

측방유동을 받는 교대말뚝기초에 대한 거동분석 Behavior of Piled Abutment adjacent to Surcharge Loads

정상섭¹⁾, Sang Seom Jeong, 서정주²⁾, Jung Joo Suh, 장범수³⁾, Bhum Soo Jang

¹⁾ 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.

²⁾ 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.

³⁾ 시설안전기술공단 기술개발지원실 차장, Manager, Korea Infrastructure Safety & Technology Corp.

개요(SYNOPSIS) : In order to analyze the behavior of piled abutment adjacent to surcharge loads a numerical study was conducted. In 2D plane strain analysis, the distribution of lateral soil movement was investigated by varying the thickness of clay layer and the magnitude of surcharge loads. In 3D analysis, the magnitude and distribution of lateral pile-soil movement were studied for different cap rigidity. Based on limited parametric studies, a simple method is proposed to identify the lateral pressure of piled abutment adjacent to surcharge loads.

주요어(Key words) : lateral pile-soil movement, soft clay, piled abutment, plane strain

1. 서론

연약지반에 성토, 매립 등을 하거나 각종 토류구조물을 시공할 경우에는 지반침하, 지지력, 사면활동 파괴에 대한 안정성 평가가 주된 검토 대상이었으나 최근에는 배면지반의 뒤채움, 지반굴착시 발생하는 편재하중, 과도한 압밀침하, 급속한 절·성토 등에 의해서 발생하는 측방유동으로 지반-구조물의 안정성 문제가 빈번히 발생하고 있는 실정이다. 현재 국내에서도 연약지반인 서·남해안 지역(영종도, 당진, 군장, 광양만, 가덕도)을 중심으로 한 건설공사가 활발히 진행되면서 측방유동과 관련된 문제에 관심이 급증하고 있다. 지반에 측방유동이 발생하면 구조물의 과도한 변형으로 구조물 자체가 기능상의 손상(예, 교대의 과도변위로 인한 신축이음부의 문제)을 입을 뿐만 아니라 인접 구조물과 지하 구조물 등에 피해를 발생시킬 수 있다. 특히 말뚝기초의 경우 측방유동압을 받는 수동말뚝의 거동을 무시하고 주동말뚝으로 설계·시공함으로써 구조물이 완성된 후에 피해가 발생한 사례가 많이 나타나고 있으며 그 복구비용도 상당히 크게 발생하고 있다.

이에 사전설계시 적용할 수 있는 측방유동 예측법이 필요하지만 현재 국내 설계시방서나 설계기준 등에서는 측방유동을 정량적으로 평가할 수 있는 판정기준이나 측방유동압의 크기 및 분포형태 또는 평가산정방법 등이 구체적으로 규정되어 있지 않은 상태로 설계시 제대로 검토하기에는 어려운 실정이다. 이와 같은 배경에서 본 연구에서는 지반-구조물 문제와 관련하여 측방유동의 발생메카니즘 및 형태와 크기에 대한 연구의 일환으로 단일층으로 이루어진 연약지반에 근입된 말뚝기초 구조물에 인접하여 성토하중이 재하될 때 발생하는 측방유동압의 분포형태와 크기를 수치해석적으로 분석하였다.

2. 측방토압분포

대부분의 구조물은 말뚝기초로 이루어져 있는 경우가 대다수이며 특히, 연약층에 위치한 구조물의 측방유동에 대한 연구를 위해서는 측방유동지반 속에 설치된 수동말뚝에 작용하는 측방토압을 어떻게 산

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

수동말뚝의 거동을 검토하는데 있어 가장 중요한 것은 수동말뚝에 작용하는 측방토압의 산정이다. 이는 수동말뚝을 계통적으로 해석할 경우에 구조물의 안정문제를 검토해야 하는데 측방토압의 산정이 그 핵심을 이루고 있기 때문이다. 그러나 측방토압은 성토체의 높이나 형상, 지반의 역학적 특성과 성층(profile) 그리고 교대·교각 구조물 내 말뚝의 배치와 강성 등 여러 가지 요인의 영향을 받으므로 정량적으로 파악하기에는 많은 어려움이 수반된다.

