

## PAP옹벽에서 역해석을 이용한 사면보강 사례 연구

김장득\*<sup>1</sup> · 김용하<sup>2</sup>

<sup>1</sup>삼성물산 건설부문, <sup>2</sup>(주) 신진지.큐.씨

### A Case Study on Reinforcement of Slope in PAP Retaining Wall using Back Analysis

Jang Deuk Kim\*<sup>1</sup> and Yong Ha Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samsung C&T Corporation, <sup>2</sup>Sun Jin Good Quality Control CO.,LTD

경주-감포간 국도건설공사 중 양북터널의 종점부측은 산악지형으로 도로가 산지의 사면으로 통과하기 때문에 대절토 구간으로 이루어져 있다. 이 구간에 사면안정공법으로 PAP옹벽을 설치하였다. 옹벽을 설치한 후 6개월 정도가 지나면서 부터 PAP옹벽의 앵커체 일부가 파단되었다. 즉시 계측기를 추가 배치하고 응급조치를 한 다음 지금까지의 계측기록으로 역해석을 실시하였다. 동시에 앵커체의 정착부를 확인하기 위한 지층조사와 앵커체의 이상여부를 확인하는 인장시험을 실시하였다. 역해석 결과 당초 설계에 적용한 토질정수의 90%를 적용함이 타당한 것으로 나타났다. 이를 근거로 재설계를 시행하였으며, 재설계의 결과는 당초 허용응력 306 kN이던 앵커체를 591 kN 및 784 kN의 앵커체로 교체하고, 정착부의 위치를 당초 11.0 m에서 23.0 m를 증가시켰다. 앵커체를 교체한 후 약 5개월 정도가 지난 지금까지의 계측 결과는 안정된 상태를 보여주고 있다. 이 사례는 대형사고로 이어질 수 있었던 사례를 신속하고 정확한 조치로 사면을 안정화시킨 사례이다.

**주요어** : 앵커, 역해석, 사면안정공법, PAP옹벽

The endpoint of the Yangbuk tunnel constructed at the national road between Gyeongju and Gampo is composed of massive cutting because the road is driven through the sides of mountain. PAP(Prestressed Anchor and PC Panel) retaining wall as a slope stability method was established over this section. Part of the anchor in PAP wall became broken after six months. We performed inverse analysis through its measurements obtained until that time. An geological investigation to confirm the condition of ground layering and the attraction force test to find as to whether some errors might be present in the anchor were made. According to the back analysis, it was turned out that the value with soil parameter 90% that was applied to the original design was pertinent. In the redesign, the permissible stress in the anchor body was changed from 306 kN to 591 kN and 784 kN and the fixation position was increased from 11.0 m to 23.0 m. Nevertheless, five months have passed since the exchange of the anchor, the measurement results validate that stable state has been maintained. This research is considered a case that the immediate maintenance helps prevent the slope accidents.

**Key words** : anchor, back analysis, slope stability method, PAP retaining wall

## 서 언

경주-감포간 국도건설공사는 경주권의 내륙과 해안권인 감포읍을 연결하는 공사로 토함산 국립공원 지구 외측으로 4차로를 신설하는 도로이다. 이 구간은 불국사산맥을 관통하는 터널과 인근 산지를 연결하는 토공부로 나누어

져 있다(Fig. 1).

불국사 산맥은 해발 450~750 m 내외로 토함산(745 m), 동산령(630 m), 삼태봉(629 m)을 연결하는 산계로, 특히 절토부는 백악기에 퇴적된 하양군층의 퇴적암(흑색세일)으로, 제4기에 작용한 역단층운동의 영향으로 소규모의 단층과 절리가 많으며(노병돈, 2002), 심하게 파쇄되거나

