

변단면 파일벤트 구조의 수평거동 분석

Analysis of Laterally Loaded Pile-Bent Structure with Varying Cross-sectional Area

정 상 섭¹ Jeong, Sang-Seom

성 철 규² Sung, Chul-Gyu

고 준 영³ Ko, Jun-Young

김 수 일⁴ Kim, Soo-Il

Abstract

The load distribution and deformation of pile-bent structures are investigated using a numerical study. A numerical analysis that takes into account the effects of varying cross-sectional area was performed for different pier diameters, loading steps, and soil conditions. Through the comparison study, it is shown that the location of maximum bending moment is almost the same per each loading step, regardless of varying cross-sections. However, the member force (i.e., stress of pile material) has the largest value at the ground surface when the cross-section is changed. Based on the results obtained, it is found that the location of maximum member force influences highly the behavior of pile-bent structure with varying cross-sections for repair works.

요 지

본 연구에서는 수평하중을 받는 파일벤트(pile-bent) 구조의 변단면에 따른 거동특성을 분석하기 위하여 beam-column 모델을 적용하여 수평변위 및 모멘트, 부재력(응력)을 단일단면 파일벤트 구조의 수평거동과 비교하였다. 분석결과 지표면에서 변단면 파일벤트 구조의 수평변위량이 동일하중 재하시 단일형 파일벤트 구조의 수평변위량보다 커지는 경향을 보였으나, 동일지반, 동일하중조건인 경우에는 변단면 존재유무에 관계없이 최대휨모멘트 발생위치는 일정한 경향을 보였다. 또한 말뚝재료의 부재력 검토 결과 파일벤트 구조의 변단면 부분에서의 부재력이 최대휨모멘트 발생 깊이에서의 부재력보다 큰 것으로 나타났다. 이는 일체형말뚝의 구조적 특성으로 최대휨모멘트 발생위치보다 변단면 부분의 단면축소로 인해 취약해지기 때문에 변단면 발생부분에 대한 보강이 필수적으로 요구됨을 알 수 있었다.

Keywords : Laterally loaded pile, Maximum bending moment, Member force, Pile-bent, Varying cross-section

1. 서 론

최근 산업화에 따른 도시로의 인구집중과 용지면적의 부족으로 인해 사회 시설물의 고밀도화가 요구되고 있으며, 이로 인해 기초 구조물 설계시 많은 제약조건

과, 보다 높은 정확성을 요구하고 있다. 따라서 미국, 유럽 등의 선진국에서는 공간하중, 충격하중, 지진하중 등 큰 수평하중에 대해 유연한 거동을 보이는 단일형 파일벤트(pile-bent) 구조의 활용도가 높아지고 있는 추세이다. 또한 도심의 소음, 진동 등의 문제에 따라 현장

1 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., soj9081@yonsei.ac.kr, 교신저자)

2 신세계건설 대리 (Assistant Manager, Construction Div. Shinsegae E&C.)

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

4 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

타설말뚝의 시공이 증가되고 있으며 상하부 구조를 일체화시킨 파일벤트 구조가 많이 적용되고 있다. 국내에서도 구조물의 대형화, 고층화가 이루어짐에 따라 대구경기초의 사용이 늘어나고 있으며, 공기단축, 경비절감 등의 효과로 인해 교각 말뚝 일체형 기초의 활용도가

높아지고 있다. 그러나 구조적 특성상 상대적으로 큰 수평변위가 발생하기 때문에 수평방향 거동분석이 매우 중요하다.

