

측방유동 발생 시 성토사면에 시공된 교대의 영향에 대한 연구

A Study on Influence of Constructed Bridge Abutment in Landfill Slope under Laterally Displacing

이 한 규¹⁾ · 홍 종 옥²⁾ · 천 병 식[†]

Hangyu Lee · Jongouk Hong · Byungsik Chun

Received: September 9th, 2013; Revised: September 17th, 2013; Accepted: November 13th, 2013

ABSTRACT : The damage caused by lateral movement occurs frequently on site where abutment or retaining wall was built on soft ground along with embankment behind and the study on stability of abutment against lateral movement has been mostly focused on soft ground. However lateral movement occurs not only on soft ground but also on embankment slope which causes the impact on structure. The bridges built in Korea are mostly on mountainous area than soft ground. This study is intended to analyze the ground behavior resulting from lateral movement using finite element analysis method to the section as well as propose the basic data for abutment design on embankment slope through the analysis of the outcome of reinforcement method. As a result, when it comes to the reinforcement with soil surcharge and stabilized pile in slope, lateral movement was reduced by 4~30% and displacement on bearing shoe on abutment was reduced by 2~13%. On the contrary, when reinforced with EPS, lateral float was reduced by 97% and maximum horizontal displacement of bearing shoe on abutment was reduced by 95%. Thus, it's necessary to identify the design technique which is applicable to domestic condition through additional tests and more reliable study using numerical analysis and comparing the measured values shall follow.

Keywords : Lateral movement, Embankment slope, Abutment, Retaining wall, Stabilized pile

요 지 : 국내에서 지반의 측방유동으로 인한 피해가 가장 빈번하고 극명하게 나타나는 사례는 주로 연약지반에 교대 및 옹벽을 시공하고 배면에 성토를 진행하는 경우로서 측방유동으로 인한 교대의 안정성에 대한 연구는 연약지반에서의 연구가 대부분이다. 그러나 측방유동은 연약지반뿐만 아니라 성토사면에서도 발생하며, 이로 인해 인접구조물에 영향을 미치게 된다. 특히 국내에서 시공되는 교량 중에는 연약지반 위에 시공되는 경우보다 산지에 시공되는 경우가 많다. 이에 본 연구에서는 현장단면에 대한 유한 요소해석을 통해 성토사면의 측방유동으로 인한 지반거동을 분석하였고, 그에 따른 적절한 보강 공법의 결과 분석을 통해 성토사면에 설치된 교대설계에 관한 기초자료를 제시하고자 하였다. 그 결과, 압성토와 사면에 억지말뚝으로 보강하였을 경우에는 측방유동은 4~30% 감소하는 것으로 나타났고, 교대 교좌부의 변위는 2~13% 감소하는 것으로 나타났다. 한편, EPS로 보강하였을 경우에 측방유동은 약 97% 감소하였고, 교대 교좌부의 최대수평변위는 약 95% 정도 감소하였다. 향후, 국내 여러 현장을 대상으로 추가적인 실험을 지속적으로 수행하여 보다 국내 여건에 부합하는 설계 기법의 도출이 요구되며, 수치해석 및 실측치를 비교·분석함으로써 지금보다 신뢰성 있는 연구가 뒤따라야 할 것이다.

주요어 : 측방유동, 성토사면, 교대, 압성토, 억지말뚝

1. 서 론

지반의 측방유동은 연약지반 상에 교대나 옹벽 등을 설치하고 뒷채움을 할 경우, 구조물 전면부와 배면부의 성토차로 인하여 편차토압이 발생하여 하부의 연약지반이 수평 방향의 압력을 받아 유동하는 현상을 말한다(Peck, 1969). 성토에 인접한 교대 말뚝기초, 기존 구조물에 근접한 토류벽 및 말뚝 항타시공, 활동사면 내의 억지말뚝, 불안정한 해저사면에 설치된 횡간교 말뚝기초, 연약지반의 편차 성토하중 등에

의해 빈번히 발생하는데, 측방유동은 연약지반뿐만 아니라 성토사면에서도 발생하며, 이로 인해 인접구조물에 영향을 미치게 된다. 국내에서 지반의 측방유동으로 인한 피해가 가장 빈번하고 극명하게 나타나는 사례는 주로 연약지반에 교대 및 옹벽을 시공하고 배면에 성토를 진행하는 경우로서 측방유동으로 인한 교대의 안정성에 대한 연구는 연약지반에서의 연구가 대부분이다. 그러나 측방유동은 연약지반뿐만 아니라 성토사면에서도 발생하며, 이로 인해 인접구조물에 영향을 미치게 된다. 연약지반에서의 측방유동 현상에 대해서

1) Dongbu Corporation

2) Dept. of Civil and Environmental Eng., Hanyang University

† Dept. of Civil and Environmental Eng., Hanyang University (Corresponding Author : hengdang@unitel.co.kr)

는 Peck(1969)이 공학적으로 처음 정의한 이후 Tschebotarioff (1973), De Beer(1977)등 여러 학자에 의해 인접한 편차 성토하중으로 발생하는 측방유동에 의한 지반-토류구조물의 안정성 문제에 대한 심각성이 제시되었다. 특히 국내에서 시공되는 교량 중에는 연약지반 위에 시공되는 경우보다 산지에 시공되는 경우가 많다. 산지에 시공되는 교량의 교대는 자연사면을 절토한 후 계획고까지 성토시켜 시공하며, 대부분 고성토 사면 위에 시공하게 된다. 고성토 사면에 시공된 교대는 강우 및 동결·융해 등의 외부영향으로 인해 측방유동이 발생하며, 교대에 상대변위를 발생시켜 교량 구조물 전체의 안정성과 사용성을 크게 저해하게 된다. 본 연구에서는 고성토 사면에 시공되어 측방유동 가능성이 있는 교대에 대한 사례를 중심으로 현장조건과 지반 조사 자료를 참고하여 경험적인 방법과 수치해석을 통해 측방유동, 교대의 변위, 사면의 안정성에 대한 검토를 실시하였다. 또한, 보강공법 3개를 선정하여 수치해석을 통해 현장에 적용한 후, 보강 시에 발생하는 측방유동의 결과분석을 실시하여 적절한 보강대책 수립에 대한 기초자료를 제시하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 측방유동의 정의

매립지 등과 같이 연약지반의 두께에 비해 재하면적이 매우 큰 기초 지반의 변형은 주로 연직방향의 일차원적 압밀변형이 발생한다. 그러나 제방처럼 좁고 긴 하중이나 교대의 뒷채움과 같은 국부적인 하중이 거의 극한 상태까지 작용하게 되면 연약지반 임의의 수평면상에서의 응력분포가 균등하지 않으므로 2차원 또는 3차원적 변형을 하여 연직방향의 압밀변형 이외에도 수평방향의 전단변형이 발생하게 되는데, 이와 같은 현상을 측방유동이라 한다.

