

연약지반에서의 말뚝기초 교대의 측방유동 대책공법 적용에 관한 연구 A study on the stability of pile bridge abutment on soft ground undergoing lateral flow

오일록¹⁾, Ill-Rok Oh, 채영수²⁾, Young-Su Chae

¹⁾ 삼부토건, Civil Engineer, R&D Dept of Sambu Construction CO., Ltd.

²⁾ 수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng, The Univ. of Suwon

SYNOPSIS : An existing studies concern about movement of pile bridge abutments. However, lateral displacement cause the serious failure of bridge by embankment under soft soil lateral flow. A intention is obtained by analyzing the relationship between the safety factor of evaluation for lateral movements. Precise investigation and analysis are performed, in which the lateral movement of bridge abutments has occurred, and construct design strut-slab between bridge abutments in order to restraint lateral flow. As a result of this study, it was found that when evaluation for lateral movements is allowed to use Tschebotarioff's method and lateral flow decision number (I) and revision lateral flow decision number (M_i) by Korea Highway Corporation. Most important thing is decision of pressure of lateral flow at this case. Tschebotarioff's isoscales triangle method have no trouble analysis of pressure of lateral flow. Strut-slab method are nearly not have constructed case in this field site study that applied method. The method are between abutments combined steel strut and reinforced concrete slab. This method are effective restraint lateral flow but have little difficulty if long span bridge between abutments.

Key words : Lateral flow, Strut-slab, Pressure of lateral flow, Lateral flow decision number I, M_i

1. 서론

성토에 인접한 교대말뚝기초, 기존 구조물에 근접한 토류벽, 활동사면 내의 억지말뚝, 불안정한 사면에 설치된 횡잔교 말뚝기초, 기존 구조물에 인접한 말뚝 항타시공 등의 경우 연약지반에서는 편재하중이나 압밀침하에 의한 측방유동 현상이 빈번히 발생한다. 최근 국내에서도 연약지반인 서·남해안 지역(영종도, 당진, 군장, 광양만, 가덕도)을 중심으로 한 건설공사가 활발히 진행되면서 측방유동과 관련된 교대말뚝기초나 토류벽의 변형문제가 많이 발생하고 있다. 본 논문에서는 교대 측방유동 현상이 발생한 현장을 중심으로 연약지반에 시공된 교대기초, 말뚝기초등의 토류구조물을 대상으로 배면 편차성토에 의해 발생하는 측방유동의 발생메카니즘을 규명하고 이를 바탕으로 국내 지반조건을 반영한 토류구조물의 안정해석기법을 개발하는데 그 목표를 두고 있다. 그리고 측방유동에 대한 판정기준 및 평가방법을 마련하여 토류구조물에 대한 실제진단시 실무적으로 활용할 수 있는 방법과 시공법을 제안하고자 한다.

