

석축구조물 및 배면지반의 안정성 검토사례연구

A Case Study on the Stability Analysis for Masonry Retaining Walls and Backfill

천 병 식* 여 유 현** 김 경 민***
Chun, Byung-Sik Yeoh, Yoo-Hyeon Kim, Kyung-Min

Abstract

In this paper, the stability analyses were performed for masonry retaining walls in Seoul subway system. This masonry retaining walls were reinforced with earth anchor system for the construction, but it was removed after construction. Therefore, the stability of masonry retaining walls should be checked after the earth anchors removed. For stability analysis of masonry retaining walls, FDM analysis(FLAC Ver.3.3) and slope stability analysis (SLOPE/W) were performed applying the test results from laboratory and field tests(schmidt hammer test, crack examination). As conclusion, the tension force of earth anchors should be kept, therefore, substitutional method was required in order to keep the tension force of earth anchor system.

Keywords : stability analysis, masonry retaining wall, FDM analysis, slope stability analysis

1. 서 론

석축의 안정해석에 있어서 현재까지 널리 행해지고 있는 방법은 토압이론에 기초를 두고 있으며 토압공식이 만족스럽게 적용되는 경우에는 중력식 옹벽에서처럼 도류구조물 자체가 충분한 강성을 가지고 있으며, 횡력의 작용을 받아 선단을 중심으로 회전할 수 있는 조건에서 합리적인 검토가 이루어지고 있다. 그러나 실제로 석축시공은

매쌓기 또는 칠쌓기로 이루어지므로 석축 벽체의 충분한 강성확보가 어려우며, 벽체가 끊어져 나가거나 기초저면의 수평활동으로 인한 붕괴는 석축의 경우가 중력식 콘크리트 옹벽에 비해 빈번하게 발생한다. 특히 석축은 물리적 성질이 다른 재료로 구성되므로 토압을 받을 때의 역학적 거동은 대단히 복잡하며 벽체의 강성이 콘크리트 옹벽에 비해 현저히 낮기 때문에 실제로는 배면토의 횡토압에 저항하는 구조물로서의 기능을 할

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 한양대학교 대학원 박사과정

*** 한양대학교 대학원 박사과정

● 본 논문에 대한 토의를 2001년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2001년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

취하지 못하게 된다. 따라서 석축을 강도정수가 대단히 큰 비탈의 일부로 간주하여 활동에 대한 안정에 저항하도록 설계하는 것이 더 합리적이며 안정검토 또한 석축의 실제 균열현상을 바탕으로 사면의 안정해석기법을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 석축의 안정성 확보를 위해 보강공법으로서 적용한 앵커시스템 제거시의 석축 안정성검토를 위해서 우선, 단계별 터파기 굴착 공사시에 석축구조물에 미친 영향을 선행 검토하여야 하므로 유한차분해석에 의한 시반변형해석을 실시하였으며, 이를 토대로 되메움이 완료된 상태에서 앵커시스템을 제거할 경우에 대한 석축의 안정검토를 수행하였다.

2. 공사개요 및 현장상황

본 현상은 서울지하철 0-00공구 건설공사중 ○○중학교 석축구간(STA.31K120~31K240, L=120m)은 최대높이가 약 6m(2~6m)정도로 석축 전면으로 약 0.8m 떨어져 배수로(콘크리트 박스구조물, 폭 0.7m, 깊이 0.8m)가 위치해 있고, 석축으로부터 약 2.0m 정도 이격되어있고, 약 23m 깊이의 지하철 터파기 공사 실시 후 되메움이 완료된 상태이다. 석축 구조물은 지하철 구조물에 인접하여 위치하고 있어 지하철 터파기 공사시 굴착이 진행됨에 따라 석축 기초부 지반변형 및 석축 구조체의 안정성에 미치는 영향을 고려하여 석축높이가 약 3.0m 이상 되는 구간에 어스앵커를 보강한 후 터파기 공사를 실시한 것으로 조사되었다.

2.1 비파괴 압축강도시험(Schmidt Hammer Test) 결과

석축 구조체의 콘크리트 몰탈 부위에 대하여 비파괴 시험법인 반발경도법으로 압축강도를 조사하였다. 조사개소는 총 81개소로서 균열이 발생한 부위를 중심으로 조사하였다. 측정면은 균열이 없는 부

Table 1 석축전면 지하철 터파기 공사개요

굴착깊이	22.3 m
가시성 벽체	H-Pile + 토류판, 토류벽 콘크리트
지보시스템	Strut(6단), 일부구간 Rock Bolt(3단) 병행 설치

분을 선정하여 마감을 완전히 제거한 후 측정하였으며 타격방법은 항상 측정면에서 직각방향으로 하고, Schmidt Hammer에서 서서히 힘을 가하여 반발경도를 측정하였다. 전체 측정값의 산술평균 값을 그 개소의 반발경도 R로 하였으며, 측정시에 반향 등의 이상이 있다고 판단된 경우에는 그 값을 버리고 다시 측정하였다. 측정장비 및 근거기준은 다음과 같다.

- 측정장비 : Concrete Test Hammer (α -750RX)
- 근거기준 : DIN 1048 PART 4 : 1978 Test Method for Concrete Determination of Compressive Strength of Hardened Concrete in Structure and Component in General Method

비파괴 압축강도시험에 의한 압축강도는 다음 3가지 방법에 의하여 각각 추정하였으며, Schmidt Hammer에서 읽은 반발 경도 R에 보정치 ΔR 을 더한 것을 기준경도 R_0 로 하였다. 여기에서, 보정치 ΔR 는 타격방향에 대한 수정값으로 수평 타격시는 $\Delta R=0$, 수직타격시는 Table 2와 같이 일본 재료학회에서 규정한 보정치를 써서 그 비례값으로 구하였다. 현장시험에 의해 측정된 추정 압축강도는 Table 3과 같다.

