

역지말뚝 간편설계법 및 적용성 분석

Simplified Design Method for Stabilizing Piles and its Application

정 상 섭 ^{*1}	Jeong, Sang-Seom	원 진 오 ^{*2}	Won, Jin-Oh
박 중 배 ^{*3}	Park, Joong-Bai	김 성 열 ^{*4}	Kim, Seong-Yeol

Abstract

This paper describes a simplified design method of stabilizing piles based on an experimental tests and an analytical study which can take into account the safety factor of slope and pile spacing. The nonlinear characteristics of the soil-pile interaction for stabilizing piles are modeled by using load transfer method. The interaction factors due to pile spacing and cap rigidity were estimated by using a three dimensional nonlinear finite element approach and laboratory tests. Based on the results obtained, the interaction factors are proposed quantitatively for one-row pile groups with spacing-to-diameter ratios varying for 2.5 to 7.0. The Bishop's simplified method of slope stability analysis is extended to incorporate the soil-pile interaction and determine the safety factor of the reinforced slope. Through the comparative study, it is found that the prediction by present approach is in relatively good agreement with the results of centrifuge tests and field tests and three dimensional finite element analyses.

요 지

본 연구에서는 사면안정 확보를 위해 설치된 역지말뚝과 보강사면의 안전율을 산정할 수 있는 간편설계법을 제안하였다. 역지말뚝-지반간 상호작용은 하중전이법으로, 사면의 안전율은 Bishop의 간편법을 이용하여 산정하였다. 말뚝 간격에 따른 군말뚝 효과를 고려하기 위해 실내모형실험 및 유한요소해석을 수행하였으며 이 결과를 토대로 군말뚝 상호작용계수를 제안하였다. 제안된 군말뚝 상호작용계수는 말뚝중심간격이 좁아질수록 감소하였으며, 두부조건이 자유단인 경우가 다른 구속조건에 비해 큰 폭으로 감소하였다. 개발된 역지말뚝의 설계기법은 본 연구에서 수행한 원심모형실험, 현장시험 및 기존 유한요소해석결과와 비교·분석하였다. 본 해석프로그램은 3차원 유한요소해석에 비해 쉽고 간단하면서도 말뚝-지반간 상호작용에 의해 매우 복잡한 거동을 나타내는 역지말뚝을 비교적 적절히 설계할 수 있음을 알 수 있었다.

Keywords : Group interaction factor, Simplified design method, Stabilizing pile, Three-dimensional finite element analyses

1. 서 론

역지말뚝을 이용한 사면보강에 대한 기존연구는 오

래전부터 수행되어 왔다. 특히 일본은 20세기초 Nigata의 Noo-Tsutsuishi 철도변의 산사태방지책으로 나무말뚝을 사용한 이래 Ito-Matsui(1975)등, Fukuoka(1977)

*1 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)
 *2 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)
 *3 정회원, (주)대우건설 토목기술2팀 차장 (Member, Chief Engineer, Civil Engrg. II Team, Daewoo Corp.)
 *4 정회원, (주)평화엔지니어링 지반공학부 전문 (Member, Managing director, Geotech. Dept., Pyeong-Hwa Corp.)

에 의하여 콘크리트말뚝과 강관말뚝을 사용한 사면보강 연구결과를 발표하였다. 프랑스는 19세기말에 축성한 제방의 유동에 대한 보강책으로 억지말뚝을 사용한 사례가 있으며 미국에서는 다양한 보강재를 사용한 사면안정책에 대한 연구가 있었다.

이러한 억지말뚝을 사면에 적용하여 안전율을 계산하는 방법으로는 크게 축방토압을 이용한 방법과 축방변위를 이용한 방법으로 구분된다. 축방토압은 Ito-Matsui에 의해 제안된 이론식을 근거로 하여 산정하는 것이 일반적이며, 이 토압을 사면에 저항력으로 작용시켜 안전율이 계산된다. 국내에는 홍원표(1983,1984,1995)등, 윤여원(1997)등에 의해 연구되었고, 홍은 통상적인 사면 안정해석법에 말뚝의 효과를 고려할 수 있는 해석 프로그램인 Champ(1995)를 개발하였다. 국외의 경우 Chen과 Poulos(1997), Hassiotis(1994)등은 Ito-Matsui의 축방토압식을 적용하여 억지말뚝으로 보강된 사면의 안정해석기법을 제안하였다. 이때 Chen과 Poulos는 말뚝의 저항력을 Bishop의 사면 안전율식에 추가하여 사면안정을 해석하였고, Hassiotis는 말뚝의 축방토압을 포함한 안정수를 개발하여 사면의 안정을 계산하였다. 반면에 축방변위를 이용한 억지말뚝의 설계법으로는 사면의 활동에 의해 축방변위가 주어졌을 때 말뚝에 발생하는 휨모멘트와 전단력 및 이에 따른 보강사면의 안전율을 산정할 수 있는 방법이 Cartier(1983)등에 의해 제안되었다. 이 방법은 p-y곡선 및 축방변위형태를 입력하여 다양한 형태의 억지말뚝-지반간 상호작용을 고려할 수 있으며, 특히 현장계측이나 또는 수치해석을 통해 산정한 정확한 축방변위를 입력하는 경우 실제 억지말뚝의

거동에 근접하게 예측하는 것으로 알려져 있다(Goh, 1997; 정상섭, 1999). 축방변위법은 주로 단독말뚝을 대상으로 연구를 수행하여 왔으며 좀더 체계적인 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 축방변위를 이용한 억지말뚝의 설계법에 초점을 맞추었으며 Ito-Matsui의 축방토압식을 함께 적용하여 연구를 수행하였다. 설계 단계에서는 사면 붕괴에 따라 지반의 축방변위가 어떠한 형태로 발생하는지 알 수 없으므로, 일반적인 사면 붕괴시 지반의 변위 분포형태 및 크기를 가정하여 말뚝에 발생하는 토압을 산정하였다. 주로 단독말뚝을 대상으로 연구되었던 축방변위법을 일렬 군말뚝으로 시공되는 억지말뚝에 적용하기 위해 실내모형실험 및 3차원 유한요소해석을 수행하여 군말뚝 상호작용계수를 산정하였으며 이를 설계기법에 적용하였다(원진오, 1999; 장서용, 1999; Jeong, 2000). 개발된 억지말뚝의 설계기법을 원심모형실험(Centrifuge test)과 현장시험 및 기타 사례와 비교하여 적용성을 검토하였다(정상섭등, 2000).

2. 억지말뚝의 설계기법 개발

본 연구에서 사면에 1열로 설치된 억지말뚝의 해석 및 설계를 위하여 자연사면의 안전율 산정, 억지말뚝 보강시 말뚝의 위치, 간격을 고려한 말뚝의 안정성 해석 및 보강사면의 안전율 산정이 가능한 프로그램(RSSP, Reinforced Slope Stabilizing Pile)을 개발하였다. 본 연구에 적용한 억지말뚝의 설계흐름도는 그림 1과 같다.

