

論 文

## 해안 연약지반상의 교량 구조물 변위 억제

장 용 체\*

### Method of Reducing Lateral Displacement of Abutment Constructed on Marine Clay Deposits

*Y. C. Chang*

**Key Words** : 측방이동(Lateral movement), 측방유동(Lateral flow), 연약지반(Soft clay), 성토하중(Embankment load), 점착력(Cohesion), EPS성토공법(Expanded Polystyrene Construction method), 간극수압(Pore Water Pressure)

#### Abstract

Since 1970s, though many effective construction methods have been established to solve soft ground problems which had occurred in the off shore land reclamation and on shore highway construction, lateral movement of structure on soft ground is still a big problem to engineers.

In this study an applicability of criteria for determining the lateral movement of the structure in soft ground is examined and most measured data is obtained from 140 bridge abutments in highway construction sites. Characteristics and effectiveness of existing methods that used for deciding amount of lateral movements of abutment are analyzed using the obtained data. From the analysis, a proper method to prevent lateral movement is proposed. This method is confirmed on several case histories which were constructed on marine clay.

#### 1. 서 론

우리 인간은 과거부터 현재까지 산과 강을 끼고서 군락을 이루며 생활의 터전을 일구고 있다. 최근들어 산업 물동량의 증대와 더불어 국토의 개발은 무한히 계속되고 있으며, 이러한 개발을 위해

해안 연약지반상에 성토하중이 가해지면 지반내 응력증가로 측방으로의 유동압이 발생하며, 이로 인해 인접구조물에 편재하중을 가하게 된다. 연약지반상에 구축된 말뚝기초형식의 교대는 배면 성토의 편재하중에 의해 수평방향으로 하중을 받고 장기적으로 이동하게 된다. 이러한 측방유동

\* 정회원, 한국도로공사 도로연구소 지반연구실장 수석연구원

의 역학적 메커니즘 및 정량적인 파악은 매우 어려우며, 현재까지 대책공법의 확립을 위한 연구가 여러 학자에 의해 이루어지고 있는 실정이다.

본 연구에서는 연안의 공사현장에서 자주 문제시되는 교대 구조물의 측방이동에 대한 정의와 기존 판정식에 의한 교량교대의 현황을 파악하고, 이의 분석자료를 중심으로 기존의 측방이동 유무 판정식과 새로운 판정식의 적용성 검토 및 교대의 안정 대책방안에 대해 분석한다.

한편, 국내 연약지반상에 존재하는 교량구조물의 지질학적, 역학적 및 구조적 특성 등을 파악하고, 판정식의 계수값에 따른 교대변위의 유무를 분석 검토하였다. 또한, 교대 변위를 최소화하기 위하여 성토체 하중 대신에 토사중량의 약 1/80에 해당하는 EPS(Expanded Polystyrene)블럭을 적용한 현장 계측결과를 중심으로 교대 배면 지반과 구조물의 역학적 특성을 규명하고, 차후 교량 구조물의 안정성을 증대시킬 수 있는 방법으로 EPS 성토공법을 검토하였다.

## 2. 교대 측방이동

연약지반에 성토하중이 작용하면, 하부지반은 초기에 탄성거동에 의한 침하가 발생하고, 간극수압이 소산되기 전에 계속해서 단계하중을 증가시키면 과잉간극수압의 급증으로 강도가 저하되어 소성영역이 확대되고, 이에 따라 점차 소성평형상태로 변하면서 측방유동압이 발생하게 된다. 이와 같이 연약지반이 성토하중 등의 편재하중에 의해 수평방향으로 변형하는 현상을 측방유동(lateral flow)이라 하고, 측방유동으로 인해 시공 중 또는 시공 후에 구조물이 움직이는 현상을 측방이동(lateral movement)이라 한다.

이러한 측방유동압이 발생하면 지표면의 융기가 발생되어 극한상태에서는 제체의 활동과피를 유발시켜 파괴에 이르기도 한다. 이러한 현상은 1969년에 Peck에 의해 처음으로 거론되었으며,

1973년에 Tchebotarioff가 모스크바에서 열린 국제토질기초회의 발표과제로서 구조물에 작용하는 점성토지반의 측방토압을 취급하므로써 연약 하부지반 속의 말뚝문제를 거론하였다. 일본에서는 1973~1975년의 3년에 걸친 건설성 토목연구소의 연구과제를 중심으로 시작하여, 1976~1981년에 수행한 수도고속도로공단의 “연약지반상의 교대 기초에 관한 조사연구”등이 꾸준히 연구된바 있다. 캐나다에서는 캐나다 및 미국 내의 약 90개의 지지말뚝이 설치된 교대, 교각의 수평 및 수직변위 관계를 중심으로 판정기준을 정립하였다. 본 연구에서는 고속도로 건설에 있어 설계시 주로 검토하는 측방유동방법을 간략히 소개하고 이를 중심으로 적용성을 분석하고자 한다.

### 2.1 측방유동의 유무

#### 2.1.1 측방유동의 영향인자

연약지반상에 축조되는 교대의 측방이동에 영향을 미치는 인자는 1) 교대배면의 성토고, 2) 연약지반의 전단강도, 3) 연약지반의 심도, 4) 교대형식, 5) 기초의 형식 및 강성 등으로 알려져 있다. 측방유동의 유무판정시 주로 이용되는 방법은 Marche 법, German Recommendation법, Tchebotarioff법 등을 이용한 사면안정 해석, 하부지반의 비배수 전단강도에 의한 안정수 개념, 계측에 의한 변위의 경향에 의한 판정방법으로 나눌 수 있다<sup>11)</sup>.