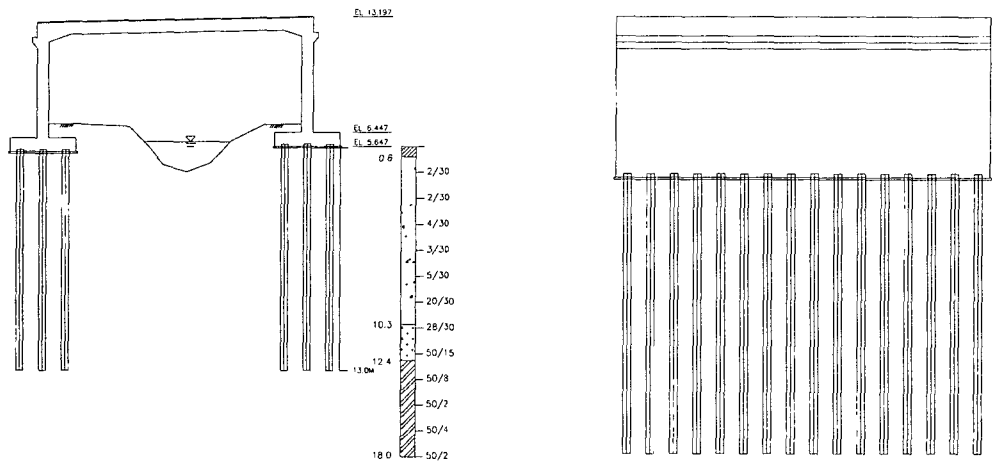
2. 현장의 개요

논산-상월간 도로확,포장공사의 갈산 2교 시공에 있어 <그림 1>에서 보는 바와 같이 연약지반상에 축조되는 rahmen 교량의 교대가 교대 뒷채움 성토로 인한 편재하중으로 지반의 측방유동(lateral

plastic flow)과 교대 수평변위를 발생시켰다. 본 교량구조물을 이미 시공 완료된 상태이며 후속공정인 교대 뒷채움성토를 실시하던중에 측방유동이 발생하여 구조물의 안정성 확보를 위해 교대배면 뒷채움 성토부를 후방 20m까지 제거한 상태이다.

2.1 지반분석

측방유동이 일어난 현장을 조사한 결과 수십년전 무연탄 채석장으로 활용되었던 구간으로 $N_{값}$ 2~5, 일축압축강도 $q_u=0.25\sim0.5(kgf/cm^2)$ 정도의 연약점토층의 두께가 약 5~8m 정도이며 paper drain에 의한 surcharge 공법이 적용되어 안정화 처리가 되었다. 그러나 급속시공으로 인해 연약지반 상에 성토하중이 작용되면서 하부지반은 초기 탄성거동을 보이다가 하중이 계속적으로 증가하여 미처 소산되지 못한 과잉간극수압의 급증으로 강도가 저하되고 소성영역이 확대되어 소성적인 유동이 일어난 것으로 판단된다.



(a) 평면도

Steel pile $\phi 406.4$ 3열 16행

(b) 단면도

<그림 1> 현장 토질주상도의 평면도 및 단면도

2.1.1 지형 및 지질

본 지역은 대부분 해발 100m 이하의 저구릉성 들과 평야로 이루어져 있으며 대부분 지역은 개간되어 농경지로 이용되고 있다.

(1) 각 지질의 토질특성

본 지역의 토질특성 및 지층단면을 파악하기 위하여 교량교대부근에서 시추조사를 추가로 실시하였다. 지반조사결과 본 지역은 지표면으로부터 매립층, 실트질 점토층, 모래층, 모래자갈층 및 풍화토층으로 구성되어 있으며 교량중양부 자연소하천으로 지하수위는 교대저면 직하에 위치하고 있다.

(가) 매립층

본 층은 매립되어 형성된 지층으로 G.L \pm 0.0m~G.L-0.6m에 위치하고, 점토 및 모래를 함유하고 있으며, 지반의 연경도 $N_{값}$ 7/30으로 느슨한 상태로 구성되어 있다.

(나) 실트질점토층

본 층의 상부는 실트를 약간 함유한 상태로 하부로 갈수록 실트함량이 증가하고 있고 습윤상태이

다. 본 층의 두께는 9.7m로 N값 2/30~5/30의 연약한 점토층은 6m이며 하부는 비교적 단단한 점토층으로 구성되어 있다.

(다) 모래층

본 층은 G.L-10.3m~G.L-12.4m에 위치하고 있고 습윤상태로 거의 균등한 모래로 구성되어 있다.

(라) 모래자갈층

본 층은 G.L-12.4m~G.L-18.0m에 위치하고, 잔자갈~큰자갈 크기의 입도분포를 보이고 있다.

(2) 시험 결과

현장지반에서의 연약점토층에 대해 원위치 시료를 채취하여 실내시험을 실시한 결과 및 비배수 전단강도는 불교란시료를 채취할 수 없는 초연약 점토이어서 배인전단시험에 의한 값을 나타낸 것이 < 표 1>이다.