그림 2와 같이 3개의 층으로 이루어진 사면에 설치된

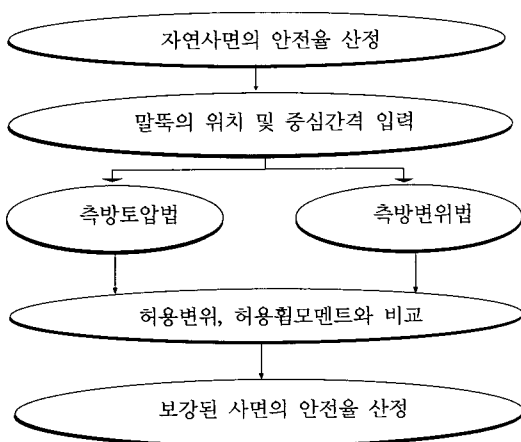


그림 1. 설계기법의 흐름도

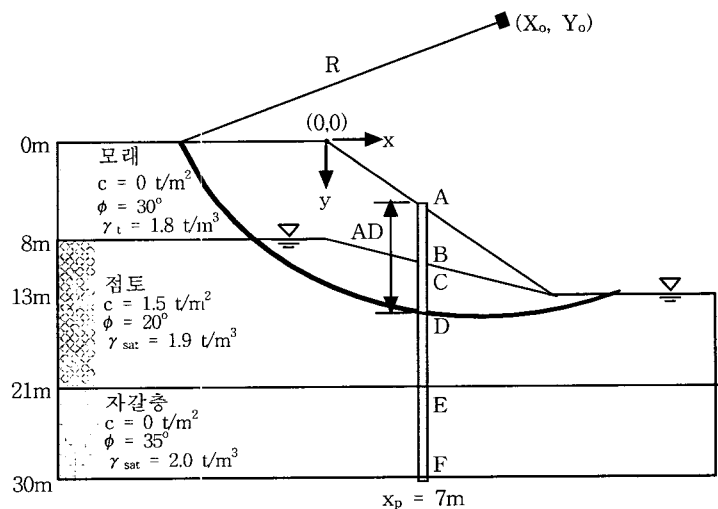


그림 2. 억지말뚝으로 보강된 사면 설계 예제

역지말뚝을 설계하고자 할 때 먼저 본 해석 프로그램 (Bishop의 간편법 적용)을 이용하여 자연사면의 안전율을 산정한다. 만일 자연사면의 안전율이 소정의 안전율에 미치지 못하는 경우, 역지말뚝을 사면 내에 설치하여 말뚝해석 및 보강사면의 안정성 해석을 수행한다.

2.1 측방변위 또는 측방토압을 받는 수동말뚝의 해석

수동말뚝의 해석방법은 측방변위에 기초한 방법과 측방토압에 기초한 방법이 있으며 본 간편설계법에서는 두 해석방법을 모두 고려하였다. 측방변위를 받는 수동말뚝은 그림 3과 같이 모델링되며 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$EI \frac{d^4 w}{dz^4} = p = K(y_s - w) \quad (1)$$

여기서 y_s 는 말뚝이 없는 원지반(Free field)의 변위, w 는 말뚝의 수평변위, 그리고 K 는 지반의 탄성계수로 말뚝직경과 지반반력계수의 곱으로 나타낸다. 그림 3에 보는 바와 같이 활동면 상부지반은 지반의 측방변형으로 인해 말뚝이 하중을 받음으로 수동영역으로 고려하며, 하부지반은 측방변형이 없다는 가정하에 주동영역으로 고려하였다. 말뚝에 발생 가능한 한계토압(P_u)은 사실도 지반에서는 일반적으로 $P_u = \alpha P_p$ 의 형태로 나타났다. 이때 α 값은 주동말뚝에서는 일반적으로 3.0을 사용하고 있으나, 수동말뚝에서는 제안자마다 큰 폭의 차이를 나타내고 있으며, 최근 연구결과에 의하면 4.6이 타당한 것으로 보고되어 본 설계기법에서는 이를 적용하였다. (Chen, 1994) 본 설계기법에서는 말뚝중심간격과 말뚝두부조건에 따라 말뚝 거동의 변화를 고려하기 위해 균말뚝 상호작용계수인 μ 를 사용하였으며, 측방

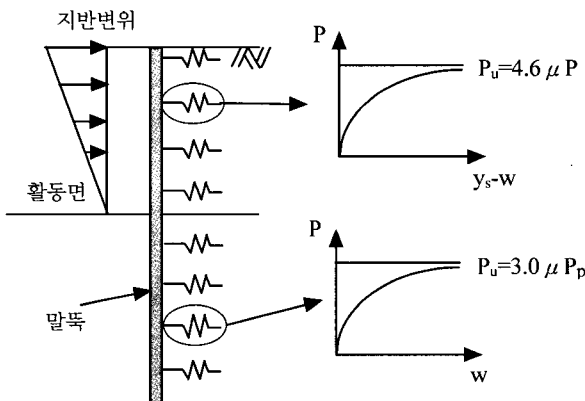


그림 3. 측방변위를 받는 수동말뚝의 모델링

유동이 발생한 상부지반은 $4.6 \mu P_p$ 의 한계토압을, 하부지반은 $3.0 \mu P_p$ 의 한계토압을 사용하도록 하였다. 해석 프로그램에 사용된 μ 는 본 연구에서 수행한 3장의 실내모형실험과 유한요소해석 결과를 토대로 제안한 표 2의 값을 사용하였다. 식 (1)에 나타난 지반의 탄성계수 K 는 위에서 산정한 $(1/2)P_u$ 및 일반적으로 적용가능한 말뚝의 한계변위인 5mm(0.2inch)를 적용하여 구한 secant modulus에 말뚝의 직경을 곱하여 산정하였다. 경계조건으로 말뚝두부는 자유단, 힌지, 회전구속, 고정단 조건을, 말뚝선단은 자유단, 고정단 조건을 고려할 수 있도록 하였다.

측방토압에 기초한 방법은 그림 4와 같이 모델링되며, 지배방정식은 활동면 상부는 식 (2)로, 활동면 하부는 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\text{활동면 상부 : } EI \frac{d^4 w}{dz^4} = p \quad (2)$$

$$\text{활동면 하단 : } EI \frac{d^4 w}{dz^4} + Kw = 0 \quad (3)$$

여기서 p 는 말뚝에 작용하는 측방토압이며, 본 설계기법에서는 Ito-matsui의 측방토압식을 적용하였다.

