

## 시험성토 계측결과를 이용한 연약지반 거동의 역해석

### Back Analysis of Soft Ground Behavior Using Measured Results for Test Loading

김태훈<sup>1)</sup>, Tae-Hoon Kim, 정창규<sup>2)</sup>, Chang-Kyu Jung, 황근배<sup>3)</sup>, Geun-Bae Hwang, 최용규<sup>4)</sup>, YongKyu Choi

<sup>1)</sup> 경성대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Kyung Sung Univ.

<sup>2)</sup> 부산광역시 건설본부 교량 1 과장, Manager, Construction Headquarter, Busan Metropolitan City

<sup>3)</sup> 경성대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Kyung Sung Univ.

<sup>4)</sup> 경성대학교 건설·환경공학부 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Kyung Sung Univ.

**개요(SYNOPSIS)** : There are many methods to accelerate for consolidation of the soft ground but, in this study, only preloading method was used to improve the soft ground. To measure the settlement of soft ground, surface-settlement plates were installed at several points.

To examine settlement behavior of soft ground, back analysis was done using the measured results. In the back analysis, consolidation parameter( $c_v$ ) were obtained and it was compared with test result for undisturbed sample.

**주요어(Key words)** : surface-settlement, settlement, back analysis, consolidation parameters,  $c_v$

## 1. 서론

연약지반의 압밀을 촉진시키기 위한 방법으로는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 연약지반의 압밀을 촉진시키기 위한 일반적인 개량공법 중의 하나인 프리로딩 공법만을 적용하여 대상지반의 침하량을 측정하였다. 대상지반의 침하량을 측정하기 위해서 지표침하판을 설치하여 성토 후 압밀의 진행과정을 관찰하였다. 프리로딩에 의한 연약지반의 거동으로는 압밀침하, 슬라이딩, 지반강도의 증가 등 여러 가지 변화가 있으나 본 연구에서는 압밀침하에 대한 내용만을 역해석하여 대상연약지반의 거동을 살펴보았다.

먼저 실내시험에서 구한 압밀특성치로 대상연약지반의 거동을 추정하였고, 계측을 통해서 얻은 실측치를 이용하여 역해석한 압밀특성치로 압밀침하량 및 압밀기간을 산정하여 대상 연약지반의 향후 거동을 예측하였다.

실계측을 통해 얻어진 지반침하량의 측정치를 이용하여 쌍곡선법과 호시노법 등으로 대상연약지반의 예상최종침하량을 산정하였고, 이러한 결과로부터 대상연약지반의 압밀특성치를 역해석하였다. 또한, 실내시험에 의한 압밀특성치와 실제 계측에 의한 실측치를 이용하여 역해석 된 압밀특성치를 비교하였다.

## 2. 시험성토 계속 결과 및 침하관리

### 2.1 시험성토 계획

위치 시험성토의 위치는 지질조사(동아지질, 1999) 결과를 참고하여 연약층의 두께가 가장 두꺼운 구간인 A-8 지역으로 선정하였고, 면적이 25m x 52.5m이고, 높이가 약 5.0m인 성토를 실시하였다.

### 2.2 침하량 측정 결과

본 현장에 설치된 지표침하계는 총 6개소로서 설치 위치는 파쇄구간에 SS-1~3 그리고 비파쇄구간에 SS-4~6이 각각 설치되었다. 계측기간 동안의 경과 기간에 따른 침하량을 각 설치구역별로 그림 1에 도시하였다. 또한, 각 구역별로 측정된 경과시간에 따른 침하의 추이를 그림 2에 도시하였다.