#### 2.1.2 사면안정 해석결과 이용한 간접 추정방법

일본수도고속도로공단에서 제안한 원호활동에 대한 저항비와 압밀침하량에 의한 판정법으로 교대와 말뚝기초가 없는 것으로 가정하여 연약지반 구간을 통과하는 최소안전율에 의해 다음과 같은 기준을 제안하였다<sup>11)</sup>. ( $F_s$  : 원호활동 저항비,  $s$  : 압밀침하량)

$F_s \geq 1.6$  및  $s \leq 10$  cm : 측방유동에 대한 가능성 없음

1.2 ≤ Fs ≤ 1.6 및 10 cm ≤ s ≤ 50 cm : 측방유동에 대한 가능성이 있음, 대책공법요망  
 Fs < 1.2 및 s > 50 cm : 측방유동에 가능성이 큼, 대책공법 필요

2.1.3 교대측방이동 판정지수(IL)

일본건설성 토목연구소 기초연구실에서는 성토 안정계수를 여러가지 계수로 보정한 새로운 측방이동 판정지수에 의한 판정기준을 제안하였다. 즉, 안정계수 (C/γ)H를 측방이동에 주로 영향을 준다고 생각되는 3개의 요인으로 보정한 다음의 IL 값을 측방이동 판정지수로 하였다(Fig. 1 참조).

$$I_L = \mu_1 \times \mu_2 \times \mu_3 \times \frac{\gamma \cdot H}{C} \dots\dots\dots(1)$$

IL : 측방이동판정지수

μ1 = D/L ; 연약층비에 관계되는 보정계수

μ2 = Σb/B ; 기초체 저항에 관계되는 보정계수,

Σb : 교축방향 말뚝직경의 합

μ3 = D/A ; 연약층 두께 및 교대길이에 관계되는 보정계수

$\frac{\gamma \cdot H}{C}$  = 성토안정계수

IL ≥ 1.5 ; 움직임 있음,

IL < 1.5 ; 움직임 없음

2.1.4 측방유동지수(F)

일본 도로 공단은 연약지반상의 교대의 이동에 관한 교량교대의 조사연구 결과, 주요 영향을 미치는 요소로서 지반의 강도(점토의 일축압축강도), 연약지반의 두께, 그리고 성토높이를 들고 있으며, 이들 관계를 수식화하여 측방유동지수(F)를 구하고 있다<sup>3)</sup>.

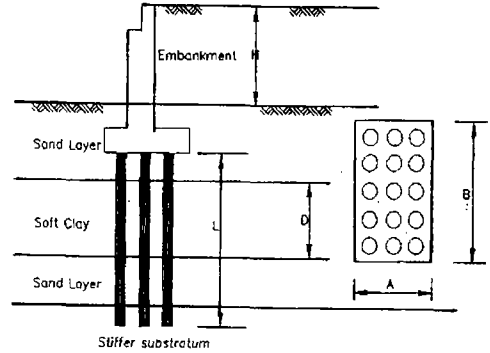


Fig. 1 Diagram of the index of lateral movement

$$F = \frac{C}{\gamma \cdot H} \cdot \frac{1}{D}, \dots\dots\dots(2)$$

F : 측방유동지수 ( \*10<sup>-2</sup>m<sup>-1</sup> )

$\frac{C}{\gamma H}$  : 안정수,

C : 연약층의 평균점착력(t/m<sup>2</sup>),

γ : 성토의 단위체적중량(t/m<sup>3</sup>)

H : 성토고 ( m ), D : 연약층 깊이 ( m )

F ≥ 4 : 측방유동의 우려없음,

F < 4 : 측방유동의 우려있음

2.1.5 캐나다법<sup>4)</sup>

캐나다에서는 캐나다 및 미국에 있는 약 90개의 교량기초 하부구조물에 대하여 성토하중에 따른 변형관계를 조사 분석하였다. 각 교량교대의 연직 변위 Sv와 수평변위 Sh의 관계에서 다음과 같은 판정기준을 수립하였다.

Sv < 50mm, Sh < 25mm : 유지관리상 문제 없음

50mm ≤ Sv ≤ 100mm : 변형 있음

25mm ≤ Sv ≤ 50mm : 변형 있음

Sv > 100mm, Sh > 50mm : 유지관리상 문제 있음

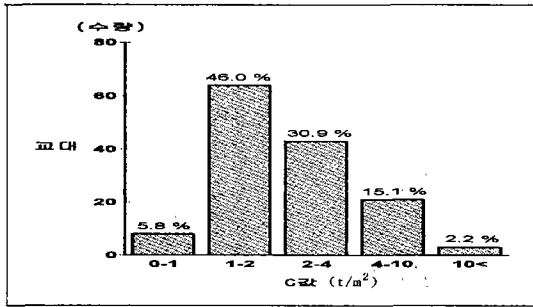


Fig. 2 Variation of cohesion of soft clay

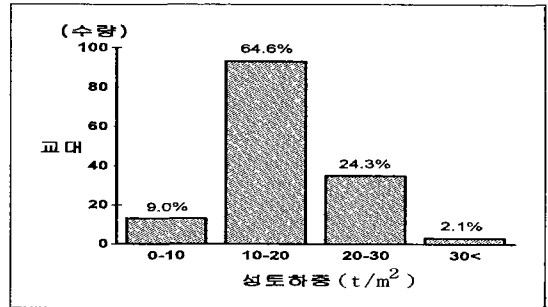


Fig. 3 Magnitudes of embankment loads

### 3. 측방이동판정식의 국내적용

#### 3.1 국내 연약지반상 고속도로의 현황

##### 3.1.1 연약지반의 점착력 분포

국내 연약지반의 점착력 분포는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 1~4 t/m<sup>2</sup> 범위 내에 매우 밀집된 형태를 보이고 있으며, 전체 자료의 약 77%를 차지하고 있다. 이는 실제 측방유동판정식을 사용할 수 있는 점착력의 값은 이 범위의 값에 밀집해 있다는 것을 의미한다.