측방토압에 기초한 방법은 측방변위에 기초한 방법과 유사하게 지배방정식을 유한차분화하여 말뚝의 변위를 산정하고 산정된 말뚝의 변위로부터 깊이별 말뚝의 휨모멘트, 전단력, 지반반력을 결정한다. 그림 5는 본 간편설계법을 이용하여 그림 2에 나타난 사면에 설치된 역지말뚝을 해석한 결과를 나타낸다. 말뚝의 해석결과 산정된 말뚝의 최대 변위, 휨모멘트 또는 전단력이 허용치를 초과하는 경우, 말뚝의 휨강성을 증가시켜 반복 계산한다. 허용 변위와 허용 휨모멘트를 만족하면 그림 6

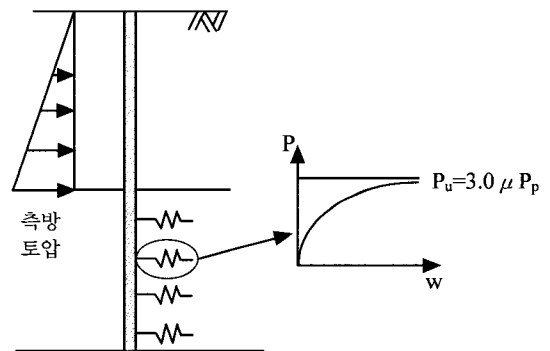


그림 4. 측방토압을 받는 수동말뚝의 모델링

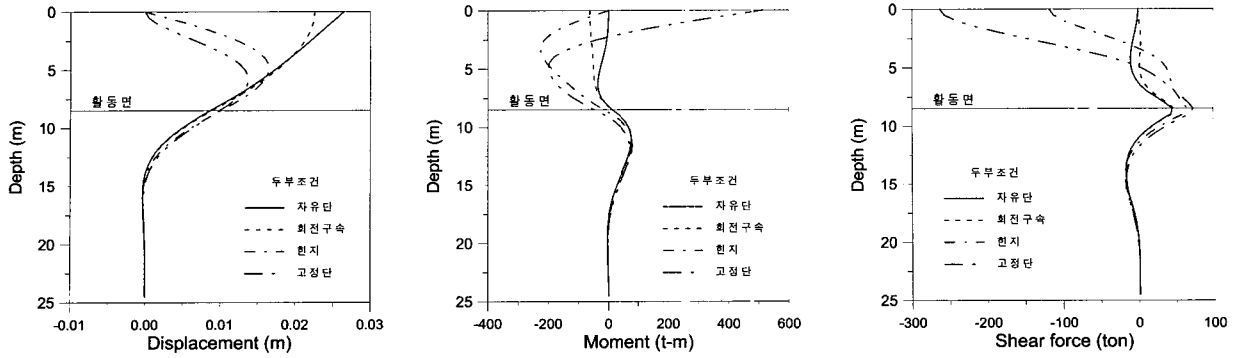


그림 5. 말뚝두부의 경계조건에 따른 말뚝 해석결과

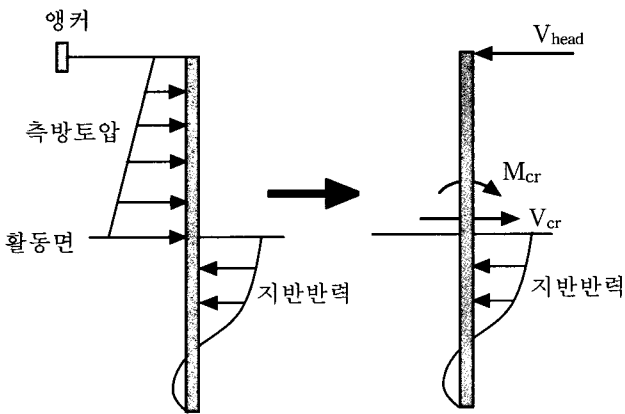


그림 6. 활동면 위치에서의 M_{cr} , V_{cr} 과 말뚝두부에서의 V_{head}

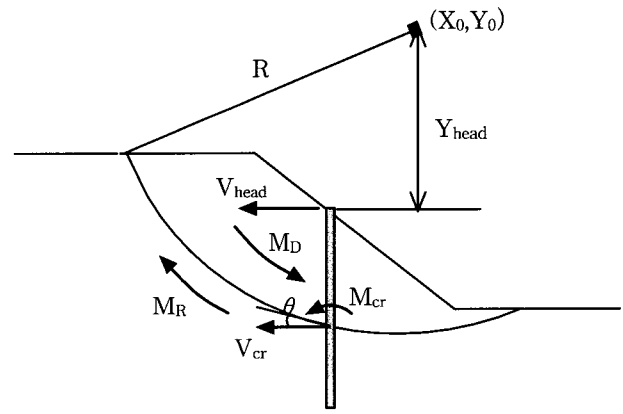


그림 7. 보강된 사면의 안전율 산정

과 같이 활동면 위치에서 말뚝에 작용하는 휨모멘트와 전단력 그리고 말뚝두부에서의 전단력을 산정한다.

2.2 보강된 사면의 안전율 산정

활동면 위치에서 산정된 휨모멘트와 전단력 그리고 말뚝두부에서의 전단력을 말뚝중심간격으로 나누어 단위 폭에 대해 말뚝에 작용하는 휨모멘트(M_{cr}), 전단력 (V_{cr}) 및 말뚝두부에서의 전단력(V_{head})을 산정하고 이를 그림 7에 나타낸 바와 같이 사면에 적용하여 보강사면의 안전율을 결정하였다.

역지말뚝으로 보강된 사면의 안전율은 식 (4)와 같으며 자연사면의 안전율(F_i)과 말뚝에 의해 보강되는 안전율(ΔF)의 합으로 계산하였다.

$$F = F_i + \Delta F = \frac{M_R}{M_D} + \frac{V_{cr}R \cos \theta - M_{cr} + V_{head} \cdot Y_{head}}{M_D} \quad (4)$$

본 간편설계법으로 그림 2의 사면을 대상으로 해석할 때 사면 내 말뚝의 위치($x_p = -5, 0, 5, 10, 15$)를 모두

입력한 후 말뚝의 중심간격만 말뚝직경의 2.5배, 5배, 7배, 10배로 변화시키면서 해석하면 총 4번의 실행으로 그림 8과 같은 안전율 도표를 산정할 수 있다. 안전율 산정도표를 통하여 소정의 안전율의 만족하는 역지말뚝의 위치 및 중심간격을 결정할 수 있다.