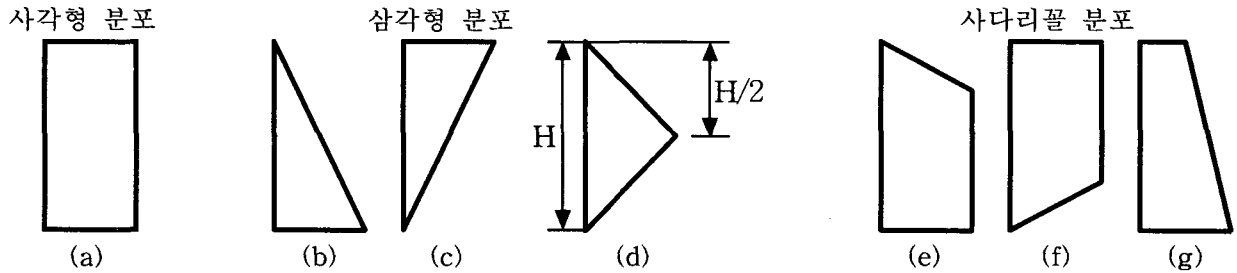


그림 1. 수동말뚝에 작용하는 측방토압분포

그림 1은 지금까지 추정 혹은 가정된 측방토압의 깊이방향 분포형태를 개략적으로 구분하여 보여준 것이다. 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 측방토압 분포 중 연약지반에 설치된 수동말뚝의 측방토압 분포로 가장 많이 사용되고 있는 것은 그림 1 (d)의 이등변 삼각형 분포로 Tschebotarioff(1973)에 의해 제시되었다.

실제로 수동말뚝에 작용하는 측방토압은 지반의 측방변형과 구조물의 상호작용에 의해 발생하는 결과로 그림 1에서와 같은 단순한 분포형태와는 달리 다소 복잡한 형태를 나타내기도 한다. 따라서 본 연구에서는 2D와 3D 수치해석을 수행하여 측방토압의 거동을 분석하고자 한다.

3. 유한요소해석

3.1 2차원 해석

본 연구에서는 구조물이 없는 지반(free-field)에서 편재하중에 따른 연약지반의 거동분석을 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS(1995)를 이용하여 2차원 유한요소해석을 수행하였다. 본 해석에서는 그림 2에 나타낸 바와 같이 연약한 점성토 지반이 사질토 지반 사이에 위치한 지층조건을 대상으로 비대칭인 편재하중에 의해 발생하는 측방변위의 분포형태와 크기를 살펴보았다.

본 2차원 유한요소해석에서는 6 node triangle 요소를 사용하여 지반을 모사하였으며 연약한 점성토 지반은 Tresca의 탄소성 매질로, 사질토 지반은 Mohr-Coulomb의 탄소성 매질로 선정하였다. 그리고 표 1은 본 해석대상의 지반에 대한 기본 물성을 정리한 것이다.

본 평면변형을 해석에서는 연약지반의 측방유동에 영향을 미치는 인자에 대한 매개변수 연구를 수행하기 위해 1차적으로 연약층의 두께(H_c)와 편재하중의 크기(q)를 대상으로 결정하였다. 해석시 연약층의 두께에 대해서는 10m, 15m, 20m의 세 종류로, 편재하중의 크기에 대해서는 50kPa, 100kPa, 120kPa의 세 종류로 선정하였다.

그림 3은 연약층의 두께와 편재하중의 크기를 변화시켜 해석지반 단면의 중앙면에서 발생하는 지반의 측방변위의 분포양상을 나타낸 것이다. 그림 3에서와 같이 점성토 지반이 사질토 지반 사이에 위치한 지층조건에서는 편재하중으로 발생한 연약지반의 측방변위가 중앙부가 볼록한 포물선 형태로 나타났

며 그 크기는 연약층의 두께가 증가함에 따라 커짐을 알 수 있었다. 또한 그림 3으로부터 각 해석사례에 대한 지반의 최대 측방변위를 살펴보면 편재하중의 크기가 50kPa에서 100kPa로 2배 증가할 경우 지반의 최대 측방변위는 약 3배 증가하였으며 50kPa에서 120kPa로 2.4배 증가할 경우 지반의 최대 측방변위는 약 4.3배 증가하였다. 그리고 편재하중이 50kPa인 경우에는 연약층의 두께에 대한 변화정도가 상대적으로 작게 나타났지만 편재하중이 증가함에 따라 그 변화정도는 크게 발생하는 것을 알 수 있었다.