\*Corresponding author: jdk8703@samsung.com

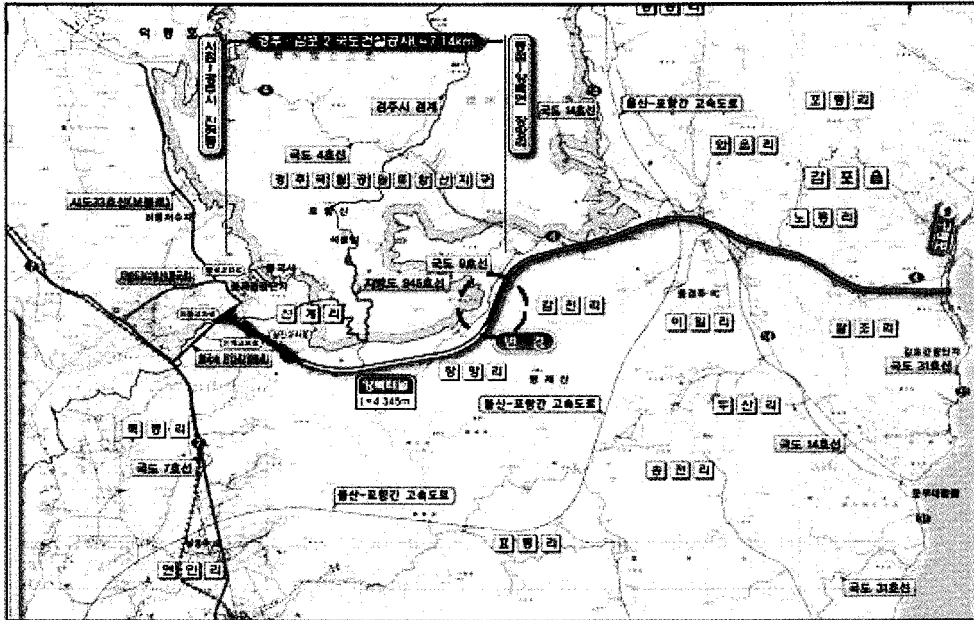


Fig. 1. Location map of study area.

심층 풍화를 받은 상태에 있다. 이 중 터널의 종점부는 산악지형으로 도로가 산지의 측면으로 계획되어 있어 도로 설치 시 대절토의 사면이 형성된다. 이 사면부는 심하게 풍화를 받은 셰일층으로 이루어져 있다.

**사면보강**

**사면의 안정성 검토**

본 공사구간의 터널 종점 부근인 Sta. 7+300 지점의 단면은 중심선의 지반고가 EL.184.57, 계획고가 EL.162.56 이고, 사면길이가 약 50 m 정도이다. 이 구간은 대절토 구간으로서 사면의 안정대책을 실시하기로 하였다. 사면 상부층은 FRP보강 그라우팅을 실시하고, 하부층은 영구 앵커인 PAP 공법을 Fig. 2와 같이 각각 실시하였다. 이때, 적용한 토질정수는 Table 1과 같고, 해석은 한계평형 해석과 유한요소 해석을 실시하였고, 해석 결과는 Table 2와 같다. 영구앵커의 제원은 Table 3과 같다.

**사면보강**

먼저 사면 상부에 산마루 측구를 실시하고, 경사면을 1:1의 기울기로 굴착하면서 Fig. 2와 같이 사면의 윗부분에는 FRP보강그라우팅을 실시하였다.

다음에 PAP(Prestressed Anchor and PC Panel) 영

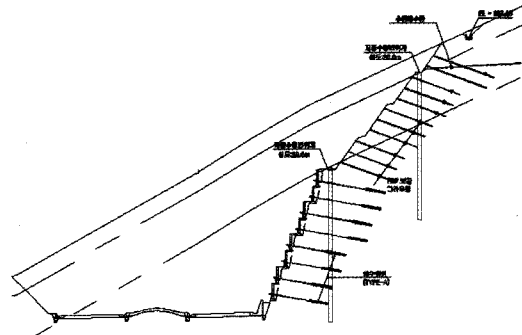


Fig. 2. Section of Sta. 7 + 300.

Table 1. Soil parameters used in slope stability analysis.

| 구분  | 변형계수 (MPa) | 단위중량 (kN/m <sup>3</sup> ) | 점착력 (kPa) | 내부마찰각 (°) | 포아송비 (ν) |
|-----|------------|---------------------------|-----------|-----------|----------|
| 풍화토 | 20         | 18.0                      | 25        | 28        | 0.33     |
| 풍화암 | 150        | 20.0                      | 30        | 33        | 0.30     |
| 연암  | 1,500      | 24.0                      | 300       | 35        | 0.30     |

구앵커를 상부에서 하부로 순차적으로 시공하였다. 작업 순서는 먼저 사면을 굴착하고 바타콘크리트를 친 뒤 하부 판넬을 설치하고 앵커체를 설치한 뒤, 판넬과 사면 사이를 콘크리트로 채우고 영구앵커를 300kN 까지 긴장하였다.