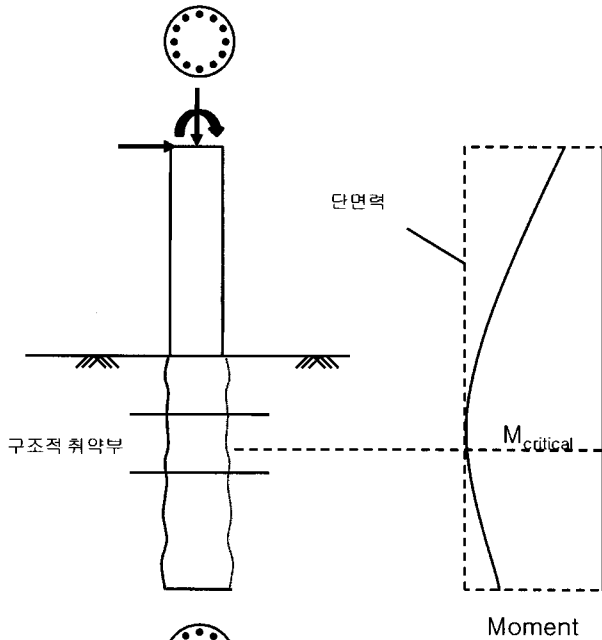
지난 수십년 동안 단독말뚝과 군말뚝의 수평거동에 관한 연구(원진오와 정상섭, 2005; 김영호 등, 2007; 정상섭 등, 2007; Daesoo Lee et al., 2008)는 많이 수행되었으나 상대적으로 파일벤트 구조에 관한 연구(전경수 등, 1999; 이풍희 등, 2003; 손혁수 등, 2005; 정상섭 등, 2005)는 미비한 실정이다. 따라서 파일벤트(pile-bent) 구조의 설계 및 수평거동에 대해서 보다 상세한 연구가 필요하다.

일반적으로 파일벤트 구조물의 기초형식은 그림 1과 같이 단일형과, 변단면 형식으로 구분할 수 있다(Caltrans, 1999). 단일형 파일벤트 구조는 동일한 직경을 가지는 교각과 하부 기초말뚝이 일체화된 구조로서 지반 내에 구조적으로 취약한 부분(최대부재력 발생위치)이 발생하고, 변단면 파일벤트 구조는 말뚝이 교각보다 큰 직경을 사용하여 지표면 부근에서 최대부재력이 발생하는 경우이다. 단일형 파일벤트는 휨모멘트의 변화가 작아 최대부재력 발생부분이 넓게 분포하여 큰 소성변형이 발생하기 전에는 파괴가 일어나지 않는다. 하지만 변단면 파일벤트는 단면을 다르게 하여 지표면 부근 교각하단에 최대부재력이 발생하도록 하여 단면부 보강작업을 통해 유지관리를 쉽게 할 수 있을 것으로 판단된다.

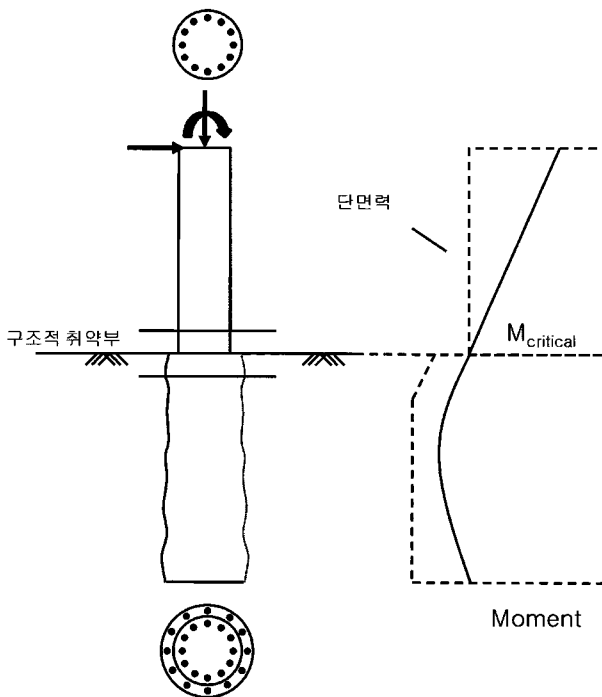
이에 본 연구에서는 변단면을 가지는 파일벤트 구조물의 수평거동 특성을 파악하기 위하여 수평하중 재하시 수평변위, 휨모멘트, 부재력을 산정하여 단일형 파일벤트 구조의 수평거동과 비교하고자 한다.

