

지진 시 소구경 말뚝기초(Micropile)의 수평 지지 시스템 연구

-건축물 기초구조기준(KDS 41 19)의 적용-

A Research on the Lateral Support System of Micropile during Earthquakes

- Application of Building Foundation Structure Standards (KDS 41 19) -

○안 성 율* 이 강 주** 한 진 태***
Ahn, Sungyull Lee, Gahng Ju Han, Jintae

Abstract

The purpose of this study was to analyze the design for small-diameter piles under the conditions proposed in the recently changed Korea Design Specification(KDS 41 19) for building foundation and analyzes the stresses generated in the reinforcing bars, external casing, and grout through FEM analysis. This paper presents an optimal design system that satisfies the design conditions for micro-piles and small-diameter casing-pile.

키워드 : 소구경 말뚝, KDS 41 19, 수평지지, 케이싱, 스레드바, 그라우트
Keywords : Micropile, KDS 41 19, Lateral Support, Casing, Threadbar, Grout

1. 서론

최근 해외뿐만 아니라 국내에서도 빈번한 지진으로 주택에 거주하는 시민은 지진 시 내가 살고 있는 건축물은 안전한 것인가라는 의문을 가진다. 건축물은 오랫동안 토목시설물과 다르게 구조물 자체에 대한 내진설계를 해온 반면, 기초에 대한 내진설계는 여전히 기준을 반영하지 않는 경우가 있다. 최근 변경된 구조기준은 기초에 적용되는 말뚝이 모두 수평 지지 되어야 한다고 규정한다. 이러한 국내 기준은 국제기준(IBC)을 근거로 하여 제정된 것인데, 이는 기초지반과 말뚝구조물의 구조물-지반 상호 작용의 역학 관계로 복잡한 설계 시스템이다. 특히 국내에서 건축물에 적용하는 소구경말뚝(Micropile)은 더욱 그렇다.

본 연구에서는 설계조건이 까다로운 소구경 말뚝에 대해 수평 지지와 비지지 조건에 대한 해석을 통하여 지내력뿐만 아니라 구조부재의 안정성까지 확보할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 변경된 기준에서의 수평 지지 및 비지지 조건

* 에스와이텍 대표이사, 공학박사

** 국립창원대학교 건축학부 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architecture, Changwon National University, tolgj@cwnu.ac.kr)

*** 한국건설기술연구원 지반연구본부 연구위원, 공학박사

2.1 설계기준의 조건

말뚝은 지반 속에 삽입된 구조물로 기본조건은 수평 지지 조건으로 해석되고 설계된다. 이것은 기둥처럼 축력은 받지만 수평 지지 조건에서는 비지지 길이 $L_b=0$ 으로 모멘트나 전단력이 발생되지 않는 것을 전제조건으로, 말뚝에 좌굴과 모멘트, 압축이 동시에 작용되는 검토는 수행하지 않는 것이다.