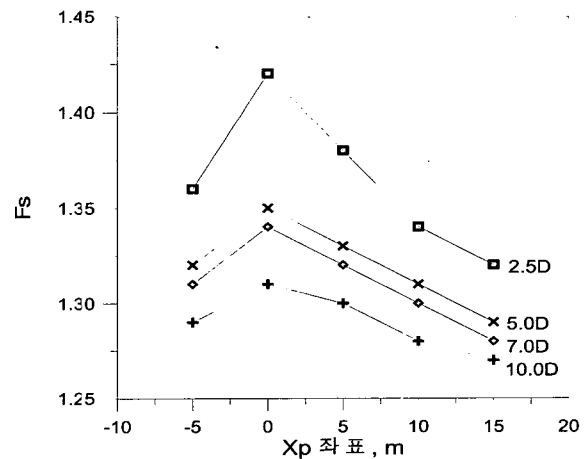


그림 8. 말뚝의 중심간격과 말뚝위치(x_p)에 따른 안전율 산정도표

3. 균말뚝 상호작용계수 산정

말뚝의 균말뚝상호계수 산정방법으로는 단말뚝과 균말뚝의 지지력비, 말뚝두부조건을 고려한 수직 또는 수평변위비 및 최대휨모멘트비를 이용하는 방법들이 있다. 수동말뚝에서는 일정한 측방변위를 가했을 때 말뚝의 두부에서의 수평변위 또는 말뚝의 최대휨모멘트의 비를 통하여 산정하는 방법이 제안되었다(Chen, 1994). 연구결과 말뚝의 최대휨모멘트비를 통해 균말뚝 상호작용계수를 산정하였을 때 말뚝간격에 따라 보다 일정한 분포형태를 나타내는 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 모형토조내에 변형률계를 부착한 말뚝의 변형률계로부터 쉽게 산정 가능한 최대휨모멘트를 이용하여 식 (5)와 같이 균말뚝 상호작용계수를 제안하였으며 수치해석과 병행하여 이를 검증하였다.

$$\mu = \frac{M_{Gmax}}{M_{Smax}} \quad (5)$$

여기서, M_{Smax} 는 단독말뚝의 최대휨모멘트이며, M_{Gmax} 는 균말뚝의 최대휨모멘트이다.

3.1 실내모형실험

수동말뚝의 균말뚝 상호작용계수의 산정을 위해 그림 9와 같은 모형토조와 실험장치를 제작하여 말뚝재질(알루미늄, PVC), 실험용 시료(주문진표준사, 화강풍화토), 지반의 상대밀도(느슨, 조밀), 두부구속조건(자유단, 힌지), 말뚝중심간격(2.5D, 5.0D, 7.0D, 단독)을 달리

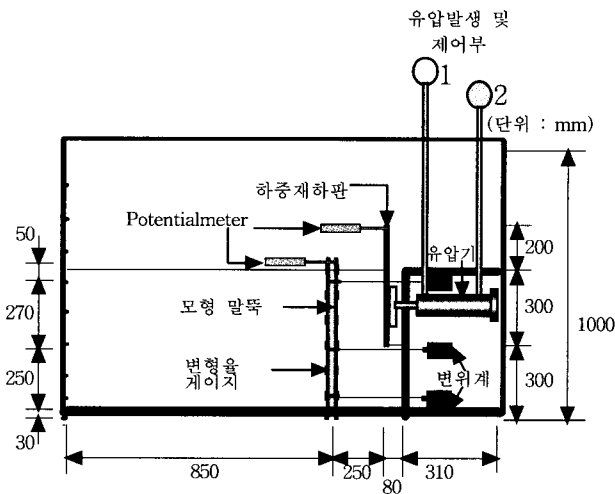
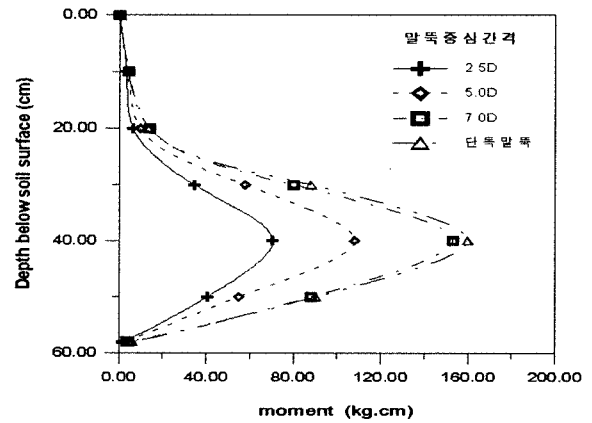


그림 9. 모형토조와 실험장치의 횡단면도

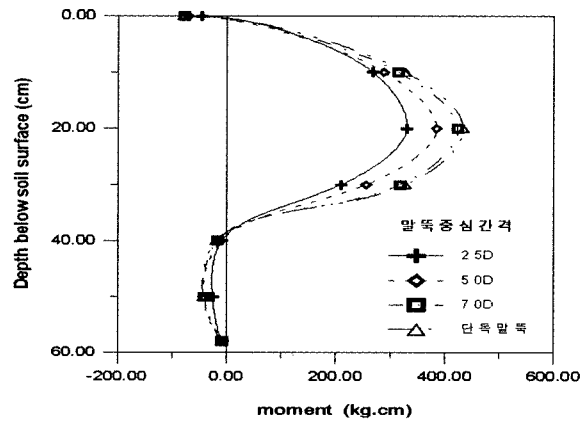
하여 총 48회의 실내실험을 수행하였다. 알루미늄말뚝과 PVC말뚝의 직경은 각각 19mm와 22mm, 휨강성은 각각 165404.85 kg·cm²와 28264.89 kg·cm²이며, 시험용 시료의 내부마찰각은 삼축압축시험 결과 주문진표준사의 경우 32°(느슨), 38°(조밀)로, 화강풍화토의 경우 31°(느슨), 37°(조밀)로 나타났다. 실험방법은 하중재하판에 연결된 유압장치를 통해 일정한 속도로 3cm까지 지반의 측방변위를 발생시키며 이때 말뚝의 변형률과 변위를 측정하였다.

그림 10은 실험결과 말뚝에 발생하는 전형적인 휨모멘트를 나타낸 것으로 두부조건이 (a)는 자유단, (b)는 힌지를 나타낸다. 그림 10에 나타난 바와 같이 말뚝의 중심간격이 좁아짐에 따라 최대휨모멘트는 감소함을 알 수 있으며, 본 실험에서는 약 7.0D에서 단독말뚝과 유사한 값이 나타남을 알 수 있었다.

표 1은 식 (5)를 적용하여 산정한 균말뚝 상호작용계수로, 말뚝중심간격과 두부구속조건에 큰 영향을 받



(a) 알루미늄, 자유단, 사질토, Dr=79%인 경우



(b) 알루미늄, 힌지, 사질토, Dr=79%인 경우

그림 10. 말뚝중심간격에 따른 말뚝의 휨모멘트

표 1. 모형토조실험 결과 산정된 1열 군말뚝의 상호작용계수

말뚝두부 구속조건	지반종류	말뚝재질	상대밀도	말뚝중심간격			단독말뚝
				2.5D	5.0D	7.0D	
자유단	사질토	알루미늄	24%	0.60	0.83	0.97	1.00
			79%	0.44	0.68	0.96	1.00
		PVC	24%	0.62	0.78	0.99	1.00
			79%	0.62	0.78	1.00	1.00
	화강풍화토	PVC	24%	0.60	0.72	0.97	1.00
			79%	0.61	0.77	0.98	1.00
	평균				0.58	0.76	0.98
한지	사질토	알루미늄	24%	0.69	0.82	0.99	1.00
			79%	0.76	0.89	0.98	1.00
		PVC	24%	0.82	0.92	0.99	1.00
			79%	0.81	0.90	0.99	1.00
	화강풍화토	PVC	24%	0.82	0.88	0.99	1.00
			79%	0.81	0.90	0.99	1.00
	평균				0.79	0.89	0.99

며 지반조건 및 말뚝강성에 따른 변화는 크지 않음을 알 수 있었다.