Table 2 반발경도 보정값

반발경도 R	보정치 ΔR			
	- 90°	+ 45°	- 45°	- 90°
10	-	-	+ 2.4	+ 3.2
20	- 5.4	- 3.5	+ 2.5	+ 3.4
30	- 4.7	- 3.1	+ 2.3	+ 3.1
40	- 3.9	- 2.6	+ 2.0	+ 2.7
50	- 3.1	- 2.1	+ 1.6	+ 2.2
60	- 2.3	- 1.6	+ 1.3	+ 1.7

Table 3 비파괴 압축강도시험법에 의한 압축강도 추정결과

측정부위	평균 반발경도	추정 압축강도 (kg/cm ²)			
		방법 1	방법 2	방법 3	평균강도
1	20	90	76	-	83
2	13	20	-	-	20
3	20	90	76	-	83
4	19	80	63	-	72
5	17	60	37	-	49
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
40	13	20	-	-	20
41	18	70	50	-	60
42	18	70	50	-	60
43	13	20	-	-	20
44	17	60	37	-	49
45	17	60	37	-	49
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
77	27	160	167	165	164
78	36	250	284	290	275
79	35	240	271	280	264
80	18	70	50	-	60
81	39	280	323	340	314

- 방법 1 : $F=10 \times R_0 - 110$ (kg/cm²)
(동경도 건축재료 검사소에 의한 강도 추정식)
- 방법 2 : $F=13 \times R_0 - 184$ (kg/cm²)
(일본 재료학회에 의한 강도 추정식)
- 방법 3 : Schmidt Hammer에 표시된 반발경도 곡선에서 반발경도 R_0 에 해당하는 값

석축 구조체의 콘크리트 몰탈 부위에 대하여 81개소에 실시한 비파괴 압축강도시험결과, 측정위치마다 상당히 큰 편차의 압축강도를 나타내는 것으로 조사되었고, 압축강도가 30kg/cm² 이하인 곳도 상당수 조사된 것으로 보아 석축 구조물의 벽체 강성이 균일하지 못할 뿐만 아니라 석축 시공시 빈배합의 콘크리트 몰탈하거나 시공후 시간경과에 따른 내구성 저하에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 본 석축구조물은 배면지반의 토압에 대해 저항하는 구조체로서 제 기능을 발휘하기에는 다소 미흡한 것으로 판단된다.

2.2 균열조사 결과 검토

석축구조물에 발생한 균열을 조사한 결과, 어스앵커 보강구간은 횡방향 균열이 주로 발생하였고, 보강구역 이외 구간은 종방향 균열이 크게 발생한 것으로 조사되었다. 이와 같은 균열양상은 석축전면의 지하철 공사구간에서 굴착진행 중 석축 수동토압 경감 및 지반변형으로 활동이 발생하였고, 보강구간 이외의 지역은 보강구간 석축의 침하발생에 따른 부동침하 내지 부등변위의 영향인 것으로 평가된다.

2.3 계측관리 결과 검토

본 현장의 석축구간 안정상태를 확인하기 위하여 어스 앵커에 설치된 하중계(2EA)와 석축에 설치된 건물경사계(2EA)의 계측관리를 항목별로 요약 정리하면 다음과 같다.

(1) 어스앵커 하중(Load Cell)측정

어스앵커 설치후 시간경과에 따른 어스앵커 축력 측정치는 약 13~20t/본으로 각 위치별로 초기치 확인 후 변화양상을 나타내고 있지 않으므로 지하철 공사 진행으로 주변 지반 이완에 따른 어스앵커의 정착상태는 비교적 양호한 것으로 평가된다.

(2) 건물경사계(Tiltmeter)측정

설치 운영된 2개소의 건물경사계 측정결과에 의하면, 초기치와 비교하여 지하철공사 진행으로 다소 증가한 경향을 보이므로 이와 같은 변화경향은 석축에 나타난 균열양상의 형태를 보여주는 것으로 사료된다.

3. 석축 구조물의 안정검토

석축의 안정성 확보를 위해 보강공법으로서 적용한 앵커시스템 제거시의 석축 안정검토를 위해서는 우선, 단계별 터파기 굴착 공시시에 석축구조물에 미친 영향을 선행 검토하여야 하므로, 유한차분해석에 의한 지반변형해석을 실시하였으며,

이를 토대로 되메움이 완료된 상태에서 앵커 시스템을 제거할 경우에 대한 석축의 안정검토를 수행하였다.

3.1 지하철 터파기 공사로 인한 석축구조물에 미치는 영향검토

해석모델의 선정 문제는 기본적으로는 지반이나 암반을 연속체 또는 불연속체의 집합체로 생각하는지에 따라 다르다. 본 해석에서는 대상지반을 연속체모델로 가정하여 해석을 수행하였다.

역학모델의 선정문제에서는 공사시 계층 결과, 원 지반의 상태 등을 충분히 검토한 후 결정해야 하므로, 본 해석에서의 해석모델은 Mohr-Coulomb 모델을 이용하였다.

해석영역은 반단면 해석을 수행하였으며 지하철 터파기 공사가 약 20m 깊이까지 시행되므로 하부로는 이를 고려하여 결정하였고 상부로는 지표면까지, 우측은 석축구조물을 중심으로 하여 약 30m 까지 설정하여 해석을 수행하였다. 해석영역에 대한 경계 조건은 좌우측 및 하부를 모두 Roller로 좌, 우측은 수평변위를 하부는 연직변위를 구속하였으며 하부의 양 모서리는 Hinge로 수평 및 연직변위를 구속하였다. 본 해석에 사용된 Element Typc은 지반에 대해서는 2차원 평면요소(Plane Element)를 사용하였으며 터파기 가지설 벽체는 Beam 요소, 이스앵

커는 Cable 요소를 이용하였다.