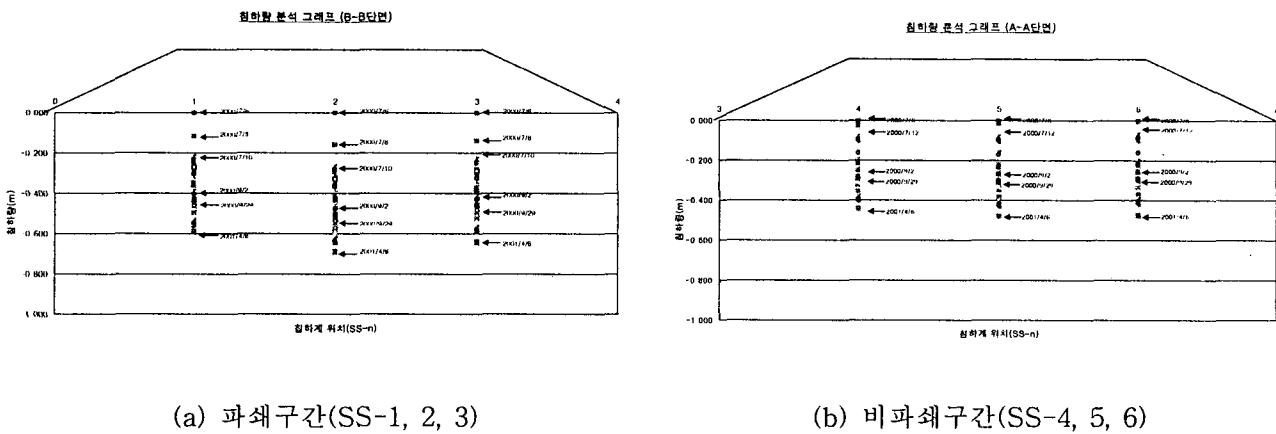


그림 1. 구역별로 측정된 침하량

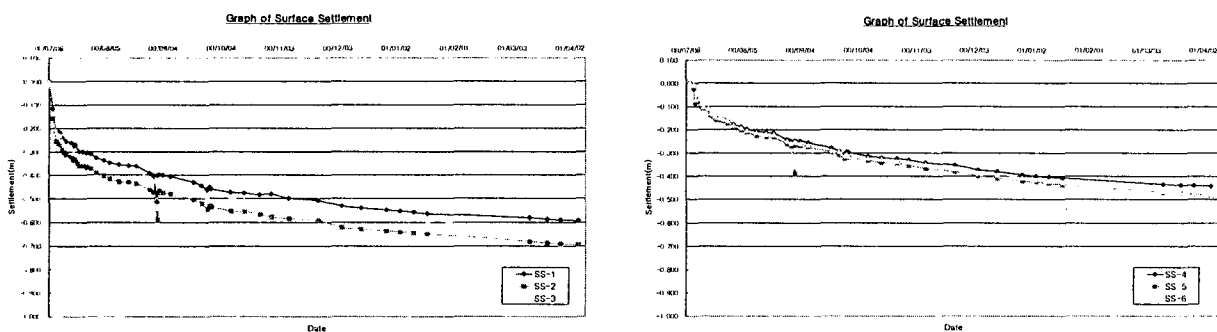


그림 2. 경과 시간에 따른 침하의 추이

2000년 7월 초 초기치 측정 이후, 2001년 4월 6일까지의 비파쇄지역에서는 50cm 이내 그리고 파쇄지역에서는 70cm 이내의 침하량이 발생되었다. 콘크리트 포장면을 파쇄한 단면에서 큰 침하량을 보였다.

시간의 흐름에 따라 침하 양상이 점점 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 파쇄지역의 경우 측정초기에 약 20cm의 침하량이 나타났는데, 이 변위는 하중제하 직후에 발생된 지반의 탄성침하량으로 추정하였으나 성토작업중 중장비의 충격 및 진동으로 인한 지표침하봉 자체의 변위일 가능성도 완전히 배제할 수는 없다고 판단되었다.

### 2.3 침하관리 방법의 개요

연약지반상에 구조물을 시공할 경우 시공중 및 시공후에 침하를 실측하여 작성된 침하 - 시간곡선(그림 3)을 설계시 압밀 시험결과를 이용하여 추정된 침하 - 시간곡선과 비교하여 시공관리를 한다. 그러나, 실제의 측정결과가 압밀계산으로부터 구한 것과 완전히 일치하지 않으므로 압밀이론에 관계없이 실측침하 곡선에 적합한 곡선식을 도출하여 앞으로의 침하를 예측한다. 그 방법에는 쌍곡선법, 호시노법, 아사오카법, Terzaghi 방법, 편대수법(한국지반공학회지, 1996) 등 여러 가지 방법이 있으나 본 연구에서는 쌍곡선법과 호시노법을 이용하여 실측치에 의한 예상침하량을 결정하였다.