2. 수치해석방법 및 절차

본 연구에서는 수평하중을 받는 변단면 파일벤트 구조의 거동특성을 분석하기 위해 범용 프로그램인 FB-Pier (university of florida, 2000)을 이용하여 해석하였다. 이를 위해 Beam-Column 모델을 이용한 탄소성보법을 적용하였으며 지반의 비선형성을 고려하기 위해 수평방향하중전이함수(p-y)를 사용하여 말뚝-지반의 상호작용을 고려하도록 하였다. 또한, 대구경 현장타설말뚝의 보강철근에 따른 재료의 비탄성거동에 대하여 모멘트-곡률(Moment- ϕ)의 상관관계를 이용하여 항복거동을 고려하였으며, 극한하중까지의 해석결과를 비교하기 위하여 철근콘크리트 균열하중을 산정하여 해석을 수행하였다.



(a) 단일형 파일벤트



(b) 변단면 파일벤트

그림 1. 파일벤트 구조의 종류

이에 현재 파일벤트를 적용하는 인천대교 현장, 용인 경전철 현장 등의 말뚝직경이 1.8m~2.4m임을 고려하여, 말뚝직경은 3m로 가정하였다. 보강철근비를 조절하며 교각의 단면, 지반물성 및 수평하중을 매개변수로 하여 단일형 파일벤트 구조의 거동과 해석결과를 비교하였다.

2.1 파일벤트 구조해석단면 및 입력물성

본 연구에서 고려한 대표 해석단면은 표 1과 같다. 교각단면변화에 대해서 수직하중은 도로교설계기준 해설

(건설교통부, 2008)에서 제시한 DB24 활하중(432kN)에 안전율 약 2.0을 적용하여 800kN으로 고정하고, 자유장 10m, 말뚝근입깊이는 20m로 가정하여 수치해석을 수행하였다. 주철근은 도로교설계기준 해설(건설교통부, 2008)에 준하여 콘크리트 단면적의 1%로 가정하였으며, 철근간의 간격은 100mm 이상을 유지하였다. 직경 1m의 경우 16개의 주철근이 일정한 간격으로 배근되어 있고, 직경 1.5m의 경우 36개의 주철근이 배근되어 있으며, 직경 2.0m~3.0m의 경우는 주철근이 2줄로 배열되어 있는 단면을 선정하였다. 직경이 3.0m의 경우는 상하부

표 1. 변단면 파일벤트 구조물의 수평거동분석을 위한 해석단면 및 철근배근도

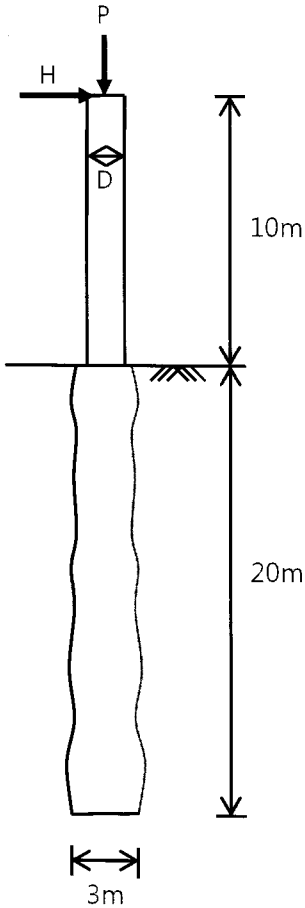
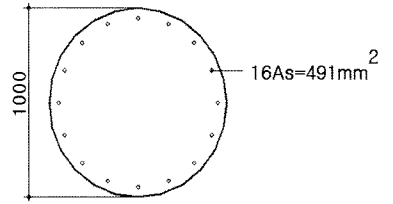
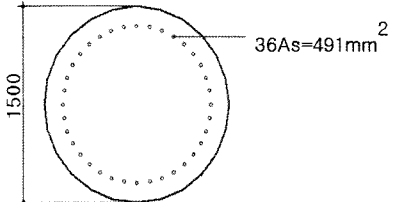
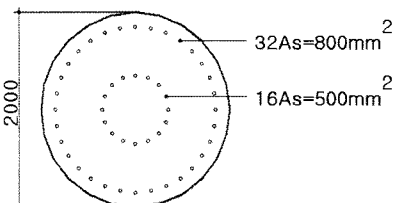
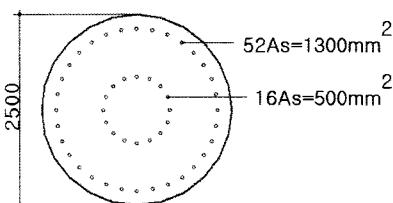
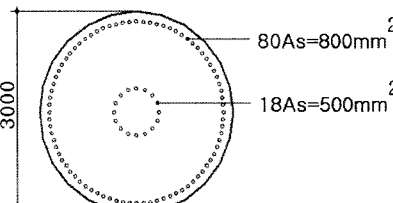
해석구조	D=1.0m
	