3.2 3차원 유한요소해석

실내모형실험과 병행하여 ABAQUS 범용프로그램(Hibbit, Karlsson and Serensen, 1998)을 이용한 3차원 유한요소해석을 수행하였으며 이로부터 군말뚝 상호작용계수를 산정하였다. 해석에 사용한 말뚝 및 지반의 물성을 표 2에 나타내었다. 직경 400mm인 강관말뚝과 화강풍화토 지반을 대상으로 8 Node Brick 요소를 사용하여 말뚝은 탄성체로, 주변지반은 Durcker-Prager의 탄소성 매질로 모사하였다. 말뚝-지반간 및 활동면에는 경계요소를 사용

하였으며, 말뚝 두부의 경계조건은 자유단, 회전구속, 변위구속조건을 고려하였다. 그림 11은 본 해석을 수행한 3차원 유한요소 Mesh를 나타낸 것이다. 해석결과 실내모형실험과 동일하게 말뚝중심간격이 좁아질수록 말뚝에 발생하는 휨모멘트가 감소하는 것으로 나타났다.

이상 실내모형실험과 3차원 유한요소 해석 결과를 통하여 산정한 군말뚝 상호작용계수는 표 3과 같다. 본 연구에서 제안하는 군말뚝 상호작용계수는 실내 모형실험을 통해 산정한 값으로, 3차원 유한요소해석은 실내 모형실험의 한계인 scale effect에 의한 영향을 고려하기 위한 수단으로 이용하였다. 유한요소해석시 실제 현장 scale의 일렬 억지말뚝을 대상으로 실내 모형실험과 동일한 방법으로 측방변위를 작용하여 군말뚝 상호작용계수를 산정한 결과, 표 3에 나타난 바와 같이 실내 모형실험을 통해 산정된 값과 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 수행한 실내모형실험이 경계의 영향을 최소화한 상태에서 수행되었고, 이를 통해 산정

표 2. 말뚝 및 지반의 물성

말뚝 (steel)	직경	0.4 m	
	길이	20 m	
	탄성계수(E_p)	18.3×10^6 kN/m ²	
	포아송비(ν)	0.25	
지반	Elastic properties		
	탄성계수(E_s)	Upper	19×10^3 kN/m ²
		Lower	61×10^3 kN/m ²
	포아송비(ν)	0.3	
	단위중량(γ)	141 kN/m ³	
	Plastic properties		
	마찰각(ϕ')	Upper	25°
		Lower	40°
점착력(c')	5 kN/m ²		

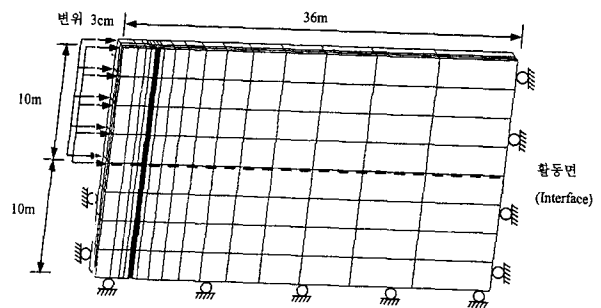


그림 11. 3차원 유한요소 Mesh

표 3. 균말뚝 상호작용계수

말뚝두부 구속조건		자유단 (Free)		회전구속 (Unrotated)	힌지 (Hinged)	
산정 기준		유한요소해석	실내 모형실험 (표1참조)	유한요소해석	유한요소해석	실내 모형실험 (표1참조)
말뚝 중심간격	2.5D	0.59	0.58	0.83	0.78	0.79
	5.0D	0.73	0.76	0.94	0.92	0.89
	7.0D	0.78	0.98	0.97	0.97	0.99
단독말뚝		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

된 균말뚝계수는 scale에 큰 영향을 받지 않기 때문인 것으로 판단된다. 이를 통해 본 실내 모형실험을 통해 산정된 균말뚝 상호작용계수는 실제 현장에 서로 적용 가능함을 확인할 수 있었다. 산정된 균말뚝 상호작용계수의 특징은 말뚝중심간격이 줄어들어 따라 감소하는 것으로 나타났으며 특히 두부구속조건에 큰 영향을 받음을 알 수 있었다. 두부조건이 자유단인 경우가 다른 구속조건에 비해 큰 폭으로 감소하였다.

4. 설계기법의 검증 및 적용성 분석

본 연구에서 개발한 해석기법의 타당성 및 적용성 검증 위해 본 연구에서 수행한 원심모형실험, 현장시험 결과 및 기존 유한요소해석결과와 비교·분석하였으며, 이때 표 2에 나타난 바와 같이 실내 모형실험을 통해 산정한 균말뚝 상호작용계수를 본 해석기법에 적용하여 말뚝의 간격을 고려한 억지말뚝 해석을 수행하였다.