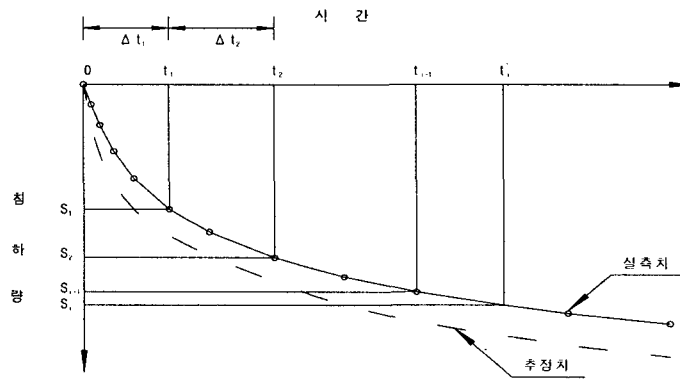


그림 3. 실측 침하량-시간곡선도

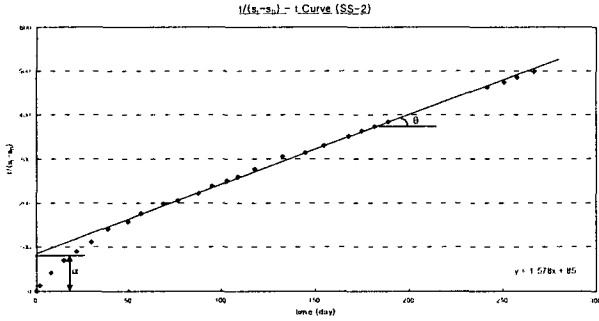
## 3. 침하량 분석 및 역해석 분석

### 3.1 침하량 예측방법을 이용한 최종침하량 분석

쌍곡선법과 호시노법에 의하여 압밀침하량을 분석하였으며, 각 구역에서 침하량이 가장 크게 발생한 구간인 SS-2(파쇄구간)과 SS-5(비파쇄구간)의 경우에 대하여 그림 4~5와 같이 침하량 분석을 실시하였다. 그리고 그림 6에서는 파쇄지역과 비파쇄지역에서 발생될 것으로 예상되는 최종침하량을 도시하였다. 측정결과를 토대로 각 예측방법에 의해 예측된 최종침하량과 현재 압밀도를 표 1에 나타내었다.

(1) 쌍곡선법에 의한 최종침하량 분석

그림 4와 같이 침하량 분석결과 SS-2 지역의 최종예상침하량은 79.2cm이고, SS-5의 최종예상침하량은 60.8cm로 판단된다.

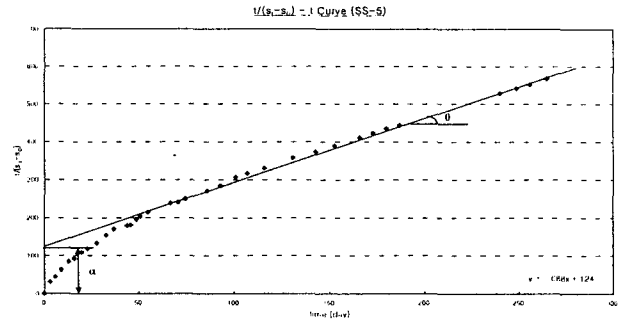


(a) SS-2(콘크리트 파쇄구간)

$$\alpha = 85, \quad \beta = \tan \theta = 1.578$$

$$S_{\infty} = S_i + \frac{1}{\beta} = 0.158 + \frac{1}{1.578} \cong 0.792 \text{ m}$$

$$S_{\infty} = S_i + \frac{1}{\beta} = 0.016 + \frac{1}{1.688} \cong 0.608 \text{ m}$$