	
	
	
	

표 2. 변단면 파일벤트 구조물의 입력물성

구분	파일벤트(pile-bent) 구조		수평하중(kN)	
	콘크리트	철근		
탄성계수 (kPa)	3.044×10 ⁷	2.0×10 ⁸	100	
일축압축강도 (kPa)			41,370	300
주철근 면적 (mm ²)			-	414,000
피복두께 (mm)			75	철근비 1%
				-
			600	
			900	
			1150	

의 단면이 같아 일체형 단면으로 해석하였다. 본 연구에서 적용한 파일벤트의 입력 물성치는 표 2에 정리하였다. 해석시 입력한 수평하중은 표 2와 같이 100~1150kN로 6가지 경우이다.

2.2 해석적용 지반 정수 및 균열수평하중 산정

본 연구에서는 대표적인 비배수전단강도(c_u)와 N치에 따라 탄성계수 (E)값을 산정하여 원지반을 점성토와 사질토 단일 지반으로 각각 연약~견고, 느슨~조밀의 단계로 나누어 침하량 분석을 수행하였다. 또한 지반의

비선형 특성을 고려하기 위해 점성토는 O'Neill의 p-y 모델(O'Neill and Gazioglu, 1984)을 사용하였고, 사질토의 경우는 Reese의 p-y 모델(Reese et al., 1974)을 사용하였다. 해석시 적용한 지반 물성 값은 표 3과 같다.

본 연구에서 극한상태에서의 변단면 파일벤트 구조의 거동을 파악하기 위해 균열수평하중 이상을 적용하였다. 이 때 그림 2와 같이 Response 2000(Bentz, 2000)을 이용하여 말뚝단면별 균열모멘트를 산정하였다. 이러한 산정방법을 통해 구한 변단면 파일벤트 구조물의 해석대상말뚝의 단면별 균열수평하중은 표 4와 같다.

표 3. 해석단면의 지반조건

지반조건		하중전이함수	γ (kN/m ³)	c (kPa)	φ (°)	K (kPa/m)	ε ₅₀	ε ₁₀₀	q _u (kPa)
점성토	연약한 점성토	O'Neil	17.6	40	-	-	0.01	0.04	-
	견고한 점성토	"	18.6	120	-	-	0.005	0.01	-
사질토	느슨한 사질토	Reese	18.1	-	32	10,000	-	-	-
	조밀한 사질토	"	19.1	-	40	34,000	-	-	-
암반		O'Neil	22.5	-	-	244,300	-	-	25,000

지반 성층	연약한 점성토		견고한 점성토		느슨한 사질토		조밀한 사질토	

표 4. 단면별 균열수평하중

	연약한 점성토 (kN·m)	견고한 점성토 (kN·m)	느슨한 사질토 (kN·m)	조밀한 사질토 (kN·m)
D=1.0m	103	115	99	102
D=1.5m	350	384	335	360
D=2.0m	676	741	647	699
D=2.5m	1,164	1,317	1,155	1,246