<표 1> 시험결과

구 분	실타질 점토층
$\gamma_t (tf/m^3)$	1.75
연약층 두께 (m)	6.0
$C_v (cm^2/sec)$	0.00240
C_c	0.470
e_o	1.218
비배수전단강도 $C_u (tf/m^2)$	1.8
연경도 I_c	0.75

2.2 축방유동평가법

국내외에서 축방유동평가법을 보면 Tschebotarioff, 미연방 도로국(FHWA), 축방변위지수(R), 연경도지수(I_c), 축방이동계수(I), 수정 축방유동계수(MI)등 여러 가지가 있으며 합리적인 방법은 교대 기초말뚝의 설계를 실용적으로 고려하고 지반의 안정성을 극한 평형문제로 취급하는 접근방식이 바람직할 것이다.

2.2.1 Tschebotarioff 방법

Tschebotarioff(1973)는 교대배면과 전면의 성토고 차이로 유발되는 사면의 불안정만을 기준으로 축방유동의 가능성을 판정하는 방법을 제시하였다. 연약지반의 비배수 전단강도에 대하여 연약지반상에 성토시킬 수 있는 최대높이를 분석한 결과에 의하면 성토높이의 증가에 따라 증가하는 상재하중이 연약층의 비배수 전단강도의 3배가 되면 전단변형이 발생하기 시작함을 나타내고 띠기초인 경우에는 5.14배, 정사각형 기초인 경우에는 7.95배가 되면 전단파괴가 발생함을 예측할 수 있다.

2.2.2 축방이동계수(I)에 의한 판정법

이 방법은 일본 건설성 토목연구소에서 제안한 방법으로 식(1)과 같이 축방이동계수(I)를 구하여 그 값이 1.2이상일 경우 축방유동 가능성이 있다고 판정한다.

교대의 축방이동에 관련된 요인으로는 교대, 말뚝기초, 지반에 관한 각종 요인이 고려되고 있지만 일본 건설성 토목연구소에서는 교대의 축방이동이 흙구조물의 안정문제와 깊은 관련이 있는 것으로

성토의 안정계수로 분석하였다.

$$I = \mu_1 \mu_2 \mu_3 \frac{\gamma H}{C_u} \quad (1)$$

여기서,

- μ_1 : 연약층 두께에 대한 보정계수(D/L) μ_2 : 말뚝자체의 저항폭에 대한 보정계수($\sum b/B$)
 μ_3 : 교대길이에 대한 보정계수(D/A ≤ 3.0) v : 성토지반의 단위중량 (tf/m^3)
H : 성토높이(m) C_u : 연약층의 평균 점착력 (tf/m^2) A : 교축방향의 기초폭(m)
B : 교축 수직방향의 기초폭(m) $\sum b$: 교축 수직방향의 말뚝폭 합계(m)
L : 기초의 근입길이(m) D : 연약층의 두께(m)

2.2.3 수정 측방유동계수(M₁)

현재 국내에서 주로 사용하고 있는 측방유동 판정식들은 외국의 사례에 기초하여 제시된 기준으로 국내 상황에 그대로 적용하기에 무리가 따라서 한국도로공사에서는 1995년에 국내 140여 개의 교량, 교대의 자료를 수집·분석하여 기존의 측방유동 판정식을 수정하여 수정지수 (M₁)를 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$M_1 = \alpha \cdot \frac{\gamma \cdot h}{C_u} \quad (2)$$

여기서,

α : 측방유동압을 받는 기초 하부 면적에 대한 교대 면적비 (= (b · D)/(B/A))

2.2.4 측방유동 평가분석

본 연구대상 현장에 대해 여러 제안방법들에 의한 평가결과는 <표 2>와 같다.

