

論 文
3-2

## 경사계를 이용한 교대변위 계측에 관한 연구

장 용 채

The Measurement of Lateral Displacement of Abutment Using a Inclinometer

*Y.C. Chang*

**Key Words** : 경사계(Inclinometer), 연약지반(Soft Foundation), 측방유동(Lateral Flow), 측방유동압(Lateral Flow Pressure), 말뚝(Pile), 수평변위(Lateral Displacement), 증분변위(Incremental Deformation)

### Abstracts

The abutment of bridge on soft foundation makes lateral movement due to the settlement of back fill and lateral flow. To measure the displacement of such a abutment, there are a lot of indirect method for measurement such as survey of leveling or inclinometer gauge around the abutment. But all of them are not sufficient to confirm the ground behavior and measure the exact lateral behavior of structure.

As making the structure and pile cooperatively by measuring the movement of lateral displacement, for measuring the abutment displacement precisely by using the inclinometer. In this work, we try to suggest efficient measuring method of abutment displacement and its application.

### 제 1 장 서 론

#### 1.1 배경 및 목적

연약지반상 교량의 교대는 배면토의 침하와 측방 유동 등으로 인하여 교대측방이동 발생된다.

이러한 교대의 변위를 측정하기 위하여 레벨측량을 하거나 교대근처에 경사계를 매설하여 간접 측정하는 등 다양한 계측방법이 있으나 구조물의 정확한 변위거동 측정과 지반거동의 확인에는 미흡한 점이 있다. 본 과제는 경사계(Inclinometer)를 이용한 정확한 교대변위를 계측하기 위해 구조물과 하부지지

\* 정희원, 목포해양대학교 해양토목전공

기초 파일을 일체화시켜 교대변위 거동을 측정함으로써 효율적인 교대변위 계측방법을 제시하고 향후 이를 현장에 적용할 수 있도록 연구 개발하는데 그 목적이 있다.

## 1.2 연구의 내용과 범위

본 연구에서는 경사계를 이용한 교대변위 계측을 위해 ○○고속도로 A공구 IPV-2교대에 제안된 계측방법을 시험 시공을 실시하였다. 매설방법은 파일을 항타한 후 파일내부에 경사계를 매설하여 기초를 안치한 후 교량교대 상부까지 연장시켰다. 위와 같은 방법을 통하여 교량시공 중 혹은 시공 후 교량상부에서 경사계를 이용해 계측하여 상부의 교대 구조물과 하부 기초파일의 전체적인 거동을 파악할 수 있도록 하였다.

## 제 2 장 교대측방이동 판정

### 2.1 수동말뚝에 작용하는 측방유동압

교대의 측방이동과 수동말뚝의 거동을 검토하는데 가장 중요한 점은 수동말뚝에 작용하는 측방유동압의 산정이다. 측방유동압은 성토고와 형상, 지반의 구성과 역학적특성 및 말뚝의 배치와 강성 등 여러 가지 요인에 영향을 받기 때문에 정량적인 해석은 곤란하며 실용적인 관점에서 여러 가지 간이산정법이 제안되어 있다.

#### Tschebotarioff 법

Tschebotarioff는 측방유동압의 분포를 이등변 삼각형으로 가정하고 유동압력계수를 도입하여 이등변 삼각형의 정점의 압력을  $0.4\gamma h$ 로 제한한 바 있고 이를 발전시켜 일본 도로공단에서는 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$P_{\max} = \alpha \gamma h B \quad (\text{식2-1})$$

$\alpha$  : 유동압력계수(≈0.8),

$\gamma h$  : 성토하중,

$B$  : 말뚝축 직각방향의 작용폭(2.5d)

三木(일본)등은 측방유동압의 크기를 급속재하시 성토하중의 0.7~0.8배, 압밀축진공법에 의한 경우는 0.3~0.4배 정도라고 하였고 이는 Rankine 토압이론에 의한 값과 비교적 잘 일치한다.