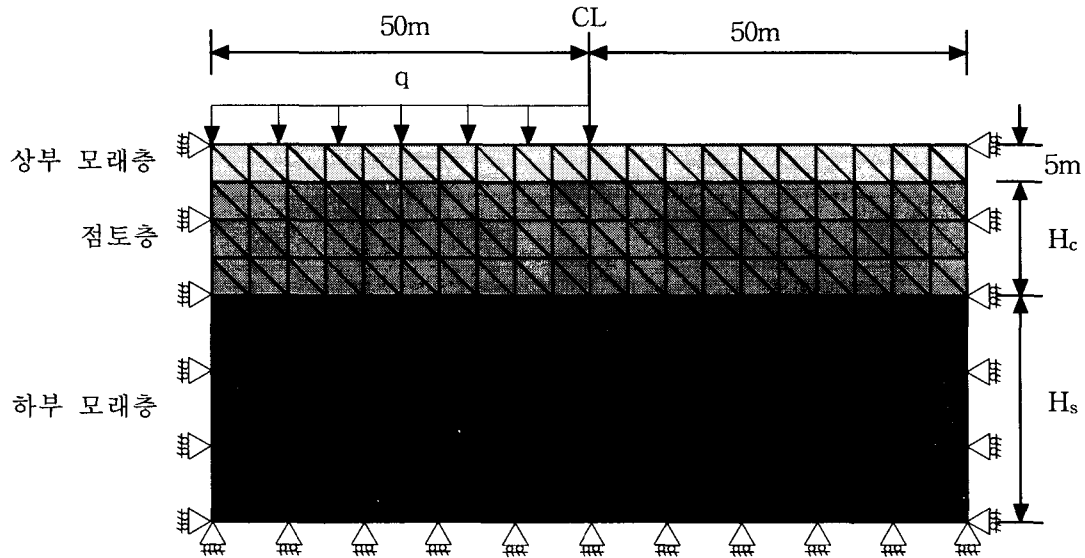


그림 2. 2차원 유한요소해석 mesh

표 1. 2차원 유한요소해석시 지반물성

상·하부 사질토 지반	건조단위중량 (kN/m^3)	14.0
	포화단위중량 (kN/m^3)	16.0
	포아송비	0.3
	점착력 (kN/m^2)	1.0
	내부마찰각($^\circ$)	40
	탄성계수 (kN/m^2)	5.0×10^4
점성토 지반	건조단위중량 (kN/m^3)	16.0
	포화단위중량 (kN/m^3)	18.0
	포아송비	0.3
	점착력 (kN/m^2)	20.0
	내부마찰각($^\circ$)	0
	탄성계수 (kN/m^2)	1.0×10^5
	마찰계수 (α)	0

일반적으로 측방유동의 가능성을 판단하는 기준은 측방유동을 일으키는 하중메카니즘을 고려하여 설정할 수 있다. 이 때 가장 근간이 되는 하중메카니즘은 편차성토고에 의한 사면 불안정에 기인되는 측방유동 가능성이며 그외 과다한 압밀침하로 야기되는 측방유동의 가능성을 기준으로 삼고 있다. 본 2차원 유한요소 해석에서는 1차적으로 구조물이 없는 자유장에서의 편재하중에 의한 연약지반의 측방유동에 초점을 맞추고 있으며 이러한 경우 측방유동의 가능성을 판정할 수 있는 기준으로는 일본 도로공단에서 식 (1)과 같이 제안한 측방이동지수(F)에 의한 판정법을 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

$$F = \frac{C_u}{\nu \cdot H \cdot D} \quad (1)$$

그 이유는 본 연구의 평면변형을 해석사례에 대한 측방유동 가능성을 평가한 결과 측방유동의 징후가 가장 작은 해석사례인 상재하중의 크기가 50kPa이고 연약층의 깊이가 10m인 경우, 측방이동지수(F)가 0.04로 산정되었기 때문이다. 이는 일본 도로공단에서 제안한 판정기준의 상한치인 0.04와 일치한다. 따라서 본 해석사례의 경우에 편재하중의 크기와 연약층의 두께가 증가함에 따라 측방이동지수가 0.04보다 작게 나타나므로 측방유동이 발생 가능함을 알 수 있다.