4.1 원심모형실험과의 비교·분석

원심모형실험시 40G시에 자연붕괴되는 사면각을 찾

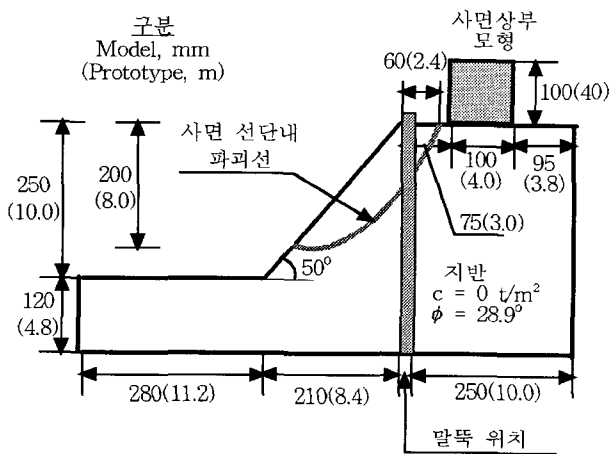


그림 12. 원심모형실험의 대상사면

기 위해 많은 예비실험을 수행하였으며, 본 연구에서 사용한 풍화토로는 사면경사가 50°, 사면상부에 상재하중을 가했을 때 그림 12에 나타난 바와 같이 원호모양의 활동면이 발생하였다. 억지말뚝이 설치된 사면의 조성을 위해 먼저 억지말뚝을 바닥판에 고정시킨 후 풍화토를 1/3씩 나누어 매번 원심력을 이용하여 압밀시킨 다음 사면 위의 토체를 제거하였다. 이와 같은 방법으로 내부 마찰각 28.9°의 균질한 지반을 조성할 수 있었으며, 아크릴판 안쪽, 토체와 접하는 면에 mesh를 그려 넣어 사면활동시 지반변위의 형태 및 크기를 산정하였다. 사면의 높이는 25cm로 40G상태에서는 10m이었으며, 말뚝은 직경이 40G에서 0.8m, 휨강성(EI)은 145215.0 t·m²이었으며, 말뚝에 총 14개의 변형률계를 설치하여 말뚝에 발생한 휨모멘트를 산정하였다. 실험은 말뚝의 간격(2.5D, 5.0D, 10D)과 말뚝의 두부조건(자유단, 힌지)을 고려하여 총 6회의 본실험을 수행하였으며 실험결과와 본 연구에서 고려한 해석프로그램으로 예측한 결과를 비교·분석하였다.

본 연구에서 고려하는 해석기법 중 지반변위에 기초한 방법으로 해석을 수행하였으며, 원심모형실험 결과 실측된 지반변위 분포형태를 입력하여 말뚝에 발생한 휨모멘트를 예측하였다. 말뚝두부의 경계조건이 자유단과 힌지의 경우 예측치와 실측치를 그림 13에 나타내었다. 말뚝두부조건인 자유단이 경우 그림 13(a)에 나타난 바와 같이 8.5m 깊이에서 최대 휨모멘트가 산정되었고, 실측치와 유사한 분포형태를 나타내었다. 말뚝두부조건이 힌지인 경우 그림 13(b)에 나타난 바와 같이 4m 깊이에서 최대휨모멘트가 발생하여 실측치보다 약 1.5m정도 차이가 발생하였으나 비교적 실측치에 근접한 해석결과를 나타내었다. 말뚝중심간격이 좁아짐에 따라 균말뚝 효과에 의해 최대 휨모멘트는 감소하는 경향이 나타났으며, 그 감소하는 폭은 예측치가 실측치에 비해 다소 적은 것으로 나타났다.

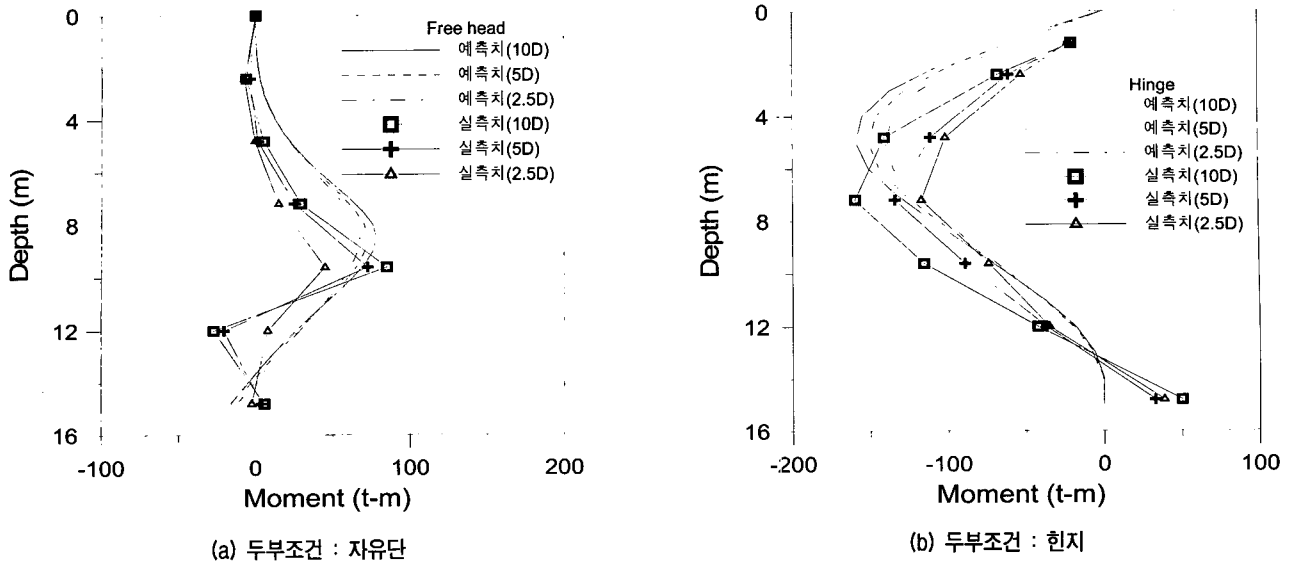


그림 13. 원심모형실험에 대한 실측치와 예측치의 비교

4.2 현장시험과의 비교 · 분석

본 연구에서 고려한 설계기법의 현장적용성을 검토하기 위해 전북 ○○에서 억지말뚝의 현장시험을 수행하였으며 본 해석기법의 예측치와 비교 · 검토하였다. 억지말뚝이 설치된 지반은 그림 14에 나타난 바와 같이 상부 지표면에서 약 2m까지는 점토가 우세한 CL층(내부마찰각 31.6° , 점착력 1.7 t/m^2), 그 이하는 SM계통의 조밀한 화강풍화토층(내부마찰각 33.8° , 점착력 0.6 t/m^2)으로 구성되어 있었다. 시험말뚝은 직경 162.5mm, 두께 9mm, 길이 6m인 구조용 강관으로 총 6본을 사면에 수직방향으로 일렬로 설치하였으며, 말뚝중심간격은 0.9m (=5.5D, D는 말뚝직경)로 하였다. 말뚝은 5m 선굴착후 백호우를 이용하여 매입하였으며, 사면의 활동력 증대를 위해 말뚝 전면으로 20cm의 여유를 두고 높이 7m, 경사각 75° 인 가파른 사면을 조성하였다.