#### 일본 건설성 토목연구소 추정치

일본 건설성 토목연구소에서 모형실험의 결과에 근거하여, 지반강도와 성토하중을 고려하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$P_x = k \cdot B \cdot \delta_x \quad (\text{식2-2})$$

#### 말뚝간격을 고려한 측방유동압

측방유동이 발생하면 말뚝의 전면과 후면에 토압의 균형이 붕괴되면서 상당한 크기의 토압차이가 발생하게 되는데 그림2-1의 사선부분이 Mohr - Coulomb 항복조건을 만족하는 소성상태에 있다고 가정하고 열항 1본당 작용하는 단위 깊이당 측방유동압을 계산하는 식을 제안하였으며 점토의 경우에는 다음과 같이 표현된다.

$$p(z) = cD_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{(N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1)} \left[ \frac{1}{N_\phi \tan \phi} \left\{ \exp \left( \frac{D_1 - D_2}{D_2} N_\phi \tan \phi \tan \left( \frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - 2N_\phi^{1/2} \tan \phi - 1 \right\} + \frac{2 \tan \phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} \right] - c \left\{ D_1 \frac{2 \tan \phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} - 2D_2 N_\phi^{-1/2} \right\} + \frac{\gamma}{N_\phi} \left\{ D_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{(N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1)} \exp \left( \frac{D_1 - D_2}{D_2} N_\phi \tan \phi \tan \left( \frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - D_2 \right\} \quad (\text{식 2-3})$$

여기에서  $N\phi = \tan^2(\pi/4 + \phi/2)$ ,  $D_1$ 은 말뚝 중심 간격,  $D_2$ 는 말뚝 순간격,  $c$ 와  $\phi$ 는 활동 토피의 전단 정수,  $\gamma$ 은 활동 토피의 단위 중량,  $z$ 는 지표면에서의 임의 깊이이다. 한편, 점토에 대해서는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$p(z) = c \left( D_1 \left( 3 \log \frac{D_1}{D_2} + \frac{D_1 - D_2}{D_2} \tan \frac{\pi}{8} \right) - 2(D_1 - D_2) \right) + \gamma z (D_1 - D_2) \quad (\text{식2-4})$$

그림2-1은 상기 식에 의한 예측치와 실측치를 비교한 것으로 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

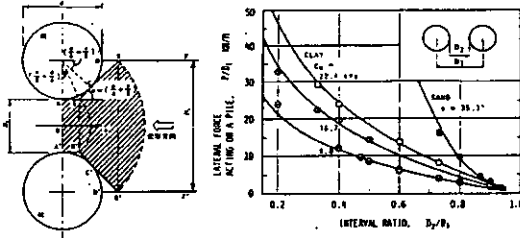


그림2-1 말뚝주변의 소성상태 및 측방유동압의 예측치와 실측치 비교

## 2.2 교대의 측방이동

연약지반상에 축조되는 교대의 측방이동은 1) 교대 shoe의 파손 및 shoe 받침의 파손, 2) 신축조인트의 기능저하, 3) 주형과 흙벽의 접합에 의한 beam 단부의 국부좌굴 및 철근콘크리트의 압축파괴와 주형의 반력에 의한 흙벽의 손상, 4) 교대기초의 파손 등의 피해를 유발할 수 있다. 따라서 사전에 교대의 측방이동을 예측하여 대책공법을 세우는 것이 매우 중요하다.

교대의 측방이동 판정은, 현재까지는 해석적 방법에 의한 판정을 일반화되어 있으나, 교대의 측방이동에 영향을 미치는 인자가 많고 매우 복잡하기 때

문에 어느 것도 정확한 예측을 한다고 보기는 어렵다. 교대의 측방이동 판정에는 다음의 식이 이용이 된다.

$$I_L = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \cdot \frac{\gamma H}{c} \quad (\text{식2-5})$$

- $\mu_1$  : 연약층 깊이에 대한 보정계수,
- $\mu_2$  : 기초체 저항폭에 대한 보정계수
- $\mu_3$  : 교대 길이에 대한 보정계수

