

## 국내 고속도로 교량 교대에 대한 측방유동 판정식의 적용성 연구

### A Study on Application of Discriminant Equations in Korea

장용채<sup>1)</sup>, Yong-Chai Chang, 최영철<sup>2)</sup>, Young-Cheol Choi

- 1) 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 책임연구원, Chief Researcher, Div. of Geotechnical Eng. Highway Research Center, K.H.C.
- 2) 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 연구원, Researcher, Div. of Geotechnical Eng. Highway Research Center, K.H.C.

**개요(SYNOPSIS)** : The need of a definition about the lateral movement has been raised because it gives rise to serious problems. After the applicability of the discriminant equation used in Japan to our construction situations were examined, the modified equation was established. The protection methods from the lateral movement of abutments were also suggested according to the results from this modified discriminant equation.

**주요어(Key Words)** : 안정수, 측방유동 판정식, 측방유동지수(F), 교대측방이동판정지수(L<sub>L</sub>)

## 1. 서론

연약지반상에 구조물을 건설하게 되면, 구조물에 작용하는 토압과 측방유동압으로 인하여 구조물과 배면지반에 심각한 영향을 미치게 된다. 교대와 같이 편재하중을 받는 구조물은 배면성토하중에 의해 연약한 기초지반이 수평이동을 하게 되고, 이에 따라 말뚝체는 수평방향의 토압을 받게 되는데 이것을 측방유동압이라 한다. 따라서, 측방유동압을 받는 구조물의 설계에서 중요한 것은 유동압의 크기를 정량적으로 결정하는 것과 유동압에 의한 말뚝과 지반의 거동양상을 파악하는 것이다.

본 논문에서는 기존의 측방유동 판정식을 우리나라 연약지반상에 가설되어 있는 고속도로의 교량 교대에 적용하여 이들 교량의 측방유무를 판정하고, 기존의 판정식들을 비교 검토하여 서로 부합하는 새로운 판정식을 제안하였으며, 이에 대한 적용성도 아울러 소개하고자 한다.

## 2. 교대 측방이동

### 2.1 교대 측방이동 판정법

#### 2.1.1 구조물과 말뚝을 무시한 원호 활동의 안정계산

일본 건설성 기술 연구회에서 조사한 결과에 의하면 교대의 원호사면안정 검토 결과 안전율이 1.0이하의 경우는 일반적으로 이동의 판정이 나타나지만, 꼭 이동한다고 볼 수 없다. 따라서 현 시점에서는 활동에 대한 안전성 검토만 가지고 이에 대한 기준화 작업은 어렵다고 판단된다.

### 2.1.2 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. 이 지수 값은 안정수에 연약층 두께의 역수를 곱한 형상으로  $m^{-1}$ 의 차원을 갖으며, 측방이동에 미치는 연약층의 두께의 효과를 높게 평가하고 있다. 여기서,  $F \geq 4$ 이면 안정하고,  $F \leq 4$ 이면 측방유동의 가능성이 있는 것으로 평가하고 있다.

$$F = \frac{\bar{c}}{\gamma \cdot H} \cdot \frac{1}{D} \quad (1)$$

여기서,  $F$  = 측방유동지수(  $*10^{-2}m^{-1}$  )

$\bar{c}$  : 연약층의평균 점착력( $t/m^2$ )

$\gamma$  : 성토체의 단위체적중량( $t/m^3$ )

$H$  : 성토고  $D$  : 연약층 깊이( $m$ )

### 2.1.3 성토체에 의한 원호활동 안정계산

일본 수도고속도로 공단에서는 지반을 이상화하여, 원호미끄럼 저항비와 압밀침하량에 의해 측방이동의 영향 유무를 판정하는 방법을 제안했다.

$F_c \geq 1.6$ 또는, $\delta_s < 10 \text{ cm}$	우려 없음.
$1.2 \leq F_c < 1.6$ 또는, $10 \text{ cm} \leq \delta_s \leq 50 \text{ cm}$	확실치 않음.
$F_c < 1.2$ 또는, $\delta_s > 50 \text{ cm}$	우려가 있음.