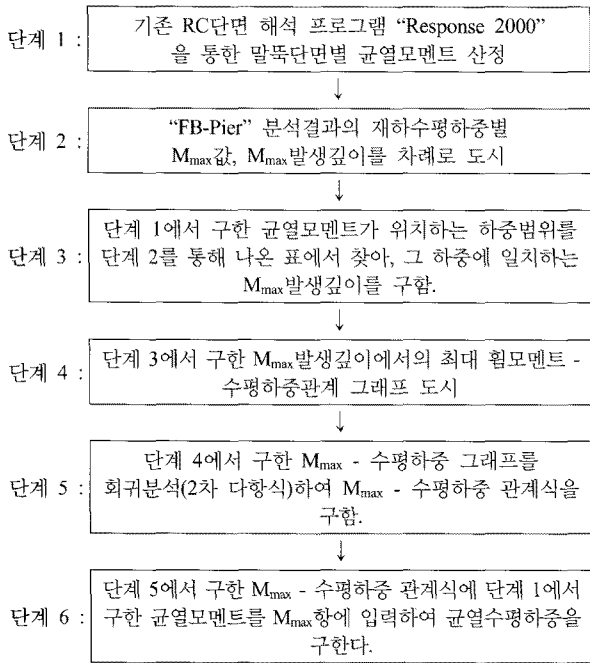


그림 2. 균열수평하중 산정방법

3. 결과분석

3.1 지반조건에 영향

그림 3은 지반조건에 따른 영향정도를 나타낸다. 심도별 수평하중이 작용하는 변단면 파일벤투 구조에서 점성토와 사질토 모두 지반강성이 작을수록 수평변위가 크게 발생하였으며 교각단면이 줄어들수록 수평변위가 커지는 경향을 나타냈다. 그림 4에서 나타난 것과

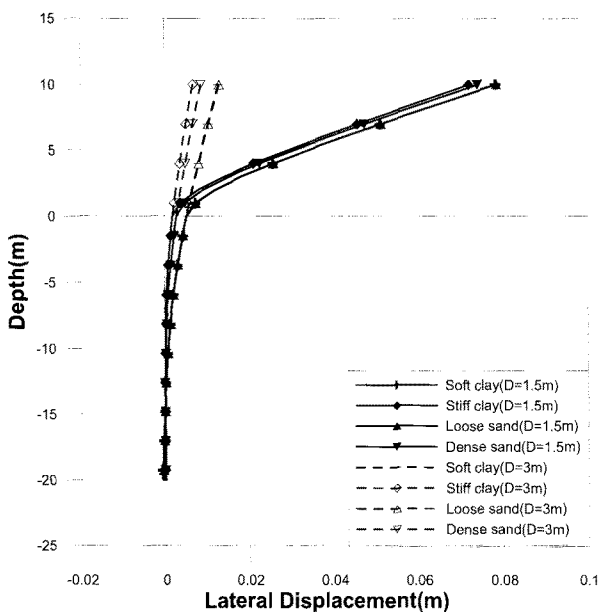


그림 3. 지반조건에 따른 수평변위량 비교(수평하중=450kN)

같이 단면변화에 무관하게 최대휨모멘트는 지표면 부근 1~3D(D는 말뚝직경) 사이에서 발생하였으나, 지반강성이 클수록 발생심도는 지표면에 가까워지는 경향이 나타났다. 그리고 동일하중, 동일 지반조건일 때, 최대휨모멘트 크기는 교각단면변화에는 큰 차이가 없는 것을 알 수 있었다. 따라서 변단면에 따른 최대휨모멘트 발생위치 및 크기는 일정한 것으로 나타났다.

3.2 수평하중변화 및 변단면의 영향

그림 5~8의 결과, 파일벤투의 수평변위는 지반조건과 무관하게 교각단면이 줄어들수록 증가하였으며, 또한 동일한 직경인 경우 하중이 커질수록 증가하였다. 그리고 수평하중에 따른 휨모멘트는 표 5에 정리한 바와 같이 동일하중, 동일지반조건일 때 변단면 유무에 관계없이 최대휨모멘트 발생위치 및 그 크기가 유사한 것으로 나타났다. 또한 구조적 취약부를 찾기 위한 말뚝 재료의 부재력 검토는 구조물 기초설계기준 해설(한국지반공학회, 2003)에 준하여 다음과 같은 식을 통해 산정하였다.