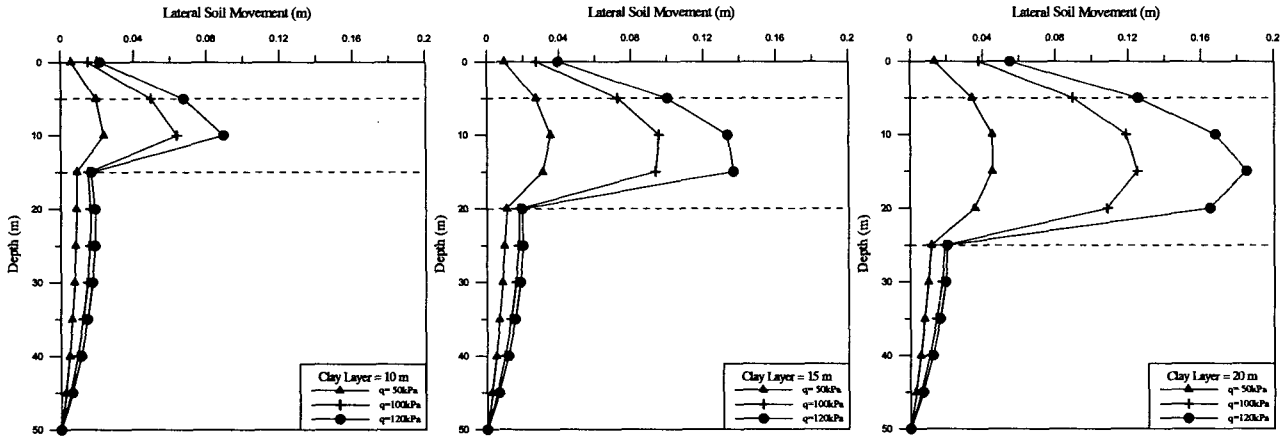


그림 3. 평면변형을 해석결과 - 편재하중으로 발생한 지반의 측방변위

3.2 3차원 해석

본 연구에서는 단일지층으로 이루어진 점성토 지반에 근입된 말뚝기초 구조물에 인접하여 성토하중이 재하될 경우 발생하는 측방유동압의 분포형태와 크기를 Hibbit, Karlsson & Sorensen사에서 개발한 범용프로그램인 ABAQUS(1998)를 이용한 3차원 유한요소해석으로 분석하였다. 지반의 측방변형으로 나타나는 측방유동은 지반과 말뚝의 상호작용으로 인하여 발생하는 상대변위(relative displacement)의 영향을 크게 받으며 측방유동압의 분포형태와 크기는 지반과 말뚝의 상대강성, 말뚝두부의 경계조건, 말뚝 배열, 말뚝중심간격 등에 의해 상이하게 나타난다.

본 3차원 해석에서는 먼저 측방유동압의 분포형태와 크기에 영향을 미치는 매개변수 중 말뚝두부의 경계조건에 따라서 지반과 말뚝의 상대변위를 살펴보았다. 그리고 그림 4에 나타난 바와 같이 본 유한요소해석에서는 해석시간을 줄이면서 말뚝중심간격에 따른 균말뚝 효과를 분석하기 위해 말뚝 중심에서 말뚝중심간격의 1/2에 해당하는 중심선까지의 단면에 대해서만 해석을 수행하였다.

본 유한요소해석에서는 국내 현장에서 가장 많이 사용하고 있는 직경이 406.4mm이고 두께가 9mm인 강관말뚝과 연약한 점성토 지반을 대상으로 8 node brick 요소를 사용하여 말뚝은 탄성체로 주변 지반은 Mohr-Coulomb의 탄소성 매질로 모사하였다. 그리고 말뚝과 말뚝 주변지반의 경계면에는 경계요소(interface element)를 사용하였다. 본 해석대상에 대한 기본물성은 표 2와 같다.