$F_c$  : 원호활동 저항비

### 2.1.4 교대 측방이동 판정지수(I<sub>L</sub>)

일본 건설성 토목연구소 기초 연구실에서는 안정계수 ( $N_b = \gamma H/c$ ) 를 중심으로 연약층의 깊이비, 기초체의 저항폭, 연약층 두께 및 교대의 길이의 관계를 보정하여 다음과 같은 교대 측방이동 판정지수  $I_L$ (Index of lateral movement)를 정의했다.

$$I_L = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \cdot \frac{\gamma \cdot h}{c} \quad (2)$$

여기서,

$I_L$  : 측방유동판정지수

$\mu_1$  : 연약층 깊이에 관한 보정계수 ( $\mu_1 = D/L$ )

$\mu_2$  : 기초체 저항폭에 관한 보정계수 ( $\mu_2 = b/B$ )

$\mu_3$  : 교대의 길이에 관한 보정계수 ( $\mu_3 = D/A \leq 3$ )

$I_L \geq 1.5$ 이면 측방유동의 가능성이 있는 것으로 판단한다.

### 2.1.5 수정 측방이동 판정지수(M<sub>L</sub>)

일본도로공단에서 제안한 측방유동지수(F)값과 건설성 토목연구소에서 제안한 판정지수( $I_L$ )값을 우리나라 고속도로 교량교대에 적용하여 분석한 결과, 두 식이 상당한 정도의 불일치를 보이고 있었다. 따라서, 본 연구진은 일반적으로 많이 이용하는 F값을 기준으로  $I_L$ 지수 값을 분석한 결과  $I_L/\mu_1$ 값이 F값과

대부분 일치하는 것을 알 수 있었다.  $\mu_1(D/l)$ 의 값이 1보다 커지면, 판정지수( $I_L$ )값과 측방유동지수(F)의 분석결과와의 차이가 비례하여 커진다. 따라서, 이러한 편차를 줄이기 위해서 판정지수( $I_L$ )를  $\mu_1(D/l)$ 으로 나누어 판정지수를 수정하게 됐다.

$$M_{IL} = \mu_2 \times \mu_3 \times \frac{r \cdot H}{c} \quad (3)$$

### 3. 측방유동 판정식의 국내적용

우리나라 고속도로상에 설치되었거나 설치예정인 교량교대의 제원에 따른 교량교대의 안전성 여부를 기존의 측방유동 유무 판정식과 수정 판정식으로 검토한 자료를 중심으로 분석하고자 한다.

#### 3.1 측방유동지수(F)의 영향인자

일반적으로 F값은 대략 0 ~ 5사이에서 존재하며, 연약지반의 점착력(C)의 범위는 0 ~ 6사이에서 존재한다(그림 1). 그림 1에서 나타난 것을 분석하면, 대부분 교대의 F값이 4이하에 분포하며 일본도로공단 판정식인 F값에 따르면 측방유동의 가능성이 큰 것으로 나타났다. 그 중에서도 절반 이상이 0 ~ 3사이에 밀집해 있고, 이에 따른 C값 역시 상당히 낮은 수치인 0 ~ 4사이인 것으로 판단된다. 도표상의 범위에서, F와 C는 정비례의 관계를 보여주고 있다.

