

3차원해석에 의한 교대말뚝기초의 측방유동 발생메카니즘 분석

Three Dimensional Analysis of Piled Abutment Adjacent to Surcharge Loads

서 동 희 ^{*1}	Seo, Dong-Hee	서 정 주 ^{*2}	Suh, Jung-Joo
장 범 수 ^{*3}	Jang, Bhum-Soo	정 상 섬 ^{*4}	Jeong, Sang-Seom

Abstract

The behavior of piled abutment adjacent to surcharge loads was investigated by a numerical analysis. In a three-dimensional analysis, the distribution and magnitude of lateral soil pressure and effect of pile groups were studied by considering surcharge loads, various cap rigidities and spacing-to-diameter ratios. Based on limited parametric studies, the distribution of lateral soil movement is similar to that of lateral pile deflection and the magnitude of lateral soil pressure can be expressed in terms of surcharge loads. The distribution and magnitude of lateral soil pressure on clay layer and clay-sand layer are significantly affected by cap rigidities, whereas those on sand-clay layer are affected by soil profile. Based on the results obtained, the distribution and magnitude of apparent soil pressure are proposed to design piled abutment subjected to lateral soil movement.

요 지

본 논문에서는 연약지반에 시공된 교대말뚝기초에 인접하여 성토하중이 재하될 때 발생하는 측방유동의 발생메카니즘을 규명하기 위해 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 본 수치해석에서는 점성토 지반과 점성토-사질토 지반 그리고 사질토-점성토 지반에 선단지지된 강관말뚝에 대하여 성토하중 크기($q=20, 75, 100\text{kPa}$)와 말뚝두부조건(변위구속, 회전구속) 그리고 말뚝중심간격($s=2.5d, 5.0d, 7.0d$, 단독말뚝)에 따라 측방유동압의 분포형태와 크기를 분석하였다.

그 결과 측방유동압의 분포형태는 교대말뚝기초의 수평변위와 유사한 형태로 나타났으며 측방유동압의 크기는 배면 성토하중의 크기에 대한 비로써 결정할 수 있었다. 그리고 점성토 지반과 점성토-사질토 지반의 경우, 측방유동압의 분포형태와 크기는 말뚝두부조건에 가장 큰 영향을 받는 반면 사질토-점성토 지반의 경우에는 말뚝두부조건보다는 토층조건에 가장 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다. 본 연구결과를 토대로 연약지반에 시공된 교대말뚝기초의 측방유동에 대한 설계 및 해석시 지침자료로서 측방유동압의 분포형태와 크기를 추천·제안한다.

Keywords : Cap rigidity, Lateral soil movement, Piled abutment, Pile group, Spacing-to-diameter ratio

1. 서론

최근들어 연약지반에 성토, 매립 등을 하거나 각종 토류 구조물을 시공할 경우 배면지반의 뒤채움, 지반굴착시 발생하는 편재하중, 과도한 압밀침하, 급속한 절·성토 등에

의해서 발생하는 측방유동으로 지반-구조물의 안정성 문제가 빈번히 발생하고 있다. 현재 국내에서도 연약지반인 서·남해안 지역을 중심으로 한 건설공사가 활발히 진행되면서 측방유동과 관련된 교대말뚝기초와 토류벽의 피해사례가 급증하고 있다.

*1 정희원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사과정
 *2 정희원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정
 *3 정희원, 시설안전기술공단 기술개발지원실 차장
 *4 정희원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수

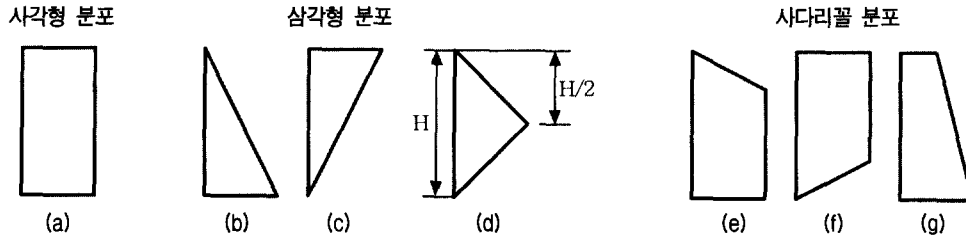


그림 1. 수동말뚝에 작용하는 측방유동압분포

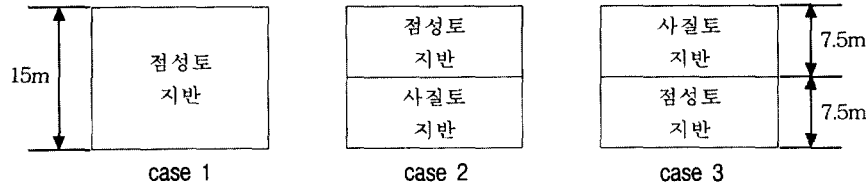


그림 2. 수치해석 대상 지반조건

이에 사전설계시 적용할 수 있는 측방유동 예측법이 필요하지만 현재 국내 설계시방서나 설계기준 등에서는 측방유동을 정량적으로 평가할 수 있는 판정기준이나 측방유동압의 크기 및 분포형태 등이 구체적으로 규정되어 있지 않다. 또한 국내에서는 최근 급증하는 측방유동 관련 피해사례에 비하여 측방유동을 받는 교대말뚝기초나 토류벽에 대한 현장계측은 거의 이루어지지 않고 있다. 이와 같은 배경에서 본 논문에서는 지반-구조물 문제와 관련하여 측방유동 발생메카니즘에 대한 연구의 일환으로 교대말뚝기초에 인접하여 성토하중이 재하될 때 발생하는 측방유동을 수치해석적으로 분석하였다. 그리고 수치해석 결과를 바탕으로 교대말뚝기초의 측방유동에 대한 설계 및 해석시 지침자료로 측방유동압의 분포형태와 크기를 제안하고자 한다.