수치해석에 있어서 해석 모델링과 함께 입력 물성치의 평가는 해석결과의 신뢰성에 큰 영향을 미치는 요소라 할 수 있다.

본 연구에서는 석축구조물 주변지반의 지층조건은 기 토질조사보고서를 참고로 하였으며 입력물성치는 현장답사시 시행한 현장시험결과와 실내에서 수행한 물리·역학시험결과를 토대로 하여 결정하였다.

본 해석에서의 검토대상 단면은 기존 조사자료와 현장조사시 파악된 현황자료를 토대로 하여 가장 위험한 단면을 설정하였다.

석축 전면 지하철 터파기 공사시 배면 학교운동장에 석축면을 따라 인장균열이 발생하여 현재 석축 전면 앵커 시스템을 2단 설치한 구간으로서 석축 높이 약 5.5m의 단면을 해석단면으로 설정하여 단계별 굴착에 따른 석축구조물의 영향을 유한차분해석을 통해 검토하고자 하였다. 그리고 한계평형상태해석에 의한 사면안정해석 이전에 Mohr-Coulomb 모델을 이용한 지반의 응력-변형을 관계로부터 대상 사면의 안정성 평가를 개략적으로 수행하였으며, 석축 전면의 약 GL(-)23m까지의 지하철 터파기 공사시 석축 구조물에 미친 영향을 평가하고자 하였다.

지하철 터파기 공사의 해석은(H-Pile + 토류판, 토류벽 콘크리트, Strut, 일부구간 Rock Bolt)은 기 설계노선을 참조하여 단계별 굴착을 적용하였으며 GL(-)4.0m에 암층이 출현하므로 하중분담은 고려하지 않고 굴착 후 시보시스템을 설치하는 것으로 하여 해석을 수행하였다.

프로그램 적용물성치(Table 4 참조)에서 지반 물성치는 기 토질조사보고서와 설계도서, 실내 및 현장시험결과를 토대로 결정하였고, 이스앵커 입력물성치는 그라우드와 주변지반 및 그라우드와 철근과의 부착력이 중요한 파라미터로 설치지반(토사층, 암반층)에 따라 결정하였다.

이스앵키설치지반이 토사층일 경우 Rock Bolt의 S_b , K_b (한국지반공학회)는 이레 식을 이용하여 구하였다.

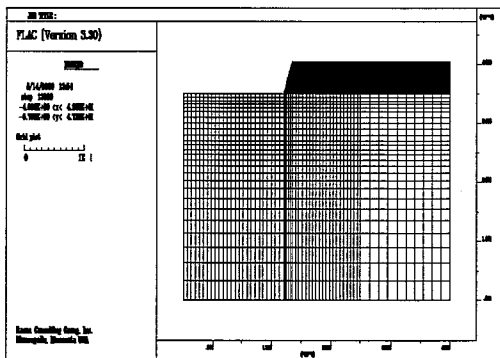


Fig. 1 FLAC 해석단면 Mesh

Table 4 프로그램 적용 물성치

대상지반물성치(B-2 기준)					
구분	단위중량 $\gamma(t/m^3)$	내부마찰각 $\phi(^{\circ})$	점착력 $C(t/m^2)$	지반 변형계수 $E(t/m^2)$	프와송비 ν
토사층	1.7	32	0.0	3,000	0.35
풍화암층	2.0	35	5.0	8,000	0.30
연암층	2.1	39	10.0	20,000	0.25

어스앵커 설치 지반의 입력물성치						
어스앵커 설치 지반	E		K_b (Pa)	S_b (N/m)	A (m^2)	비고
	(t/m^2)	(Pa)				
토사층	2.1	2.1×10^7	0.92×10^9	0.92×10^6	394×10^{-6}	PC 강관선 $\phi 12.7m$ m 4EA
풍화암층	2.1×10^7	2.1×10^{11}	9.01×10^9	2.46×10^6	394×10^{-6}	

어스앵커의 입력물성치				
구분	E (t/m^2)	A (m^2)	I (m^4)	비고
H-Pile	2.1×10^7	92.18×10^{-6}	9930×10^{-8}	II 250×250×9×14
Strut	2.1×10^7	110.8×10^{-6}	18800×10^{-8}	H-298×299×9×14

Rock Bolt의 입력물성치					
어스앵커 설치지반	E		K_b (Pa)	S_b (N/m)	A (m^2)
	(t/m^2)	(Pa)			
암층	2.1×10^7	2.1×10^{11}	9.01×10^9	2.46×10^6	5.0×10^{-4}

$$S_{bond} = (\text{Grouting의 주변길이}) \times (\sigma_m \cdot \tan \phi + c) \quad (1)$$

$$K_{bond} = \frac{S_{bond}}{(\text{Nail 전체길이 or Anchor 정착장}) \times \epsilon} \quad (2)$$

여기서, $\sigma_m = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2}$
 ϵ : 변형율 (Nail의 경우 0.15~0.30%
 Anchor의 경우 0.10~0.30% 본 해
 석에는 0.2% 적용)
 ϕ : 내부마찰각, c : 점착력

암층의 경우는(Flac Manual) 다음과 같다.

$$K_{bond} = \frac{2 \pi G_B}{10 \ln(1 + \frac{2t}{D})} \quad (3)$$

여기서, G_B : Grout 재의 전단탄성계수

D : 강재의 직경(22.4mm)

t : 원공어유경

$$\left(\frac{100 - 22.4}{2} \right) = 38.8mm = 3.88cm$$

$$S_{bond} = \pi(D + 2t) \tau_{peak} \quad (4)$$

여기서, τ_{peak} : Peak Shear Strength(= $\tau_i \times Q_B$)

τ_i : Grout와 암의 압축강도중 작은값
 의 1/2

Q_B : Grout와 암이 완전접착했을 때 1.0

부재 입력물성치는 지하철 가시설 설계도면을 참
 조하였으며, 석축 벽체의 압축강도는 비파괴 압축강
 도시험시 측정된 압축강도를 토대로 산정하였다.