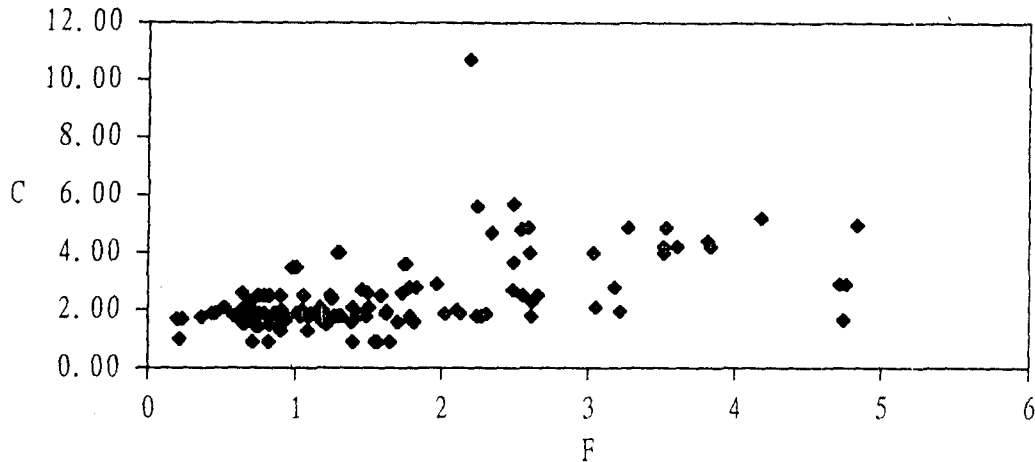


그림 1. F - C 상관도

#### 3.2 교대 측방이동 판정지수( $I_L$ )의 영향인자

국내 고속도로 교량교대에  $\mu_1(D/l)$ 계수와  $I_L$ 지수의 관계를 분석하면,  $\mu_1$ 계수의 값이 1.0이하로, 이는 말뚝의 길이가 연약지반의 깊이보다 긴 것을 나타내며, 측방유동시 말뚝의 세장비가 커서 좌굴의 가능성이 높다.  $\mu_1$ 과  $I_L$ 의 관계는 비례적인 관계로 보이나 직접적인 선형으로 보기는 어렵다.

$I_L$ 지수와  $\mu_2(\Sigma b/B)$ 계수의 관계를 보면,  $\mu_2$ 는 교대폭에 대한 말뚝 직경의 합을 나타낸 것으로 대부분 0.2에서 0.4사이로 나타났다. 이러한 간격비에서는 말뚝들 사이로 흙이 흐르는 것을 막아주는 arching 효과가 실제로 일어나기 어려우며 이러한 경향이  $I_L$ 과의 관계에서도 나타나고 있다.

$I_L$ 지수와  $\mu_3(D/A)$ 계수의 관계를 분석하면,  $I_L$ 의 2.0에서 좌표(8.0,3.0)를 잇는 직선을 경계로 위쪽에 분포하고 있어 대체적으로 비례 관계가 성립하고 있음을 알 수 있다.

### 3.3 수정측방이동 판정지수( $M_{IL}$ )의 영향인자

측방유동에 미치는 말뚝길이의 효과가 연약지반의 토성의 효과보다 크지 않을 것이라는 가정하에서,  $\mu_1$ 계수를 사용하지 않는 상태에서 교대의 밀면적(AB)에 대한 연약층의 깊이와 말뚝 본체폭 총화의 곱 ( $D\Sigma b$ )의 경향을 검토한 것이 그림 2에 나타낸  $I_L$ 지수와  $\mu_2\mu_3$ 계수 관계이다. 앞에서  $\mu_2, \mu_3$ 계수의 개별적인 경향은 크지 않은 것으로 나타났다.

F값의 경우는 대부분의 교량교대가 2 ~ 4범위에 해당하며, 측방이동의 유무에 매우 민감하게 분포하고 있음을 알 수 있고, 이를  $I_L$ 과 비교한 결과 F값과 많은 불일치를 볼 수 있다. 즉,  $I_L$  값은  $\mu_1(D/l)$  계수 값의 연약층 두께에 대한 말뚝의 길이가 길면 길수록 불일치의 폭은 훨씬 증가하는 것을 알 수 있었다. 즉,  $D/l$ 가 1에 가까울수록 F값과 높은 일치성을 나타내, 본 연구에서는  $I_L$ 값 중에서 연약층 깊이의 항에 중복으로 접근한  $\mu_1(D/l)$ 항을 삭제하여 F값과 비교 분석한 결과 아주 높은 일치성이 나타났다. 편의상 본 연구에서는  $I_L/\mu_1$ 지수 값을 수정 측방이동 판정지수( $M_{IL}$ )라 정의한다.