2.2 측방유동의 발생 메커니즘

일반적으로 점성토 지반의 압밀과 전단 현상이 복잡한

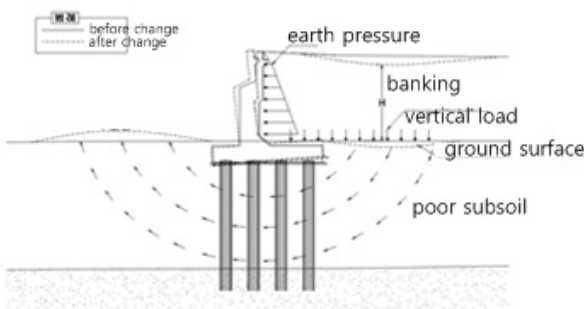


Fig. 1. Conceptual diagram of lateral flow(Shin, 2008)

형태로 나타나기 때문에 그 발생메커니즘이 매우 복잡하다. 따라서 지반에서의 변형 양상이나 변형량 등을 정량적으로 파악하기 어렵다. 연약한 점성토지반상에 하중을 재하하면 지반 내에서는 하중에 의한 응력이 증가하고 간극수압이 소산되면서 체적이 감소하여 지반의 침하가 발생한다. 그러나 간극수압의 소산에 필요한 충분한 시간이 소요되기도 전에 계속적으로 하중을 증가시켜 지반 내의 과잉간극수압이 증가하게 되면 측방유동이 작용하게 되므로 토립자의 소성화에 의한 수평적인 측방변위가 발생하게 된다. 또한, 이로 인한 지표면의 융기가 발생하여 결국에는 활동과파가 유발되어 구조물의 안정이 위태롭게 된다.

2.3 측방유동 평가방법 분석

이상과 같이 국내·외 지방서와 기존 관련 문헌으로부터 측방유동의 판정기준과 평가방법은 배면 성토하중과 점성토의 비배수 전단강도와와의 관계로 측방유동을 판정한 Tschebotarioff방법, FHWA 기준, 高速道路調査會(1989)에 의해 제안된 방법인 측방유동지수(F)에 의한 판정법, 高速道路調査會(1981)에 의해 제안된 방법인 측방유동판정수(I)에 의한 판정법, Korea Expressway Corporation(1995)에서 국내 140여 개의 교량 및 교대의 자료를 수집·분석하여 제안한 방법인 수정 측방유동판정수(M_f)에 의한 판정법이 있다. 측방유동지수(F)에 의한 판정법에서는 배면성토하중과 점성토의 비배수 전단강도와와의 관계에 점성토의 두께를 고려하였으며, 측방유동판정수(I)에 의한 판정법은 배면성토하중과 점성토의 비배수 전단강도와와의 관계에 점성토층의 두께와 교대말뚝기초의 제원을 반영한 것으로 분석되었다. 그리고 수정 측방유동판정수(M_f)에 의한 판정법은 1995년 한국 도로공사에서 국내 140여 개의 교대 자료를 수집·분석하여 제안한 방법이다.

3. 교대현황 및 측방유동 검토

3.1 교대 및 지반현황

본 해석에 사용된 단면은 000현장 구간으로 주변 현상은 민가가 다수 분포하고 있다. 원지반으로부터 약 4.5~6.8m 가량 성토 후 비탈면 구간에 교대의 강관말뚝기초와 교대가 시공되고 교대의 배면 뒷채움에 따른 토압의 증대로 수평 방향 변형, 즉 측방유동이 예상되는 구간이다.

연구대상 교대는 10.3m, 길이는 6.4m이고, 고성토 사면에 시공되며, 기초는 강관말뚝기초(508mm, $t=12$ mm)로 설

Table 1. Ground property for analysis

Classify		Unit weight(kN/m ³)	Cohesion(MPa)	Internal friction angle(°)	Modulus of deformation(MPa)	Poisson's ratio
Burried layer	Clay	17.0	0.02	0.0	2.0	0.40
	Sand	18.0	0.01	30.0	15.0	0.35
Sedimentary layer	Clay	17.0	0.02	0.0	2.0	0.38
	Sand	18.0	0.01	25.0	15.0	0.35
	Gravel	19.0	0.0	30.0	30.0	0.35
Sedentary deposit		19.0	0.015	32.0	50.0	0.34
Weathered rock		20.0	0.03	33.0	300.0	0.33
Soft rock		25.0	0.35	35.0	1,000	0.25
Hard rock		27.0	2.0	40.0	10,000	0.23

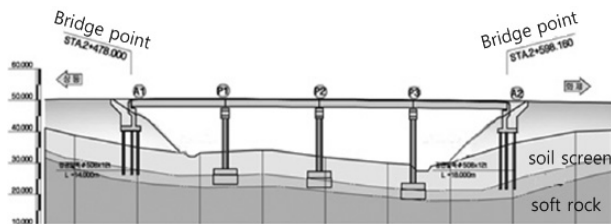


Fig. 2. Construction

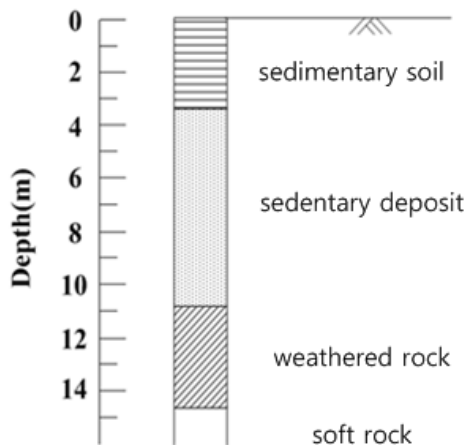


Fig. 3. Layered condition

계되어 있다. 연구대상 교대의 설계현황은 Fig. 2와 같다. 지반은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 퇴적층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층으로 구성된다. 풍화토층은 7.2~7.5m 두께로 분포하며, 하부에 풍화암 및 연암층이 분포하고, 풍화암층은 3.8m 두께를 보이며, N치 50 이상 범위로 하부로 갈수록 증가한다. 또한, 지반의 특성은 Table 1과 같다.

3.2 측방유동 검토

본 검토에서는 교대 성토부와 10.3m 정도의 성토차이가 발생하여 편토압에 의한 측방유동이 예상된다. 측방유동 발생 가능성을 판정하는 방법은 2.3절에 언급한 바와 같이 여러 가지 제안방법이 있으며, 본 검토에서는 Tschebotarioff

법, 도로교 표준시방서(측방유동판정치에 의한 판정), 일본 도로공단법(측방유동지수에 의한 판정)을 중심으로 검토하였다.

3.2.1 Tschebotarioff 법

Table 2. Evaluation result of lateral flow according to Tschebotarioff method

Construction	γ_t (kN/m ³)	H (m)	c_u (kPa)	Stability factor (N_b)	Evaluation
Abutment	18	7.3	10	13.14	N.G

3.2.2 도로교 표준시방서 (측방유동판정치에 의한 판정)

Table 3. Evaluation result of lateral flow according to standard specification for highway bridges

Construction	μ_1	μ_2	μ_3	γ_t (kN/m ³)	H (m)	c_u (kPa)	I value	Evaluation
Abutment	0.67	0.38	1.88	18	7.3	10	4.77	N.G
	A	B	b	l	D			
	6.4	8.6	2.5	18	12			

3.2.3 일본도로공단법 (측방유동지수에 의한 판정)

Table 4. Evaluation result of lateral flow according to Japan expressway corporation law

Construction	c_u (kPa)	γ (kN/m ³)	H (m)	D (m)	F value	Evaluation
Abutment	10	18	7.3	17	0.63	N.G

3.2.4 검토결과

상기와 같은 검토결과, Table 5에서 보듯이 교대가 측방유동의 가능성이 높은 것으로 나타나 이에 대한 대책이 필요할 것으로 판단된다.