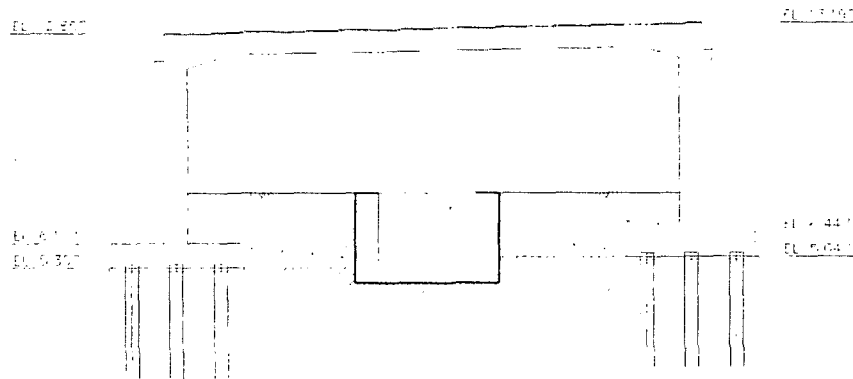
<표 2> 측방유동평가 제안식에 따른 분석결과

제안방법	기준치	결과	비고
Tschebotarioff	3이상 발생	6.86	편재하중평가
미연방기준 (FHWA)	3이상 발생	8.4	편재하중평가
측방변위지수(R)	1.4이하 발생	1.3	편재하중과 사면안정과의 관계
연경도(I_c)	1.6	0.831	사면안정해석
말뚝기초를 무시한 사면안정	1.0	0.831	사면안정해석
측방유동지수(F)	0.04이하 발생	0.024	편재하중평가
측방이동계수(I)	1.2이상 발생	1.948	편재하중평가 구조물의 특성평가
수정 측방유동 계수(M ₁)	1.2이상 발생	2.058	편재하중평가 구조물의 특성평가

<표 2>에서 알수 있듯이 주로 편재하중을 어떻게 평가하는가에 대해서는 유사한 결과가 나왔으나 Tschebotarioff가 제안한 방법이 비교적 안전측으로 해석 되었으며 여기에 구조물의 특성을 동시에 평가하는 경우에는 측방이동계수(I)에 의한 방법이 안전측으로 해석되었다. 또한 사면안정해석의 경우에는 말뚝기초를 무시한 사면안정해석방법이 안전측으로 해석되었으나 이는 과다설계의 문제점을 가지고 있으며 전반적으로 편재하중에 의한 평가인 Tschebotarioff방법과 측방유동지수(F), 측방이동계수(I)방법을 조합해서 평가하는 것이 옳다고 판단된다.

2.3 대책공법의 선정

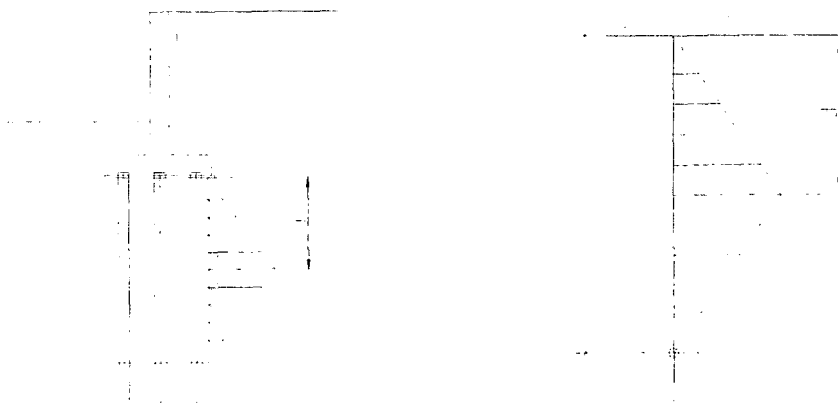
<그림 2>와 같이 본 현장은 지하수위가 높게 위치하며 지반보강에 효과를 신빙할 수 없기 때문에 보다 적극적인 방법으로 교대와 교대사이가 적은 교량에 구조물로서 측방이동을 허용하지 않는 strut-slab공법을 적용하였다.