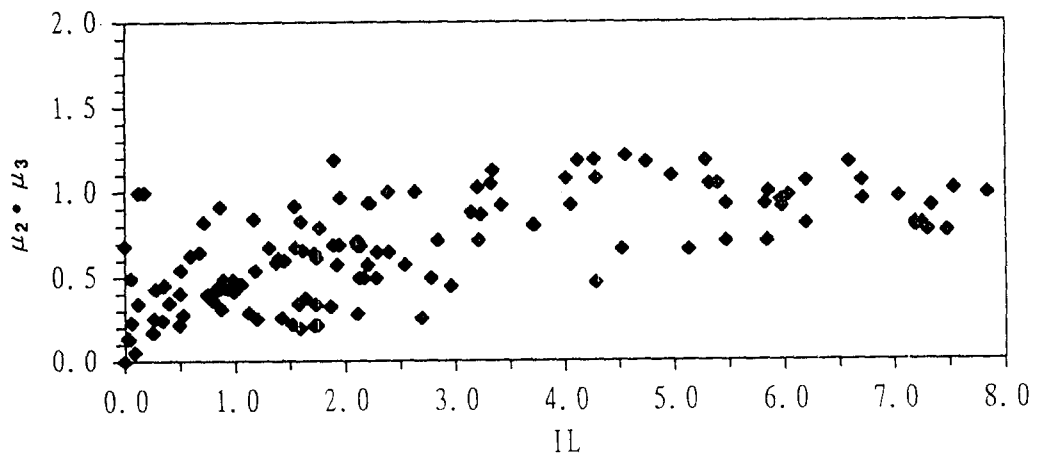


그림 2.  $I_L - \mu_2\mu_3$  상관도

### 3.4 F, $I_L$ , $M_{IL}$ 의 적용성 판단

이상의 지수들을 국내 고속도로에 있는 140 여개 교량교대 현장에 적용하여 F값을 분석한 결과, 측방유동 가능성이 있는 교대가 126개, 13개 교대는 안정하다고 판정이 난 반면,  $I_L$ 지수로 검토한 바에 의하면 측방유동 가능성이 있는 교량 교대가 94개, 그렇지 않은 교대가 42개 판정되어 두 식의 적용에 있어 많은 혼란을 가져온다. 한편, 본 연구진이 제안한 수정측방이동판정지수( $M_{IL}$ )의 적용결과는 교대의 횡방향 이동 가능성이 있는 교량수는 121개, 없는 교량수는 15개로 F값과 유사성을 많이 갖고 있다.

#### 3.4.1 C(연약지반의 점착력)값에 의한 F, $I_L$ 지수 및 수정 $I_L$ 지수의 분석

그림 3과 표 1에 의하면, 연약지반의 점착력 값이  $1\text{tf/m}^2$ 이하,  $10\text{tf/m}^2$ 이상의 수치에서는 측방유동유무를 나타내는 판정지수값들이 대체적으로 일치하는 경향을 보이나,  $1\text{tf/m}^2$ 와  $10\text{tf/m}^2$ 사이에서는 모두 28개의 불일치를 보인다. F지수에서 변위 발생유무의 기준상수 "4"를 "2"로 바꾸면  $I_L$ 지수와 대체적으로 일치하는 경향이 보이며, 이것은 F 값이 2 ~ 4 사이에서 민감한 변위 변동에 영향을 받는 것으로 판단된다. 연약지반의 점착력은 대부분  $1 \sim 4\text{tf/m}^2$ 인 점을 감안하여 이 범위에서 비교를 하면, F 값은 대상 교대 107교대 중에서 100개의 교대가 변위를 일으킬 가능성이 있는 것으로 나타났고,  $I_L$ 지수는 대상교대 104교대중 82개의 교대가 변위를 일으킬 가능성이 있는 것으로 나타나 14%정도의 차이가 나타났다. 역으로,  $I_L$ 지수에서 말뚝의 영향을 줄이기 위해서  $\mu_1$ 값을 포함시키지 않고 나타낸 수정  $I_L$ 지수 값으로 다시 재편성하여 F지수와 비교하여 보면, 불일치하는 교대가 2개 정도로 대폭 줄어든다. 즉, F지수의 판정

기준인 상수 "4" 를 "2" 로 낮추던가, 아니면,  $I_L$ 의  $\mu_1$ 의 값을 배제한 수정  $I_L$ 지수 값을 사용하여 F 값과  $I_L$ 지수의 일치폭을 넓혀서 사용하는 것이 판단의 정확도를 높이는 방법이라 생각된다.