본 해석에서는 경계조건으로 mesh 하단은 말뚝이 암반층에 접해 있는 경우를 모사하였으며 mesh의 왼쪽과 오른쪽은 Randolph와 Wroth(1978)가 말뚝 근입으로 인한 영향거리(r_m)에 대해 제안한 식 (2)를 적용하여 20m로 결정하였다. 여기서 L 은 지반에 근입된 말뚝의 길이이며 ν 는 지반의 포아송비이다.

$$r_m = 2.5 \times L \times (1 - \nu) \quad (2)$$

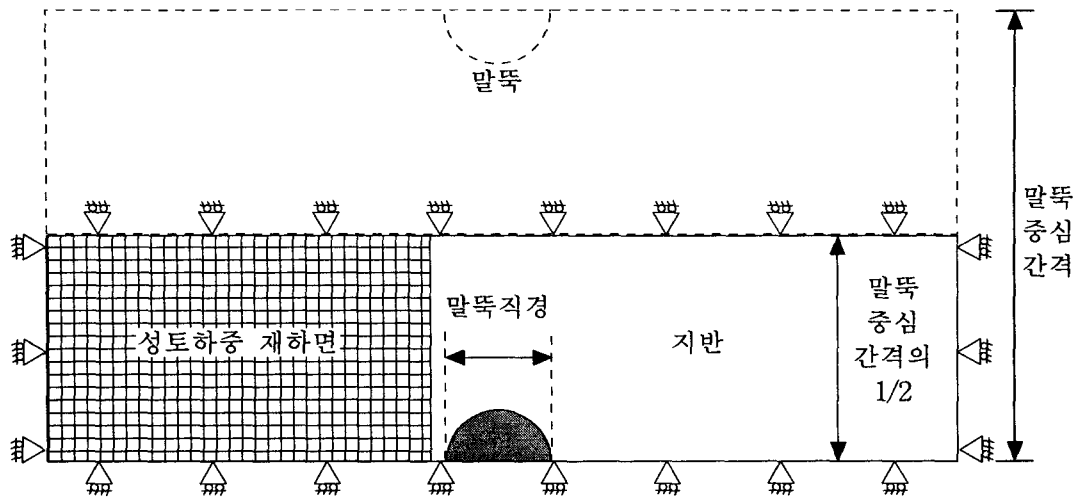


그림 4. 유한요소해석의 대상 영역(평면도)

표 2. 3차원 유한요소해석시 말뚝과 지반 그리고 활동면의 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	
15	회전구속(unrotated) 변위구속(hinged)		수평방향 : 자유(free) 수직방향 : 고정(fixed)	
연약지반				
비배수전단강도 (kPa)	내부마찰각 (°)	탄성계수 (kPa)	포아송비	단위중량 (kN/m ³)
24.5	0	4900	0.48	18
말뚝-지반 경계면				
마찰계수 ($\tan \delta$)		0.249		

본 3차원 유한요소해석에서는 20kPa의 성토후중에 대한 비배수 조건에서의 해석을 수행하였으며 그 결과 단독말뚝인 경우, 성토후중의 재하폭에 따라 그림 5와 같이 지반의 측방변위에 대한 깊이별 분포 양상을 살펴볼 수 있었다.

그리고 그림 6은 3차원 해석으로 구한 지반과 말뚝의 상대변위를 근사화하여 결정한 측방토압 분포를 나타낸 것이다. 그림 6에서 Δ 는 지반과 말뚝의 변위이고 D는 지반의 측방변위가 발생하는 층의 두께이며 P는 측방토압을 나타낸다. 그리고 실선은 깊이에 따른 말뚝의 변위를 점선은 깊이에 따른 지반의 변위를 나타낸 것이다.

그림 6 (a)는 말뚝두부의 경계조건이 회전구속인 경우로 지반과 말뚝의 상대변위가 지표면에서 지반의 측방변위가 발생하는 층의 중앙면까지는 거의 일정하게 나타났으며 그 결과 이 때의 측방토압의 분포형태는 사다리꼴 형태로 근사화하였다. 말뚝두부의 경계조건이 변위구속인 경우는 지반과 말뚝의 상대변위가 그림 6 (b)와 같이 지반의 측방변위가 발생하는 층의 중앙면에서 가장 크게 발생하였으며 이

로부터 추정된 측방토압의 분포는 이등변 삼각형으로 나타났다.