2. 측방유동압 분포

대부분의 구조물은 말뚝기초로 이루어져 있는 경우가 대다수이며 특히, 연약층에 위치한 구조물의 측방유동에 대한 연구를 위해서는 측방유동지반 속에 설치된 말뚝기초에 작용하는 측방유동압을 어떻게 산정하는가가 중요

하다. 하지만 이에 대한 명확한 해석기준은 없는 상태이지만 수치해석을 통한 이론적 방법과 많은 실측사례를 통한 경험적 방법을 이용하여 기준을 마련하는 것이 필요한 상태이다.

그림 1은 지금까지 추정 혹은 가정된 측방유동압의 깊이방향 분포형태를 개략적으로 구분하여 보여준 것이다 (홍원표, 1994). 그림 1 (a)는 사각형 분포이고 그림 1 (b)에서 그림 1 (d)까지는 삼각형 분포이며 그림 1 (e)에서 그림 1 (g)까지는 사다리꼴 분포이다. 이러한 측방유동압 분포 중 연약지반에 설치된 말뚝기초의 측방유동압 분포로 가장 많이 사용되고 있는 것은 그림 1 (d)의 이동변 삼각형 분포로 Tschbotarioff(1973)에 의해 제안되었다.

3. 유한요소해석

3.1 3차원 수치해석

본 논문에서는 점성토로만 이루어진 단일지반과 점성토와 사질토로 이루어진 지반에 선단지지된 말뚝기초 구조물에 인접하여 성토하중이 재하될 경우 발생하는 측방유동압의 분포형태와 크기를 Hibbit, Karlsson & Sorensen

표 1. 수치해석 종류

지반조건	성토하중 (q, kPa)	말뚝두부조건	말뚝중심간격 (s)
case 1	20, 75, 100	변위구속(hinged) 회전구속(unrotated)	말뚝지름(d)의 2.5, 5.0, 7.0, 10.0배 (단독말뚝)
case 2	20, 75, 100	변위구속(hinged) 회전구속(unrotated)	말뚝지름(d)의 2.5, 5.0, 7.0, 10.0배 (단독말뚝)
case 3	20, 75, 100	변위구속(hinged) 회전구속(unrotated)	말뚝지름(d)의 2.5, 5.0, 7.0, 10.0배 (단독말뚝)

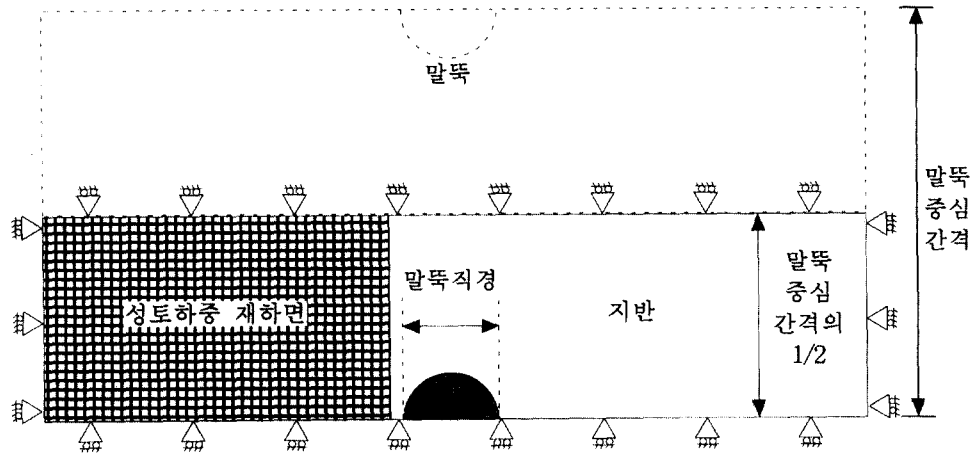


그림 3. 유한요소해석의 대상 영역(평면도)

사에서 개발한 범용프로그램인 ABAQUS(1998)를 이용한 3차원 유한요소해석으로 분석하였다. 본 해석에서는 비배수 조건에서의 축방유동의 발생메카니즘을 규명하기 위해 그림 2와 표 1에 나타낸 바와 같이 성토하중의 크기와 말뚝두부조건 그리고 말뚝중심간격에 따라서 축방유동압의 분포형태와 크기를 살펴보았다.

이 때 성토하중의 크기는 기존의 연구결과(FHWA, 1996; Stewart 등, 1993)를 바탕으로 점성토의 비배수 전단강도의 3배를 축방유동 발생유무의 기준으로 선정하였으며 말뚝두부조건은 교대말뚝기초의 현장시공조건을 반영하여 변위구속(hinged)과 회전구속(unrotated)의 두 종류로 결정하였다. 그리고 그림 3에 나타낸 바와 같이 본 유한요소해석에서는 해석시간을 줄이면서 일렬 교대말뚝기초의 말뚝중심간격에 따른 군말뚝 효과를 분석하기 위해 말뚝중심간격의 1/2에 해당하는 중심선까지의 단면에

대해서만 해석을 수행하였다.