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{M_{\max} y}{I} \quad (1)$$

여기서, σ : 축압축력과 휨모멘트에 의해 발생하는 응력

P : 말뚝에 작용한 축압축 하중

A : 말뚝재료의 단면적

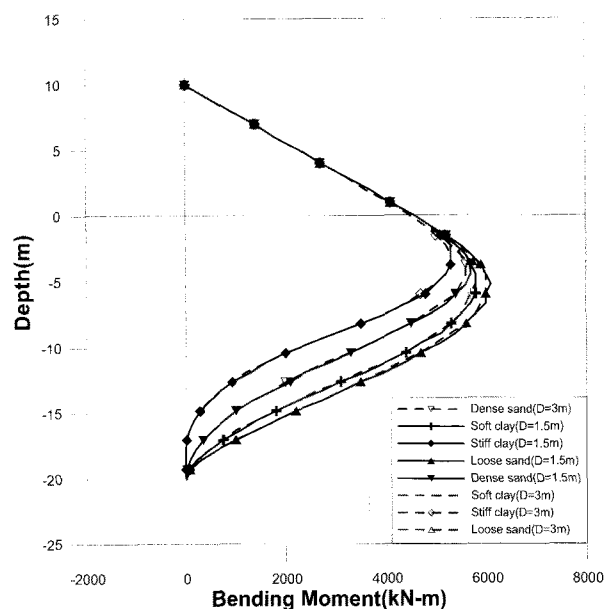


그림 4. 지반조건에 따른 휨 모멘트 비교(수평하중=450kN)

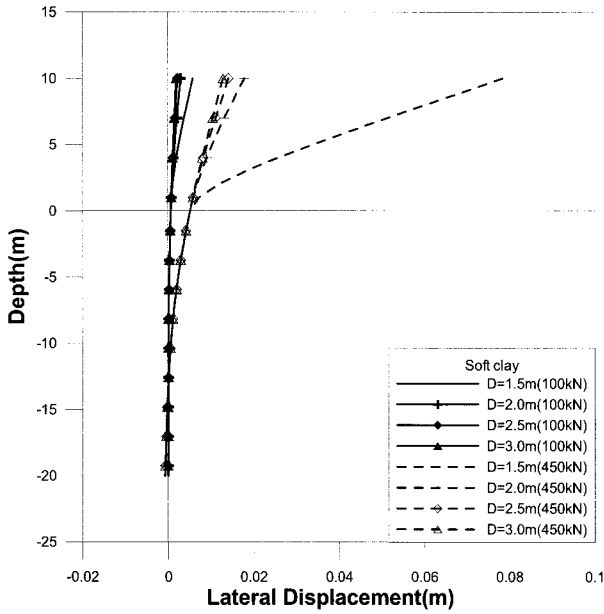


그림 5. 수평하중과 변단면에 따른 수평변위(수평하중=100kN,450kN, 연약한 점성토)