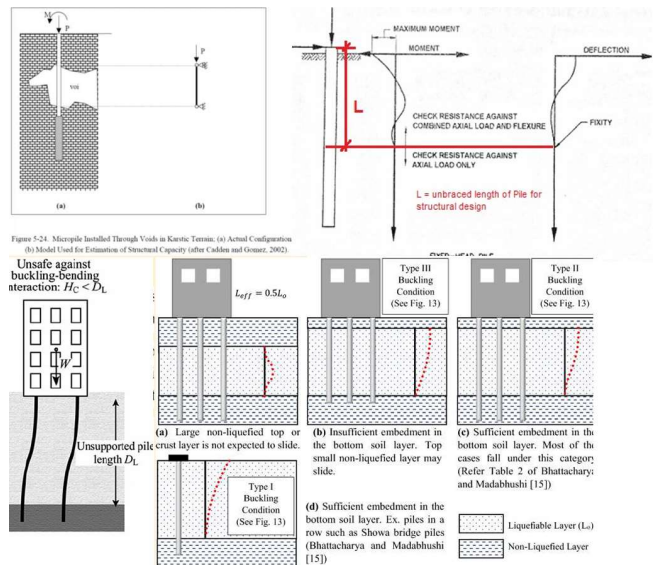


그림 1. 기둥으로 분류되는 말뚝의 비지지 조건 예시

그러나 말뚝에서도 예외 사항이 있으며, 지진시 조건, 경사지 등과 같이 수평력이 작용되는 말뚝에서는 이러한

수평 지지 조건을 사용할 수 없고 말뚝에 발생하는 모멘트를 고려해야 한다. 또한 지반 내에 석회암 공동과 같이 공기 또는 물이 직접 접하는 경우에도 말뚝을 기둥으로 분류하는 설계기준이 국내에서도 IBC 코드를 인용하여 반영되었다. <그림 1>은 이런 조건을 보여주는데, 말뚝을 기둥으로 분류하여 설계하도록 하고 있다. 별도의 검토가 없는 경우는 단단한 지반 1.5m, 연약한 지반 3.0m를 기둥으로 분류하고 비지지 길이를 고려하여 말뚝의 구조내력을 검토하여야 한다.

2.2 기둥으로 분류되는 말뚝의 해석

지진 때문에 수평력이 발생하는 건물에서 수평 지지 문제를 가지고 있는 말뚝의 해석과 설계 방식은 일본건축학회에서 합리적인 방법들을 제시하고 있다(그림 2).

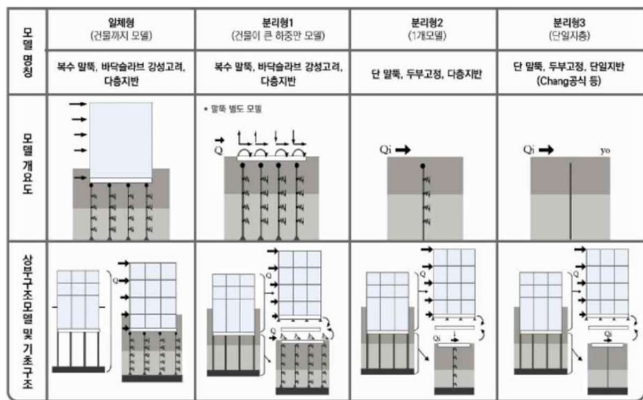


그림 2. 말뚝의 해석 모델 방법(일본건축학회, 2017)

지진 시 건물에 작용하는 수평 관성력과 지진 토압으로 발생하는 전체 밀면 전단력이 말뚝에 전달된다고 가정하여 말뚝 한 개의 수평력을 산정하고 이것을 FEM 해석을 통하여 모멘트 또한 산정할 수 있다.

지반 속에 삽입된 구조물의 경우 지반-구조물 상호작용을 반영하여 해석해야 한다. 이때 지반은 연속체 모델을 하거나 지반스프링을 대체하는 P-y 해석 방식을 적용한다. P-y 해석을 간단하게 할 수 있도록 유한요소 해석을 단일 말뚝에 대하여 수행할 수 있다(그림 3).

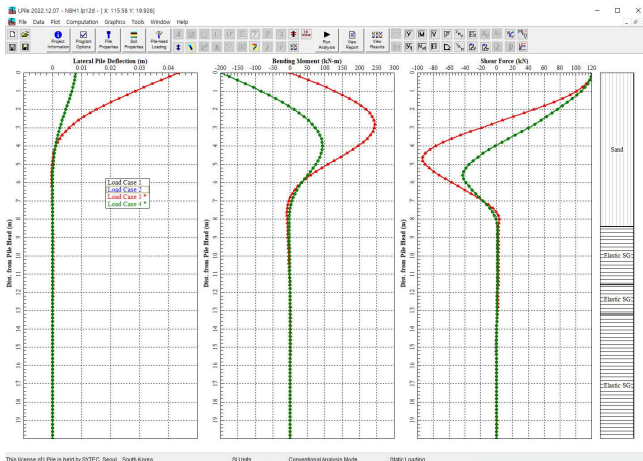


그림 3. 말뚝의 P-y 해석을 통한 구조 부재력 검토

2.3 말뚝 구조 내력의 검토

수평 지지가 되지 않는 말뚝은 압축 파괴는 물론, 전단 파괴, 휨압축 파괴, 휨인장 파괴 등에 대하여도 안정성을 확보해야 한다. 그림 4는 콘크리트 말뚝에서 발생한 하자 사례들로 지진 발생 시 전단, 휨압축, 휨인장 파괴들이 발생하고 있음을 보여주고 있다.