그리고 본 해석에서는 국내 현장에서의 사용빈도가 가장 높은 직경이 406.4mm이고 두께가 9mm인 강관말뚝을 대상으로 하였으며 8개의 node와 8개의 Gauss quadrature point를 가지는 brick 요소(C3D8R)를 사용하여 말뚝은 탄성체로 주변 지반은 Mohr-Coulomb의 탄소성 매질로 모사하였다. 또한 말뚝과 말뚝 주변지반의 접촉면에 경계요소(interface element)를 사용하기 위해 본 해석에서는 상대적으로 강성이 큰 말뚝요소와 성토하중에 의해 변형을 일으키는 지반요소 사이의 상대적인 이동을 고려할 수 있는 "finite sliding" 선택사양을 적용하였다. 이 때 경계요소에 입력된 변수로 말뚝과 지반 사이의 마찰계수 값을 사용하였다. 그리고 본 해석시 사용한 말뚝과 지반 그리고 접촉면에 대한 기본물성을 표 2에 정리하였다.

기존 연구결과(한국도로공사, 1996; 홍원표, 1994)에

표 2. 3차원 유한요소해석시 말뚝과 지반 그리고 접촉면의 물성

말뚝				
바깥지름(mm)	두께(mm)	탄성계수($\times 10^6$ kPa)	포아송비	단위중량(kN/m ³)
406.4	9	200	0.27	77
길이(m)	말뚝두부조건	말뚝선단조건	말뚝중심간격	
15	회전구속(unrotated) 변위구속(hinged)	수평·수직방향 : 고정(fixed)	2.5d, 5.0d, 7.0d, 10.0d(단독말뚝)	
점성토 지반				
비배수 전단강도(kPa)	내부마찰각(°)	탄성계수(kPa)	포아송비	단위중량(kN/m ³)
24.5	0	4900	0.48	18
사질토 지반				
내부마찰각(°)	dilation angle(°)	탄성계수(MPa)	포아송비	단위중량(kN/m ³)
35	0	25	0.3	20
말뚝-지반 경계면				
pile-clay	마찰계수(coefficient of friction) tan δ		0.249	
pile-sand			0.364	

의하면, 국내 교대말뚝기초가 시공된 연약지반의 비배수 전단강도는 $0.1 \sim 0.4 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우가 약 77%를 차지하고 있으며 국내 서·남해안 지역의 경우 연약지반의 탄성계수는 비배수 전단강도의 약 50~400배의 분포를 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 이상의 국내 연약지반의 특성을 고려하여 표 2에 나타낸 바와 같이 점성토 지반의 비배수 전단강도는 $0.25 \text{ kg/cm}^2 (24.5 \text{ kPa})$ 로, 탄성계수는 비배수 전단강도의 200배로 결정하였다.

본 연구에서는 강관말뚝의 관입깊이가 5m~20m인 경우가 현장에서 사용실적이 많은 점(포스코 개발, 1997)과 국내 교대말뚝기초가 시공된 연약지반의 두께가 5m~20m인 범위가 76%를 차지하고 있다는 점(한국도로공사, 1996)을 고려하여 해석시 말뚝의 근입깊이를 15m로 설정하였다. 그리고 경계조건으로 mesh 하단은 말뚝이 암반층에 지지되어 있는 경우를 모사하였으며 mesh의 왼쪽과 오른쪽은 Randolph와 Wroth(1978)가 말뚝 근입으로 인한

영향거리(r_m)에 대해 제안한 식 (1)을 적용하여 20m로 결정하였다. 여기서 L 은 지반에 근입된 말뚝의 길이이며 ν 는 지반의 포아송비이다.

$$r_m = 2.5 \times L \times (1 - \nu) \quad (1)$$

3.2 수치해석결과

3.2.1 축방유동압의 분포형태

본 연구에서는 성토하중에 인접한 교대말뚝기초에서의 축방유동압 분포형태를 파악하기 위해서 각 해석 대상 지반에 대하여 성토하중의 크기와 말뚝두부조건 그리고 말뚝중심간격에 따라 축방유동압의 분포형태를 수치해석으로 분석하였다.