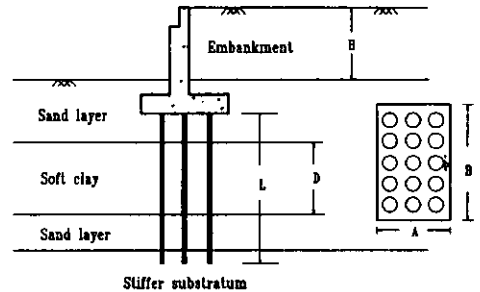


그림2-2 교대측방이동 판정지수의 계산단면

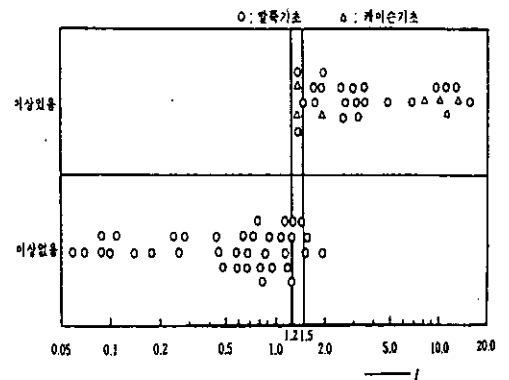


그림2-3 판정지수와 교대측방이동과의 관계

이 교대측방이동 판정식은 지반의 점탄소성적 변형양상을 안정계수( $\frac{\gamma H}{c}$ )의 함수로 하고, 기초의

형식과 연약지반의 깊이 및 기초의 dimension을 고려한 무차원계수를 도입한 것으로 일본의 자료에 의하면 이 교대측방이동 판정지수가 1.5이하에서는 교대의 변위가 없는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 본이 판정지수는 연약층의 심도가 과도하게 적용될 뿐만 아니라 연약층의 심도가 클 경우에는 심도에 대한 보정계수가 1에 수렴하는 등의 문제점이 발견되어, 장 등(도로연구소, 1996)은 이를 수정하여 수정 교대측방이동 판정식을 제안한 바 있다.

$$M_{IL} = \alpha \cdot \frac{\gamma H}{c} \quad (\text{식2-6})$$

$\alpha$  : 측방을 받는 하부의 면적에 대한 교대면적비  $\{ \Sigma(b \cdot D) / (B \cdot A) \}$

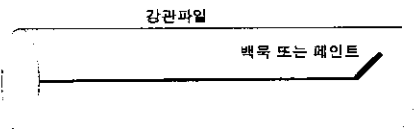
장 등의 연구에 의하면, 교대의 허용 변위량 1.5cm와 수정판정지수 1.5를 기준으로하여 총 48개 교대를 대상으로 해석을 실시한 결과 18개의 교대에서 측방이동이 발생하였으며 수정 교대측방이동 판정지수가 1.5이하에서는 측방이동에 대해 안정하다고 하였다.

### 제 3 장 제안된 계속방법

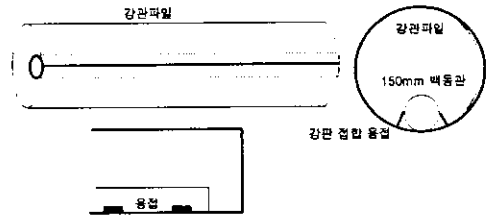
#### 3.1 경사계와 파일의 일체화 시공방법

본 방법은 연약지반상의 교대축조에 있어, 지반의 측방유동에 의한 교대의 측방이동을 측정하기 위해 교대 기초파일 내부에 경사계를 일체화시키고 하부 지반에 고정시켜 매설한 것으로 다음의 순서에 따라 시공이 진행된다.

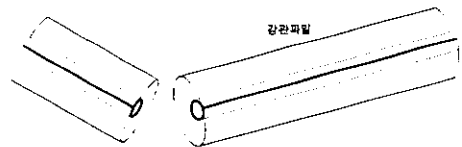
가. 항타를 실시하기 전에 사용될 파일에 백묵 등으로 측선을 표시한다.



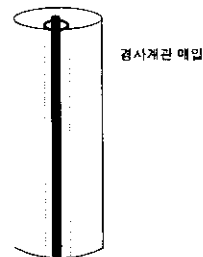
나. 표시된 측선을 따라 직경 150mm의 경사계 안내용 백동관을 파일내부에 용접한다. 용접시에는 강관 접합용 철판을 이용하여 항타시 유동이나 이탈이 없도록 단단히 용접하며, 백동관이 직선성을 유지할 수 있도록 주의한다.



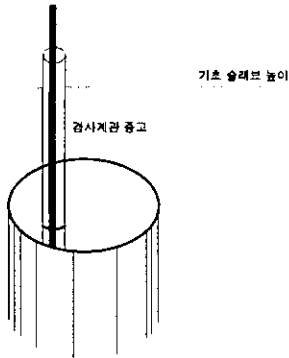
다. 내부에 백동관을 용접한 파일을 뒤채움부를 향하도록 위치를 조정한 후 항타하고, 파일을 연장할 경우에는 사전에 표시된 측선을 따라 세심하게 용접하여 내부의 백동관에 걸치는 부분이 발생하지 않도록 한다.