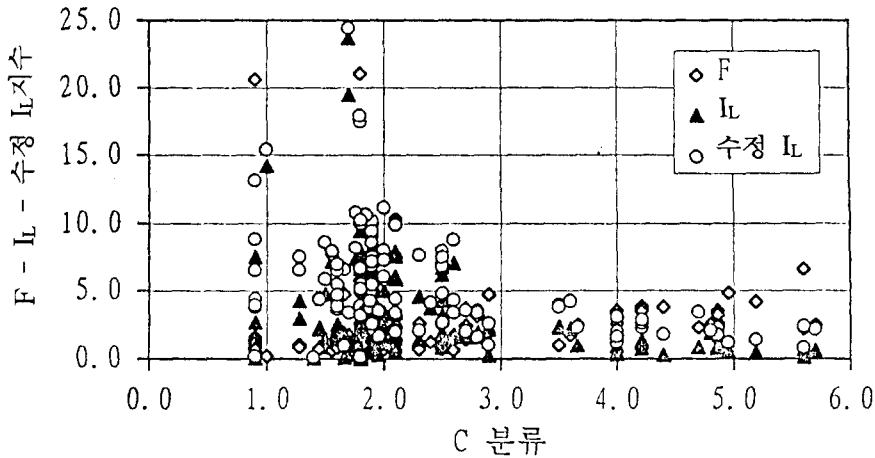


그림 3. C 분류 -(F -  $I_L$  - 수정  $I_L$ 지수) 상관도

표 1. C (점착력) 분류에 의한 F값,  $I_L$ 지수, 수정 $I_L$ 지수의 상관도

측방이동 판정값 C 값		F 값			$I_L$ 지수			수정 $I_L$ 지수		
		범위	교대수		범위	교대수	F값과 비교	범위	교대수	F값과 비교
			3단계	2단계						
0 ~ 1	8	0~2	7	7	1.5이상	7		1.5이상	7	
		2~4	0							
		4이상	1	1						
1 ~ 2	64	0~2	53	59	1.5이상	48	8 불일치	1.5이상	56	
		2~4	6							
		4이상	5	5						
2 ~ 4	43	0~2	33	41	1.5이상	34	7 불일치	1.5이상	41	
		2~4	8							
		4이상	2	2						
4 ~ 10	21	0~2	4	18	1.5이상	5	13 불일치	1.5이상	17	1 불일치
		2~4	14							
		4이상	3	3						
10 이상	3	0~2	0	1	1.5이상	0	1 불일치	1.5이상	0	
		2~4	1							
		4이상	2	2						
계	139	139		136			136			

### 3.4.2 D(연약지반의 깊이)값에 의한 F, $I_L$ 지수 및 $M_L$ 지수의 분석

연약층의 깊이 10m이상에서는 지수 값들 사이에 불일치하는 정도가 80개의 교대 중에서 5개 중 F,  $I_L$ 지수가 잘 일치하나, 10m미만인 경우에는 불일치하는 정도가 61개 교대중 27개가 불일치하여 약 44%의 불일치를 나타낸다. 이것은 심각한 정도의 불일치로써 연약층의 깊이가 비교적 얕다고 판단되는 곳에서는 이들 F,  $I_L$ 지수를 사용하는데 주의가 요구된다. 수정  $I_L$ 지수 값을 이용하여 측방이동 판단 기준 상수를  $I_L$ 지수와 마찬가지로 1.5로 하여 F 값과 비교하여 보면, 불일치의 정도는 1개로 일치 폭이 매우 크다고 볼 수 있다(표 2, 그림 4).