PAP 응벽은 1~6단까지 시공하고, 7~8단은 터널굴착

**Table 2.** Numerical analysis results of permanent anchor.

| 구분            | 돌출길이(m) |       | 정착장 (m) | 자유장 (m) | 앵커전장 (m) | 정착하중 (ton) | 천공장 (m) | 늘음량 (cm) |
|---------------|---------|-------|---------|---------|----------|------------|---------|----------|
|               | 여유장     | 구조물두께 |         |         |          |            |         |          |
| Type-A (1~4단) | 0.15    | 0.80  | 3.00    | 5.85    | 9.00     | 30.0       | 8.55    | 5.13     |
| Type-A (5~8단) | 0.15    | 0.80  | 3.00    | 7.85    | 11.0     | 30.0       | 11.25   | 6.27     |

**Table 3.** Physical and mechanical properties of permanent anchor.

| 앵커 종류               | F50TA   | F100TA  | F130TA  |
|---------------------|---|---|---|
| PC 강연선              | φ8.1 × 7 EA   | φ11.1 × 7 EA  | φ12.7 × 7 EA  |
| 극한하중( $\tau_{pu}$ ) | 510 kN  | 985 kN  | 1,306 kN  |
| 항복하중( $\tau_{py}$ ) | 447 kN  | 842 kN  | 1,113 kN  |
| 허용하중( $\tau_a$ )    | $0.6^2 \tau_{pu} = 306 \text{ kN}$<br>$0.75^2 \tau_{py} = 335 \text{ kN}$ | $0.6^2 \tau_{pu} = 591 \text{ kN}$<br>$0.75^2 \tau_{py} = 631 \text{ kN}$ | $0.6^2 \tau_{pu} = 784 \text{ kN}$<br>$0.75^2 \tau_{py} = 835 \text{ kN}$ |

공사의 버력처리장 때문에 추후 시공하기로 하였다. FRP와 PAP앵커를 시공한 전경은 Fig. 3과 같다.

계측기는 지중경사계 2개소와 지하수위계 2개소 및 지표면위 측정용 타겟 7개소를 설치하고 계측을 시행하였다.

### 영구앵커체 파단

#### 앵커체 설치

영구앵커체는 허용하중 306 kN인 F50TA 앵커체를 설치하였다. 앵커체의 설치시기는 1~2단은 2007년 11월, 3~4단은 2007년 12월, 6단은 2007년 12월, 5단은 2008년 5월에 각각 인장하였다.

#### 앵커체의 파단

터널 버력을 외부로 반출하는 작업 중 2008년 7월 4일 4-16번(좌측 3번째) 앵커가 파단되었다. 즉시, 앵커체의 인장력을 점검한 결과, 최고 450 kN 정도의 인장력이

작용하였고 그 중 하중이 가장 크게 작용한 부위가 파단된 것으로 판단되었다. 파단된 주위의 앵커체는 인장력을 300 kN으로 낮추고 대표위치의 앵커체 10개소에 하중계(load cell)을 설치하고 PAP옹벽 18개소에 광변위타겟을 부착하고 계측을 시행하였다.

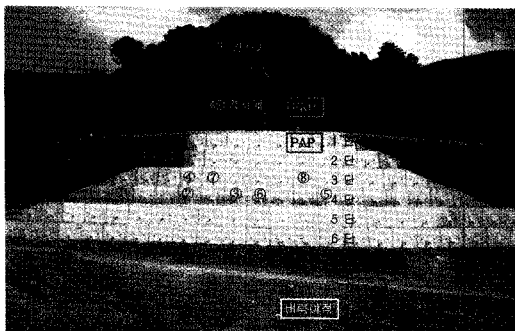
9월 23일에는 두번째의 앵커체가 파단되었고, 이어서 10월 2일까지 8개의 앵커체가 순차적으로 파단되었다.