라. 항타가 완료되면 천공기를 백동관 내부에 삽입하여 하부지반까지 굴착하고 경사계관 (ABS Pipe) 을 삽입한다.

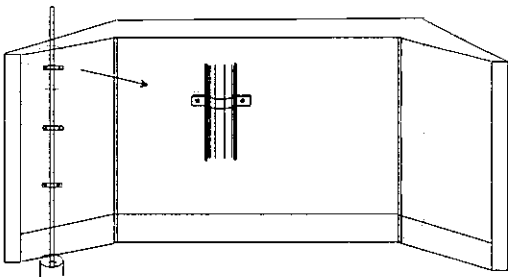


마. 상기의 작업이 완료되면, 백동관과 경사계관의 높이를 원하는 높이(기초슬래브 상단)까지 증고한다.



바. 경사계관을 매입한 후 백동관 주변을 시멘트 모르타르 등으로 그라우팅을 실시한다. 이 때 경사계관의 하부가 하부지반에 단단히 고정되도록 하여야 한다.

사. 기초슬래브 타설 및 경화가 완료되고 교대의 파라펫 타설이 완료되면, 뽑아올린 경사계관을 교대 벽체에 앵커볼트로 고정하고 초기치 설정 작업을 실시한다.



### 3.2 제안된 계측방법의 특징

기초파일과 일체화 시공한 경사계를 이용한 교대 변위 계측법은 기존의 방법과 비교하여 다음과 같은 특징이 있다.

- 기존방법 : 레벨측량이나 교대부근에 경사계를 매설하는 간접적인 방법으로 구조물 기초와 지반의 정확한 변위거동을 파악하는데 미흡하다
- 개선방법 : 하부 기초까지 일체로 경사계를 매설하여 교량시공 중 혹은 시공 후 교량상부에서

경사계를 이용해 계측하면 상부의 교대 구조물과 하부 기초파일의 전체적인 거동을 파악할 수 있다

또, 본 방법을 이용하면 다음과 같은 같은 부수적인 효과를 기대할 수 있다.

- 기술적 측면 : 기초파일 및 교량교대의 정확한 거동을 파악할 수 있다
- 경제적 측면 : 전체를 일체식으로 설치하기 때문에 기타 부수적인 장비가 불필요하다

그러나, 본 방법을 사용하는 경우에 다음과 같은 사항을 고려해야 한다.

- 사전에 설계단계에서 고려가 되어야 한다.
  - 1) 경사계가 매설될 강관은 미리 제작되어야 한다.
  - 2) 시공시기에 맞추어 경사계관을 매설해야 하며 매설위치에 주의해야 한다.
- 시공시 상당한 정도(精度)가 요구되며 지반 유동계측을 위한 경사계와 쌍을 이루어 계측이 실시되어야 원래의 목적에 부합할 수 있다.

## 제 4 장 시험시공

### 4.1 개요

본 시험시공구간은 ○○고속도로 A공구에 위치한 역T형 교대(IpV-2)로서 25m 단경간의 PC Beam 형식의 교량이 설치되며 높이는 약 8m이다. 본 교대는 교대측방이동 해석결과 측방이동의 위험이 있는 것으로 판단되어 이에 대한 대책으로 교대의 하부를 샌드콤팩션 파일로 처리하고 파재성토하여 선행압밀을 시킨 후 파일(φ 609×20.0m, 선단지지)을 시공하였다. 본 구간에서 교대변위를 계측하기 위해 제안된 새로운 공법을 적용하였다. 본 구간의 교대 측방이동 해석에 사용된 매개변수는 표4-1과 같고 다음과 같이 해석결과 모든 경우에 측방이동의 우려가 있는 것으로 나타났다.

표4-1 교대축방이동 해석에 사용된 매개변수

교대	A	B	L	$\Sigma b$	파일 직경	연약지반	
						점착력	깊이
IpV-2	5.1	24.2	19.2	8.53	609mm	2.5 t/m <sup>2</sup>	17.2 m

성토체				
단위중량	성토고	F지수	I <sub>L</sub> 지수	M <sub>L</sub> 지수
1.8 t/m <sup>3</sup>	9.57 m	0.008	6.7	8.2

본 구간의 대략적인 지층의 구성은 표4-2과 같다.