그 결과 점성토 지반에서는 축방유동압의 분포형태가 그림 4에 나타낸 바와 같이 말뚝의 수평변위 분포형태와

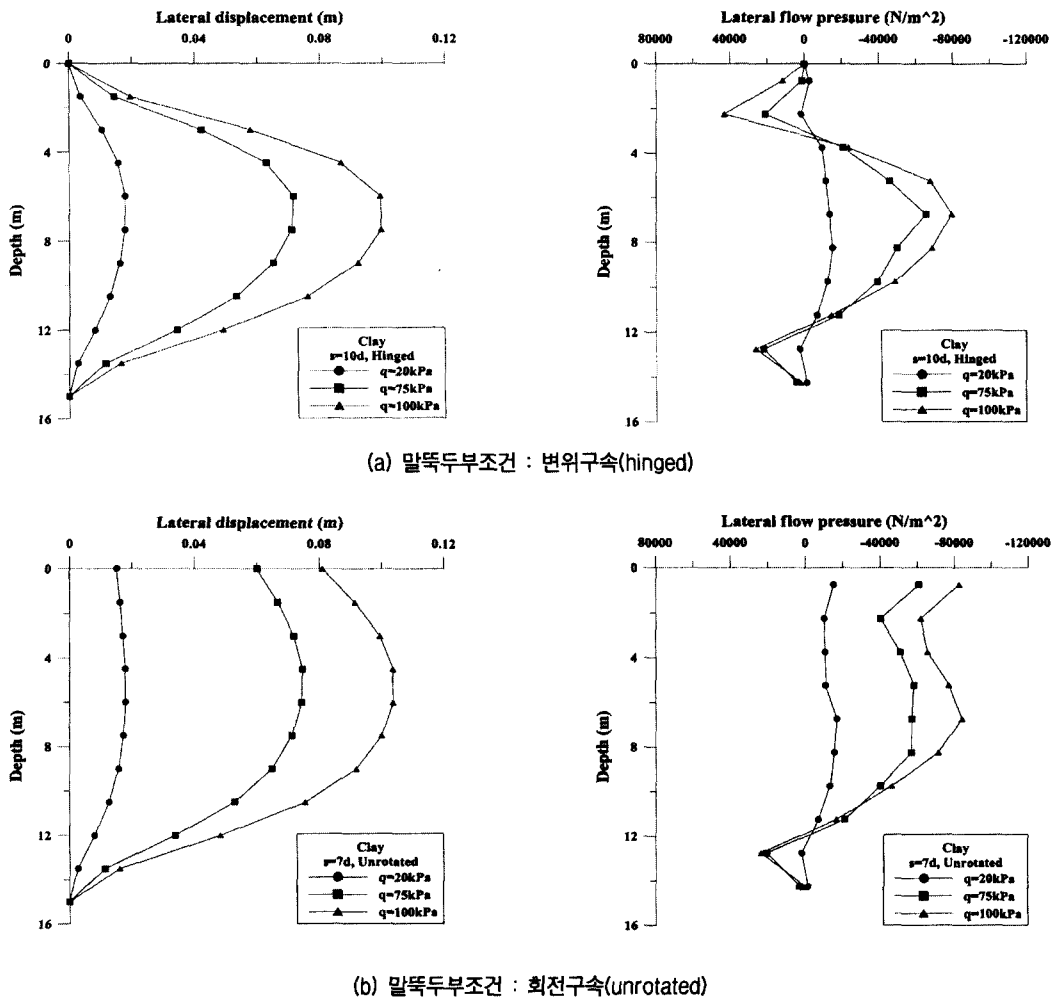
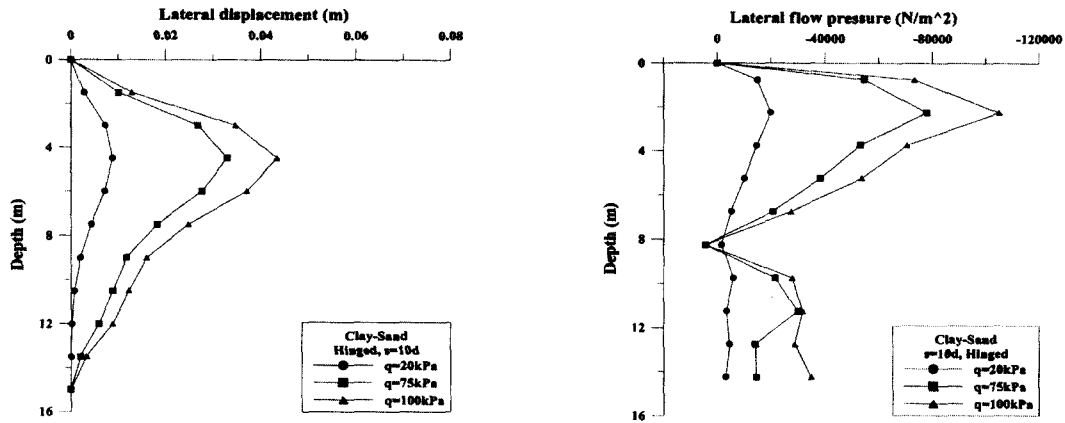
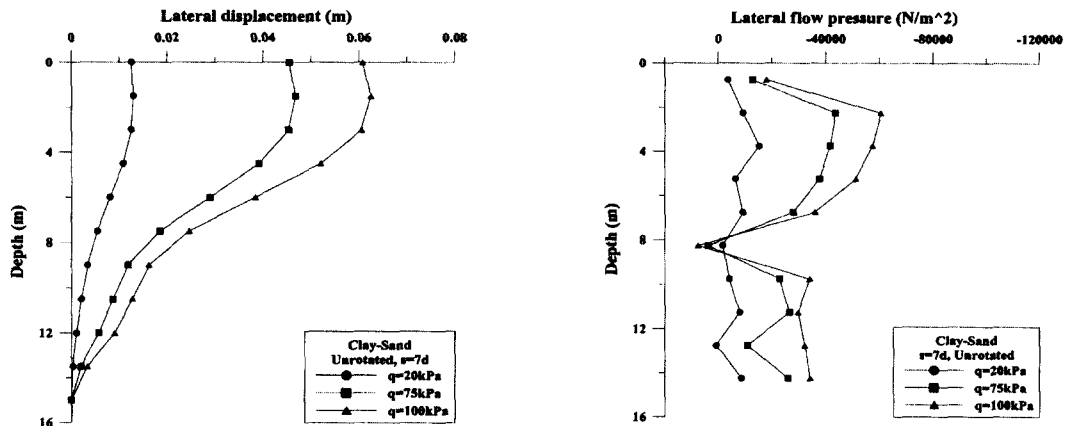


그림 4. 성토하중에 따른 말뚝의 수평변위와 축방유동압(점성토 지반)



(a) 말뚝두부조건 : 변위구속(hinged)



(b) 말뚝두부조건 : 회전구속(unrotated)

그림 5. 성토하중에 따른 말뚝의 수평변위와 축방유동압(점성토-사질토 지반)

유사하게 나타났으며 말뚝두부조건이 변위구속(hinged)인 경우에는 거의 이동변 삼각형 분포로, 말뚝두부조건이 회전구속(unrotated)인 경우에는 거의 사다리꼴 분포로 나타났다.