따라서 본 현장에 맞는 최적의 보강공법을 파악하고자 수치해석을 통해 몇 가지 보강공법(압성토, 매면 EPS 적용,

역지말뚝(1열, 2열)을 적용하여 성토단계별 교대의 측방유동을 분석해보았다.

직관적인 모델링이 가능하다. 또한, 다양한 계산 기능이 있으며, 후처리 결과를 그래픽으로 표현하는 것이 가능한 장점이 있다.

4. 수치해석

4.1 사용프로그램

해석에서는 유한요소 프로그램인 MIDAS GTS V.420을 사용했다(MIDAS Information Technology Co., Ltd.). MIDAS GTS V.420은 지반 및 터널구조물 전용해석 프로그램으로서 복잡한 지형과 다양한 흙의 구성모델을 제공하고 있어

4.2 해석조건 및 영역

본 해석에서는 기본조건, 압성토, 배면 EPS 적용, 역지말뚝(1열, 2열)을 적용하여 성토단계별 교대의 측방유동을 분석하였다. 기본조건에 해석모델링은 교대의 높이를 10.3m, 길이는 6.4m이고 강관말뚝의 간격은 2.2m, 길이는 18m로 모델링하였다. 말뚝 설계는 강관말뚝(508mm, t=12mm)이고 강재의 등급은 SKK400을 적용하였다. EPS 성토고는 10.3m,

Table 5. Evaluation result of construction

Construction	Evaluation			Evaluation
	Tschebotarioff	Japan expressway corporation	Highway bridge standard specifications	
Abutment	N.G	N.G	N.G	N.G

Table 6. Material property

Classify	Modulus of deformation(MPa)	Poisson's ratio	Unit weight(kN/m ³)
Steel pipe pile	210,000	0.3	78
EPS block	5	0.12	0.25
Stabilized pile(H-300×300×10×15)	210,000	0.3	78

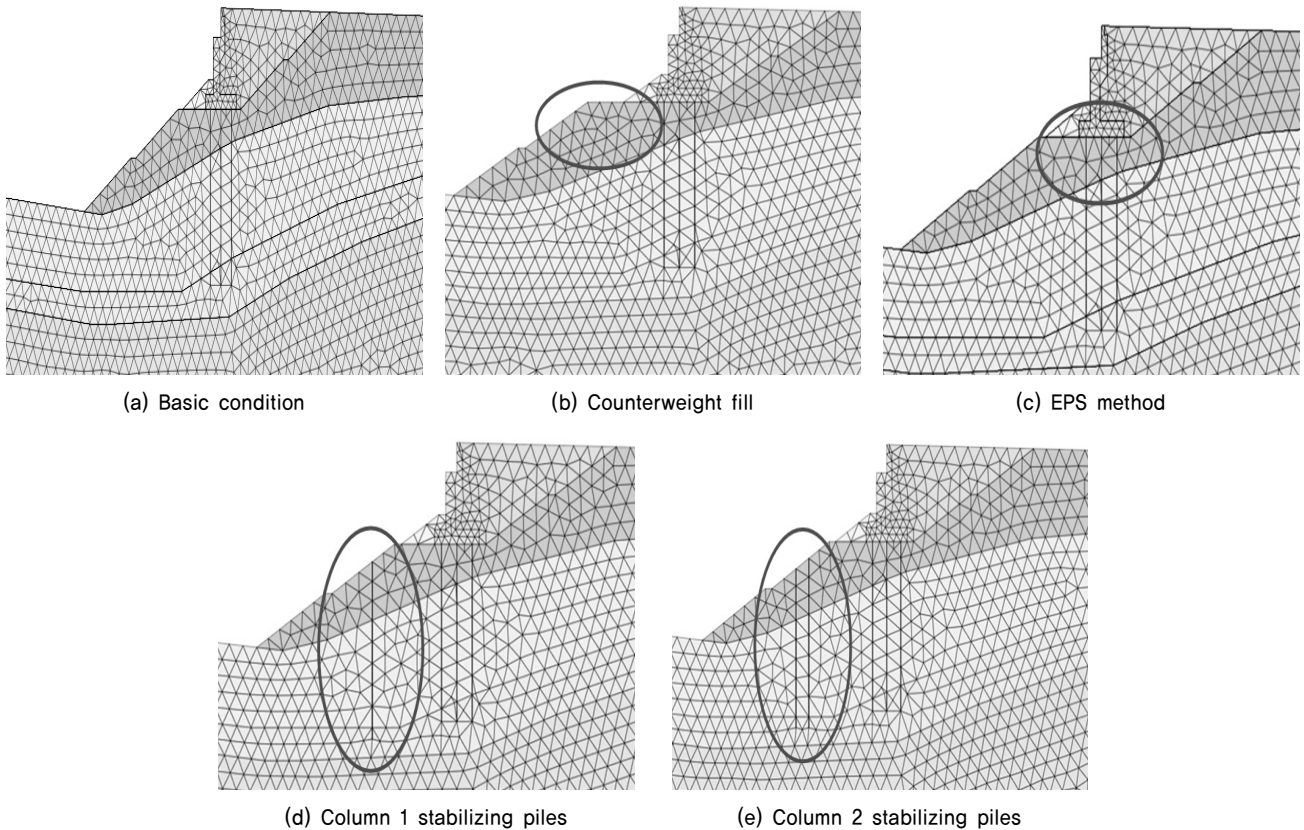


Fig. 4. Component network for analysis

설치 폭은 22.3m로 적용하여 해석하였다. EPS의 단위 중량은 EPS공법 적용 시 일반적으로 흔히 사용되는 토목용 EPS의 단위 중량인 0.25kN/m^3 를 적용하였다. 교대의 측방유동 방지를 위해 성토부에 1열 억지말뚝으로 보강했을 때와 2열 억지말뚝으로 보강했을 때의 거동을 분석하였다. 억지말뚝(H-300×300×10×15)은 18m 관입되었고, 2.5m 간격으로 설치하여 해석하였다. 해석에 적용된 물성은 Table 6과 같다.

지반 및 지보재에는 삼각형 요소를 사용하였고, 강관말뚝 및 억지말뚝의 경우에는 보 요소를 사용하여 모델링하였다. 지반의 경계조건은 좌, 우측의 X축 변위를 고정시켰고, 하부는 X, Y축 변위를 고정시켰다. Fig. 4는 해석에 사용된 요소망을 보여주고 있고 Fig. 5는 교좌부 확대 단면을 보여준다.