표4-2 시험시공 구간의 지층 구성

구	분	분포범위	
		(평균치), m	N치(평균치)
성토부		0.7~1.4	-
		(1.0)	
	점토층	4.7~17.2	1~4 (2)
충적층		(9.0)	
두께(m)	실트층	3.2~11.8	2~24 (12)
		(6.7)	
		모래층	3.1 (3.1)

성토부는 약 1m의 두께로 풍화잔류토 및 세립 내지 중립의 모래로 구성되어 있으며, 충적층은 점토층, 실트층, 모래층으로 구성되어 있다. 점토층은 주로 암회색을 띠며, 모래질 점토 및 실트질 점토로 구성되어 있고 4.7~17.2m의 두께로 분포하며 평균두께는 9.0m이다. 표준관입시험 결과 N치는 1~4의 분포범위를 나타내며, 평균 N치는 2이다. N치로 미루어 보아 점토층의 상대밀도는 매우 연약(Very soft)~연약(Soft)한 상태이다.

실트층은 주로 암회색~황갈색의 점토질 실트로 구성되어 있으며, 3.2~11.8m로 분포하며, 평균두께는

6.7m이다. 표준관입시험 결과 N치는 2~24이며, 평균 N치값은 12이다. N치로 미루어 보아 실트층의 상대밀도는 매우 느슨(Very loose)~중간조밀(Medium dense)한 상태이다. 표4-3와 표4-4은 본 구간에서 시행한 현장 Vane 시험과 실내시험의 결과이다.

표4-3 현장 Vane 시험결과(IpV-2)

구 분	시험 시험	
	No.1	No.2
심도(GL, -m)	4.0	9.0
전단강도(kN/m <sup>2</sup> ) : 자연상태	12.8	10.0
	(1.5)	(2.4)
수정전단강도(t/m <sup>2</sup> )	1.28	1.00

표4-4 실내시험결과(IpV-2)

구 분	시료	
	No.1	No.2
심도(m)	3.0~3.8	8.0~8.8
일축압축강도 qu(t/m <sup>2</sup> )	4.6	4.5
Cu = qu/2	2.30	2.25
삼축압축(UU)시험에 의한 Cu (t/m <sup>2</sup> )	3.6	2.2
N치에 의한 추정	1.3~2.5	0.6~2.5
전단강도(t/m <sup>2</sup> )		
삼축압축(CU)시험에 의한 강도정수	C=1.9t/m <sup>2</sup>	-
	$\phi=15.3^\circ$	
압축지수, Cc	0.44	-
선행압밀하중, Pc(t/m <sup>2</sup> )	0.74	-

## 4.2 경사계 매설

그림4-1과 그림 4-2는 본 시험시공구간의 경사계 매설단면과 상세도면을 나타낸 것이다. 경사계 매설 위치는 시공시 장비에 의한 파손을 막고 교통개방 이후의 유지관리를 고려하여 교대 뒤편부 좌측 모서리 부분으로 하였으며, 교대 파라펫 상단까지 뚫아올려 장기 계측이 가능하도록 하였다. 기초슬래브

상단으로 나온 경사계는 ABS관을 교대벽면에 앵커볼트로 고정하여 뒤채움 및 장비의 운용시 유동이 없도록 하였다.

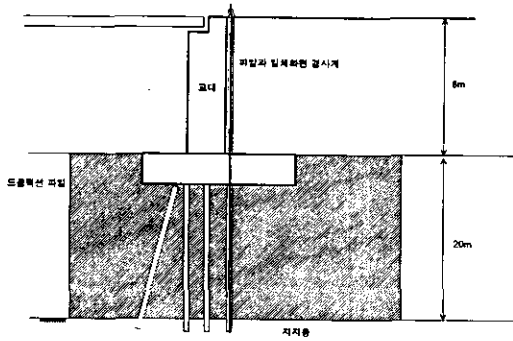


그림4-1 파일과 일체된 경사계 매설단면(IpV-2)