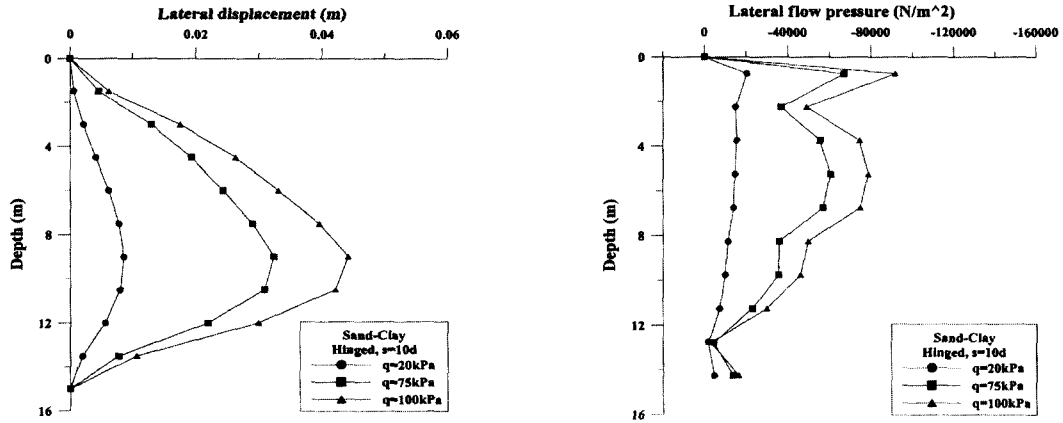
그리고 점성토-사질토 지반에 대한 해석결과는 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 보는 바와 같이 점성토-사질토 지반의 경우에도 점성토 지반의 경우와 동일하게 점성토 지반에서 발생하는 축방유동압의 분포형태가 말뚝의 수평변위 분포형태와 유사하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 즉 말뚝두부조건이 변위구속인 경우 거의 이동변 삼각형 분포로, 말뚝두부조건이 회전구속인 경우 거의 사다리꼴 분포로 나타났다. 이상의 해석결과로부터 본 연구에서는 점성토 지반과 점성토-사질토 지반의 경우, 교대말뚝기초에서의 축방유동압의 분포형태가 지반조건, 성토하중의 크기보다는 말뚝두부조건에 의해 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

반면에 사질토-점성토 지반에서는 그림 6에 나타낸 바

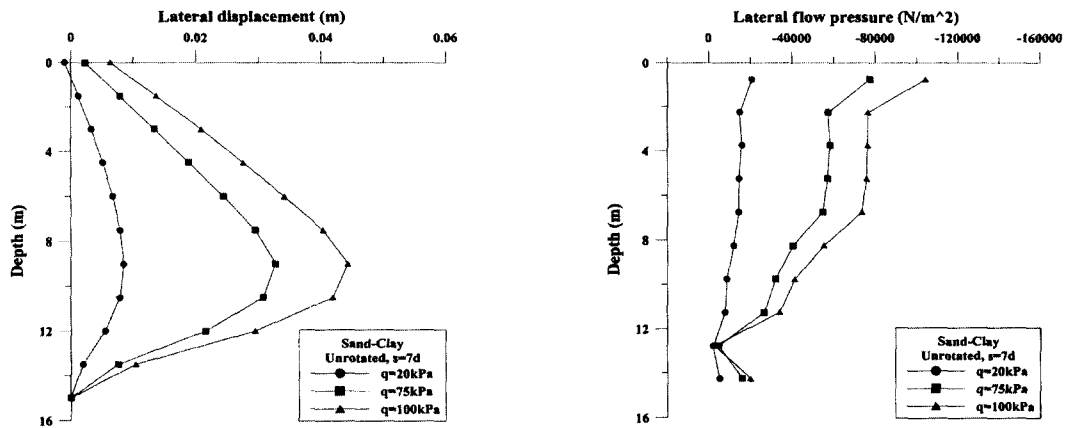
와 같이 점성토 지반에서 발생하는 축방유동압의 분포형태는 말뚝의 수평변위의 분포형태와 유사하게 나타났지만 말뚝두부조건과는 무관하게 사다리꼴 형태로 분포하는 것을 알 수 있었다. 이로부터 사질토-점성토 지반의 경우, 축방유동압의 분포형태는 성토하중의 크기와 말뚝두부조건보다는 토층조건에 가장 큰 영향을 받는 것으로 판단되었다.