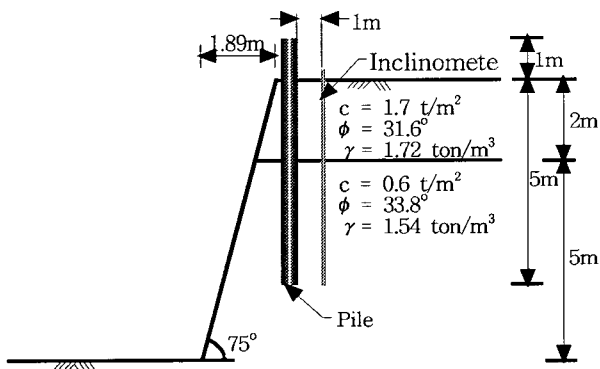


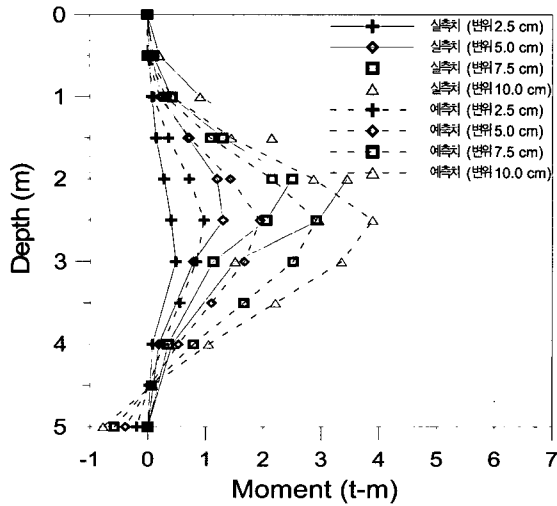
그림 14. 현장시험의 횡단면도

총 6본의 말뚝 중 가운데 2본의 말뚝에 깊이별로 변형률 게이지를 설치하여 사면활동시 말뚝에 발생한 휨응력을 측정하였다. 본 현장시험 대상지반은 대단히 양호한 지반이어서 원래 계획했던 배수에 의한 사면활동은 일어나지 않았으며, 이에 대한 대안으로 말뚝의 배면 1m 앞에서 2m 깊이까지 굴착한 후 증장비를 이용하여 지반의 측방변위를 발생시켜 수동말뚝의 거동에 가깝게 현장시험을 수행하였다.

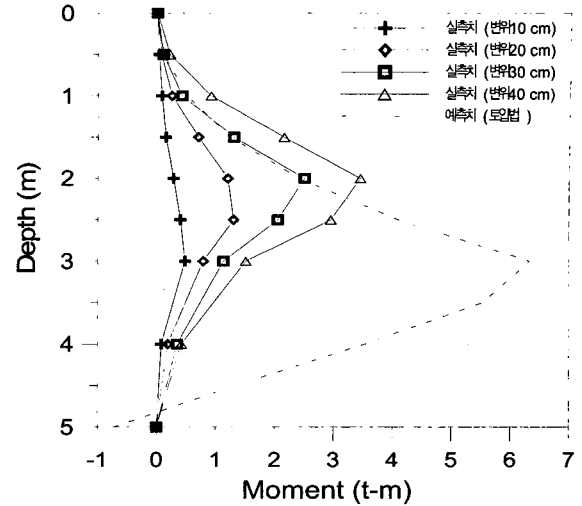
인위적으로 발생시킨 지반의 측방변위에 의해 말뚝에 발생한 휨모멘트의 실측치와 본 해석기법으로 예측한 값을 비교하여 그림 15에 나타내었다. 현장시험은 실측변위량이 단계별로 증가(2.5cm, 5.0cm, 7.5cm, 10.0cm)함에 따른 계측을 수행하였으며, 그 결과를 측방변위 및 측방토압 해석결과와 함께 그림 15(a)와 그림 15(b)에 나타내었다. 이때 적용한 균말뚝 상호작용계수는 표 2에 제안된 값 중 말뚝중심간격이 5.5D에 해당되는 값을 보간하여 0.77을 적용하였다. 단계적으로 수평변위량을 증가시키면서 해석을 수행하였으며 지반변위량 증가를 통해 시험결과를 적절히 예측할 수 있었다. 그림 15(b)는 본 해석기법 중 토압법에 기초한 방법을 통해 예측한 휨모멘트와 실측치를 비교한 것으로 해석 프로그램을 통한 예측치가 다소 과다하게 산정되었다.

4.3 3차원 유한요소 해석결과와 비교 · 분석

Cai(1998)등은 그림 16과 같이 사면내 설치된 1열 억지말뚝을 대상으로 지반전단강도 감소법을 사용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 말뚝중심간격을 고려



(a) 측방변위법



(b) 측방토압법

그림 15. 휨모멘트의 예측치 및 실측치 비교

하여 반단면 해석을 하였고, 지반은 탄소성매질로, 말뚝 주면은 경계요소를 사용하여 slip을 고려하였다. 대상사면은 1:1.5의 경사, 10m의 높이를 가지는 균질한 사면이며, 지반의 물성은 내부마찰각이 20°, 점착력이 0.1 t/m²으로 산정하였다. 그림 17은 말뚝 중심간격에 따른 안전율의 변화를 나타낸 것으로, 유한요소 해석결과와 해석기법을 통해 예측한 결과 모두 말뚝중심간격이 좁아질수록 점점 크게 증가하여 비교적 서로 일치하는 상관성을 보였다.

사면내 말뚝의 위치에 따른 안전율의 변화를 그림 18에 나타내었다. 유한요소해석 결과 말뚝이 사면의 중앙부에 있을 때 가장 큰 안전율이 산정되었다. 본 해석기

법을 통해 산정된 사면의 안전율은 중앙보다 약간 사면의 상부 쪽에서 가장 큰 안전율이 산정되었으며 사면의 상부쪽으로 갈수록 유한요소 해석결과보다 다소 큰 안전율이 산정되었다.

5. 결론

본 연구에서는 사면안정 확보를 위해 일렬로 설치된 억지말뚝의 균말뚝 효과를 고려한 안정성 해석 및 보강 사면의 안전율을 산정할 수 있는 간편설계법을 제안하였다. 억지말뚝-지반간 상호작용은 하중전이법으로, 사면의 안전율은 Bishop의 간편법을 이용하여 산정하였