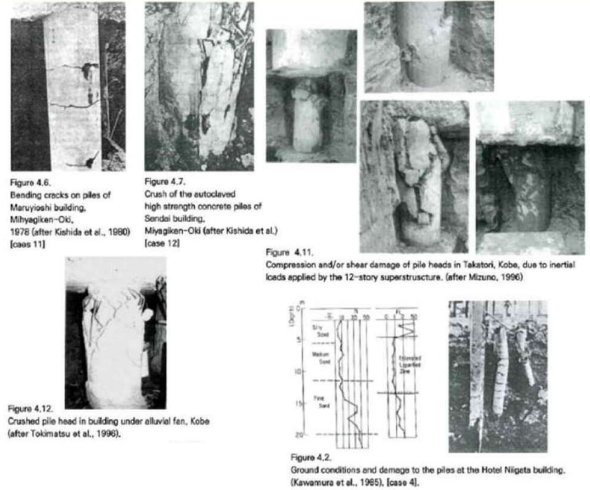


그림 4. 지진 시 말뚝의 하자 사례: 전단, 휨압축, 휨인장 파괴

구조내력의 검토는 국내에서는 마이더스Design+ 프로그램을 많이 사용한다. 콘크리트, 강관, 복합 소재에 대한 다양한 형태의 구조내력 검토가 가능하게 되어 있다. 말뚝은 허용응력법을 사용하는 경우가 많아 하중계수에 대한 적절한 값을 반영하여 검토한다. 최근 콘크리트 말뚝을 검토할 때 하중계수가 반영된 말뚝의 반력을 산정하여 검토하고 그렇지 못한 경우는 입력 시 1.5~2.0의 하중계수를 반영해야 한다. 특히, PHC말뚝과 같이 무근 콘크리트인 경우는 '구조용 무근콘크리트 설계기준' (KDS 14 20 64)의 내용을 반영해야 한다. 기둥으로 분류되는 말뚝에는 구조용 무근콘크리트의 적용이 불가한데, 이 경우 보강 강관을 적용한 말뚝 또는 최소 철근비가 충족되는 보강 PHC 말뚝을 적용해야 한다. 그림 5는 말뚝의 구조내력 검토 입력과 결과의 예시이다.

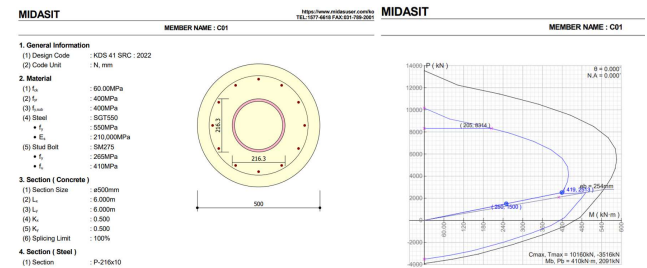


그림 5. 말뚝의 구조내력 검토 예시

3. 소구경 말뚝의 설계 시스템

3.1 소구경 말뚝의 설계조건과 공학적 특성

수평력이 작용되는 소구경 말뚝은 좌굴에 취약하다. 따라서, 설계기준은 수평 지지를 조건으로 달고 있으며, 경

사진 말뚝으로 2축 또는 3축으로 두부가 결합되면 수평 지지 되는 것으로 간주하고 있다. 그림 6은 국내에서 적용되고 있는 수평 지지 말뚝의 사례들이다.



그림 6. 기둥으로 분류되는 소구경 말뚝 보강 시스템

소구경 말뚝으로 설계하는 경우 변경된 기준에서 요구하는 조건은 표 1과 같다.

표 1. 마이크로 파일의 재료특성(KDS 41 19)

재료 종류 및 조건	최대허용응력 ¹⁾
1. 압축을 받는 콘크리트 또는 그라우트 ²⁾ -4.5.3.2(7)에 따른 영구 케이싱된 현장 타설	$0.40f_{ck}$
-강관 및 기타 영구 케이싱 또는 압반속 현장타설	$0.33f_{ck}$
2. 압축을 받는 철근	$0.40f_y \leq 200\text{MPa}$
3. 압축을 받는 강재 -마이크로파일용 강관	$0.40F_y \leq 220\text{MPa}$
4. 인장을 받는 철근 -마이크로파일 내부 철근	$0.60f_y$
5. 마이크로파일 채움콘크리트 강도	$f_{ck} = 27\text{MPa}$

설계기준에서 제시하고 있는 조건에서는 마이크로 파일의 보강 재료는 KS D 3504에 따른 이형 철근이어야 하고 강관의 최소 두께는 4.8mm 이상이어야 한다. 지반과 직접 접촉하는 경우는 부식 두께를 고려하여 6.8mm를 적용한다. 18톤에 2개의 샘플을 강도시험을 하여 연신율 15%, 최소 $F_y=310\text{MPa}$ 를 만족해야 한다.