3.2.2 축방유동압의 크기

본 연구에서는 각 해석 대상지반에 대하여 성토하중의 크기와 말뚝두부조건 그리고 말뚝중심간격에 따라 수치해석을 수행하였으며 이로부터 성토하중에 인접한 교대말뚝기초에서의 축방유동압 크기를 다음과 같이 결정하였다. 그림 7에 나타낸 바와 같이 먼저 성토하중을 재하기 전인 초기상태의 수평방향 지반응력($\sigma_{initial}$)과 성토하중을 재하시킨 후인 최종상태의 수평방향 지반응력(σ_{final})을 3차원 수치해석결과로부터 깊이에 따라 산정한다.



(a) 말뚝두부조건 : 변위구속(hinged)



(b) 말뚝두부조건 : 회전구속(unrotated)

그림 6. 성토하중에 따른 말뚝의 수평변위와 축방유동압(사질토-점성토 지반)

이 때 σ_{final} 은 하중 평형상태에 도달한 후 지반이 받고 있는 응력상태이다. 그리고 성토하중이 재하됨에 따라 지반에는 수평토압계수를 고려한 배면 성토하중($K \cdot q$)이 수평방향으로 작용하게 된다. 따라서 그림 7에 나타낸 바와 같이 $\sigma_{initial}$ 에 $K \cdot q$ 를 더한 값에서 σ_{final} 을 뺀 값으로 축방유동압을 산정하였다.

이와 같이 점성토 지반과 점성토-사질토 지반 그리고 사질토-점성토 지반에서 성토하중에 따라 발생한 축방유동압의 크기를 그림 8과 그림 9 그리고 그림 10에 나타내었다. 축방유동압의 크기에 대한 이상의 해석결과를 바탕으로 본 연구에서는 축방유동압의 크기와 성토하중의 크기의 관계를 살펴보았으며 이로부터 표 3에 나타낸 바와 같이 축방유동압의 최대크기(P_{max})를 성토하중의 크기(q)에 대한 비(α)로 나타낼 수 있었다. 표 3에 제시한 바와 같이 점성토 지반과 점성토-사질토 지반에서는 축방유동압 최대크기가 말뚝두부조건이 변위구속(hinged)인 경우 성토

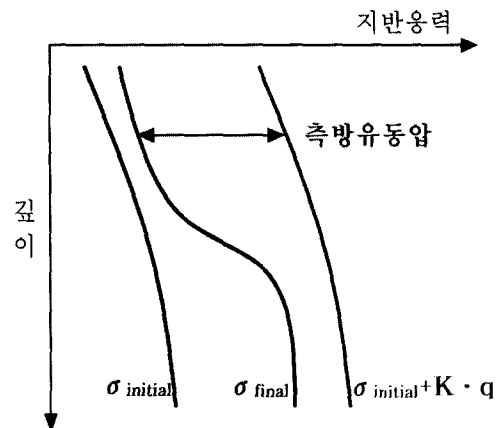


그림 7. 축방유동압 산정과정

하중 크기의 약 0.8배로, 회전구속(unrotated)인 경우 성토하중 크기의 약 0.6 ~ 0.65배로 나타났다. 그리고 사질토-점성토로 이루어진 지반에서는 축방유동압 최대크기가 말뚝두부조건에는 무관하게 성토하중 크기의 약 0.5배로

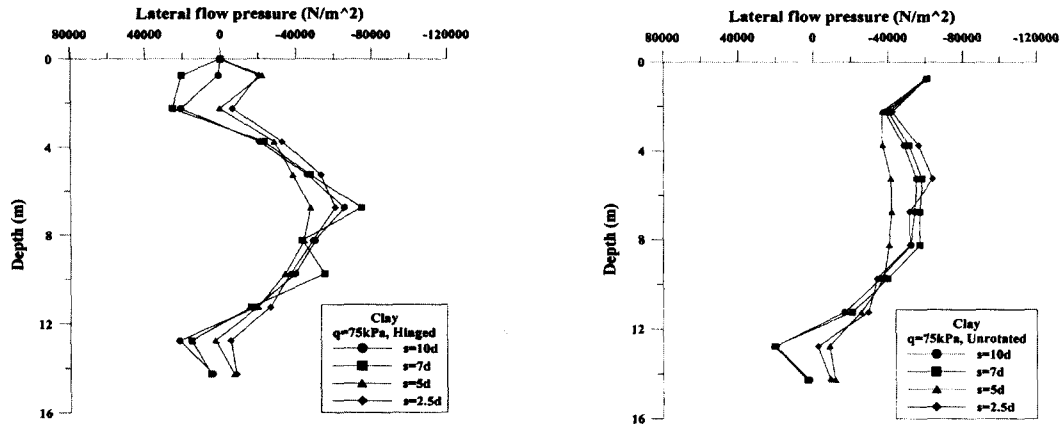


그림 8. 성토하중에 따른 측방유동압의 크기(점성토 지반)