그리고 추정된 측방토압의 분포에 대해 측방토압의 작용크기는 $\alpha \gamma H$ 형태로 나타낼 수 있으며 이 때 α 는 지반의 압밀 진행정도 또는 압밀도에 따라 변화하며 일반적으로 대상지반의 압밀도가 낮은 지반에서는 약 0.8, 대상지반의 압밀도가 큰 지반에서는 약 0.3으로 보고되고 있으나 좀 더 체계적인 연구를 수행 중에 있다.

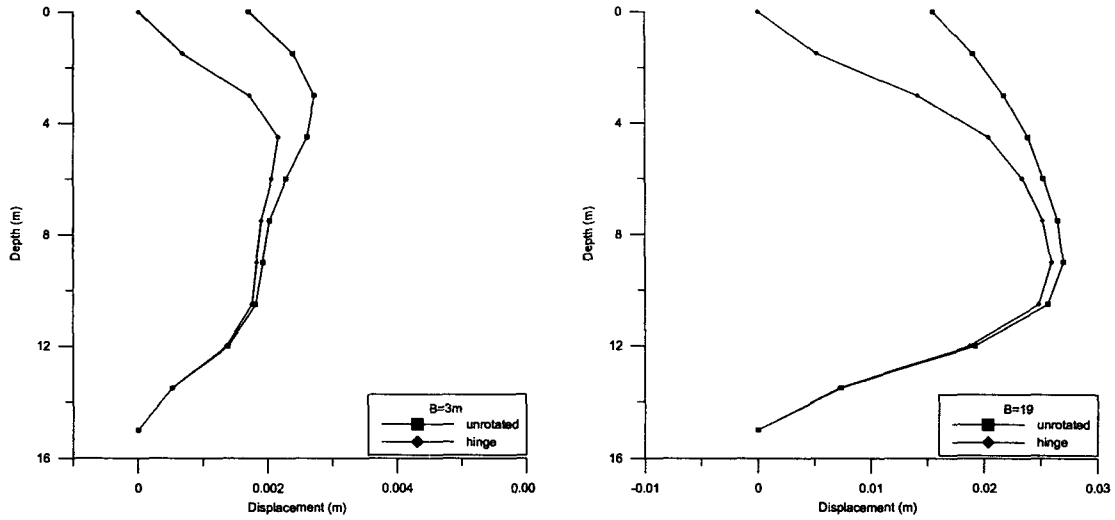


그림 5. 3차원 유한요소해석 결과 - 말뚝구속조건에 따른 측방변위

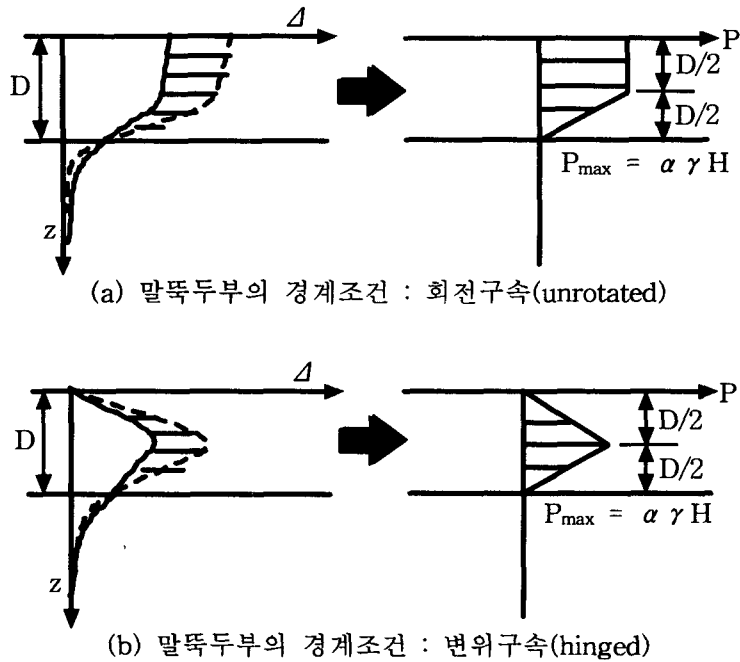


그림 6. 지반과 말뚝의 변위로 추정된 측방토압 분포

4. 측방유동이 발생가능한 지반조건

측방유동 관련 기존의 국내 연구결과를 종합·분석하였다. 그 결과 국내에서 지반의 측방유동으로

인한 피해가 가장 빈번하게 나타나는 사례들을 살펴보면 연약지반상에 교대 및 교각 구조물을 설치하고 배면에 성토를 진행시키는 경우가 대부분을 차지하고 있다. 따라서 측방유동 발생이 예상되는 지반조건은 연약한 점성토 지반상에 편차성토나 뒤채움 매립이 이루어진 경우가 가장 대표적이다. 측방유동이 발생가능한 연약지반에 대한 분명한 기준은 없지만 표준관입시험치(N치)가 6 이하이거나 비배수 전단강도가 $1.0\text{kg/cm}^2(10\text{kPa})$ 이하인 연약지반에서 측방유동이 발생한다고 판단하는 견해가 실무적으로 적용가능하다.

그리고 다음과 같은 경우에는 측방유동의 발생가능성이 크다고 판단할 수 있으며 동시에 연약지반내에 시공되는 토류구조물에 대한 설계하중을 결정할 때 측방유동의 영향을 고려할 필요가 있다.

- ① 압밀침하가 발생할 가능성이 큰 연약층 상부에 2m 이상의 성토가 이루어지는 경우
- ② 교대구조물과 말뚝기초를 무시하고 원호활동에 대한 사면안정해석을 수행한 결과 최소안전율이 1.0보다 작게 산정된 경우
- ③ 연약지반에 시공된 기존 말뚝기초의 수평변위량이 말뚝의 탄성변위량인 2.5cm를 초과하는 경우
- ④ 연약지반 상부의 성토하중이 연약층의 비배수 전단강도보다 큰 경우
- ⑤ 교대기초인 말뚝 시공후 배면 성토지반의 지표침하가 50mm 이상 발생하는 경우

5. 측방유동 판단기준

현재까지 수행한 본 연구결과를 토대로 한 잠정적인 결론을 살펴보면 다음과 같다.

- ① 측방유동 메카니즘은 편차성토고에 의한 사면 불안정에 기인되는 측방유동 가능성과 과도한 압밀 침하로 야기되는 측방유동의 가능성이 대부분이다. 본 연구결과 일본 도로공단에서 제안한 측방 이동지수(F)에 의한 판정법을 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.