<그림 2> Strut-slab 대표단면

2.3.1 측방유동압의 산정

본 연구에 적용된 측방유동압은 <그림 3>과 같이 Tschebotarioff가 제시한 이등변삼각형 분포형태의 측방유동압을 사용하여 구하고 교대배면 토압과 측방유동압을 strut가 부담하는 것으로 가정해서, FLAC프로그램을 이용하여 측방유동압을 검증하였다.



<그림 3> 말뚝에 작용하는 측방유동압

(1) 측방토압에 관련하여 말뚝에 작용하는 측방유동압

$$P = a \times \gamma \times H \times d \quad (t/m) \quad (3)$$

여기서,

a : 유동압계수 H : 편재성토고 (안전측 성토고에서 교대 저판두께만 제외한다)

d : 콘크리트후 푸팅에서 전측방토압 작용점까지의 거리 (연약지반층의 두께/2, 양질토사치환 감안)

$$P_{\max} = 0.8 \times 1.9 \times 7.55 \times \frac{9.5}{2} = 54.511 \text{ tf/m}$$

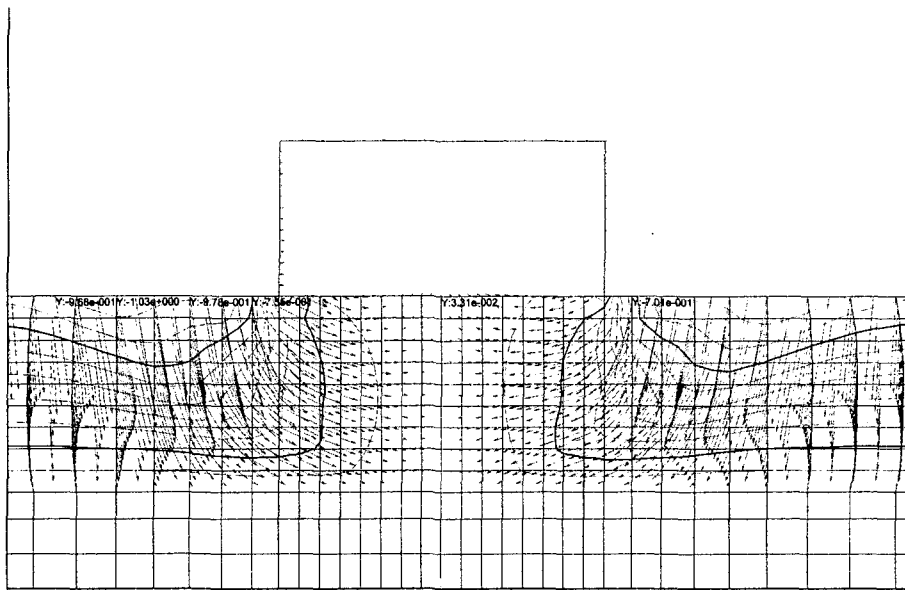
$$\sum P_H = \frac{54.511 \times 9.5}{2} \times 19.5 \text{ (교축직각방향 저판길이)} = 5049.08 \text{ tf/m}$$

$$R_B = \sum \frac{P_H}{2} / (\text{말뚝열수} \times \text{말뚝본수}) = \frac{5049.08}{2} / (3 \times 16) = 52.59 \text{ tf}$$