3.2 앵커 해체시의 석축구조물 안정검토 (사면안정해석)

지하철 터파기 공사시 석축의 안정성확보를
 위한 보강공법으로서 적용한 앵커시스템 제거시
 의 안정검토를 위해 사면안정해석기법을 이용하
 여 안정성 해석을 수행하였다.

석축은 강도정수가 대단히 큰 비탈의 일부로 간주
 하여 활동에 대한 안정에 지향하도록 설계하는 것이
 더 합리적이며 안정검토 또한 석축의 실제 균열현상
 을 바탕으로 사면의 안정해석기법을 적용하는 것이
 바람직하므로 본 연구에서도 사면안정해석기법을 적
 용하여 석축의 안정검토를 수행하였다.

본 검토에서는 대상현장이 일반적인 절토사면
 이 아니라 석축을 강성이 큰 사면의 일부로 가정
 하고 사면안정해석을 수행하므로 집중강우시 지
 하수위가 GL(-)2.0m 까지 상승하는 것으로 하
 여, 가장 위험한 1개 단면(앵커 2단 설치 단면)
 에 대하여 다음과 같이 해석조건을 달리하여 안
 정해석을 수행하였다.

해석조건(건기시, 우기시)은 Table 5와 같다.

본 SLOPE/W에 의한 사면안정해석은 프로그램 특성상 석축 구조물 전면의 지하철 터파기 공사로 인하여 석축에 미치는 영향을 고려하지 못하는 단점이 있다. 지하철 터파기 공사로 인한 영향은 FDM 해석에 의해 평가될 수 있으며, 따라서 본 해석에 의한 사면 안정성 검토시에 평가된 안전율은 어느 정도 과대평가 할 수 있음에 주의하여야 한다.

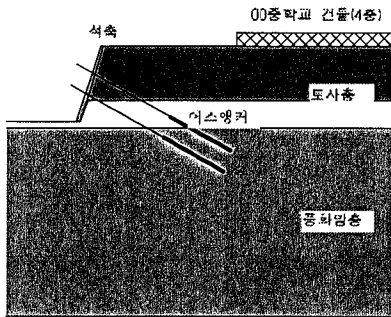


Fig. 2. 해석단면

Table 5 사면안정해석조건

해석조건
a) 댐커 2단 보강시 사면안정해석
b) 상단 앵커만 제거시의 사면안정해석
c) 하단 앵커만 제거시의 사면안정해석
d) 상·하단 앵커 동시 제거시의 사면안정해석

본 사면안정해석에서 적용한 지반물성치는 FDM 해석에서 이용한 지반물성치를 적용하였다. 그리고 석축을 강도정수가 대단히 큰 비탈의 일부로 간주하여 활동에 대한 안정성을 사면안정해석을 통해 검토하므로 석축 구조체에 대한 입력 물성치를 결정하여야 한다. 석축벽체의 붕괴에 있어서는 그 벽체를 이루는 콘크리트의 강도가 대단히 중요한 역할을 한다. 견뎌들 사이와 그 뒤쪽을 메우는 콘크리트는 보나 기둥과 같은 구조체로 사용되는 콘크리트와는 달리 골재의 선택이나 배합에 별로 관심을 기울이지 않는 것이 현상의 관습이다. 더욱이 주어진 벽체 단면을 제대로 시공하지 않고 공간을 남기는 경우가 있는데 이러한 부실공사는 석축벽체 붕괴의 가장 큰 원인이 되고

있다. 활동원이 석축벽체를 통과할 때에는 콘크리트의 전단강도에 의해 저항이 되므로 토괴의 활동에 대한 전단저항은 흙과 콘크리트의 전단강도로 인해 생긴 각 저항력을 합친 값이다. ACI 규정에 의하면 콘크리트의 극한 전단강도 S_c 는 다음 식으로 주어진다.

$$S_c = 0.53 \sqrt{f'_c} \quad (5)$$

여기서, S_c : 콘크리트의 극한전단강도

f'_c : 콘크리트의 28일 압축강도

일반적으로 현장에서 사용되는 빈배합 콘크리트의 압축강도는 120~180 kg/cm² 정도이나 비파괴 압축강도시험에 의하면 축전위치마다 상당히 큰 편차의 압축강도를 나타내는 것으로 조사되었고, 압축강도가 30kg/cm² 이하인 곳도 상당수 조사된 것으로 보아 석축 구조물의 벽체 강성이 균일하지 못할 뿐만 아니라 석축 시공시 상당히 빈배합의 콘크리트 물탈을 이용한 것으로 판단된다.

Table 6 사면안정해석시 적용물성치

적용물성치	
석축벽체 압축강도(kg/cm ²)	2.9
콘크리트 및 견뎌들 단위중량(t/m ³)	2.3

본 검토에서는 콘크리트의 압축강도를 30 kg/cm² 을 이용하여 석축벽체의 극한전단강도를 결정하였으며, 상기 식에 의하면 약 2.9 kg/cm²로서 이를 평균 전단강도로 적용하였다.

콘크리트와 견뎌들의 단위중량은 콘크리트의 경우 단위중량은 콘크리트를 구성하는 각 재료의 배합비율에 따라 약간 달라지나 공학적 목적으로 2.3 t/m³ 정도를 사용하는 것이 보통이다. 견뎌들의 단위중량은 석재에 따라 차이가 있으나 연질의 암석을 많이 사용하므로 콘크리트의 단위중량과 동일하다고 보고, 위의 값을 콘크리트와 견뎌들을 합친 평균단위중량으로 가정하여도 본 대상구간의 석축재료와 큰 차이가 없을 것으로 판단되어 2.3 t/m³을 적용하였다.