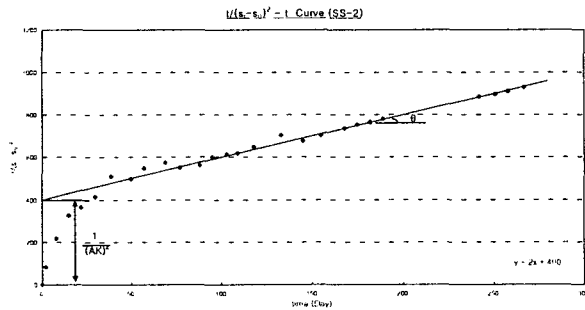
(b) SS-5(콘크리트 비파쇄구간)

$$\alpha = 124, \quad \beta = \tan \theta = 1.688$$

그림 4. 쌍곡선법에 의한 최종침하량 계산을 위한 상수결정

(2) 호시노법에 의한 최종침하량 분석

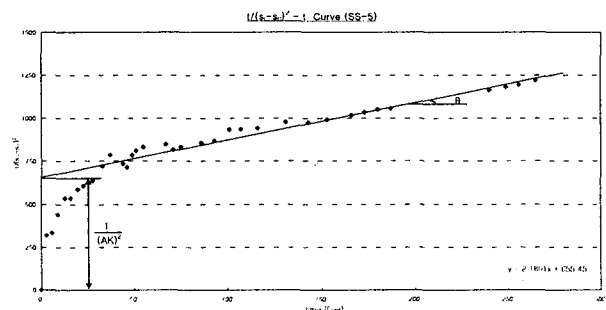
그림 4와 같이 침하량 분석결과 SS-2 지역의 최종예상침하량은 79.2cm이고, SS-5의 최종예상침하량은 60.8cm로 판단된다.



(a) SS-2(콘크리트 파쇄구간)

$$\frac{1}{(AK)^2} = 400, \quad \frac{1}{A^2} = \tan \theta = 2$$

$$S_{\infty} = S_i + A = 0.158 + \frac{1}{\sqrt{2}} \cong 0.865 \text{ m}$$

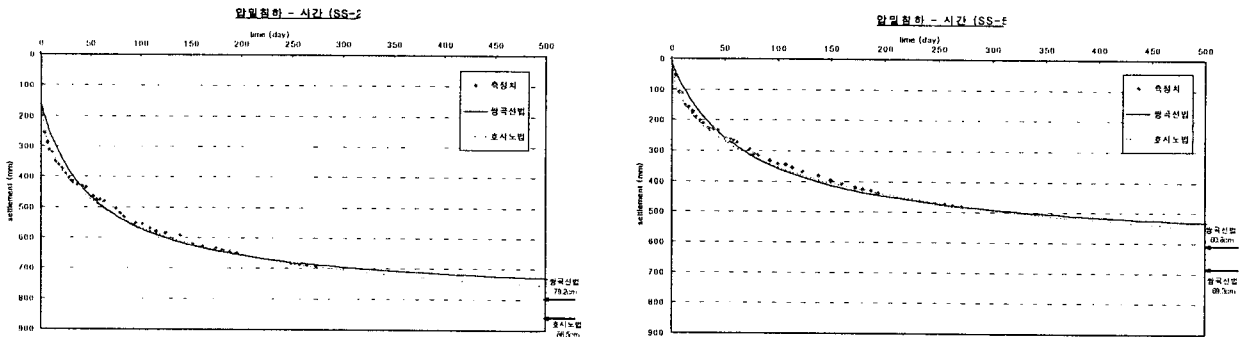


(b) SS-5(콘크리트 비파쇄구간)

$$\frac{1}{(AK)^2} = 655.45, \quad \frac{1}{A^2} = \tan \theta = 2.1801$$

$$S_{\infty} = S_i + A = 0.016 + \frac{1}{\sqrt{2.1801}} \approx 0.693 \text{ m}$$

그림 5. 호시노법에 의한 최종침하량 계산을 위한 상수결정  
(3) 침하량 예측방법들에 의한 압밀곡선의 예측



(a) SS-2(콘크리트 파쇄구간)

(b) SS-5(콘크리트 비파쇄구간)

그림 6. 예측방법들에 의한 압밀침하곡선의 예측

그림 6과 같이 침하량 예측방법들에 의한 압밀 침하-시간 곡선은 침하량 측정치와 잘 부합되고 있는 것으로 보이며, 특히 호시노법에 의한 침하곡선이 측정결과에 더 근접한 값을 보였다.

표 1. 현재 압밀도

구역	현재 침하량(cm)	최종예상침하량(cm)		평균압밀도(%)	
		쌍곡선법	호시노법	쌍곡선법	호시노법
ss-2	69.4	79.2	86.5	87.6	80.2
ss-5	48.2	60.8	69.3	79.3	69.6

### 3.2 연약지반 설계에 사용한 토질정수 분석

#### (1) 압밀특성치

지반조사보고서를 참고하여 압밀침하량 산정에 사용된 압밀특성치는 표 2와 같다.