##### 3.1.2 성토하중의 분포

성토하중의 분포를 그림으로 나타내면 다음의 Fig. 3과 같다. 성토하중의 분포는 10.0~30.0t/m<sup>2</sup>의 범위에서 88% 정도가 된다. 성토체의 단위중량을 2.0 t/m<sup>2</sup>으로 보면, 이 범위의 성토고는 대략 5~15 m 정도가 된다. 따라서, 측방유동식의 주 적용범위가 될 것이다. 앞으로 계속적인 고속도로의 건설시 성토고는 대부분 10m를 넘을 것이 예상되어 20.0~30.0t/m<sup>2</sup> 범위의 성토하중이 차지하는 비중이 더 높아지게 되어 측방유동판정식의 적용역시 이 범위에서 주의 깊게 적용되어야 할 것이다.

##### 3.1.3 연약지반의 깊이에 대한 분포

Fig. 4에서 알 수 있듯이 고속도로상의 연약지반을 살펴보면 연약층 심도가 깊은 곳은 40m 이상

이 되는 곳도 있으나, 5~20m 깊이가 약 76%를 차지해 주를 이루고 있다. 이는 우리나라 연약지반상의 교량교대의 안정성 확보를 위해 반드시 측방이동의 유무를 검토해야함을 일깨워주고 있다.

#### 3.2 측방이동 판정식의 분석

##### 3.2.1 C(연약지반의 점착력)값에 의한 F, II지수의 분석

점착력 값이 1tf/m<sup>2</sup>이하, 10tf/m<sup>2</sup>이상에서는 대체적으로 일치하나, 4 tf/m<sup>2</sup>~10tf/m<sup>2</sup>사이에서는 62%의 불일치를 보이고 있다. 연약지반의 점착력은 대부분 1~4 tf/m<sup>2</sup>인 점을 감안하면, F지수의 결과는 대상교대의 94%, I<sub>2</sub>지수는 79%가 측방이동의 가능성이 있는 것으로 나타났다. 점착력(C)값의 증가에 따라 두 지수 모두 측방이동의 가능성이 줄어드는 것을 알 수 있다(Fig. 5 참조).

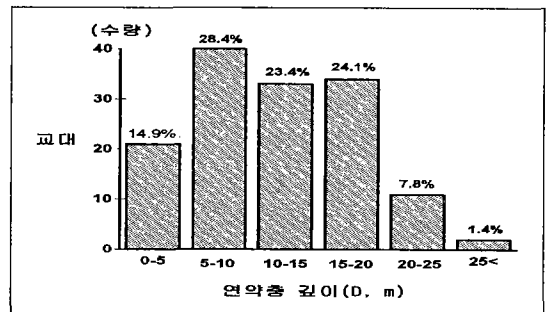
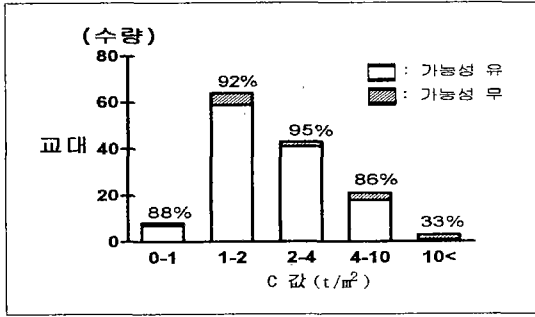
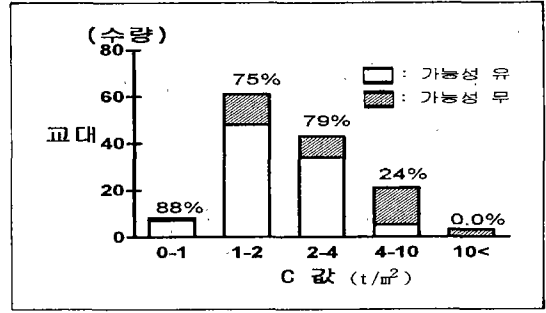


Fig. 4 Variation of thickness of soft clay



(a) Variation of F-index



(b) Variation of I<sub>L</sub>-index

Fig. 5 Variation of F and I<sub>L</sub>-index with cohesion

3.2.2 D(연약지반의 깊이)값에 의한 F, I<sub>L</sub>지수의 분석

연약층의 깊이 10m이상에서는 두지수의 일치도가 94% 정도이나, 10m미만인 경우에는 일치도가 56%로, 약 44%의 불일치를 나타낸다. 따라서, 연약층의 깊이가 10m이하인 지역에서는 이들 F, I<sub>L</sub> 지수를 사용하는데 주의가 요구된다. F지수는 전심도에 걸쳐 측방유동의 가능성이 큰 것으로 나타났으나, I<sub>L</sub> 지수는 연약층의 심도가 깊을수록 측방이동의 가능성이 큰 것으로 나타났다(Fig. 6 참조).

3.2.3 γH(성토하중)값에 의한 F, I<sub>L</sub>지수의 분석

성토하중의 단계를 0~10, 10~20, 20~30, 30이상의 4단계로 나누어 판정지수를 비교하였다. 성토체의 단위중량을 2.0tf/m<sup>3</sup>으로 보면, 고속도로 건설시 성토하중의 대부분 2단계와 3단계에 들며, F지수에 의하면 이동의 가능성이 있는 교대는 94%로 나타났고, I<sub>L</sub>지수는 67%가 이동의 가능성이 있는 것으로 나타나 서로 27%의 차이가 나타났다(Fig. 7 참조).