재료 모델링에 있어서 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암, 연암, 경암에 해당하는 지반은 비관련흐름법칙을 따르는

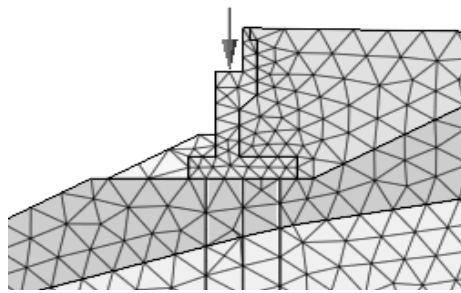


Fig. 5. Extension section of component network

Table 7. Applicable safety factor standard

Classify	Design safety standards	Note
Pile non-consideration	$F_s > 1.5$	Hong et al.(1994)
Pile consideration	$F_s > 1.8$	

Table 8. Structure review result of pile

Classify	Bending Moment(kN·m)	Bending Stress(MPa)	Shearing Stress(MPa)
Left pile	100.83	99.35	4.12
Middle pile	92.3	86.14	2.46
Right pile	123.06	107.51	2.21

Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 강관말뚝 및 억지말뚝의 경우에는 탄성모델을 적용하였다.

5. 수치 해석에 의한 결과 및 분석

5.1 기본 조건 결과

지반 거동으로 인한 교대의 변위를 분석하기 위한 유한요소 해석 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6은 유한요소법에 의한 최대 전단변형률과 수평변위를 보여준다. 최대수평변위는 성토사면부에서는 53.78mm가 발생하였고, 교좌부에서는 62.44mm로 나타났다.

한편, 기준 안전율은 Hong et. al.(1994)이 국내에서 발생한 6개 현장 12개 교대의 측방유동 사례에 대한 연구결과를 토대로 교대기초말뚝이 설치된 사면에서 제안한 기준 안전율을 적용하였으며, Table 7과 같다. 수치해석 결과 기본 조건인 말뚝을 고려한 사면 안전율은 1.73으로 기준 안전율을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

기본조건에서 측방유동으로 인해 발생한 휨모멘트, 휨응력, 전단응력은 Table 8과 같고, 이에 대한 구조 검토 결과는 다음과 같다.

말뚝의 허용 휨모멘트는 말뚝의 항복응력($\sigma_y = 140\text{MPa}$)을 토대로 산정한 결과 $158.46\text{kN}\cdot\text{m}$ 였다. 수치해석에서 나온 좌측, 중앙, 우측 각각의 휨모멘트의 최대값은 $100.83\text{kN}\cdot\text{m}$, $92.3\text{kN}\cdot\text{m}$, $123.06\text{kN}\cdot\text{m}$ 로 휨모멘트의 허용치 이내로 나타나 안전한 것으로 판단된다. 또한, 휨응력에 대한 검토 결과 각각 99.35MPa , 86.14MPa , 107.51MPa 로 항복응력 140MPa 로 나타났으며, 전단응력에 대한 검토 결과 각각 4.12MPa ,

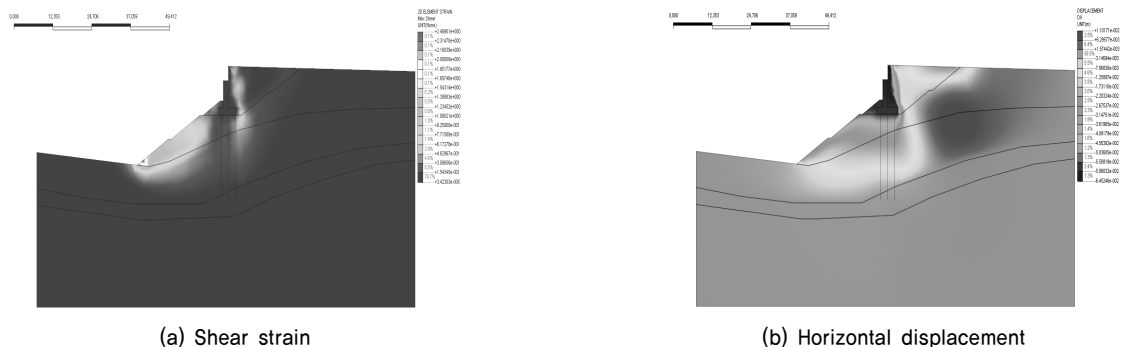


Fig. 6. Shear strain and horizontal displacement of abutment foundation(Basic condition)

2.46MPa, 2.21MPa로 허용 전단응력인 80MPa 이내로 나타나 안전한 것으로 판단된다. Fig. 7은 측방유동으로 인해 발생하는 휨모멘트와 전단력을 보여준다.

5.2 보강 공법에 따른 해석 결과

5.2.1 압성토

교대 측방유동에 대한 보강 공법으로 성토부에 압성토로 보강하였을 때의 거동을 확인해보면 성토부에 폭 5.8m, 높이 6.7m로 성토하였으며, 지반 물성은 성토부와 동일한 값으로 해석을 수행하였다. 그 결과 압성토 보강 시 최대전단 변형률을 확인해보면 파괴영역은 기본조건과 비슷한 형태를 나타냈다. 이것은 압성토부 역시 일반 성토층과 같은 토사지반이므로 동일한 거동을 보이기 때문으로 판단된다. 그러나 압성토에 의해 성토부 사면 폭이 넓어져 파괴영역이 기본조건에 비해 교대에서 멀어진 것을 확인할 수 있었다. 압성토 보강에 따른 최대수평변위는 성토사면부에서는 37.53mm가 발생하여 기본조건에 비해 약 30% 감소하는 것으로 나

타났으며, 교좌부에서는 54.28mm로 나타나 기본조건에 비해 14% 감소하였다. 한편 사면안전율은 1.88로 기준 안전율 1.8을 만족하는 것으로 나타났다.

압성토 보강 시 측방유동으로 인해 발생한 휨모멘트, 휨응력, 전단응력은 Table 9와 같고, 이에 대한 구조 검토 결과는 다음과 같다.

말뚝의 허용 휨모멘트는 말뚝의 항복응력($\sigma_y = 140MPa$)을 토대로 산정한 결과 158.46kN·m였다. 수치해석에서 나온 좌측, 중앙, 우측 각각의 휨모멘트의 최대값은 100.94kN·m, 90.44kN·m, 111.49kN·m로 휨모멘트의 허용치 이내로 나타나 안전한 것으로 판단된다. 또한, 휨응력에 대한 검토 결과 각각 99.03MPa, 85.72MPa, 104.11MPa로 항복응력 140MPa로 나타났으며, 전단응력에 대한 검토 결과 각각 4.13MPa, 2.41MPa, 2.12MPa로 허용 전단응력인 80MPa 이내로 나타나 안전한 것으로 판단된다. Fig. 9는 압성토 보강 시 측방유동으로 인해 발생하는 휨모멘트와 전단력을 보여준다.