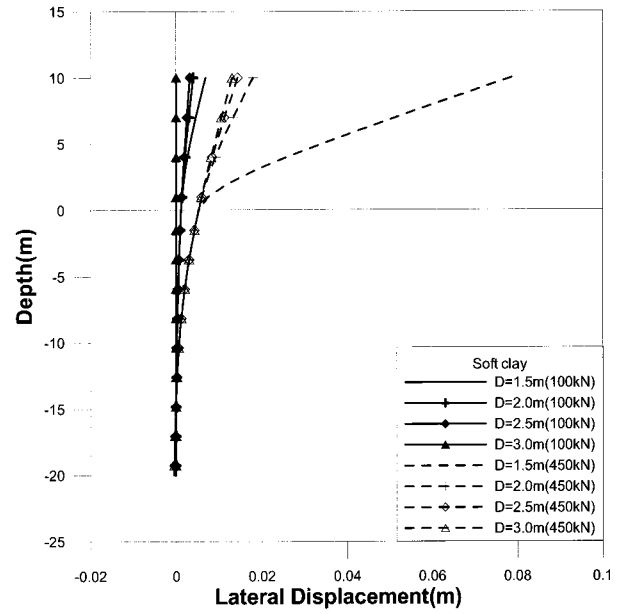


그림 7. 수평하중과 변단면에 따른 수평변위(수평하중=100kN,450kN, 느슨한 사질토)

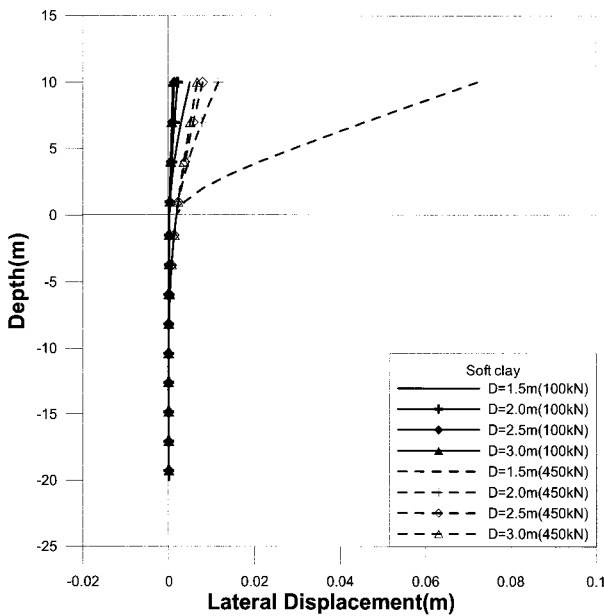


그림 6. 수평하중과 변단면에 따른 수평변위(수평하중=100kN,450kN, 견고한 점성토)

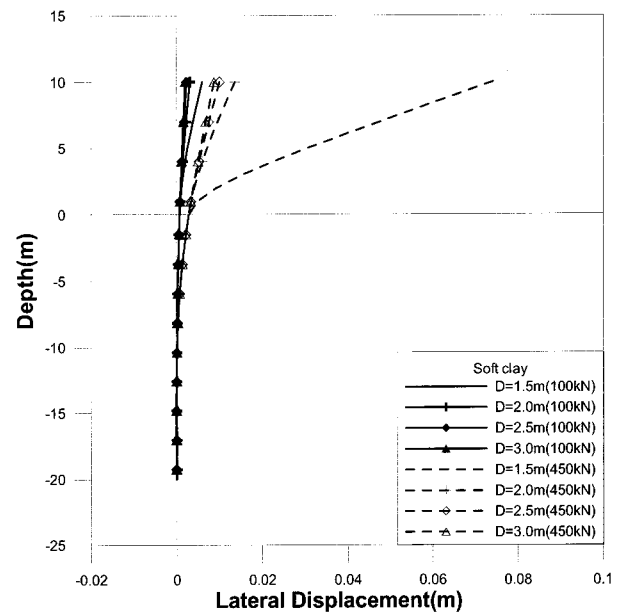


그림 8. 수평하중과 변단면에 따른 수평변위(수평하중=100kN,450kN, 조밀한 사질토)

M_{max} : 휨모멘트 최대값

y : 말뚝단면 도심으로부터의 거리

I : 말뚝의 단면 2차 모멘트

검토결과, 교각과 말뚝이 만나는 접합부의 부재력은 교각 직경이 줄어들수록 증가하는 경향을 나타냈으며, 변단면 부분에서의 부재력이 최대휨모멘트 발생위치에서의 부재력 보다 큰 것으로 나타났다. 따라서, 변단면 파일벤트 구조의 경우, 교각과 말뚝의 접합부에 최대휨

모멘트 발생위치보다 더 큰 하중이 작용하며, 이는 접합부가 구조적인 취약부임을 나타낸다. 이는 변단면 부분이 취약하기 때문에 최대휨모멘트 발생지점보다는 변단면 부분에 대한 보강이 필요한 것을 알 수 있었다.