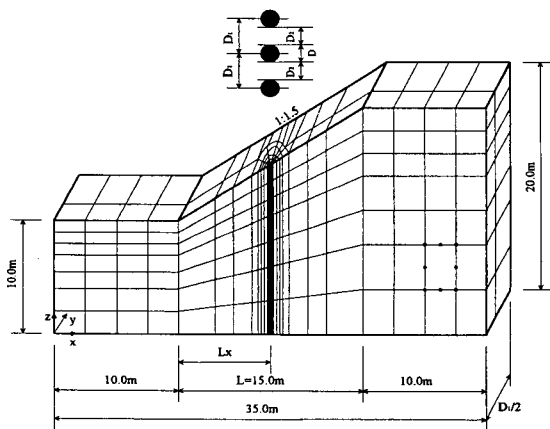


그림 16. 사면의 3차원 유한요소 모델링

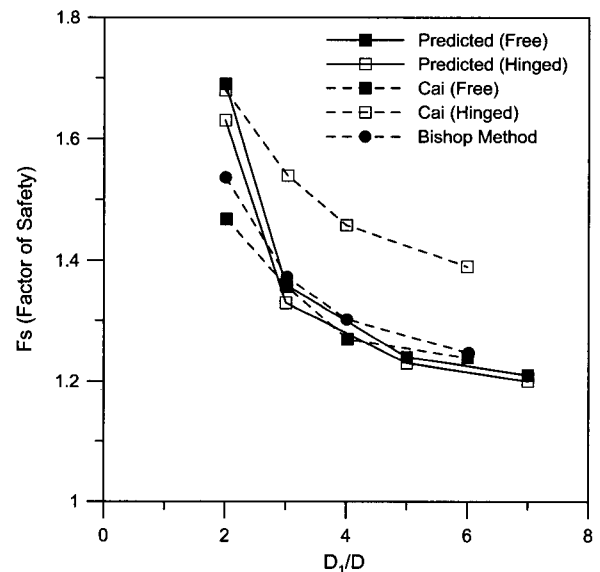


그림 17. 말뚝중심간격에 따른 안전율

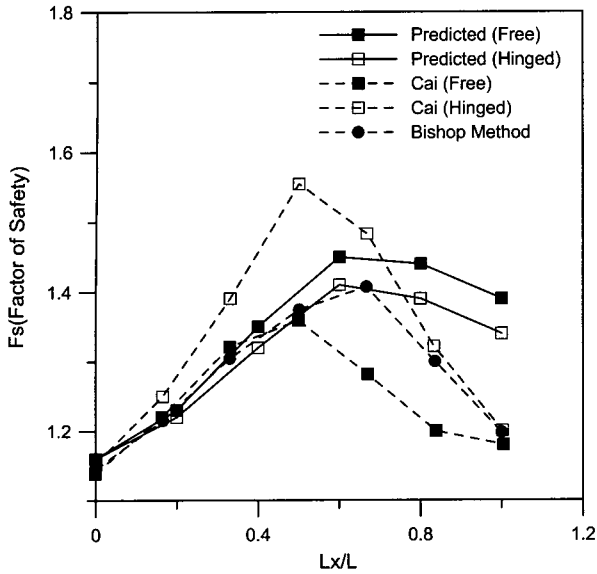


그림 18. 말뚝위치에 따른 안전율

다. 말뚝간격에 따른 군말뚝 효과를 고려하기 위해 실내 모형실험 및 유한요소해석을 수행하여 군말뚝 상호작용계수를 산정하였으며 이를 설계기법에 적용하였다. 개발된 억지말뚝의 설계기법을 원심모형실험과 현장시험 및 3차원 유한요소해석 결과와 비교하여 적용성을 검토하였다.

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 실내모형실험 및 유한요소해석 결과로부터 말뚝중심간격 및 두부조건에 따른 군말뚝 상호작용계수를 제안하였다. 제안된 군말뚝 상호작용계수는 말뚝중심간격이 좁아질수록 감소하였고, 두부조건은 자유단인 경우가 다른 힌지나 회전구속조건에 비해 군말뚝 상호작용계수가 큰 폭으로 감소하였다.
- (2) 개발된 억지말뚝의 설계기법을 본 연구에서 수행한 원심모형실험 결과 및 현장시험결과와 비교하여 적용성을 분석한 결과, 본 해석기법에서 제안한 군말뚝 상호작용계수를 이용하여 일렬로 시공되는 군말뚝의 말뚝간격 및 말뚝두부조건에 따른 휨모멘트의 변화를 적절히 예측함을 알 수 있었다.
- (3) 3차원 유한요소해석 결과와 비교·분석한 결과 본 해석기법은 유한요소해석결과와 유사한 값을 예측하였다. 따라서 말뚝-지반간 상호작용으로 매우 복잡한 거동을 나타내는 억지말뚝을 3차원 유한요소해석에 비해 비용 및 시간이 절감되는 본 해석기법을 통해서 비교적 간단하면서도 적절히 해석 및 설계할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설기술연구개발사업(과제번호:R&d/97007-2)의 연구비 지원에 의해 수행된 연구의 일부로 이에 감사 드리며, 또한 원심모형실험에 도움을 준 대우건설 기술연구소의 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 원진오(1999), "군말뚝 효과를 고려한 억지말뚝의 사면보강 해석", 연세대학교 석사학위논문.
2. 윤여원, 조주환, 김두균(1997), "횡하중에 강한 새로운 말뚝의 개발을 위한 기초 연구" 한국지반공학회지, 제13권, 제6호, pp.45~59.
3. 장서용, 원진오, 정상섭(1999), "측방변형을 받는 수동군말뚝의 거동분석"-모형토조실험-, 한국지반공학회지, 제15권, 제6호, pp.239~249.
4. 정상섭(1998), "수동말뚝의 해석기법", '98 가을 학술발표회 논문집Ⅱ, 한국지반공학회, pp.86~89.
5. 정상섭외(2000), 국내 사면 파괴특성을 고려한 토사사면의 안정 해석 및 보강기법 시스템 개발, 건설교통부 건설기술연구원, R&D/97-0007-2, pp.123~215.
6. 홍원표, 한중근, 이문구(1995), "억지말뚝으로 보강된 절개사면의 거동", 한국지반공학회, 제11권, 제4호, pp.111~123.
7. 홍원표(1983), "모래지반속의 말뚝에 작용하는 측방토압", 대한토목학회논문집, 제3권, 제3호, pp.63~69.
8. 홍원표(1984), "측방변형지반속의 줄말뚝에 작용하는 토압", 대한토목학회논문집, 제4권, 제1호, pp.59~68.
9. Cai, F., Ugai, K., Wakai, A., and Li, Q.(1998), "Effect of horizontal drains on slope stability under rainfall by three-dimensional finite element analysis", *Computers and Geotechnics*, Vol.23, pp.255~275.
10. Catier, G. and Gigan, J. P.(1983), "Experiments and observation on soil nailing structures," *Proc. 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Helsinki, pp.308~311.
11. Chen, L. T. and Poulos, H. G.(1997), "Piles subjected to lateral soil movements", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.123, No.9, Septembr, pp.802~811.
12. Chen, L. T.(1994), "The effect of lateral soil movements on pile foundations", Ph.D thesis. Univ. of Sydney.
13. Fukuoka, M.(1977), "The effects of horizontal loads on piles due to landslides", Proc. 10th Sepc. Session, 9th Int. Conf. Soil Mechs. and Fndn. Eng., Tokyo, pp.27~42.
14. Goh, A. T. C., Teh, C. I., and Wong, K. S.(1997), "Analysis of piles subjected to embankment induced lateral soil movements", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.123, No.9, September, pp.792~801.
15. Hassio'is, S. and Chameau, J. L. (1984), "Stabilization of slopes using piles." Rep. No.FHWA/IN/JHRP-84/8. Purdue Univ., West Lafayette, Ind.
16. Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc.(1998), *ABAQUS*, Ver. 5.8, U.S.A.
17. Ito, T. and Matsui, T. (1975), "Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles" *Soils and Foundations*, Vol.15, No.4, pp.43~60.
18. 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, June, pp.157~162.

(접수일자 2001. 12. 18, 심사완료일 2001. 12. 10)