3.2.4 안정수에 의한 F, I<sub>L</sub>지수의 분석결과

측방유무를 판단하는 대표적인 판정지수(F, I<sub>L</sub>)를 연약지반상에 존재하는 국내 고속도로 현장에 적용한 결과 다음 Table. 1과 같다. 이 결과를 보면 대체로 두 판정지수 값이 이동가능 유무를 판정하지만, 상호간의 오차범위가 25%정도 나타나 판정식

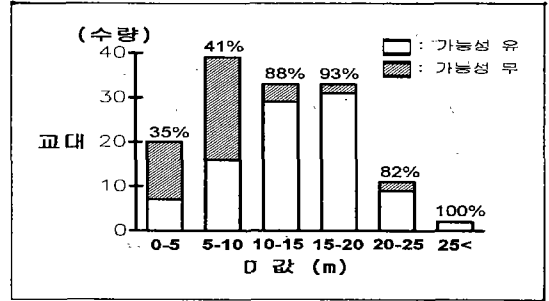
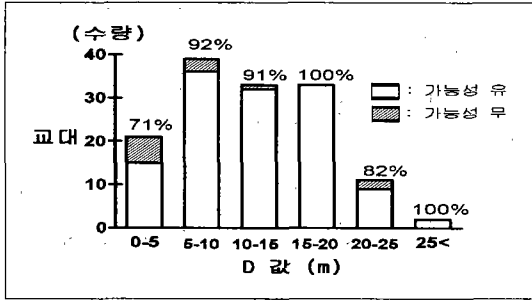
의 적용에 있어 매우 세심한 검토가 필요함을 알 수 있다.

Table. 1 Decision of possibility of lateral movement

판정 지수	대상 교대수	이동가능 (%)	이동없음 (%)	비고
측방유동지수(F)	140	128 (91.4)	12 (8.6)	25.0%의 불일치
교대측방이동지수(I <sub>L</sub> )	143	95 (66.4)	44 (33.6)	

고속도로상의 일반적인 점착력의 범위는 1 tf/m<sup>2</sup>~ 10tf/m<sup>2</sup>사이로 이 범위에서 두 지수(F, I<sub>L</sub>)의 일치 정도는 79%로 나타났다. 연약지반의 깊이에 따른 분류에서는 연약지반의 심도가 10m이하일 때, 44%의 불일치를 나타내고 있다. 연약지반에 건설된 교량교대 141개중에서 심도가 10m 미만인 지반에 건설되는 구조물은 61(43.3%)개인데, 여기서 두 지수의 일치 정도는 56% 정도이다. 따라서, 점착력 값을 이용할 경우 구조체의 안정성 검토는 세심한 주의가 필요하다.

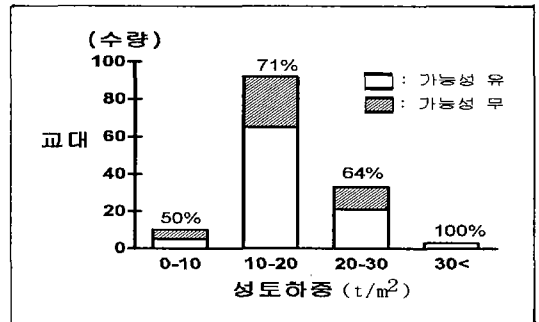
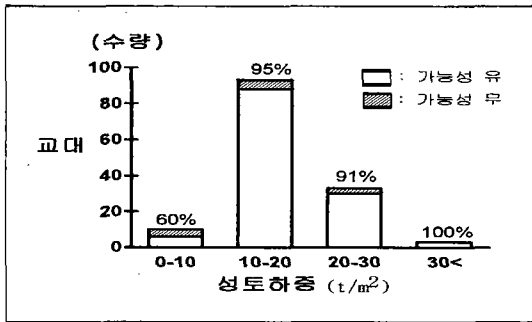
성토하중의 경우 대부분의 성토고는 5~15m 사이로 두지수의 일치 정도는 73%이다. 현재 국내실정은 대부분 여러가지 판정식을 이용하여 결과가 일치되는 쪽을 통하여 측방이동의 유무를 결정하고 있다. 그러나, 이상의 결과에서 보듯이 실제로 우리가 사용하는 범위에서 불일치도가 큰 쪽을 나타내고 있다. 따라서, 다음과 같이 점을 고려할 수 있다.



(a) Variation of F-index

(b) Variation of  $I_L$ -index

Fig. 6 Variation of F and  $I_L$ -index with thickness of soft clay



(a) Variation of F-index

(b) Variation of  $I_L$ -index

Fig. 7 Variation of F and  $I_L$ -index with embankment loads

F지수는 구조물의 강성 등의 영향이 거의 고려되지 않은 판정식으로 지반의 측방유동 유무를 나타내지만,  $I_L$ 지수는 교대의 측방이동을 판정하는 지수로 지반의 측방유동으로 발생하는 구조물의 변위 판정의 유무를 판단하기 때문에 F지수에서 측방유동의 가능성이 있는 것으로 판정되어도  $I_L$ 지수에서는 교대 이동의 가능성이 없는 것으로 판단될 수 있다. 실제로도 지반의 측방유동량에 비해 구조물의 변위는 상대적으로 작은 값으로 나타난다.

### 3.3 수정 $I_L$ 지수(MIL)

#### 3.3.1 수정 교대이동 판정지수(MIL)의 제안

현재 우리나라에서 자주 이용하고 있는 기존의 두 판정식을 국내 교량교대의 구조물에 적용하는

데 문제점은 다음과 같다.

#### (1) 측방유동지수(F)

교대구조물의 영향이 배제되어 있으며, 판정지수 기준에 대해 매우 민감하다. 2~4 사이에서 많은 자료가 몰려 있고 이 부분에서 오차발생의 주요인이 되고 있다.

