분석, 대한주택공사.
- (3) 정철호(1990), 산사태방지대책공법의 실용화 방안, 대한주택공사.
- (4) Das.Braja.M.(1983), Principles of Foundation Engineering, Books/Cole Engineering Division. P.215.
- (5) Das.Braja.M.(1985), Principles of Geotechnical Engineering, PWP Engineering, P.302.
- (6) Dunnichiff John(1988), Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, A Wiley Interscience Publication John Wiley and Sons, New York, PP.216~274.
- (7) Geotechnical Control Office(1984), Engineering Development Department, Hong Kong, Geotechnical Manual for Slope, PP.123~138.
- (8) ITASCA Consulting Group, Inc.(1991), FLAC(Version 3.02) User's Manual Vol. I, II.
- (9) Möuller, B., Lindholm.D.(1970), Experience of a Computerised Monitoring System for Landslides., Geotechnical Instrumentation in Practice, Thomas Telford, London, PP.95~106.
- (10) Ting, W.H., Toh, C.T.(1990), The Behavior of an Instrumented Dowel Installed to Stabilise Slope Movement., Geotechnical Instrumentation in Practice, Thomas Telford, London, PP.107~112.