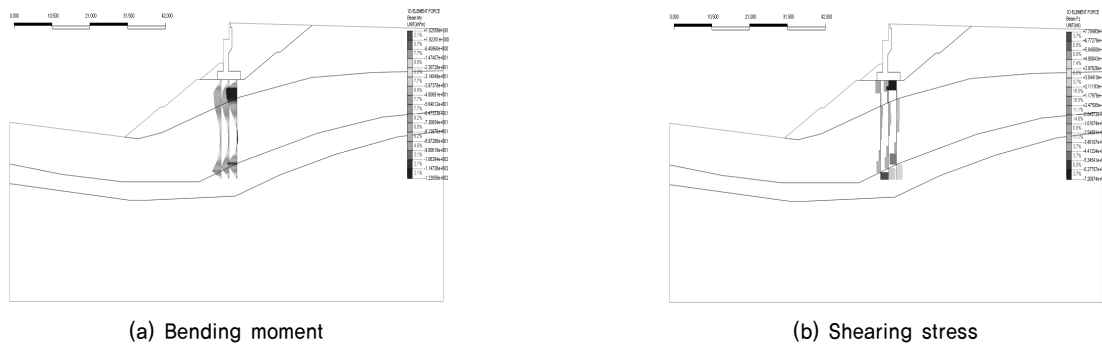


Fig. 7. Bending moment and shearing stress of steel pipe piles(Basic condition)

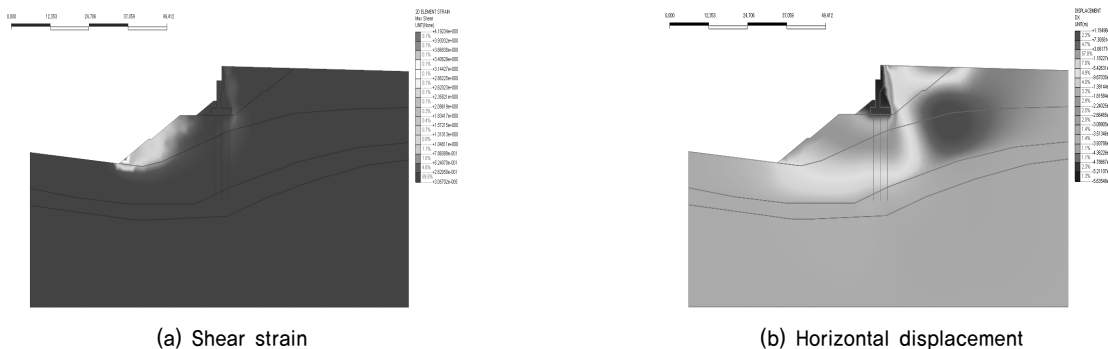


Fig. 8. Shear strain and horizontal displacement in reinforcement of counterweight fill

Table 9. Structure review result of pile in reinforcement of counterweight fill

Classify	Bending Moment(kN·m)	Bending Stress(MPa)	Shearing Stress(MPa)
Left pile	100.94	99.03	4.13
Middle pile	90.44	85.72	2.41
Right pile	111.49	104.11	2.12

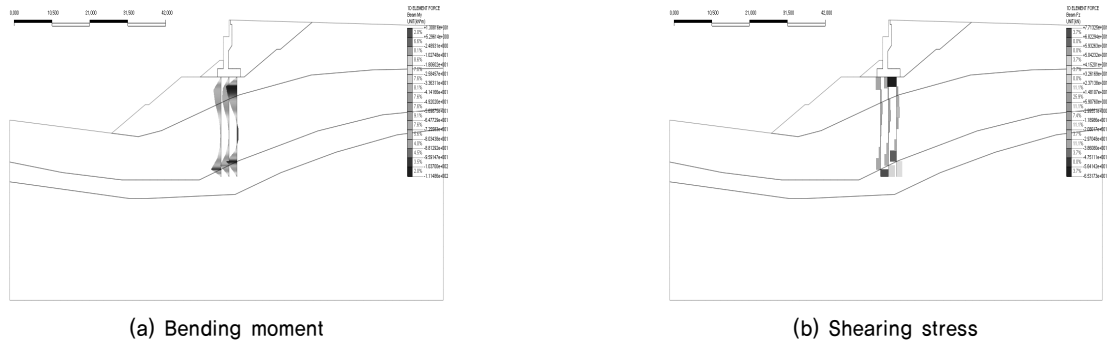


Fig. 9. Bending moment and shearing stress in reinforcement of counterweight fill

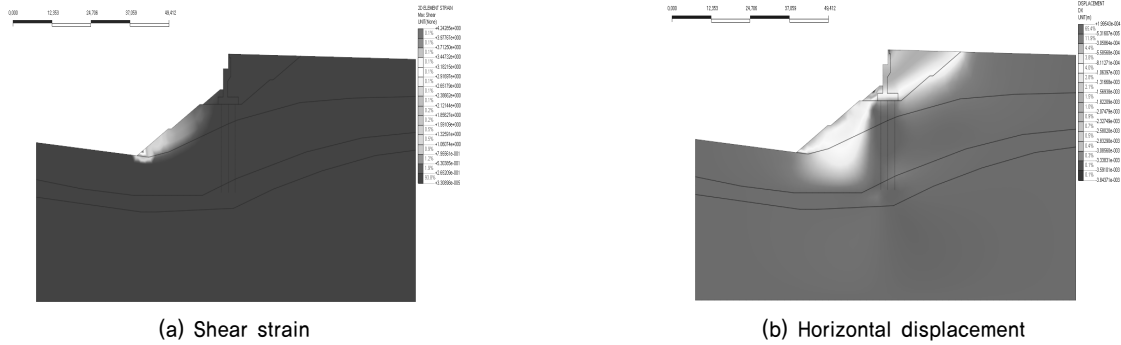


Fig. 10. Shear strain and horizontal displacement in reinforcement of EPS

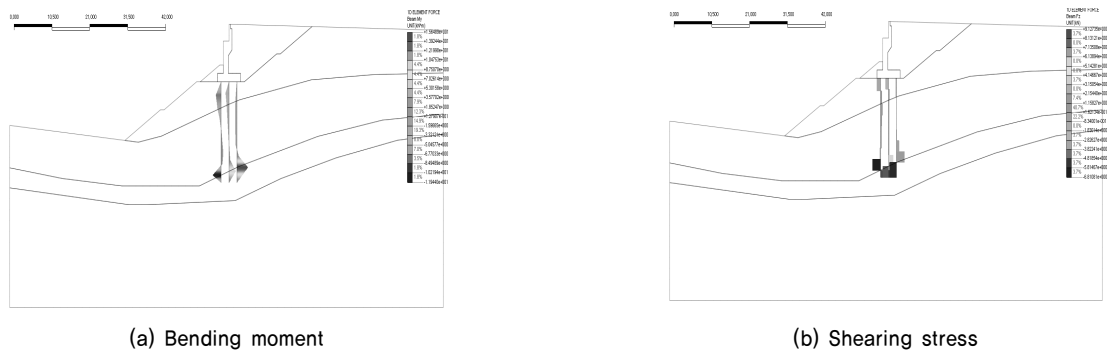


Fig. 11. Bending moment and shearing stress in reinforcement of EPS

Table 10. Structure review result of pile in reinforcement of EPS

Classify	Bending Moment(kN·m)	Bending Stress (MPa)	Shearing Stress(MPa)
Left pile	11.94	42.35	0.49
Middle pile	4.89	31.23	0.21
Right pile	2.38	18.34	0.36

5.2.2 EPS 공법

교대의 측방유동 방지를 위해 교대 배면에 EPS로 보강하였을 때의 거동을 분석하였다. 해석 결과를 살펴보면 최대 전단변형률은 Fig. 10(a)와 같다. 파괴영역은 기본조건에 비해 폭이 좁아진 것으로 나타났으며, 성토 사면 하부에서 응력이 집중되는 것으로 나타났다. EPS 보강에 따른 최대수평변위는 성토사면부에서는 1.21mm가 발생하여 기본조건

에 비해 약 97% 감소한 것으로 나타났으며, 교좌부에서는 2.53mm로 나타나 기본조건에 비해 약 95% 감소하였다. 이것은 교대 배면 성토하중의 경감으로 인한 것으로 판단된다. 한편 사면안전율은 1.86으로 기준 안전율 1.8을 만족하는 것으로 나타났다.