표 2. 연약지층의 압밀특성치 산출

$c_v$ ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )		$C_c$	$P_c$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	$e_0$
$\log t$	$\sqrt{t}$			
$1.15 \times 10^{-3}$	$5.16 \times 10^{-3}$	0.588	1.092	1.578

### 3.3 최종 압밀침하량 산정

표 2와 같은 압밀 특성치를 이용하여 최종 압밀침하량을 압밀침하량 공식에 의해 산정하였다.

(1) 최종 압밀침하량 계산

$$v = 1.9 \text{ t/m}^2$$

압밀침하량 산정시 대상지반의 지층개요는 그림 7과 같다.

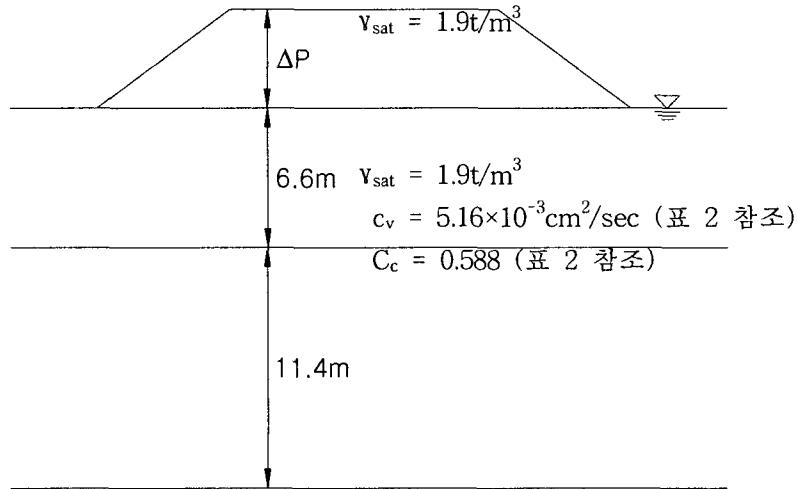


그림 7. 압밀침하량 계산을 위한 지층개요

파쇄지역 중앙부인 SS-2에 대하여 사용하중재하시(경우 1)와 프리로딩재하시(경우 2)의 최종압밀침하량을 다음과 같이 산정하였다.

1) 경우 1(사용중 하중을 상제한 경우)

여기서, 사용중 하중은 실제성토하중, 포장체하중, 차량하중의 총합이며 사용중 하중을 상제한 경우의 최종 압밀침하량  $S_{fl}$ 를 계산한 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{사용 중 하중의 환산성토고} &= 3.5\text{m(실제성토하중)} + 0.55\text{m(포장체하중)} + 0.68\text{m(차량하중)} \\ &= 4.73\text{m} \end{aligned}$$

$$p_0' = 0.9 \times 6.6 + 0.9 \times 5.7 = 11.07\text{t/m}^2$$

$$\Delta p_1' = 1.9 \times 4.73 = 8.987\text{t/m}^2$$

$$e_0 = 1.578 \text{ (표 2 참조)}$$

$$C_c = 0.588 \text{ (표 2 참조)}$$

$$S_{cl} = \frac{0.588}{1 + 1.578} \times 11.4 \times \log\left(\frac{11.07 + 8.987}{11.07}\right) = 67.1 \text{ cm}$$

$$S_s = 7.4 \text{ cm ((주)유신코퍼레이션, 1999)}$$

$$S_{fl} = 67.1 + 7.4 = 74.5 \text{ cm}$$

2) 경우 2(프리로딩 7.0m를 상제한 경우)

프리로딩 7.0m를 상제한 경우의 최종 압밀침하량  $S_{f2}$ 를 추정하면 다음과 같다.

$$\Delta p_2' = 1.9 \times 7.0 = 13.3 \text{t/m}^2$$

$$S_{c2} = \frac{0.588}{1 + 1.578} \times 11.4 \times \log\left(\frac{11.07 + 13.3}{11.07}\right) = 89.1 \text{cm}$$

$$S_s = 7.4 \text{cm} \text{ ((주)유신코퍼레이션, 1999)}$$

$$S_{f2} = 89.1 + 7.4 = 96.5 \text{cm}$$

경우 1과 2에 의해서 얻어진 최종 압밀침하량을 표 3에 나타내었다.