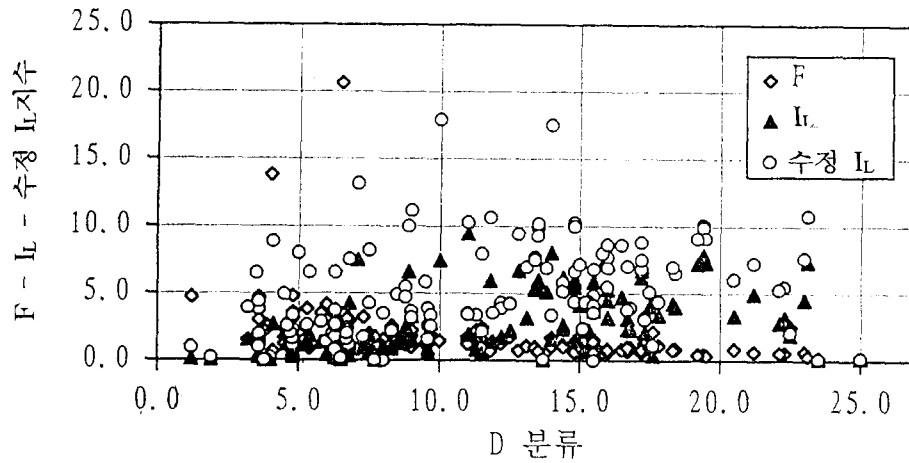


그림 4. D 분류 - (F - L - 수정 L지수) 상관도

표 2. D (연약층깊이) 분류에 의한 F값, L지수, 수정L지수의 상관도

D 값	측방이동 판정값	F 값			L 지수			수정 L 지수		
		범위	교대수		범위	교대수	F값과 비교	범위	교대수	F값과 비교
			3단계	2단계						
0 ~ 5	21	0~2	8	15	1.5이상	7	7 불일치	1.5이상	13	
		2~4	7					1.5이하	6	
		4이상	6					6	1.5이하	
5 ~ 10	40	0~2	18	36	1.5이상	16	20 불일치	1.5이상	34	1 불일치
		2~4	18					1.5이하	23	
		4이상	3					3	1.5이하	
10 ~ 15	33	0~2	30	32	1.5이상	29	3 불일치	1.5이상	32	
		2~4	2					1.5이하	4	
		4이상	1					1	1.5이하	
15 ~ 20	34	0~2	31	33	1.5이상	31	2 불일치	1.5이상	32	
		2~4	2					1.5이하	2	
		4이상	0					0	1.5이하	
20 ~ 25	11	0~2	8	9	1.5이상	9		1.5이상	9	
		2~4	1					1.5이하	2	
		4이상	2					2	1.5이하	
25이상	2	0~2	2	2	1.5이상	2		1.5이상	2	
		2~4	0					1.5이하	0	
		4이상	0					0	1.5이하	
계	141		139		138			136		

### 3.4.3 $\gamma$ H(성토하중)값에 의한 F, L지수 및 M<sub>L</sub>지수의 분석

성토하중의 단계를 0~10, 10~20, 20~30, 30이상의 4단계로 나누어 판정지수를 비교하였다. 성토체의 단위중량을 2.0tf/m<sup>2</sup>으로 보면, 고속도로건설시 성토고의 높이는 대부분 2단계와 3단계에 속하며, F 값에 의하면 이동의 가능성이 있는 교대는 126개 교대중 94%인 118개 교대가 이동의 가능성이 있는 것으로 나타났으며, L지수로는 125개 교대 중에서 67%인 86교대가 이동의 가능성이 있는 것으로 나타나 27%의 차이가 났다. 분석결과, F값의 기준상수를 2로 한 경우와 L의 상관관계, F값의 기준상수를 4로 하고 수정 L

지수 값과 관계가 각각 높은 일치성을 나타냈다(표 3, 그림 5).

F - I<sub>L</sub>, F - 수정 I<sub>L</sub>지수의 상관관계는 모두 역수관계를 나타내고 있으며, 이것은 안정수(N<sub>b</sub>)에 의해 역수관계를 나타내며, F 값의 범위 5이내와 I<sub>L</sub>지수의 범위 10안팎에서 서로 일치성을 나타내며, F - 수정 I<sub>L</sub>지수의 상관관계는 F - I<sub>L</sub>의 관계와 비슷한 양상을 보였다.