### 사면 계측 결과

#### PAP 앵커체의 인장력

설치 시 300 kN 정도였던 앵커체의 인장력이 2~4단에서는 350~450 kN으로 나타났고, 1단과 4~5단은 당초 대로 300 kN 정도였다.

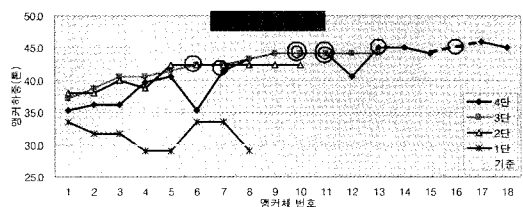
앵커의 파단은 인장력이 크게 작용한 3~4단의 450 kN 부근에 있는 앵커체에서 발생하였다. Fig. 4는 앵커체별 작용하중을 보여주고 있고 ○부분은 파단된 앵커체를 표시하고 있다.



**Fig. 3.** Establishment view of FRP and PAP.

#### 경사계

2007년 12월 5~6단 굴착 시 경사계가 굴착방향으로



**Fig. 4.** Variation of load in each PAP anchor.

변위하였고, 2008년 9월에 변위가 증가하고 있다. 여기서 PAP 앵커체에 미치는 영향은 4단에 설치한 경사계로서 9월에는 변위속도가 증가하고 있다. 10월 2일까지의 최대변위량은 4단 경사계가 A방향 66.63 mm, B방향 37.84 mm 이다. 경사계의 최대변위량은 Fig. 5와 같다.

**하중계**

하중계의 초기값이 290~350 kN으로 차이가 나는 것은 하중계를 설치할 때에 인장기로 당겨서 앵커체를 고정하는 과정에서 인장기를 정밀하게 설치하기 어려웠기 때문이다. 그래프에서 9월 23일부터 하중이 증가되기 시작하여 시간이 경과하면서 점차 변위속도가 증가하는 것으로 나타났다. 하중계의 변위량은 Fig. 6과 같다.

**광변위 타겟**

PAP 옹벽에 설치한 광변위타겟중 대표적인 것만 표시하였다. 그래프에서 타겟설치 후 9월 18일까지는 변화가 적다가 9월 23일부터 급격히 변화하기 시작하였다. 이는 경사계 및 하중계와 변위시기가 일치하고 있다. 광변위 타겟의 최대변위량은 Fig. 7과 같다.

**보강작업**

**PAP 앵커체 파단부위의 긴급 복구**

PAP 앵커체는 당초 설계시 F50TA(= 306 kN)를 적용하였으나 실제 현장에 설치하여 계측한 결과 400 kN 이상의 하중이 작용하였고, 일부는 극한강도를 넘어서 파단 되었으므로 F100TA(= 591 kN)로 교체하기로 하였다. 경사계의 변위도 현재 시공된 PAP 앵커의 정착부 부근에서 발생하므로 정착부의 위치를 안정된 지반에 정착시키기 위하여 앵커길이도 증가시키기로 하였다.

우선 F50TA(l = 11.0 m)를 F100TA(l = 23.0 m)로 교체하여 파단된 부분을 재시공하면서, 동시에 안정성을 검토하여 추가 보강 범위를 결정하기로 하였다.

**사면 안정의 재해석**

현장에서 검토된 계측결과 및 지층상태를 반영하여 역

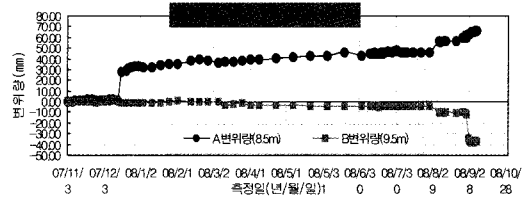


Fig. 5. Real time displacement on max. displacement of tiltmeter in the slope.

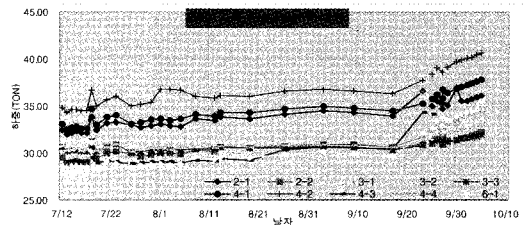


Fig. 6. Real time variation of load cell in PAP anchor.