Table 7 절 · 성토시면의 최소안전율

구분	최소안전율	참조
절토	건기	$F_s > 1.5$ -NAVFAC-DM 7.1-P.325 하중이 오래 작용할 경우 -일본도로공단 (도로설계요령) -한국도로공사: 일축, 삼축압축 시험으로 강도를 구한 경우 (도로설계요령, 1976)
	우기	$F_s > 1.1 \sim 1.2$ -영국National Coal Board
성토	축조 기간중	$F_s \geq 1.2$ -일본토질공학회 -일반적인 구조물인 경우
	공요 개시후	$F_s \geq 1.3$ -한국도로공사

* 한국도로공사 기준

사면안정해석에 있어 최소 허용안전율의 선정이 중요한 해석조건이 된다. 허용안전율에 대한 설계기준은 지역과 발주처, 공사내용에 따라 상이하나, 대체로 1.1~1.5정도의 범위이다. 본 연구에서는 한국도로공사 기준을 참고로 하고 현장여건 및 구조물 중요도 등을 고려하여 건기시에는 안전율 1.5, 우기시에는 안전율 1.3을 기준으로 사면안정해석을 수행하였다.

(1) 앵커 해체시 석축구조물의 안정

SLOPE/W에 의한 안정해석결과, 앵커가 보강된 현 석축구조물은 건기시와 우기시의 해석조건 모두 안정한 것으로 나타났다. 이와 같은 해석 결과는 석축전면 지하철 터파기 공시시 석축에 미친 영향을 고려하지 않는 결과이며 사면안전율이 모두 3.0 이상이다. 그러나 앵커 제거시의 안정해석결과에 의하면, 상단만 또는 하단만 앵커 제거시의 경우 비교적 안정하나 상, 하단 앵커를 동시에 제거한 경우는 모두 불안정한 것으로 나타나 현재상태 앵커의 긴장력을 지속적으로 유지할 수 있는 적절한 보강대체가 필요한 것으로 판단된다.

3.3 해석결과

3.3.1 지하철 터파기 공사로 인한 석축구조물에 미치는 영향검토

본 검토에서는 Mohr-Coulomb 해석모델에 의하여 개략적인 사면안정해석을 수행하였으며, 석축전면의 지하철 터파기 공시시 단계별 굴착에 따른 석축구조물에 미친 영향을 공학적으로 평가하였다.

FLAC 프로그램에 의한 사면안정해석은 지반강도정수에 안전율 감소계수를 적용하여 일정비율 감소시켜 해석을 반복수행함으로써 파괴시의 지반강도정수와 원래지반의 강도정수를 비교평가함으로써 사면안전율을 결정하였다.

사면의 안전율은 활동면에 작용하는 전단응력과 흙의 평균전단강도의 비로써 정의되며 식 (6)과 같다.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} = \frac{c + \sigma \tan \phi}{c_d + \sigma \tan \phi_d} \quad (6)$$

사면안정해석시 안전율은 흙의 점착력에 대한 안전율과 내부마찰각에 대한 안전율로 분리하여 나타낼 수 있으므로 식 (7)이 된다.

$$F_s = F_c = F_\phi \quad (7)$$

따라서 안전율 감소계수(결과적으로 사면안전율과 같음)에 의한 지반강도정수의 변화량은 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$\phi_r = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \phi}{a}\right) \quad (8)$$

$$c_r = \frac{c}{a} \quad (9)$$

- 여기서, ϕ_r : 감소된 내부마찰각
- c_r : 감소된 점착력
- ϕ : 원지반의 내부마찰각
- c : 원지반의 점착력
- a : 안전율 감소계수

1) 석축전면의 지하철 굴착공사를 고려치 않은 경우 (앵커 2단 보강)에 대하여 안전율감소계수를 이용하여 해석을 반복수행한 결과 안전율이 2.0과 2.1 사이에서 파괴가 발생하는 것으로 평가되므로 본 해석단면에 대한 안전율은 2.0정도로 평가된다.

2) 지하철 터파기 공사를 고려치 않은 경우의 상단 앵커 제거시 안정해석 안전율 1.8정도로 평가되던 소성영역 분포는 석축배면 및 기초지반에 널리 분포하는 것으로 나타났다.

3) 지하철 터파기 공사를 고려치 않은 경우의 하단 앵커제거시 안정해석의 안전율은 약 1.9정도로 평가되며, 소성영역 분포는 석축배면 및 기초지반에 널리 분포하는 것으로 나타났다.

4) 지하철 터파기 공사를 고려치 않은 경우 상, 하단 앵커 제거시 석축배면 및 기초지반의 전 영역에 소성영역이 널리 분포하여 지반이 파괴되는 것으로 나타났다.

5) 석축 전면의 지하철 터파기 공사시 단계별 굴착에 따른 석축구조물에 미치는 영향을 파악하기 위해 각 Strut 설치지점 아래 0.5m 까지 굴착한 후 Strut를 설치하는 순으로 단계별 굴착해석을 수행하였다. 굴착완료후 소성영역 분포도에 의하면 석축배면 및 기초지반에 소성영역이 상당히 분포되어 있는 것으로 나타났으며 지반변형이 상당히 크게 발생하는 것으로 해석되었다. 따라서 약 20m 깊이의 지하철 터파기 공사로 인하여 석축구조물에 상당한 영향을 미친 것으로 판단된다.