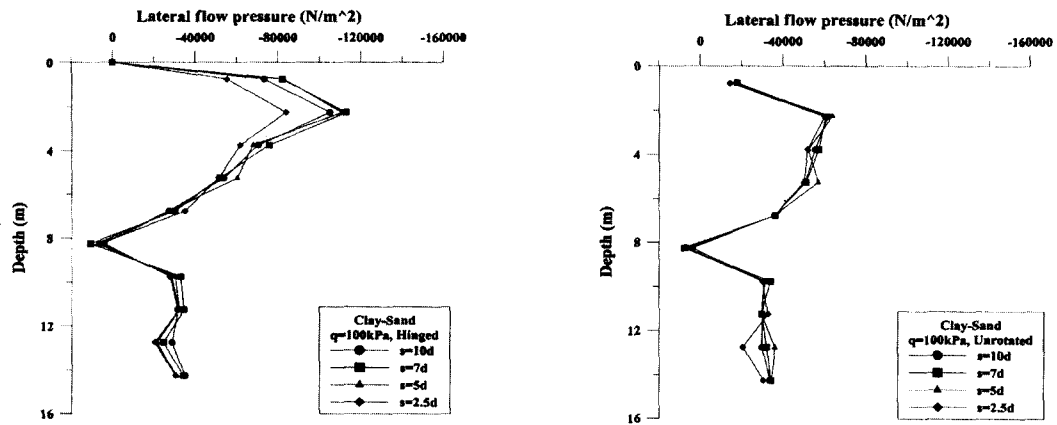


그림 9. 성토하중에 따른 측방유동압의 크기(점성토-사질토 지반)

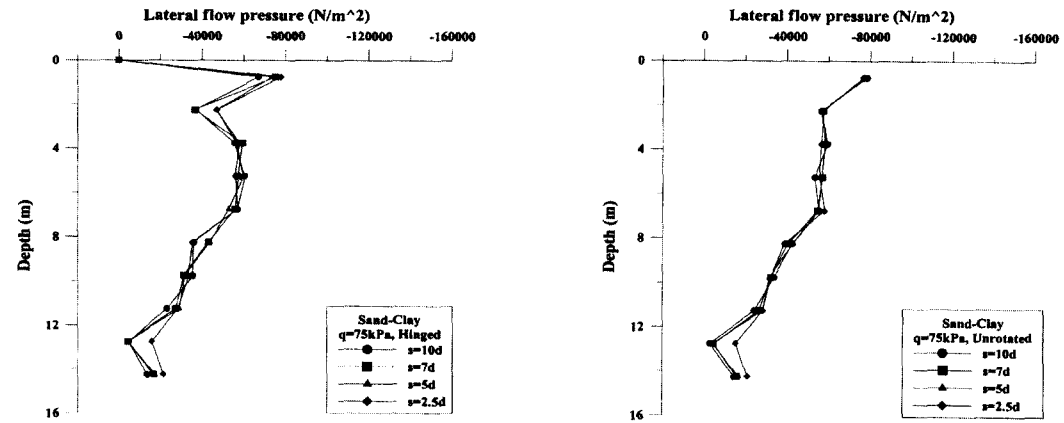


그림 10. 성토하중에 따른 측방유동압의 크기(사질토-점성토 지반)

나타났다. 본 연구에서는 측방유동압 크기에 대한 해석결과로부터 점성토 지반과 점성토-사질토 지반인 경우 측방유동압의 크기는 말뚝두부조건에 가장 큰 영향을 받으며 사질토-점성토 지반에서는 말뚝두부조건보다는 토층조건에 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

3.2.3 교대말뚝기초에 대한 측방유동압의 분포형태와 크기

본 논문에서는 연약지반에 시공된 교대말뚝기초에 인접하여 성토하중이 재하될 때 발생하는 측방유동압의 분포형태와 크기를 분석하기 위해 3차원 수치해석을 수행하였다. 이상에서 제시한 수치해석결과를 바탕으로 본 논문

표 3. 축방유동압 최대크기(P_{max})의 성토하중 크기(q)에 대한 비(α)

지반조건	성토하중 (q , kPa)	말뚝 두 부 조건		
		변위구속(hinged)		회전구속(unrotated)
점성토	20	0.81	0.80	0.65
	75	0.83		0.68
	100	0.75		0.67
점성토-사질토	20	0.80	0.81	0.67
	75	0.81		0.55
	100	0.82		0.56
사질토-점성토	20	0.52	0.50	0.52
	75	0.48		0.49
	100	0.49		0.48

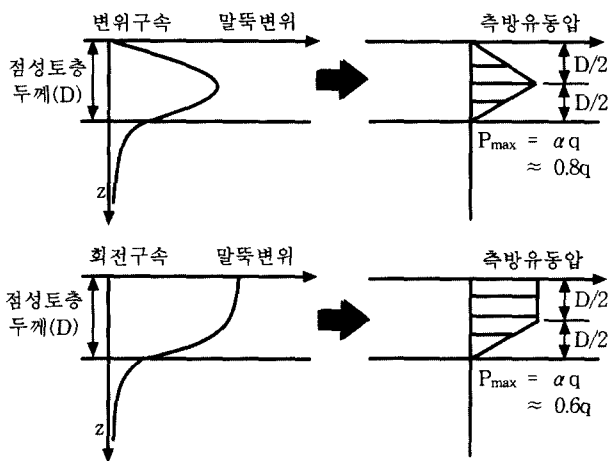


그림 11. 3차원 수치해석결과로부터 추정된 축방유동압의 분포형태와 크기(점성토 지반, 점성토-사질토 지반)