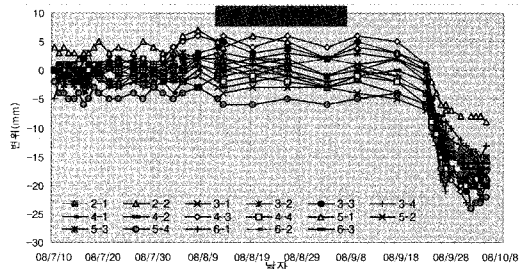


Fig. 7. Real time variation of optical displacement target in PAP anchor.

해석을 한 결과 지반의 물성치는 Table 4와 같고, 이를 바탕으로 사면을 재해석한 결과 비탈면의 안정성은 Table 5와 같고, 수치해석 결과는 안전율이 긴기 시와 우기 시 모두 안정한 것으로 나타났다. 앵커체의 길이는 지층조사 결과에 따라 23.0m로 하였다.

**보링 및 앵커체 인장시험**

사면의 지층구조를 확인하기 위하여 사면 위에서 보링을 시행하여 앵커체의 정착위치를 결정하였고, 앵커체의 인장시험을 통하여 설계인장력을 확인하였다. 인장시험 결과는 Table 3에서 제시한 항복하중과 극한하중에 이상이 없었다.

Table 4. Soil parameters for numerical analysis.

| 구분  | 변형계수 (MPa) | 단위중량 (kN/m <sup>3</sup> ) | 점착력 (kPa) | 내부마찰각 (°) | 포아송비 (u) |
|-----|------------|---------------------------|-----------|-----------|----------|
| 풍화토 | 18         | 18.0                      | 22.5      | 28        | 0.33     |
| 풍화암 | 135        | 20.0                      | 27        | 33        | 0.30     |
| 연암  | 1,350      | 24.0                      | 270       | 35        | 0.30     |

Table 5. Results of stability analysis in slope.

| 구분       | 기 시공   |        |        |        |        |        | 시공 예정  |        |        |        |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | 계단식 앵커 |        |        |        |        | 격자 앵커  | 계단식 앵커 |        |        |        |
|          | 1단     | 2단     | 3단     | 4단     | 5단     | 6단     | 1단     | 2단     | 7단     | 8단     |
| 규격       | F50TA  | F100TA | F100TA | F100TA | F100TA | F100TA | F100TA | F100TA | F130TA | F130TA |
| 발생축력(kN) | 272.65 | 487.78 | 489.15 | 494.58 | 515.68 | 536.90 | 462.25 | 459.33 | 745.85 | 742.40 |
| 허용축력(kN) | 306    | 591    | 591    | 591    | 591    | 591    | 591    | 591    | 784    | 784    |
| 결과       | O.K    | O.K    | O.K    | O.K    | O.K    | O.K    | O.K    | O.K    | O.K    | O.K    |

사면의 보강

파단부위의 긴급보강공사와 동시에 시행한 재설계에서 보강내용이 Table 5와 같이 산출되었기에 설계내용대로 보강하였다. 보강내용은 현재 시공되어 있는 PAP 옹벽 상부에 2개단을 추가로 시공하고, 기시공되어 있는 PAP 1~2단 좌우측에 3개씩을 추가로 시공하며, 추가시공분은 격자블록 앵커를 시공 하였다. 이미 F50TA(l=11.0m)로 시공된 앵커체는 1단을 제외하고 F100TA(l=23.0m)로 교체하여 재시공 하였다. 추가 보강한 도면은 Fig. 8과 같다.

보강 후 계측 결과

PAP 옹벽의 앵커체를 보강하고 추가시공하는 과정에서 모든 계측자료는 수렴의 양상을 보였고, PAP 옹벽의 사면공사가 완료된 시점에서부터 현재까지 Fig. 9와 같이 모든 계측치가 안정된 모습을 보이고 있다.