#### (2) 교대측방이동 판정지수( $I_L$ )

- ▶ 연약층 심도에 대한 영향이 과대하게 적용된 것으로 판단된다. 연약층의 심도 항이  $\mu 1$  보정계수와  $\mu 3$  보정계수에 중복되어 들어가 있어 과대한 영향을 미치는 것으로 판단되며, 연약층의 심도가 10 m 이하인 경우 F 지수와 많은 오차가 발생한다. 이것은 앞에서 설명한 연약층의 심

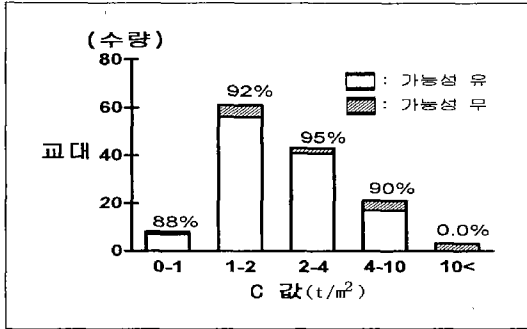


Fig. 8 Variation of MLL-index with cohesion

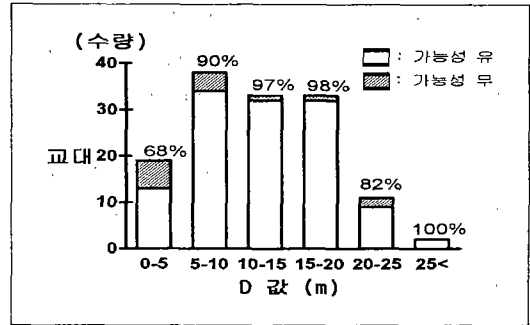


Fig. 9 Variation of MLL-index with thickness

도가 과도하게 적용된 결과일 것이다.

- ▶ 연약지반의 심도가 깊은 경우에는 연약층 깊이에 대한 보정계수( $\mu_1$ )가 1.0으로 수렴하여  $\mu_1$  보정계수가 무의미하다는 것을 말한다.

위와 같은 이유로 실제 사용할 때에는 대부분의 경우 두 경우 모두 같은 판정일 경우에만 적용을 하고 있는 실정이다. 따라서, 여기서는 ① 안정수의 영향을 인정, ② 교대구조물의 영향을 고려, ③ 판정기준을 결정해야하는 이런 여러 이유로 교대 측방이동 판정지수( $I_L$ )를 원형으로 하여 과도하게 계산된 요소를 수정하여 새로운 판정식을 다음과 같이 조심스럽게 제안하고자 한다.

$$M_{LL} = a \cdot \frac{\gamma \cdot h}{c} \dots\dots\dots (3)$$

$M_{LL}$  : 수정교대측방 이동판정수

$a$  : 측압을 받는 하부 면적에 대한 교대 면적비  
 (=  $(\Sigma b \cdot D) / (B \cdot A)$ )

$\frac{\gamma \cdot h}{c}$  = 성토안정계수

(3) 실제 계측치와 비교

이 수정 판정식이 어느 정도의 정확성을 갖는가를 알기 위해서  $M_{LL}$ 값 1.5를 기준으로 실제 계측치와 비교 검토하였다. 대상 교량교대중 48개 교대의 변위가 계측되었다. 이때, 교대의 허용변위

1.5 cm를 기준으로 하였을 때, 18개의 교대에서 측방이동이 발생하였다.

F지수의 경우 17개가 이동가능성이 있다고 판정하였고,  $I_L$ 지수는 14개를 판정하였다. 수정  $I_L$  지수는 16개가 이동가능성이 있다고 판정하였다. 따라서 본 연구에서는 연약층의 깊이에 비해 상대적으로 말뚝의 길이가 긴 경우는  $I_L$ 지수 값이 전자에 말한바와 같은 문제점이 있기 때문에  $M_{LL}$ 값을 적용하고자 하며 이때 이동유무의 판정은 1.5이하이면 안정한 것으로 추정한다.

3.3.2 안정수에 의한 수정 교대이동 판정지수 (MIL)의 분석

(1) C(연약지반의 점착력)값에 의한  $M_{LL}$ 지수의 분석  
 1 tf/m<sup>2</sup>~4tf/m<sup>2</sup>의 범위에서 90% 이상의 교대가 측방이동 가능성이 있는 것으로 나타났으며, 이는 우리나라 연약지반의 대부분의 강도가 이 범위에 속하기 때문에 교량구조물을 설치할 때 하부기초의 선단지지력은 물론 주면마찰력을 반드시 고려해서 설계해야 한다(Fig. 8 참조).

(2) D(연약지반의 깊이)값에 의한  $M_{LL}$ 지수의 분석  
 연약지반의 깊이가 5~20m에서 90%이상의 교대가 측방이동의 가능성이 있는 것으로 나타났다. 즉, 연약지반상의 교량구조물의 측방이동은 연약층 심도에 비례하기 때문에 시공시 효율적인 연약지반 개량공법을 적용하여 지반의 강도를 증대시켜야 한다(Fig. 9 참조).

(3)  $\gamma H$ (성토하중)값에 의한  $M_{II}$ 지수의 분석  
 성토하중이  $10\text{tf/m}^2$  보다 크면, 측방이동의 가능성이 90% 이상이 되는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이와같이 성토하중이 교량구조물을 측방이동시키는 주요 요인중의 하나이므로, 성토체에 일반 토사중량의 약 1/80인 EPS블럭을 이용하여 측방이동량을 최소화하도록 시험 적용하였다 (Fig. 10 참조).

이상의 결과를 종합하면, 점착력 값이  $4\text{tf/m}^2$  이하, 연약층의 깊이가 5m이상, 성토하중이  $10\text{tf/m}^2$

이상의 경우, 측방이동이 발생할 가능성이 90% 이상으로 나타나, 설계 및 시공시 이에 대한 면밀한 검토가 요구된다.