경사계 설치도

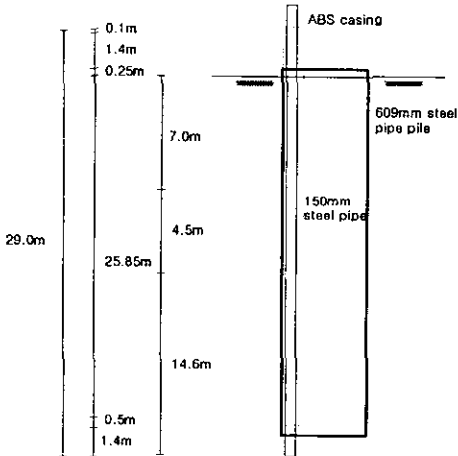


그림4-2 파일과 일체화 시공한 경사계의 상세도면

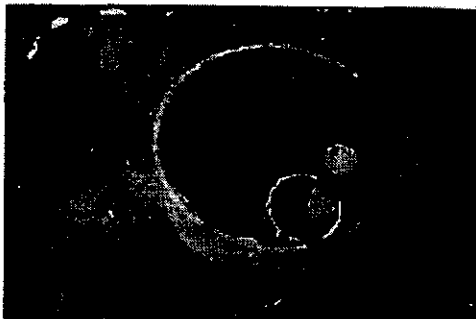


사진4-1 파일과 일체화 시공된 경사계



사진4-2 경사계관을 교대벽체에 고정한 전경

### 4.3 계측결과

파일과 일체로 시공한 경사계에 의한 교대변위 계측 결과를 그림4-3과 그림4-4에 나타내었다. 그림 4-5는 파일과 일체로 시공한 경사계와 별도로 교대 전면의 지반에 설치된 경사계의 계측결과를 나타낸 것으로 그림에 표시된 위치에 설치되었다.

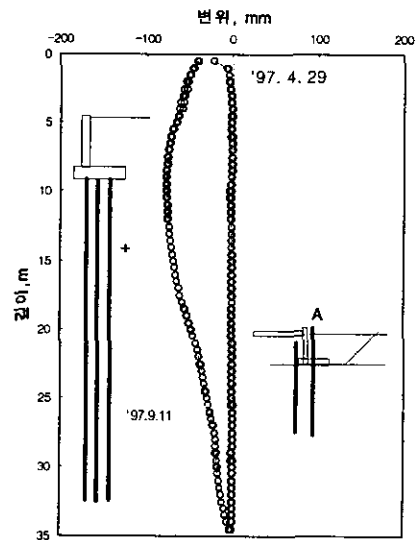


그림4-3 파일과 일체로 시공한 경사계의 계측결과

그림4-3의 의하면, 약 75mm의 수평변위가 발생했으며 파일의 하단에서도 다소간의 변위가 발생하였다. 상부 구조물에 앵커볼트로 고정된 부분에서도 변위가 발생한 것으로 보이며, 이것은 경사계가 앵커볼트에 고정된 부분과 그렇지 않은 부분의 상대적인 변위에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서, 기초슬래브를 통해 증고한 경사계판을 교대벽면에 고정할 때 앵커볼트의 간격을 좁히고 단단히 고정하는 것이 이후 교대측방이동 관측에 매우 중요한 역할을 할 것으로 보이며, 교대벽면 콘크리트 타설시 경사계판을 일체로 시공하여 완전히 고정하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 한편, 파일의 하부에서 다소간의 변위가 발생되는 것은 파일이 완전히 지지층에 근입되지 않았기 때문으로 판단되며, 이것은 경사계 매설시 시추깊이가 파일의 길이보다 다소 길었던 것과 일치하는 결과이다.

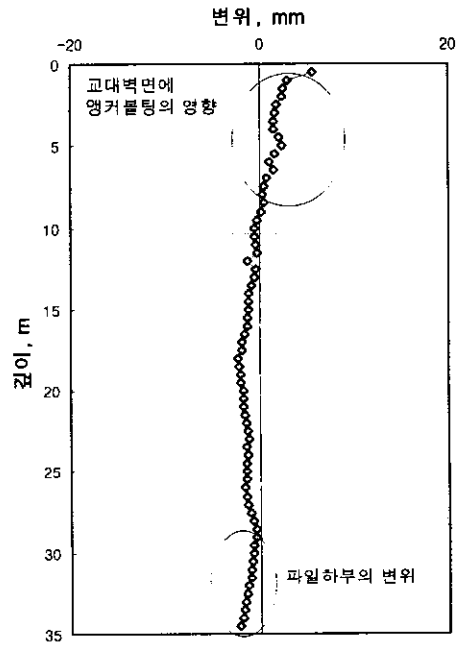


그림4-4 지점별 증분변위(incremental deformation)