결 언

1) 당초 사면의 상부는 FRP(CTC 2×2m, l=8~10m)로 보강하고, 하부는 PAP 옹벽(F50TA, l=9~11m)으로 설계되어 있었으나, PAP 6단 시공 후 앵커체 일부가

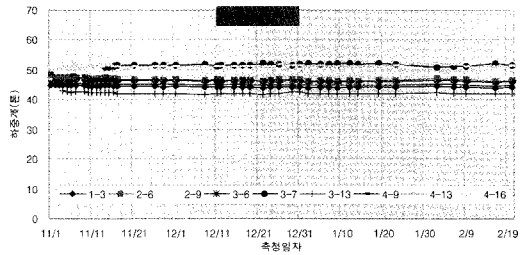


Fig. 9. Variation of load cell on PAP anchor after reinforcement.

초과된 하중으로 인해 파단되었다.

2) 사면을 역해석한 결과 지반 물성치가 당초보다 다소 감소하였기에 이를 적용하여 재해석 하였다. 또한, 보링을 시행하여 앵커체의 정착위치를 확인하였다.

3) PAP 옹벽을 재해석한 결과 옹벽상부에 2단, 좌우측에 각각 3개씩 추가로 보강하였고, 앵커의 축력은 당초 306 kN에서 591~745 kN으로 증가하였다.

4) 보강공사에 사용한 앵커체는 당초 F50TA (l=9~11 m)에서 2~6단까지는 F100TA(l=23 m)로 변경하여 시공하였고, 7~8단은 F130TA(l=19.5 m)로 설치할 예정이다

5) 계측결과와 PAP 앵커체가 파단되는 시기에는 변위

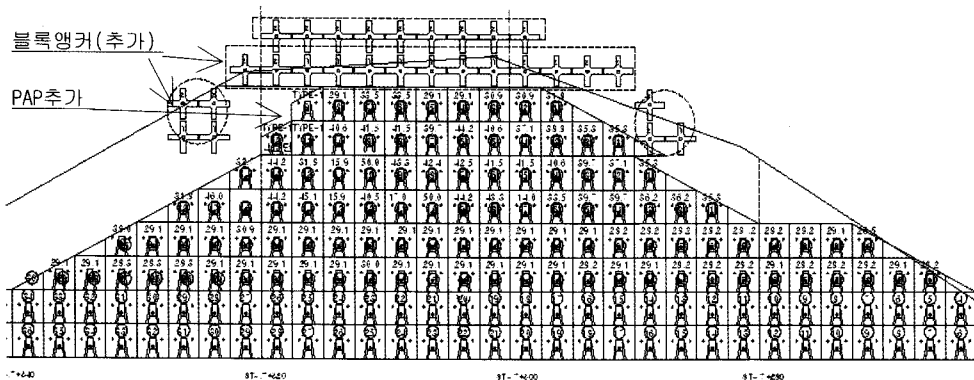


Fig. 8. Design map for reinforcement of slope.

량과 변위속도가 크게 변화했으나, 보강공사가 진행되는 과정에서 수렴의 양상을 보였고, 보강공사가 완료된 현지점에서는 모든 계측치가 안정된 모습을 보이고 있다.

### 참고문헌

- 노병돈, 2002, 경상분지 내 이압 및 세일 지역에서의 붕괴 사례, 2002년도 한국지반공학회 암반역학위원회 학술 세미나 논문집, 142-164.
- Chowdhury, R. N. and Grivas, D. A., 1982, Probabilistic model of progressive failure of slopes. ASCE J. Geot. Div., GT6, 803-819
- Leonards, G. A., 1979, Stability of slopes in soft clays. 6th Pan. Am. Conf. Soil Mech. Found. Engg., 1-50.
- Skempton, A. W., 1964, Long term stability of clay slopes. Geotechnique, 14, 77-101.
- Vanmarche, E. H., 1977, Reliability of earth slopes. ASCE J. Geot. Div. GT11, 1247-1265.
- Terzaghi, K., 1936, Stability of slopes of natural clay. Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg., 1, 161-165.

---

2009년 8월 13일 원고접수, 2009년 9월 17일 게재승인

### 김장득

삼성건설(주) 토목사업본부 경주-감포간도로현장  
 경북 경주시 외동읍 신계리 1045번지  
 Tel: 054-745-1905  
 FAX: 054-745-1907  
 E-mail: jdk8703@samsung.com

### 김용하

(주) 선진지. 큐. 씨  
 경북 경주시 외동읍 신계리 1045번지  
 Tel: 054-745-1905  
 FAX: 054-745-1907  
 E-mail: kl0218@naver.com.