3.3.2 앵커 해체시의 석축 안정검토

공사구간에서 터파기 공사시의 영향을 고려치 않은 SLOPE/W 프로그램에 의한 도사사면안정해석결과, 앵커가 보강된 현 석축구조물은 건기시와 우기시의 해석조건 모두 안정한 것으로 나타났다. 앵커 제거시의 안정해석결과에 의하면, 상단 앵커 또는 하단 앵커 제거시의 경우 건기시와 우기시 모두 안정한 것으로 나타났다. 상단앵커를 제거한 경우보다는 하단앵커를 제거한 경우가 더 안정한 것으로 평가되었다.

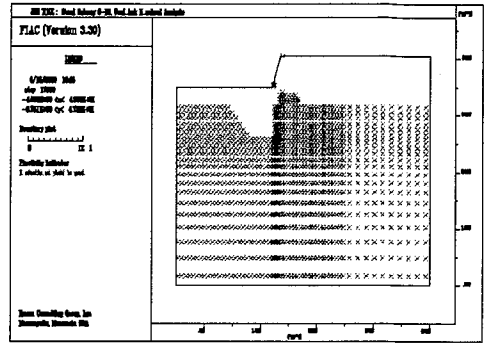


Fig. 3 앵커 2단 보강시 소성영역분포도 (안전율감소계수=1.0)

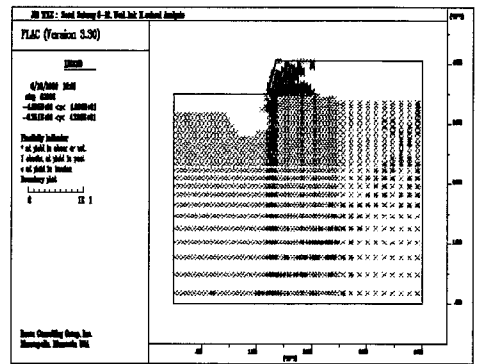


Fig. 4 앵커 2단 보강시 소성영역분포도 (안전율감소계수=2.1)

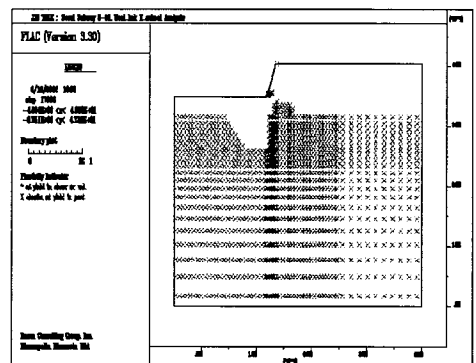


Fig. 5 상단앵커제거시 소성영역분포도 (안전율감소계수=1.0)

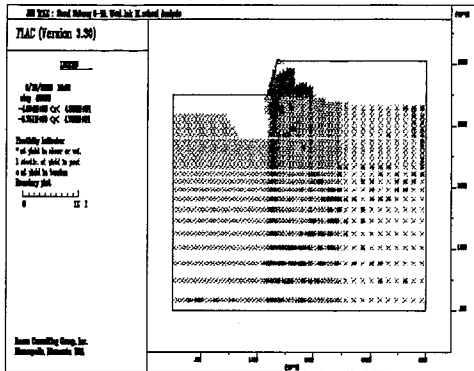


Fig. 6 상단앵커제거시 소성영역분포도
(안전율감소계수=1.8)

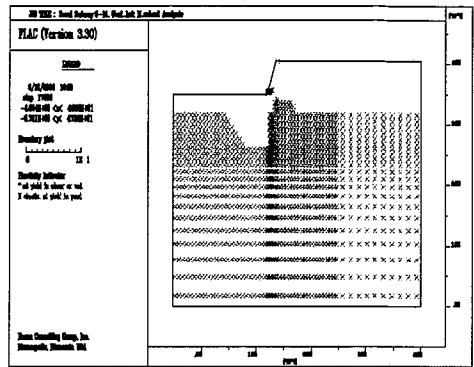


Fig. 7 하단앵커제거시 소성영역분포도
(안전율감소계수=1.0)

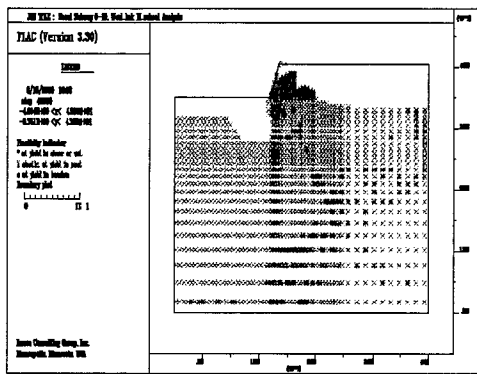


Fig. 8 하단앵커제거시 소성영역분포도
(안전율감소계수=1.9)

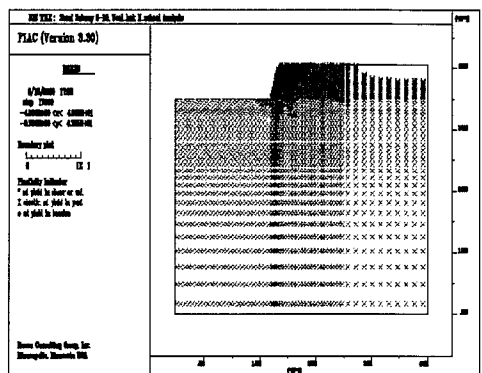
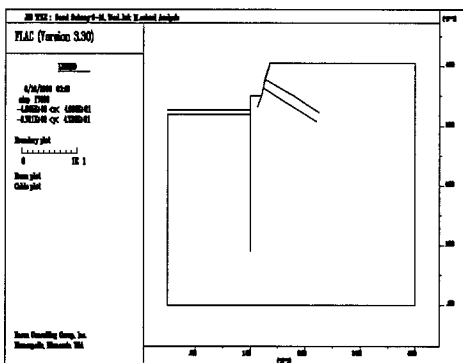
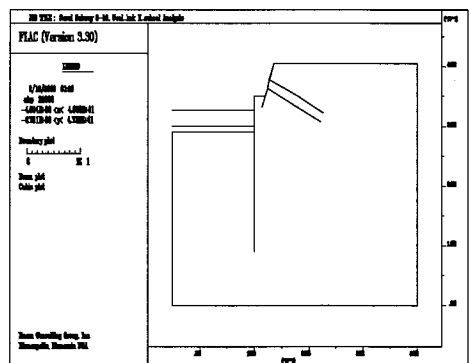