EPS 보강 시 측방유동으로 인해 발생한 휨모멘트, 휨응력, 전단력은 Table 10과 같고, 이에 대한 구조 검토결과

다음과 같다.

말뚝의 허용 휨모멘트는 말뚝의 항복응력($\sigma_y = 140MPa$)을 토대로 산정한 결과 $158.46kN \cdot m$ 였다. 수치해석에서 나온 좌측, 중앙, 우측 각각의 휨모멘트의 최대값은 $11.94kN \cdot m$, $4.89kN \cdot m$, $2.38kN \cdot m$ 로 휨모멘트의 허용치 이내로 나타나 안전한 것으로 판단된다. 또한, 휨응력에 대한 검토 결과 각각 $42.35MPa$, $31.23MPa$, $18.34MPa$ 로 항복응력 $140MPa$ 로 나타났으며, 전단응력에 대한 검토 결과 각각 $0.49MPa$, $0.21MPa$, $0.36MPa$ 로 허용 전단응력인 $80MPa$ 이내로 나타나 안전한 것으로 판단된다. Fig. 11은 EPS 보강 시 측방유동으로 인해 발생하는 휨모멘트와 전단력을 보여준다.

5.2.3 억지말뚝

교대의 측방유동 방지를 위해 성토부에 1열 억지말뚝으로 보강했을 때와 2열 억지말뚝으로 보강했을 때의 거동을 분석하였다.

1열 억지말뚝으로 보강 시의 최대전단변형률을 확인해보면 Fig. 12와 같다. 파괴영역은 성토사면 하부에 집중되는

것을 알 수 있다. 이것은 억지말뚝을 1열 보강으로 인해 사면역지 효과가 발생한 것으로 판단된다.

최대수평변위는 성토사면부에서는 $51.3mm$ 가 발생하여 기본조건에 비해 약 5% 감소한 것으로 나타났으며, 교좌부에서는 $60.61mm$ 로 나타나 기본조건에 비해 약 3% 감소하였다. 한편 사면안전율은 1.93 으로 기준 안전율 1.8 을 만족하는 것으로 나타났다.

1열 억지말뚝 보강 시 측방유동으로 인해 발생한 휨모멘트, 휨응력, 전단력은 Table 11과 같고, 이에 대한 구조 검토 결과는 다음과 같다.

말뚝의 허용 휨모멘트는 말뚝의 항복응력($\sigma_y = 140MPa$)을 토대로 산정한 결과 $158.46kN \cdot m$ 였다. 수치해석에서 나온 좌측, 중앙, 우측 각각의 휨모멘트의 최대값은 $106.21kN \cdot m$, $95.44kN \cdot m$, $118.48kN \cdot m$ 로 휨모멘트의 허용치 이내로 나타나 안전한 것으로 판단된다. 또한, 휨응력에 대한 검토 결과 각각 $101.21MPa$, $87.46MPa$, $105.87MPa$ 로 항복응력 $140MPa$ 로 나타났으며, 전단응력에 대한 검토 결과 각각 $4.34MPa$, $2.54MPa$, $2.24MPa$ 로 허용 전단응력인 $80MPa$ 이내로 나타

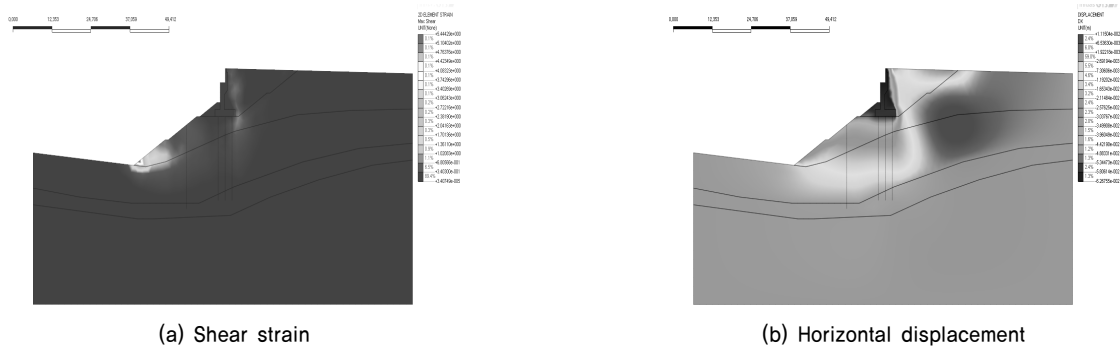


Fig. 12. Shear strain and horizontal displacement in reinforcement of Column 1 stabilizing piles

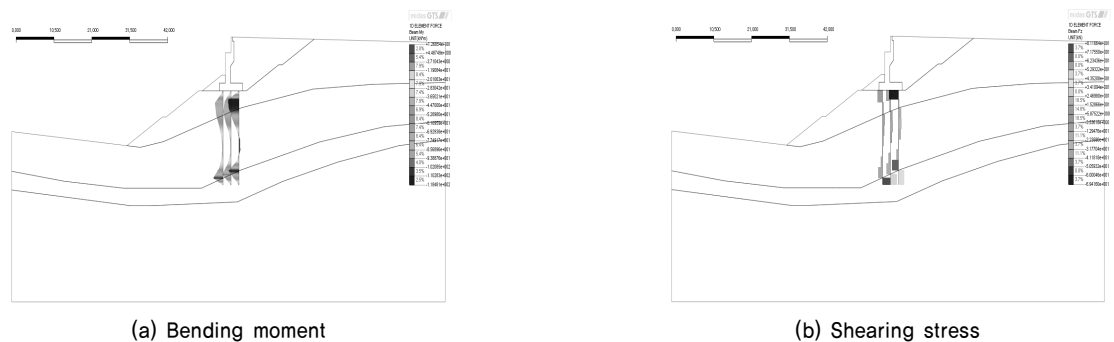


Fig. 13. Bending moment and shearing stress in reinforcement of column 1 stabilizing piles

Table 11. Structure review result of pile in reinforcement of column 1 stabilizing piles

Classify	Bending Moment(kN·m)	Bending Stress(MPa)	Shearing Stress(MPa)
Left pile	106.21	101.21	4.34
Middle pile	95.44	87.56	2.54
Right pile	118.48	105.87	2.24

나 안전한 것으로 판단된다. Fig. 13은 1열 억지말뚝 보강 시 측방유동으로 인해 발생하는 휨모멘트와 전단력을 보여 준다.