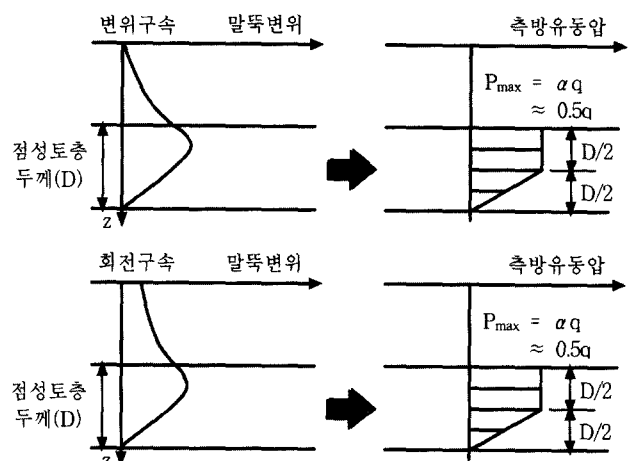


그림 12. 수치해석결과로부터 추정된 축방유동압의 분포형태와 크기(사질토-점성토 지반)

에서는 교대말뚝기초의 말뚝두부조건에 따른 축방유동압의 크기와 분포형태를 그림 11과 그림 12와 같이 교대말뚝기초의 축방유동에 대한 설계 및 해석시 지침자료로 추천·제안한다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 인접한 성토하중으로 인하여 교대말뚝기초에서 발생하는 축방유동의 발생메카니즘을 파악하기 위해 성토하중의 크기($q=20, 75, 100\text{kPa}$)와 말뚝두부조건(변위구속, 회전구속) 그리고 말뚝중심간격($s=2.5d, 5.0d, 7.0d$, 단독말뚝)에 따라 3차원 유한요소해석을 수행하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 축방유동압의 분포형태는 교대말뚝기초의 수평변위와 유사한 형태로 나타났으며 축방유동압의 크기는 배

면 성토하중의 비로써 결정할 수 있었다.

(2) 점성토 지반과 점성토-사질토 지반의 경우, 축방유동압의 분포형태와 크기는 말뚝두부조건에 가장 큰 영향을 받는 반면 사질토-점성토 지반의 경우에는 말뚝두부조건보다는 토층조건에 가장 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다.

(3) 본 수치해석결과를 바탕으로 교대말뚝기초의 말뚝두부조건에 따른 축방유동압의 크기와 분포형태를 다음과 같이 교대말뚝기초의 축방유동에 대한 설계 및 해석시 지침자료로 추천·제안한다.

① 점성토 지반, 점성토-사질토 지반

축방유동압의 분포형태는 말뚝두부조건이 변위구속(hinged)인 경우 이등변 삼각형 분포형태로, 회전구속(unrotated)인 경우 사다리꼴 분포형태로 제안한다. 축방유동압의 최대크기는 말뚝두부조건이 변위구속인 경우 성토하중의 0.8배로, 회전구속인 경우 0.6배로 제

안한다.

② 사질토-점성토 지반

측방유동압의 분포형태는 말뚝두부조건이 변위구속인 경우와 회전구속인 경우 모두 사다리꼴 분포형태로 제안한다. 측방유동압의 최대크기는 말뚝두부조건과는 무관하게 0.5배로 제안한다.

감사의 글

본 연구는 시설안전기술공단에서 시행 중인 “측방유동을 받는 토류구조물의 안전진단기술개발” 과제의 일환으로 수행하였으며 귀 공단에 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 홍원표(1994), 수동말뚝, 이진출판사, 서울.
2. 이재훈, 홍성영(1995), 지반의 측방유동, 도서출판 건설도서, 서울.
3. 한국도로공사 도로연구소(1996), 교대변위 억제대책에 관한 연구(II), 도로연 96-46-12, 한국도로공사, 서울.
4. 한국지반공학회, 포항종합제철(주), 한국강관협회, 포스코 개발(주), (주)파일테크(1997), 강관말뚝의 최적설계·시공개선방안 연구보고서(I) - 개선된 강관말뚝의 설계와 시공, 포스코 개발(주), 서울.

5. 정상섭(1998), “수동말뚝의 해석기법”, ‘98 가을 학술발표회 논문집 II, 한국지반공학회, pp. 86-89.
6. Jeong, S. S., and Kim, B. C.(2000), "Interaction factors of one-row pile groups subjected to lateral soil movements", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 16, No. 3, pp. 157-162.
7. Brown, D. A., and Shie, C.-F.(1991), "Some numerical experiments with a three dimensional finite element model of a laterally loaded pile", Technical Note, Computers and Geotechnics, Vol. 12, pp. 149-162.
8. Bolton, M. D., Sun, H. W. and Britto, A. M.(1993), "Finite element analysis of bridge abutments on firm clay", Computers and Geotechnics, Vol. 15, pp. 221-245.
9. Federal Highway Administration. (1996), Design and Construction of Driven Pile Foundation. FHWA-HI-96-033, National Highway Institute.
10. Stewart, D. P., Jewell, R. J. and Randolph, M. F.(1993), "Numerical modelling of piled bridge abutments on soft ground", Computers and Geotechnics, Vol. 15, pp. 21-46.
11. Stewart, D. P., Jewell, R. J., and Randolph, M. F.(1994), "Design of piled bridge abutments on soft clay for loading from lateral soil movements", Geotechnique, Vol. 44, No. 2, pp. 277-296.
12. Goh, A. T. C., Teh, C. I. and Wong, K. S.(1997), "Analysis of piles subjected to embankment induced lateral soil movements", J. of Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE, Vol. 123, No. 9, September, pp. 792-801.
13. Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc.(1998), ABAQUS, Ver. 5.8, U.S.A.
14. Tschebotarioff, G. P.(1973), Foundation design and construction, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, N.Y.

(접수일자 2000. 10. 28)