Fig. 9 상·하단앵커제거시 소성영역분포도

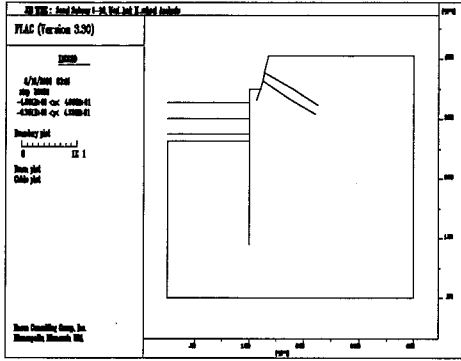


(a) 1단계 굴착

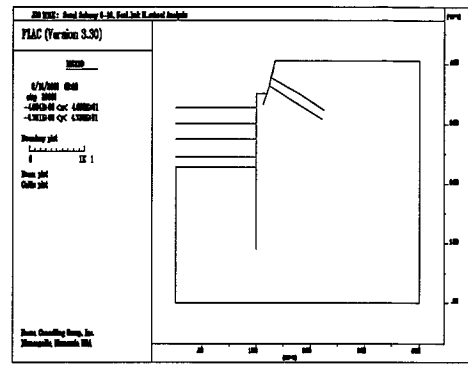


(b) 2단계 굴착

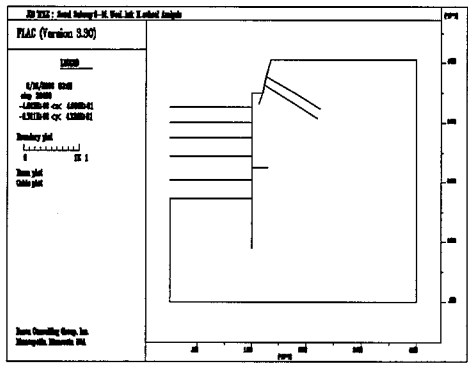
Fig. 10 굴착단계별 해석단면(계속)



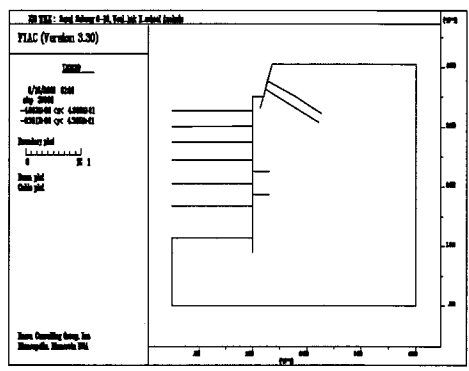
(c) 3단계 굴착



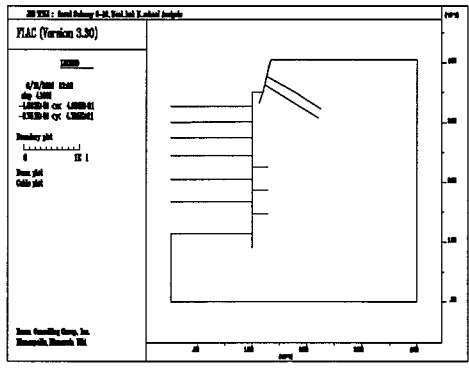
(d) 4단계 굴착



(e) 5단계 굴착



(f) 6단계 굴착



(g) 7단계 굴착

Fig. 10 굴착단계별 해석단면

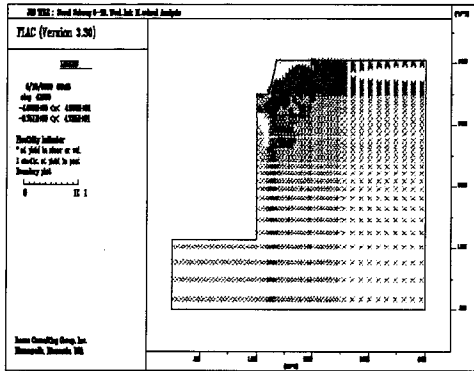


Fig. 11 굴착완료후 소성영역분포도

그러나 상, 하단 앵커를 동시에 모두 제거한 경우는 전기시와 유기시 모두 불안정한 것으로 나타났다. 상, 하단 앵커 제거시의 전기시 안전율은 1.326 으로서 소요 안전율을 1.3으로 하는 경우 안전한 것으로 평가될 수 있으나, 앞서 언급하였듯이 현장여건 및 구조물 중요도를 고려할 때, 즉 소요안전율 1.5에는 미치지 못하며, 특히 석축전면 지하철 터파기 공사시 석축에 미친 영향이 고려되지 않은 해석결과이므로 지하철 터파기 공사로 인한 소성영역 분포 및 지반이완현상과 석축배면 운동장지역의 작용 하중 증가를 고려할 경우 안전율은 상기 결과보다 작게 평가될 것이므로 상기 안전율 1.326은 과대평가 된 것으로 볼 수 있다.