- ② 측방유동의 형태는 말뚝두부의 경계조건이 변위구속인 경우에는 이동변 삼각형 분포형태로 근사화할 수 있으며 말뚝두부의 경계조건이 회전구속인 경우에는 사다리꼴 분포형태로 추정된다. 다만, 연약한 점토층이 토질이 양호한 사질토 지반 사이에 위치한 지층조건에서는 말뚝두부조건에 상관없이 대부분 삼각형 분포형태로 나타난다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 류기송(1988), “취약지반에 설치된 교대의 측방이동과 그의 대책공법”, 대한토질공학회지, 제 4권, 제 3호, pp. 63~68.
2. 박찬호, 김수일, 이승래, 정상섭, 백세환(1994), “교대변위 및 도로침하에 대한 사례분석”, '94 봄 학술발표회 논문집-지반구조물 변위에 관한 사례분석과 환경매립기술, 한국지반공학회, pp. 19~30.
3. 이종규, 박찬호, 이명환, 이인모, 이명재(1994), “교대의 측방변위 발생에 대한 사례분석”, '94 봄 학술발표회 논문집-지반구조물 변위에 관한 사례분석과 환경매립기술, 한국지반공학회, pp. 31~42.
4. 이재훈, 홍성영(1995), **지반의 측방유동**, 도서출판 건설도서.
5. 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.

6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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 Geoenvir. Engrg.*, ASCE, Vol. 123, No. 9, September, pp. 792-801.
10. Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc.(1998), *ABAQUS*, Ver. 5.8, U.S.A.
11. Tschebotarioff, G. P.(1973), *Foundation design and construction*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, N.Y.
12. Vermeer, P. A. and Brinkgreve, R. B. J.(1995), *PLAXIS: Finite element code for soil and rock analyses*, Ver. 6, Netherlands.