### 4. 현장계측

#### 4.1 계측개요

##### 4.1.1 EPS 성토공법

최근 들어 우리 나라에서는 연약지반상에 지반의 안정을 위하여 경량성토재인 EPS(Expanded Polystyrene)성토공법을 적용하는 현장이 증가하고 있는 추세이다. 이와 같은 EPS성토공법은 하중경감공법의 일종이며, 단위중량이 일반 토사중량의 약 1/80에 해당하고, 압축강도가 탄성범위에서  $5\sim 10\text{tf/m}^2$ 에 이르는 초경량의 재료(EPS Block)를 이용하여 현장에서 적용하는 공법으로서 토목현장 중 특히 연약지반 현장에서 다양하게 적용되고 있다<sup>9)</sup>. 본 시험계측지역에서 EPS블럭의 성토높이는 4.8m(EPS 단수 8단)으로 하고, 중간에 레벨링 콘크리트를 사용하였으며, 상부 2단은

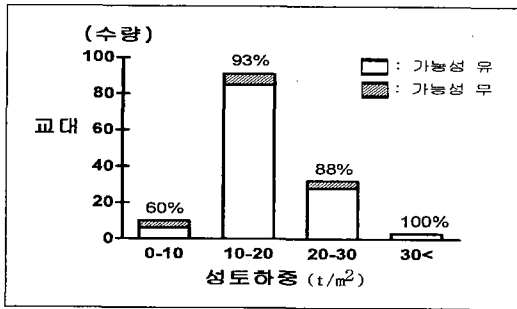


Fig. 10 Variation of  $M_{II}$ -index with embankment loads

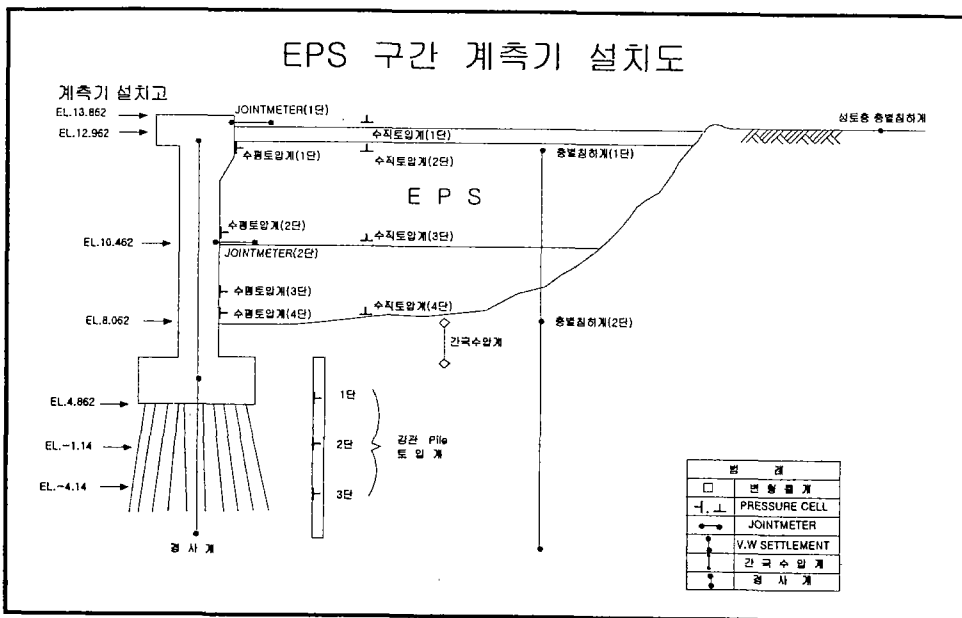


Fig. 11 Locations of instrumentations in details



단위 중량 0.03 t/m<sup>3</sup>의 EPS블럭을 사용하였다. EPS블럭 하단의 길이는 9.0m이고 상단의 길이는 19.67m으로 하였다. 기초 면에서 토사성토를 한 후 EPS블럭을 성토하였다. 레벨을 살펴보면, EPS블럭 성토층 하부는 EL. 8.062 m이고, 상부는 EL. 12.962m 이다.

4.1.2 시험시공지역의 계측기 매설 현황

실제 계측에 사용된 각 계측기의 수량 및 매설 위치는 다음 Table. 2와 Fig. 11과 같다. 시험 시공한 교량교대는 Fig. 11과 같으며, 기초바닥면의 높이는 EL. 4.862m이며, 교대 상부의 높이는 EL. 13.862m로 교대의 높이는 전술한 9.0m이다.

Table. 2 Used instruments

	수평 토압계	수직 토압계	간극 수압계	경사계	층별 침하계	조인트 메타
계	7	4	1	1	2	2

4.2 계측 결과

4.2.1 수평토압계

연약지반상에 파일을 향타한 후의 잔류응력을

분석한 결과, 시험강관의 맨 하단에 설치된 3단의 토압이 43.55 t/m<sup>2</sup>으로 중간에 설치된 2단의 토압(28.47 t/m<sup>2</sup>)보다 큰 것으로 나타났다. 강관에 설치된 토압계의 결과는 계측시작후 136일이 경과했을 때 모두 20.0 t/m<sup>2</sup> 이하로 안정된 추세를 보이고 있으나, 교대 강관 3단의 응력은 시간이 지남에 따라 조금씩 증가하는 추세를 보이고 있으며, 이와는 반대로 교대 강관 2단의 토압은 조금씩 감소하는 추세를 보이고 있다(Fig. 12 참조). EPS의 수평토압은 이전의 여러 계측에서 나타난 것처럼 모두 1.0 t/m<sup>2</sup> 이하로 교대와 EPS 성토층은 별다른 영향을 미치지 않아 구조체의 안정에 큰 도움이 된 것으로 나타났다.

4.2.2 수직토압계

교통과 포장체하중에 의한 EPS블럭에 작용하는 연직력을 측정하기 위해서 4개의 토압계를 최상부 레벨링 콘크리트층의 상, 하부에 각 1개씩, 중간 레벨링 콘크리트층의 상부에 1개 그리고 EPS 성토층의 하부에 1개를 설치하였다(Fig. 13 참조).