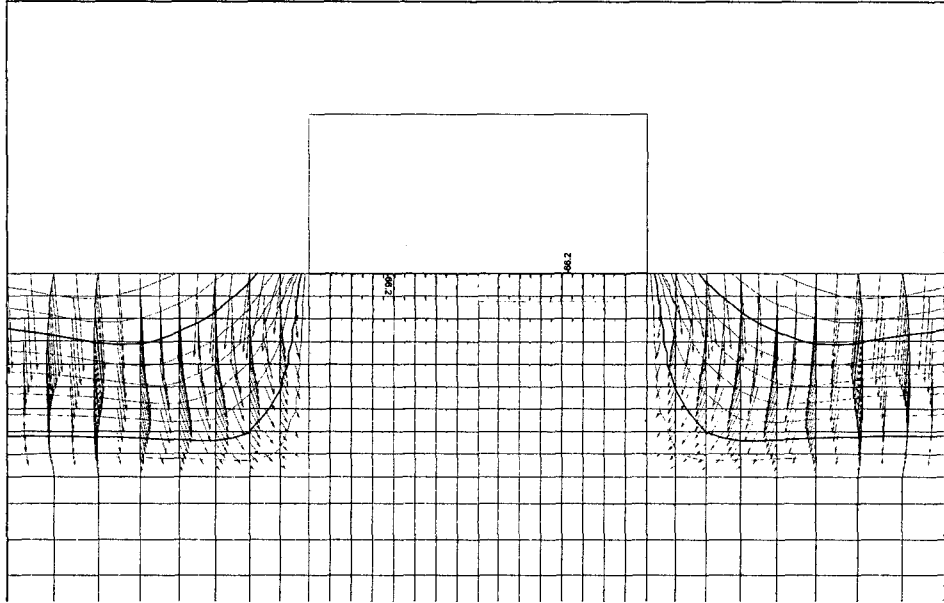
strut 에 작용하는 수평토압력은 (Strut의 간격은 2.8m)

$$\therefore P_{H1(\text{strut})} = R_A \times 2.8 = 147.3 \text{ tf/EA}$$

(2) 교대변위에 대한 FLAC 해석결과는 <그림 4>와 같이 7.01cm로, 실측된 변위량 8cm와 근접하고 구조물 특성을 조절하여 그 때 발생하는 연약점토층의 최대수평유동압을 계산한 결과 <그림 5>와 같은 50(tf/m²)으로 Tschbotarioff에 의한 방법보다 적게 나왔기 때문에 Tschbotarioff의 방법에 한 측방유동압은 안전측으로 해석되었다