그림4-4는 지점별 변위증분(incremental deformation)을 나타낸 것으로, 파일 하부에서 변위가 발생한 것을 알 수 있다. 경사계의 측정원리에 의거하여 이 부분의 변위는 연속적으로 상향으로 누적되므로 이를 배제하면, 실제 기초파일 부분에서 발생한 변위는 약 45mm 정도가 된다(그림4-4에서 점선Box로 표시된 부분). 상단에서도 일관성 없는 증분변위가 보이며 현재까지의 결과로는 벽체는 교대배면쪽으로 다소간의 변위가 발생한 것으로 보이고, 이것으로 보아 경사계를 벽체에 완전히 고정하여야 유의미한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

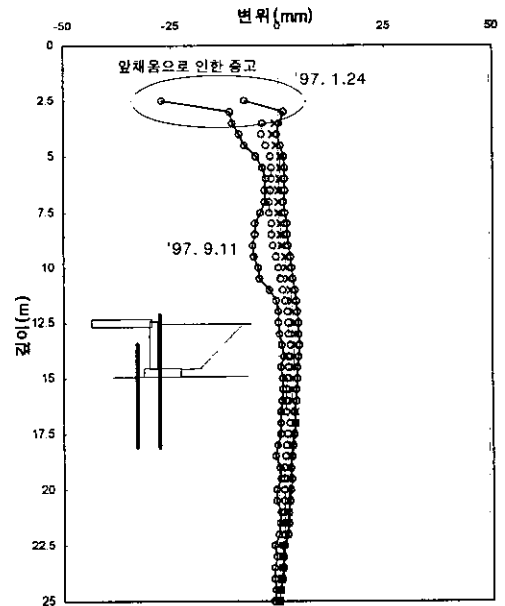


그림4-5의 결과에 의하면, 뒤채움이 거의 완료된 상태에서 측정된 계측치에 다소간의 변위(약 10mm)가 보이나 미미한 정도이며 이것으로 미루어 보아 지반의 측방유동은 없었던 것으로 판단된다. 이와 같이 파일과 일체화 시공한 경사계와 동시에 교대전면이나 후면의 지반에 매설한 경사계 계측을 병행할 경우에는 지반의 측방유동도 동시에 측정할 수 있다.

그림4-5 교대전면의 경사계 계측결과



## 제 5 장 결 론

교대변위의 계측을 위한 방법으로 경사계 (Inclinometer)를 하부의 기초파일과 일체화시키는 방법을 제안하고 이를 ○○고속도로 A공구 IpV-2 교대에 시험시공하였으며, 이를 통하여 교대변위를 계측하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제안된 방법은 경사계와 기초파일을 일체화 시켜 매설하는 방법으로 구조물의 변위와 하부지반의 변위를 동시에 측정할 수 있는 효율적인 방법이며, 일체식 시공으로 부수적인 장비의 동원이 필요없으므로 경제적이다.
2. 시험시공한 IpV-2 교대에서 계측한 결과는 교대와 하부지반의 변위를 잘 나타내고 있으며, 본 교대에서 기초파일은 약 45mm 측방으로 이동하였으며, 교대전면에 매설한 경사계와 병행하여 계측할 경우에는 지반의 측방유동을 동시에 측정할 수 있었다.
3. 본 방법의 적용시에는 반드시 설계단계에서 고려가 되어야 하며, 파일항타를 비롯한 전 공정에서 세심한 주의가 요구되며, 특히 중고한 경사계관을 교대벽체에 일체로 단단히 고정하는 것이 매우 중요하다.
4. 향후 시공방법의 개선과 시공위치등에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

## 참고문헌

1. 장용채 외 1인, 1996, “교대변위 억제대책에 관한 연구(Ⅱ)”, 도로연구소, 도로연 96-46-12
2. 건설성 토목연구소 구조교량부 기초연구실, 1981, “교대의 측방이동에 관한 연구”, 토목연구소자료, 제1804호
3. 홍원표, 1994, “수동말뚝”, 중앙대학교 공과대학

4. 정재성, 1995, “연약지반상 성토에 의한 교대의 측방이동”, 전남대 석사학위논문
5. 일본도로협회, 1986, “도로토공 연약지반 대책공 지침”