2열 억지말뚝으로 보강 시의 최대전단변형률을 확인해보 면 Fig. 14와 같다. 파괴영역은 1열로 보강했을 경우와 유사 하게 나타났고, 1열 말뚝에 비해 영역은 작은 것으로 나타 났다. 최대수평변위는 성토사면부에서는 50.3mm가 발생하 여 기본조건에 비해 약 6% 감소한 것으로 나타났으며, 교좌 부에서는 59.89mm로 나타나 기본조건에 비해 약 4% 감소 하였다. 이것은 1열로 보강했을 때와 큰 차이가 발생하지

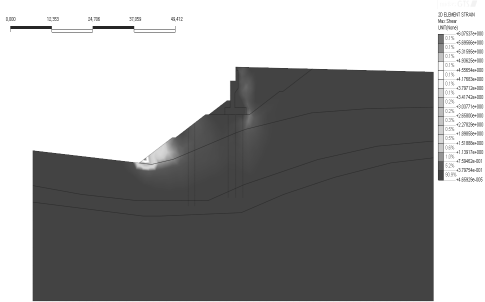


Fig. 14. Shear strain and horizontal displacement in reinforcement of Column 2 stabilizing piles

않은 것으로 나타났다. 한편, 사면안전율은 1.96으로 기준 안전율 1.8을 만족하는 것으로 나타났다.

2열 억지말뚝 보강 시 측방유동으로 인해 발생한 휨모멘 트, 휨응력, 전단응력은 Table 12와 같고, 이에 대한 구조 검토결과는 다음과 같다.

말뚝의 허용 휨모멘트는 말뚝의 항복응력($\sigma_y = 140MPa$) 을 토대로 산정한 결과 158.46kN·m였다. 수치해석에서 나온 좌측, 중앙, 우측 각각의 휨모멘트의 최대값은 106.63kN·m, 95.51kN·m, 119.75kN·m로 휨모멘트의 허용치 이내로 나타 나 안전한 것으로 판단된다. 또한, 휨응력에 대한 검토 결과 각각 101.31MPa, 87.56MPa, 106.74MPa로 항복응력 140MPa 로 나타났으며, 전단응력에 대한 검토 결과 각각 4.36MPa, 2.54MPa, 2.24MPa로 허용 전단응력인 80MPa 이내로 나타 나 안전한 것으로 판단된다. Fig. 15는 2열 억지말뚝 보강 시 측방유동으로 인해 발생하는 휨모멘트와 전단력을 보여 준다.

5.2.4 보강공법 비교검토

측방유동으로 인한 교대의 변위 방지대책으로 압성토, EPS, 억지말뚝 등으로 보강한 경우에 대해 해석한 결과는

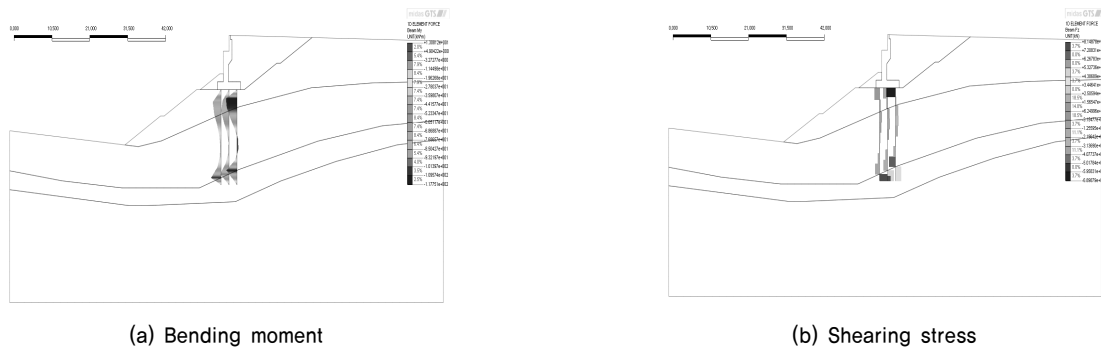


Fig. 15. Bending moment and shearing stress in reinforcement of column 2 stabilizing piles

Table 12. Structure review result of pile in reinforcement of column 2 stabilizing piles

Classify	Bending Moment(kN·m)	Bending Stress(MPa)	Shearing Stress(MPa)
Left pile	106.63	101.31	4.36
Middle pile	95.51	87.56	2.54
Right pile	119.75	106.74	2.24

Table 13. Analysis result apply to reinforcement method

Reinforcement Method	Filling slope lateral flow (mm)	Abutment drift (mm)	Slope safety factor	Standard safety factor (Hong et al., 2001)
Basal condition	53.779	62.436	1.73	1.8
Counterweight fill	37.527	54.285	1.88	
EPS	1.209	2.525	1.86	
Stabilized pile 1 row	51.304	60.611	1.93	
Stabilized pile 2 row	50.284	59.896	1.96	

Table 14. Structure review result of pile apply to reinforcement method

Classify		Moment(kN·m)	Bending Stress(MPa)	Shearing stress(MPa)
Basal condition	left pile	100.83	99.35	4.12
	middle pile	92.30	86.14	2.46
	right pile	123.06	107.51	2.21
Counterweight fill	left pile	100.94	99.03	4.13
	middle pile	90.44	85.72	2.41
	right pile	111.49	104.11	2.12
EPS	left pile	11.94	42.35	0.49
	middle pile	4.89	31.23	0.21
	right pile	2.38	18.34	0.36
Stabilized pile 1 row	left pile	106.21	101.21	4.34
	middle pile	95.44	87.56	2.54
	right pile	118.48	105.87	2.24
Stabilized pile 2 row	left pile	106.63	101.31	4.36
	middle pile	95.51	87.56	2.54
	right pile	119.75	106.74	2.24

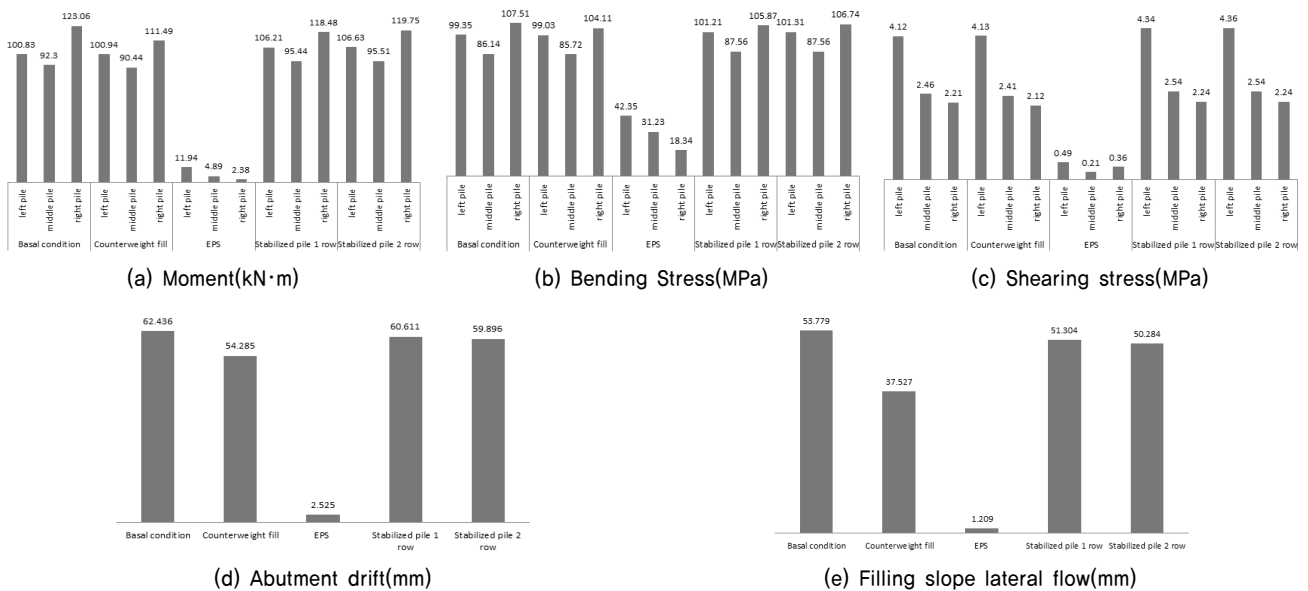


Fig. 16. Comparison of reinforcement method application result

Table 13과 같고, 측방유동으로 인해 발생한 휨모멘트, 휨응력, 전단응력은 Table 14와 같다.