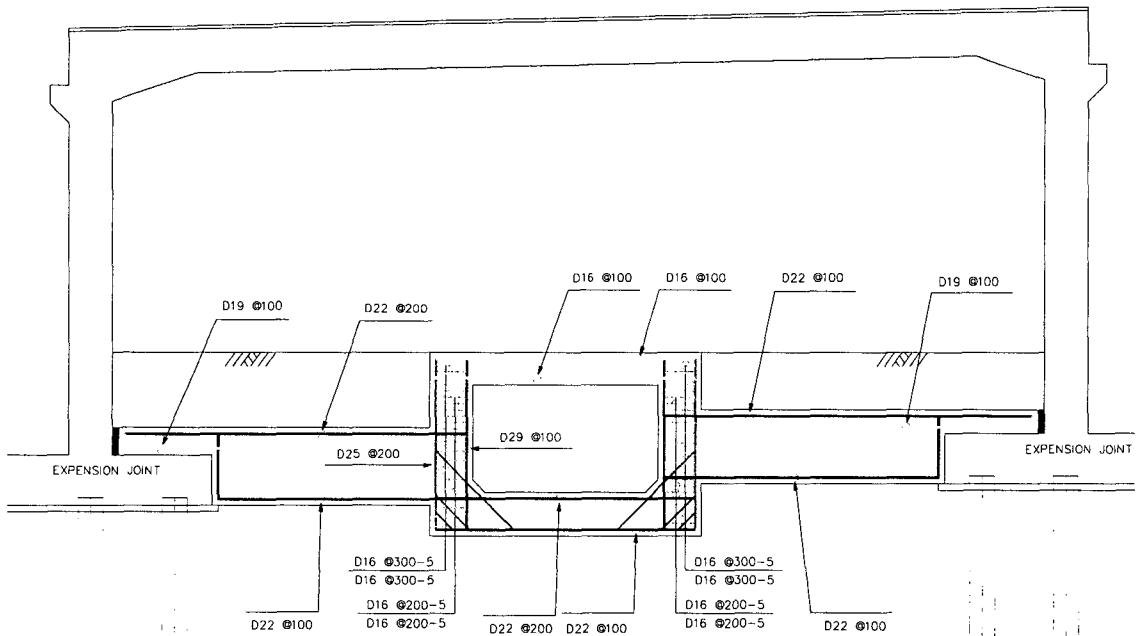
<그림 4> FLAC 해석결과 = 7.01cm



<그림 5> 변위 및 최대수평 유동압

2.3.2 설계결과

대책공법인 strut-slab의 세부 설계결과도는 <그림 6>과 같다.



<그림 6> Strut-slab의 세부설계 결과도

3. 결론

본 연구는 연약점토층상에 시공된 교대와 교대사이가 작은 RC rahmen교량에서 측방유동이 발생함에 따라 이를 중심으로 지반분석 및 측방유동평가법 분석, 대책공법의 선정에 대하여 서술하였고 우리나라에서 적용실적이 거의없는 strut-slab공법의 설계 및 측방유동압의 산정방법에 대하여 연구하여 보았다.

(1) 국내외 소개된 측방유동 평가법으로서는 Tschebotarioff방법과 측방이동계수(I)에 의한 판정이 다소 안전측으로 해석되었고 한국도로공사에서 국내실정에 맞게 자료를 수집 분석한 수정측방유동판정계수(Mi)로서의 판정에도 무리가 없는 것으로 판단된다.

(2) 교대말쪽에 작용하는 측방유동압은 Tschebotarioff가 제안한 이동변삼각형분포에 의한 방법을 적용하였으며, FLAC해석에 의한 변위 및 측방유동압추정결과와 유사하게 나타남에 따라 이를 적용함이 타당하다고 판단된다.

(3) 국내 적용실적이 거의없는 strut-slab 공법을 교대지간이 긴 경우에 적용하기는 힘들다는 단점이 있으며 측방유동압을 교대와 교대사이의 strut구조물로서 지지하기 때문에 교대저판에서 저항할 수 있는 구조물로 설계하여야 하며 상부구조물에 영향을 미쳐서는 안된다. 또한, 교대배면의 보강과 함께 적용하면 좀더 효과적인 측방유동대책이 될것으로 판단한다.

참고문헌

1. 박찬호, 김수일, 이승래, 정상삼, 백세환 (1994). "교대변위 및 도로침하에 대한 사례분석.", '94년도 봄 학술발표회 논문집, 지반구조물 변위에 관한 사례분석과 환경매립기술, 한국지반공학회, pp. 19-30
2. 일본도로공단. (1979). "연약지반상의 교대기초에 관한 조사연구보고서",
3. 이종규, 박찬호, 이명환, 이인모, 이명재. (1994). "교대의 측방변위 발생에 대한 사례분석", '94년도 봄 학술발표회 논문집, 지반구조물 변위에 관한 사례분석과 환경매립기술, 한국지반공학회, pp. 31-42
4. 홍원표, 송영석, 신도순, 손규만. (2001). "측방유동 연약지반상 교대의 안정성". 한국지반공학회논문집 Vol.17, No.4, pp.199-208
5. 한국도로공사. (1995). "교대변위 억제대책에 관한 연구(I)", 도로연 5-23-6
6. Bolton, M. D., Sun, H. W., and Britto, A. M. (1993). "Finite Element Analysis of Bridge Abutments on firm Clay," Computers and Geotechnic, 15, pp221-245
7. Federal Highway Administration. (1996). Design and Construction of Driven Pile Foundation. FHWA-HI-96-033, National Highway Institute.
8. Tschebotarioff, G. P. (1973). "Lateral Pressure of Clay Soils on Structures." Proc., 8th ICSMFE, Speciality Session 5, Moscow, 4(3), pp227-280