4. 결론

단일형 파일벤트 구조의 특성상 최대휨모멘트 발생 지점이 지표 하 약 1~3D에서 발생되어 그 위치에서 가

장 큰 부재력과 소성변형이 발생하므로 유지보수가 어려운 단점이 있었다. 이에 본 연구에서는 교각단면을 줄인 변단면 파일베нт 구조를 대상으로 지반조건, 수평하중을 매개변수로 하여 수평변위와 휨모멘트 및 부재력에 대해 분석을 수행하였다. 본 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 동일한 수평하중이 재하되었을 때, 변단면 유무에 관계없이 최대휨모멘트 발생위치 및 그 크기는 비교적 서로 유사함을 알 수 있었다.
- (2) 부재력(응력)을 검토해 본 결과, 변단면 파일베нт 구조의 경우 교각과 말뚝의 접합부(변단면부)에서 최대 부재력이 발생함을 알 수 있었으며 그 결과 접합부의 단면축소로 구조적으로 취약부가 될 소지가 있음을 알 수 있었다.
- (3) 그러므로 실제 현장에서 접합부의 보강작업이 필요함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2008), 도로교설계기준 해설, p.25.
2. 김영호, 정상삼, 김정환, 이양구 (2007), “해상 현장타설 말뚝의 p-y 곡선 산정을 통한 횡방향 상대 강성 분석”, *한국지반공학회 논문집*, 23권 6호, pp.37-51.
3. 손혁수, 서석구, 송종영, 이완수 (2005), “횡방향철근의 구속효과

를 고려한 현장타설콘크리트 말뚝 설계”, *대한토목학회 2005년도 학술발표회 논문집*.

4. 원진오, 정상삼 (2005), “교량 말뚝기초의 캡강성을 고려한 비선형 3차원 해석”, *한국지반공학회 논문집*, 제21권, 제6호, pp.19-30.
5. 이풍희, 김종훈, 전경수 (2003), “단일 현장타설말뚝 기초의 설계방안 수립”, *한국지반공학회, 2003 가을 학술발표회 논문집*.
6. 전경수, 김정환, 김명모 (1999), “풍화암에 근입된 현장타설말뚝의 지지거동 분석”, *한국지반공학회 논문집*, 15권 6호, pp.155-165.
7. 정상삼, 원진오, 김영호 (2007), “교대를 지지하는 군말뚝의 캡강성효과”, *한국지반공학회 논문집*, 23권 9호, pp.39-49.
8. 정상삼, 광동욱, 안상용, 이준규 (2005), “P- Δ 효과를 고려한 Pile-Bent 구조물의 수평거동 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 22권 8호, pp.77-88.
9. 한국지반공학회 (2003), *구조물 기초설계기준 해설*, pp.335-336.
10. Bentz, E.C. *Sectional Analysis of Reinforced Concrete Members*, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, p.310.
11. Caltrans (1999), *Seismic Design Criteria, Version 1.1*, California Department of Transportation Transportation, Sacramento, CA. USA.
12. Daesoo Lee, Jinoh Won, Sangseom Jeong (2008), “Influence of Pile Cap Flexibility on Cap-Pile-Soil System”, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol.18, No.1.
13. FB-Pier Version 3 (2000), *Florida Bridge Software Institute*, Department of Civil & Coastal Engineering, University of Florida.
14. O'Neill, M. W. and Gazioglu, S. M. (1984), “Evaluation of P-Y Relationships in Cohesive Soils”, *Proceedings of a Analysis and Design of Pile Foundations*, ASCE geotechnical Engineering Division, pp.192-213.
15. Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D. (1974), “Analysis of laterally loaded piles in sand”, *Proceedings, 6th Annual Offshore Technology Conf.*, Houston.

(접수일자 2008. 11. 14, 심사완료일 2009. 4. 23)