Fig. 16에서 보는 것처럼 압성토로 보강했을 경우, 측방유동은 약 30% 감소하였고, 교대 교좌부의 최대수평변위는 약 14% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 감소는 보강 전 사면의 파괴영역이 압성토 시공으로 인해서 변하였기 때문으로 판단된다. 그러나 실제 시공 시 압성토 공법은 시간의 경과에 따라 변위가 지속적으로 발생하고 누적되는 구조물로서 장기간의 안정성을 확보하기는 어려울 것으로 판단된다. EPS로 보강했을 경우, 측방유동은 약 97% 감소하였고, 교대 교좌부의 최대수평변위는 약 95% 정도 감소하였다. 이러한 이유는 EPS가 경량성토재로서 EPS의 단위체

적중량이 흙의 약 1/10 정도로 가벼운 경량성에 기인하여 수평토압의 경감효과가 나타났기 때문으로 판단되며, 사면에 억지말뚝으로 보강하였을 경우, 1열 보강 시에는 측방유동은 약 5% 감소하였고 교대 교좌부의 최대수평변위는 약 3% 정도 감소하였다. 2열 보강 시에는 측방유동은 약 6% 감소하였고, 교대 교좌부의 최대수평변위는 약 4% 정도 감소하였다. 이것은 억지말뚝으로 인해 사면활동에 대한 저항효과가 생기기 때문으로 판단되며, 1열 보강 시에 비해 2열 보강 시 측방유동이 감소하는 이유는 말뚝과 말뚝 사이 지반의 아칭효과로 인하여 억지말뚝의 저항 효과가 증가하기 때문으로 판단된다. 연구대상 현장이 측방유동의 우려가 있을 것으로 판단되어 보강 대책공법들을 선정하여 적용한 후

재해석을 실시하여 안정성 검토를 실시한 결과, 본 현장에서는 EPS공법이 측방유동에 대한 보강공법으로 가장 적합할 것으로 판단되며, 사면활동에 대한 저항 효과가 가장 좋은 대책공법은 2열 억지말뚝이 가장 적합한 대책공법이라고 사료된다.

6. 결 론

본 연구에서는 고성토 사면에 시공되어 측방유동 가능성이 있는 교대에 대한 사례를 중심으로 현장조건과 지반 조사자료를 참고하여 경험적인 방법과 수치해석을 통해 측방유동, 교대의 변위, 사면의 안정성에 대한 검토를 실시하였다. 또한, 보강공법을 3개(압성토 옹벽, EPS, 억지말뚝)를 선정하여 수치해석을 통해 현장에 적용한 후, 보강 시에 발생하는 측방유동의 결과분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 연구대상구조물에 대해 경험적인 방법인 Tschebotarioff 법, 도로교 표준시방서(측방유동판정치에 의한 판정), 일본도로공단법(측방유동지수에 의한 판정)으로 검토해본 결과, 교대가 측방유동의 가능성이 높은 것으로 나타났으며, 수치해석결과에서도 교대기초말뚝의 효과를 고려한 사면전체의 안전율은 1.73으로 나타나 측방유동 가능성이 있는 것으로 나타났다. 이것으로 보아 경험적인 방법으로도 측방유동의 가능성을 충분히 평가할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 압성토로 보강했을 경우, 측방유동은 약 30% 감소하였고 교대 교좌부의 최대수평변위는 약 14% 정도 감소하는 것으로 나타났으며, EPS로 보강했을 경우, 측방유동은 약 97% 감소하였고, 교대 교좌부의 최대수평변위는 약 95% 정도 감소하였다. 사면에 억지말뚝으로 보강하였을 경우, 1열 보강 시에 측방유동은 약 5% 감소하였고 교대 교좌부의 최대수평변위는 약 3% 정도 감소하였으며, 2열 보강 시에 측방유동은 약 6% 감소하였고 교대 교좌부의 최대수평변위는 약 4% 정도 감소하였다. 1열 보강 시에 비해 2열 보강 시 측방유동이 감소하는 이유

는 말뚝과 말뚝 사이 지반의 아칭효과로 인하여 억지말뚝의 저항 효과가 증가하기 때문으로 판단된다.

- (3) 연구대상 현장에 보강 대책공법들을 선정하여 적용한 후 재해석을 실시하여 안정성 검토를 실시한 결과, 본 현장에서는 EPS공법이 측방유동에 대한 보강공법으로 가장 적합할 것으로 판단되며, 사면활동에 대한 저항 효과가 가장 좋은 대책공법은 2열 억지말뚝이 가장 적합한 대책공법이라고 사료된다. 향후, 국내 여러 현장을 대상으로 추가적인 분석을 지속적으로 수행하여 보다 국내 여건에 부합하는 설계 기법의 도출이 요구되며, 보강공법 선정 시에 각 현장에 맞는 최적의 조건을 찾기 위한 연구도 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 수치해석 및 실측치를 비교·분석함으로써 지금보다 신뢰성 있는 연구가 뒤따라야 할 것이다.

References

1. 高速道路調査會 (1989), 軟弱地盤の側方變形豫測に關する研究報告書, 日本道路公團, pp. 22~47.
2. 高速道路調査會 (1981), 軟弱地盤上の橋臺移動に關する調査研究報告書, 日本道路公團, pp. 36~51.
3. De Beer, E. E. (1977), Piles subjected to static lateral loads, Proc., 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, pp. 1~14.
4. Hong, W. P., Kwon, O. H., Han, J. G. and Cho, S. H. (1994), A study on lateral movement of bridge abutment on soft ground, The Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 10, No. 4, pp. 53~65 (in Korean).
5. Hong, W. P., Song, Y. S., Shin, D. S. and Son, K. M. (2001), Stability of bridge abutments on soft ground undergoing lateral flow, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 17, No. 4, pp. 199~208 (in Korean).
6. Korea Expressway Corporation (1995), Study on protection method for lateral movement of abutment, pp. 18~67 (in Korean).
7. Peck, R. B. (1969), Deep excavations and tunneling in soft ground, Proc., 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, pp. 225~290.
8. Shin, G. N. (2008), Cause and measurement of lateral movement on bridge abutment through case study, Master's thesis, Incheon University, p. 19 (in Korean).
9. Tschebotarioff, G. P. (1973), Foundations retaining and earth structures 2nd ed., McGraw-Hill, New York, pp. 365~414.