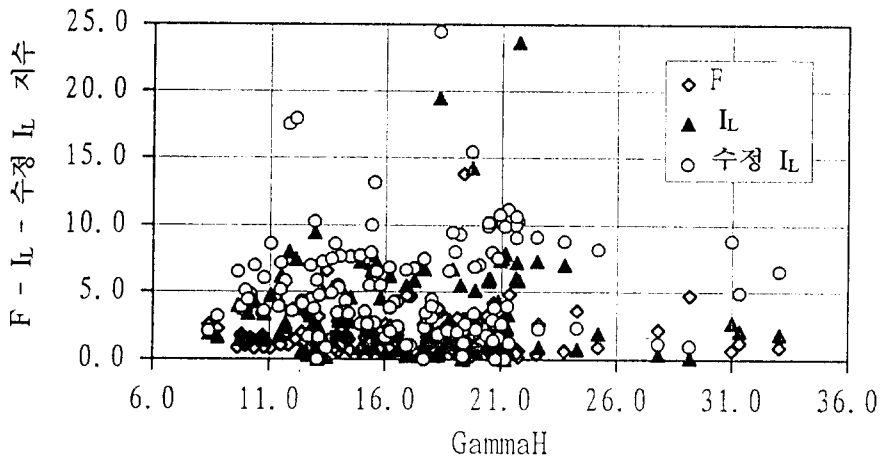


그림 5.  $\gamma H$  분류 - (F - I<sub>L</sub> - 수정 I<sub>L</sub>지수) 상관도

표 3.  $\gamma H$  (성토하중) 분류에 의한 F값, I<sub>L</sub>지수, 수정 I<sub>L</sub>지수의 상관도

$\gamma H$ 값	측방이동 판정값	F 값		I <sub>L</sub> 지수			수정 I <sub>L</sub> 지수			
		범위	교대수		범위	교대수	F값과 비교	범위	교대수	F값과 비교
			3단계	2단계						
0 ~ 10	13	0~2	4	6	1.5이상	5	1 불일치	1.5이상	6	
		2~4	2		1.5이하	5		1.5이하	4	
		4이상	4		4	1.5이하		5	1.5이하	
10 ~ 20	93	0~2	68	88	1.5이상	65	22 불일치	1.5이상	85	1 불일치
		2~4	20		1.5이하	27		1.5이하	6	
		4이상	5		5	1.5이하		27	1.5이하	
20 ~ 30	35	0~2	22	30	1.5이상	21		1.5이상	28	1 불일치
		2~4	8		1.5이하	12		1.5이하	4	
		4이상	3		3	1.5이하		12	1.5이하	
30이상	3	0~2	3	3	1.5이상	3		1.5이상	3	
		2~4	-		1.5이하	-		1.5이하	-	
		4이상	-		-	1.5이하		-	1.5이하	
계	144	139		138			136			

#### 4. 결론

현재까지 연약지반에 설치되는 구조물의 변위에 대한 설계는 모두 구조적인 것으로, 지지기반으로 거동하는 연약지반의 특성에 대한 배려가 부족했다. 그러나, 이제는 이러한 설계에 대한 고정관념을 버리고 연약지반의 일반성토 뿐만 아니라 구조물의 뒷채움 시에도 특별한 관심을 기울여야 한다.

측방유동 판정식으로 F(측방유동지수)와 I<sub>L</sub>(교대 측방이동 판정지수)을 우리공사에서 담당하고 있는

140여개의 교대에 적용하여 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. F값을 적용한 결과 128개 교대,  $I_1$ 값을 적용한 결과 95개 교대가 측방변위를 일으킬 가능성이 있는 것으로 판정되었다. 두 지수간의 불일치는 44개로 약1/3정도가 상호 맞지 않는 것으로 나타났다. 이는 일본의 토질상태에 맞춘 경험식이기 때문에, 이와 같은 편차가 나타난 것으로 판단된다.
2. 이들 판정지수 값은 연약지반 처리공법의 영향이 고려되지 않았다. 즉, 많은 교대에서 나타난 변위 값이 예측 값에 못 미치거나 거의 발생하지 않았으며, 이는 압성토나 그 밖의 연약지반 특성이 고려되지 않아서 생긴 오차로 판단된다.
3. F 값에서 변위발생유무의 기준상수가 4인데, 이 수치를 2로 낮추면 우리교량교대의 경우  $I_1$ 지수와 대체적으로 일치하는 경향을 보이며, 이 값은 F 값이 2 ~ 4사이에서 민감한 변위변동을 나타낸 것으로 판단된다.
4. 연약지반상에 건설되어 있는 우리공사 교량교대에 F값 및  $I_1$ 지수 값을 적용한 결과 두 판정지수에 있어 많은 불일치를 나타냈다. 하지만, 본 연구에서 조사한 바에 의하면  $I_1$ 지수 값을  $\mu_1$ 으로 나눈 수정  $I_1$ 지수 값과 F값은 판정에 있어 아주 높은 일치성을 보이고 있음을 알 수 있었다.
5. 조사한 교대의 수나 여러 조사 항목에서 교대의 변위에 대한 자료수집이 매우 미흡한 것으로 판단된다. 이것은 시공중인 교대와 교대의 변위가 문제시되는 교량은 별도의 관리가 가능하나, 그 밖의 교량은 체계적으로 측정된 자료의 부족 및 측정 기자재의 부재 등으로 교대변위에 관한 충분한 자료의 취득이 어려웠다.

## 참고 문헌

1. 장용채 외 4인, “연약지반상의 압밀변형에 따른 수치해석”, 1993년도 대한토목학회 학술발표회개요집 (I), pp.487-490, 1993.
2. 장용채, 이강일, 연약지반에서의 토질공학, 도서출판 새론, 제4장, 제5장, 1995.
3. 정재성, “연약지반상 성토에 의한 교대의 측방이동”, 전남대학교 석사학위 논문, 1995.
4. 홍원표, “수동말뚝”, 중앙대학교 출판부, 1994.
5. Kimura Mamoru : “軟弱地盤上の橋臺の側方移動對策”, 土と基礎, 30-5(292), pp.33-40, 1982.
6. 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.
7. 실용 연약지반대책기술 편람위원회, “실용 연약지반대책기술 편람”, 1995.