표 3. 상재하중에 따른 최종 압밀침하량

상재하중	최종 압밀침하량(계산값)
사용중 하중을 상제한 경우(경우 1)	74.5cm
프리로딩 7.0m를 상제한 경우(경우 2)	96.5cm

(2) 침하계측결과치를 이용한 압밀도분석

현재까지의 계측결과 파쇄구간인 SS-2의 경우, 최종압밀침하량은 86.5cm이고 실측된 압밀침하량은 69.4cm를 나타내고 있으므로, 약 80.2%의 평균압밀도를 나타내고 있었다.

### 3.4 압밀계수의 역해석 분석

(1) 압밀특성치에 대한 역해석

실측치를 이용한 역해석을 통하여 압밀시험결과에서 구한 압밀계수의 신뢰성을 분석하였다. 현장계측결과는 호시노법에 의해 예측된 최종침하량에 대해 현재 약 80%의 평균압밀도를 보이고 있으므로, 압밀시험에서 구한 압밀계수를 이용하여 평균압밀도가 80.0%에 도달할 때까지의 소요시간을 계산하였다.

$$c_v = 5.16 \times 10^{-3} \text{ (}\sqrt{t} \text{ 법, 표 3 참조)}$$

$$H = 5.7 \text{m (양면배수)}$$

$$T = 0.567 \text{ (U=80\%)}$$

$$t = \frac{T \cdot H^2}{c_v} = \frac{0.567 \times (5.7 \times 10^2)^2}{5.16 \times 10^{-3}} = 3.57 \times 10^7 \text{(sec)}$$

$$= 413 \text{ (일)}$$

여기서, 소요시간 계산에 사용된 압밀계수값은  $\sqrt{t}$  방법에 의해 큰 값으로 계산된 것을 사용하였는데, 계산된 압밀소요기간은 현재까지의 실제 계측기간과 거의 비슷하였다.

추정된 최종압밀침하량과 시험성도의 현장측정 자료를 이용하여 역해석을 수행하였으며 여기서, 압밀계수의 값을 역해석하여 추정하였다.

최종압밀침하량  $S_{fl} = 86.5 \text{ cm}$

측정된 침하량  $S_m = 69.4 \text{ cm}$

측정 경과기간  $t = 274 \text{ 일} = 23673600 \text{ 초}$

평균압밀도  $U = \frac{S_m}{S_{fl}} \times 100 = \frac{69.4}{86.5} \times 100 = 80.2$  (80%로 가정)

시간계수  $T_v = 0.567$  (압밀도 80% 일 때)

압밀계수  $c_v = \frac{T \times H^2}{t} = \frac{0.567 \times (5.7 \times 10^2)^2}{23673600}$   
 $= 7.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$

시험연약지반에서 구한 압밀계수(표 2)는 계측자료를 이용하여 역해석에 의해 구한 압밀계수와 거의 비슷한 값을 나타내었다.

#### 4. 결론

약 10m 정도의 연약점토층이 분포하는 지역에서 연약지반 개량공법 선정을 위해 시험성토를 실시하였다. 본 지역에서는 프리로딩공법만으로 연약지반을 개량하는 것으로 하였다. 시험성토 계측결과를 이용하여 압밀침하량을 분석하였으며 연약지반의 압밀특성치에 대한 역해석을 실시하였다. 시험연약지반에서 구한 압밀계수는 계측자료를 이용하여 역해석에 의해 구한 압밀계수와 거의 비슷한 값을 나타내었다.

시험성토의 비파쇄지역에서 지표면을 덮고 있는 약 30~50cm의 포장체는 지반의 초기탄성 침하를 다소 억제하는 효과를 나타내었으나 장기압밀 침하의 억제효과는 거의 없는 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. (주)유신코퍼레이션 (1999), “광안대로 요금소 설치공사 실시설계용역 종합보고서”
2. 동아지질 (1999), “광안대로 요금소 설치공사 실시설계용역 지질조사보고서”
3. 한국지반공학회 (1996), “‘연약지반’ 지반공학시리즈 6”