Table 8 시면안정해석결과 해석조건별 안전율

해석조건	전기시	유기시	비고
앵커 2단 보강시	3.784	3.632	전기시 기준안전율 : 1.5
상단 앵커 제거시	1.838	1.734	
하단 앵커 제거시	3.019	2.667	유기시 기준안전율 : 1.3
상,하단 앵커 제거시	1.326	1.090	

4. 해석결과 비교분석 및 고찰

FLAC 프로그램 해석결과와 SLOPE/W 프로그램에 의한 해석결과를 비교하면, 두 프로그램에 의

한 시면 안정성 평가는 각 해석조건별로 일치하는 것으로 나타났다. 두 프로그램의 해석기법 차이에 의해 계산된 안전율의 정량적 차이는 나타났으나 전체 안정성 평가는 동일한 것으로 판단되었으며, 두 해석결과는 각각의 해석결과에 대한 보완 및 검증자료로서 향후 본 석축구조물의 안정성 확보를 위해서는 적절한 보강대책이 필요한 것으로 판단된다.

4.1 단계별 굴착에 의한 석축구조물 및 앵커구조체의 안정

유한차분법 프로그램에 의한 Mohr-Coulomb 해석모델에 의하여 유기시 조건의 시면안정해석을 수행한 후, 석축 전면의 지하철 터파기 공사시 단계별 굴착에 따른 석축구조물에 미친 영향을 공학적으로 평가하였다. 해석결과에 의하면, 석축전면의 지하철 터파기 공사상황을 고려하지 않을 경우, 석축 구조물은 전체적으로 안정한 것으로 평가되었다.

그리고 어스앵커에 작용하는 축력은 단계별 굴착이 진행됨에 따라 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, 본 현장의 계측관리결과에서도 초기치 확인후 시간경과에 따른 축력의 차이가 없는 것으로 나타나 굴착으로 인한 앵커구조체에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다. 석축 구조물 배면지반 일부 및 석축하부 기초지반에는 굴착 진행에 따라 소성영역 분포는 점차 확대되고 지반 변형이 상당히 크게 발생하는 것으로 해석되었으며 안전율은 상당히 감소하였고 석축구조물 및 배면 지반의 침하 및 변형이 상당히 진행된 것으로 분석되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 석축구조물에 시공된 어스앵커를 해체할 경우의 안정성을 검토하였으며 그 결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

- 1) 유한차분해석 프로그램에 의한 Mohr-Coulomb 해석모델에 의하여 유기시 조건의 시면안정해

석을 수행한 후, 석축 전면의 지하철 터파기 공시시 단계별 굴착에 따른 석축구조물에 미치는 영향을 공학적으로 평가하였다.

- 2) 석축전면의 지하철 터파기 공사상황을 고려하지 않을 경우, 석축 구조물은 전체적으로 안정한 것으로 평가되었고 이스앵커에 작용하는 축력은 단계별 굴착이 진행됨에 따라 큰 차이가 없는 것으로 나타나 굴착으로 인한 앵커 구조체에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다.
- 3) 석축 구조물 배면지반 일부 및 석축하부 기초지반에는 굴착 진행에 따라 소성영역 분포는 점차 확대되고 지반변형이 상당히 크게 발생하는 것으로 해석되었으며 안전율은 상당히 감소하였고 석축구조물 및 배면 지반의 침하 및 변형이 상당히 진행된 것으로 분석되었다.
- 4) 사면안정해석결과, 설치된 상, 하단 앵커를 동시에 모두 제거한 경우는 건기시와 우기시 모두 불안정한 것으로 나타나 상, 하단 앵커를 동시에 제거하는 것은 어려운 것으로 평가되어 이스앵커의 긴장력을 지속적으로 유지할 수 있는 대책이 필요한 것으로 판단된다.
- 5) 지하철 터파기 공사로 인해 이미 석축구조물 및 배면지반 일부구간에 소성영역이 발생하였거나 변형이 어느 정도 발생한 것으로 추정되고, 또한 현장여건을 고려한 보강공법의 시공성 및 경제성을 비교 평가할 때, 본 현상에 대한 대책공법은 설치되어 있는 앵커의 기능 유지가 필요한 것으로 판단된다.

향후 안정성 확보를 위한 이스앵커는 영구커의 개념으로 내구성이 확보되어야 하며 설치된 앵커가 영구 앵커의 기능이 미흡한 경우에는 기존의 앵커를 보완하거나 재설치가 필요한 것으로 평가되었다.

참 고 문 헌

1. 천병식(1995), 이천여자정보공업고등학교 석축옹벽·배후 사면 붕괴사고 원인규명 및 대책조사 연구 보고서, 연구보고서, 한양대학교 부설 건설연구소
2. 천병식(1998), 상월-공주간 도로확장 및 포장공사에 따른 절토사면의 안정성 연구보고서, 연구보고서, 한양대학교 부설 건설연구소
3. 천병식(1997), 남양주시 정성큰마을아파트1단지 보강 토옹벽 안전신단 연구 보고서, 연구보고서, 한양대학교 부설 건설연구소
4. 천병식(1996), 서울 동일여중고 주변 시흥 2지구 계개 반 아파트 공사장내 2호 옹벽의 안전검토 및 배면 APT 건물에 옹벽의 안전에 미치는 영향 연구 보고서, 연구보고서, 한양대학교 부설 건설연구소
5. 성남시 수정구청(1998), 우남로상 도로 및 석축시설물 정밀안전진단보고서
6. 한국조안전진단주식회사(2000), 정밀안전진단보고서[서울 안산초등학교 석축]
7. 김상규(1974), 원호활동법에 의한 석축의 안정해석, 대한토목학회, 제22권 제1호, pp.83-97
8. FLAC Version 3.3, Itasca Consulting Group, Inc
9. SLOPE/W Ver.4, GEO-SLOPE International Ltd.

(접수일자 : 2000년 11월 14일)