상부레벨링 콘크리트층의 상부에 설치한 EPS-1단의 토압이 레벨링콘크리트층의 하부에 설치

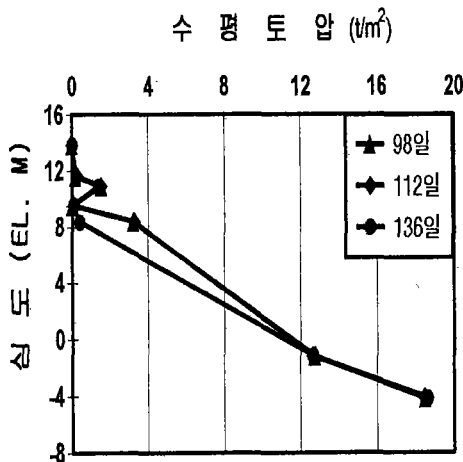


Fig. 12 Horizontal earth pressure

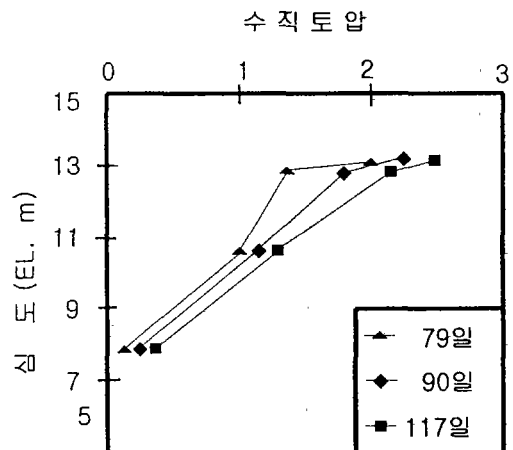


Fig. 13 Vertical earth pressure

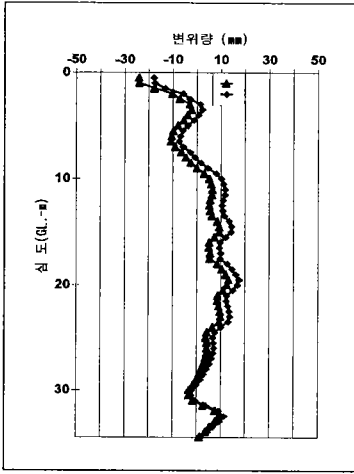


Fig. 14 Lateral movement obtained from inclinometer

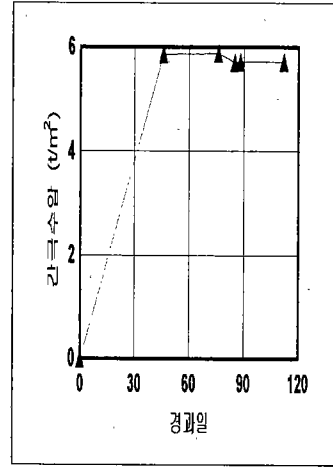


Fig. 15 Pore water pressure

한 EPS-2단의 토압보다 0.5 t/m<sup>2</sup> 정도 크게 나타났다. 이것은 이전의 여러 시험시공계측에서 관찰한 결과와 잘 일치하며, 상부토압의 크기도 2.5 t/m<sup>2</sup> 근처로 교통하중과 포장체 하중의 크기와 유사하였다. EPS-3, EPS-4단의 결과를 보면, 상부하중이 하부로 응력분산이 잘 진행되 1 t/m<sup>2</sup> 정도에서 0.3 t/m<sup>2</sup> 정도로 각각 분산하고 있음을 알 수 있다.

4.2.3 경사계

원 설계에서는 교대의 강관에 토압계를 설치하는 것으로 되어 있으나 교대가 이미 준공되어 있는 관계로 본 현장은 교대에 유도관을 근접시켜 경사계를 매설하였다.

최대 변위량은 연약지반 심도의 중간에서 2.5cm 이하이며 약간의 지반의 밀림현상이 나타났으나 증가율은 둔화되고 있는 추세이다. 따라서, 교대의 측방이동에 대한 대책으로 EPS성토공법이 효율적임을 알 수 있다(Fig. 14 참조).

4.2.4 간극수압계

간극수압계는 EPS성토체 하부인 연약지반 심도의 중간깊이 EL. -1.4 m에 설치하였다. 간극수압은 계측기 설치 후 40일 까지 지속적으로 증가

하다 이후 6.0 t/m<sup>2</sup> 이하의 값에서 일정한 수준을 지속적으로 유지하고 있음을 알 수 있다. 이것은 성토하중이 EPS블럭으로 인하여 감하였기 때문에 그 하중에 의한 압밀이 거의 종료되었음을 보여주며, 이는 장기적으로 지반이 안정화되었다는 것을 의미한다(Fig. 15 참조).

4.2.5 층별침하계

EPS블럭을 적용한 경우와 적용하지 않는 지반과의 침하거동 양상을 파악하고자 층별 침하계를 EPS성토체 하부와 일반 성토체 하부에 각각 매설 설치하였다. 계측결과, 일반토사부의 침하량은 약 24cm정도이고 EPS성토부의 침하량은 8cm 정도로 나타났다. 이는 EPS블럭의 비중이 토사에 비해 1/80 정도이므로 실제로는 제체에 미치는 하중이 극히 미미함을 알 수 있다. 따라서, 연약지반상에 EPS블럭을 적용함으로써 제체의 하중 경감효과는 물론 원하는 시간에 조기에 공사를 완공할 수 있는 시공성이 뛰어난 것을 알 수 있다(Fig. 16 참조).

4.2.6 조인트 메타

연약지반상의 교량교대와 EPS성토체와의 유간을 측정하고자 중간레벨링 콘크리트층과 상부레

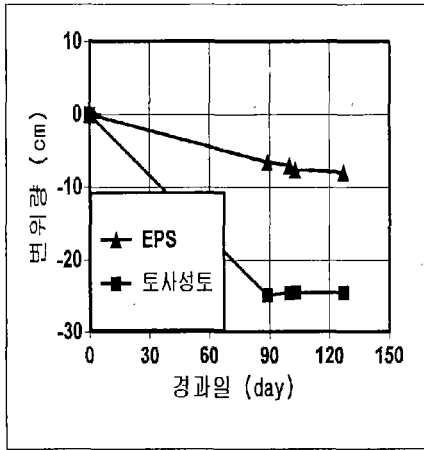


Fig. 16 Settlements

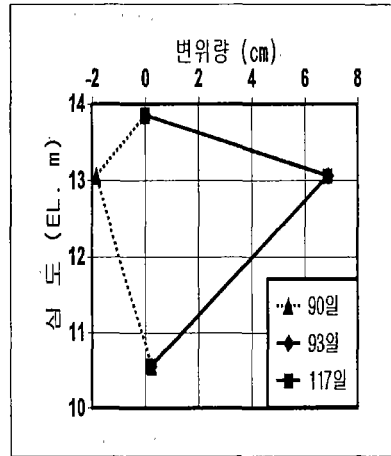


Fig. 17 Jointmeter

벨링 콘크리트층에 각각 하나씩 조인트 메타를 설치하였다. 상부레벨링 콘크리트층에 설치한 조인트 메타의 변위량은 0.27cm가 최고치로 거의 움직이지 않는 것으로 나타났다. 중간레벨링 콘크리트층에 설치한 조인트메타의 계측기록을 살펴보면, 초기에는 콘크리트층이 1.84cm만큼 오히려 교대쪽으로 움직인 것으로 나타났고, 이후에 교대후방으로 움직인 것으로 나타났는데 최고치는 6.87cm정도 되었다. 여기서 주목할 것은 상부 콘크리트층은 거의 움직임이 없는데 비해 중간 콘크리트층이 6cm이상 움직인 것은 후방의 토사 성토층이 침하하면서 중간 콘크리트층을 끌어당긴 것으로 추정된다(Fig. 17 참조).

### 5. 결 론

- (1) 연약지반상의 교량교대 형식은 역T형, 성토고는 5~15 m가 대부분이며, 특히 5~10 m(성토하중 10~20 t/m<sup>2</sup>) 범위가 65 %를 차지한다.
- (2) 국내 고속도로의 연약지반은 대부분 서·남해안 지역의 고속도로에 집중적으로 분포한다.
  - 연약지반의 점착력(c)은 1.0~4.0 t/m<sup>2</sup> 범위

에 전체 분포의 약 77 %가 차지하며, 그 중에서 초연약지반으로 볼 수 있는 1.0~2.0 t/m<sup>2</sup>의 범위는 45%정도가 해당된다.

- 연약지반 두께는 5.0~20.0 m의 범위에 76 %가 존재하며, 20m 이상도 10 % 정도 차지한다.
- (3) 측방이동 판정식을 48개 교대의 실제 계측치와 비교 검토한 결과, 교대의 허용변위 1.5 cm를 기준으로 하였을 때 18개(38%)의 교대에서 측방이동이 발생하였다. 즉 F지수의 경우 35%, I<sub>1</sub>지수는 29%, 수정 I<sub>L</sub> 지수(I<sub>ML</sub>)는 33%가 이동가능성이 있다고 판정하였다.
  - (4) 교대의 측방이동을 유발하는 가장 큰 요인들은 연약지반의 점착력, 연약지반의 심도, 성토하중 등을 들 수 있다. 특히, 연약지반의 점착력이 4.0 t/m<sup>2</sup> 이하, 연약지반의 심도가 10m 이상, 성토하중이 10.0 t/m<sup>2</sup> 이상인 지반에 건설된 교대의 측방이동 가능성은 90 % 이상으로 나타났다.
  - (5) EPS블럭에 의해 교대에 작용하는 수평토압은 1.0 t/m<sup>2</sup> 이하로 거의 없다. 한편, 교대강관에 미치는 최대 수평토압은 20.0 t/m<sup>2</sup> 이하로 교대 강관 맨 하부에서 발생한 것으로 정지토압

정도로 추정되며, 교대의 측방이동을 발생시킬 수 있을 정도의 토압은 없는 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- 1) 장용채외 1, 1995, 연약지반에서의 토질공학, 도서출판새론.
- 2) 장용채외 1, 1996, "교대변위 억제대책에 관한 연구", 한국도로공사 도로연구소 연구보고서.
- 3) 정재성, 1995, "연약지반상 성토에 의한 교대의 측방이동", 전남대학교 석사학위논문.
- 4) 조용량, 1997, "측방유동지반상 교대의 안정성에 관한 연구", 중앙대학교 석사학위논문
- 5) 도로설계요령(1992), 한국도로공사, 제3권, 제 8-3편 교량하부구조물, pp.410-411.
- 6) 도로교 표준시방서 (1992), 건설부, 제IV편 하부구조편, 제6장 기초의 안정에 관한 일반사항, pp.1027-1028.
- 7) 한국도로공사(1994) : "EPS성토공법연구(III) 보고서", 도로연-94-15-4.
- 8) Tavenas, F. and Leroueil, S.(1980) : "The behaviour of embankments on clay foundations", Canadian Geotechnical Journal, 17, pp.236-260.1.
- 9) 日本道路公團, "軟弱地盤上の橋臺基礎に関する調査研究報告書(その1,2,3)", 1979年 2月, 1981年 3月.
- 10) 發泡 スチロール開發機構, 1993, "EPS工法" - 發泡 スチロールお 用いだ 超 輕量盛土工法-, 理工圖書.
- 11) 土質工學會, 地盤の側方流動.