국내에서는 쓰레드바형 마이크로 파일이 사용되고 있는데, 표 2는 국내에서 사용되고 있는 소구경 말뚝의 허용강도를 보여주고 있다. 소구경 말뚝을 적용함에 있어 필수 확인사항은 케이싱과 쓰레드바가 동시에 설계에 반영되는 경우, 두 강도가 동일해야 한다는 것이다. 표에서 (X)는 설계에 미반영, (O)는 설계에 반영하는 경우이다. 부식 두께와 허용강도 310MPa이하인 경우는 소구경인 말뚝에서는 반영하지 않는 것이 공학적으로 안정하다.

설계기준에서 제시하는 강도를 적용할 때, 구조용 케이싱에 있는 철근의 경우는 $0.6F_y$ 를 적용한다. 그렇지 않은 경우는 $0.40f_y \leq 200\text{MPa}$ 를 적용하고, 마이크로 강관은 $0.40F_y \leq 220\text{MPa}$ 의 값을 적용한다. 외부 케이싱과 내부 철근이 동일한 변형률이 작용되기 때문에 동시에 작용하는 경우는 케이싱과 철근을 $0.40F_y \leq 220\text{MPa}$ 로 반영해야 한다.

말뚝의 최대 길이는 압축을 받는 부재에서 지반이 압반

지반 등과 같이 단단한 지반에 삽입되지 않는 부분의 길이가 200D가 넘지 않도록 설계하는 것을 권장한다. 비지 조건에서는 말뚝의 횡지지 보강을 그림 6.과 같은 방법을 하지 않는 경우 표의 값에서 모멘트 작용으로 인하여 말뚝의 허용강도는 감소한다. 모멘트 크기에 따라 50%이상 감소하는 경우가 많기 때문에 말뚝은 횡지지 되도록 설계하여야 한다.

표 2. 횡지지 마이크로 파일의 재료특성(KDS 41 19 적용예시)

말뚝종류 종류, Bar, Casing	설계조건			말뚝 최대 길이	
	Thr.Bar Fy(MPa)	Casing Fy(MPa)	설계하중 (kN/EA)	직경 (mm)	200D (m)
A품, D50, D165t4.8	550	275(X)	392.7	50	10.0
A품, D50, D165t7.0	550	550(O)	984.8	165	33.0
B품, D50, D165t4.8	350	275(X)	274.8	50	10.0
B품, D50, D165t7.0	350	355(O)	626.7	165	33.0
A품, D65, D165t4.8	550	275(X)	663.6	65	13.0
A품, D65, D216t10	550	550(O)	1881.7	216	43.2
B품, D65, D165t4.8	550	275(X)	464.5	65	13.0
B품, D65, D216t9.0	350	355(O)	1197.4	216	43.2
A품, D75, D216t4.8	550	275(X)	883.5	75	15.0
A품, D75, D216t10	550	550(O)	2123.6	216	43.2
B품, D75, D216t4.8	350	275(X)	618.5	75	15.0
B품, D75, D216t10	350	355(O)	1351.4	216	43.2
A품, X, D216t10	X	550(O)	1151.7	216	43.2
B품, X, D216t12	X	355(O)	907.3	216	43.2
B품, X, D216t9	X	355(O)	644.3	216	43.2

3.2 철근으로 보강된 소구경 말뚝의 응력 해석

철근으로 보강된 소구경 말뚝의 경우 외부케이싱의 두께와 허용 강도에 따라 발생응력과 안전율은 표 3과 같다. 말뚝에서는 재하 하중의 1/2을 적용한다. $f_y/F_y > 1.0$ 인 경우는 파괴이며, 불안정한 조건이다. A품의 소구경 말뚝을 적용하는 경우는 콘크리트, 케이싱, 보강철근이 모두 허용범위에 있다. 그러나, 케이싱 두께가 작은 경우는 콘크리트 강도와 내부 철근이 허용을 넘어간다. 케이싱과 보강철근의 응력은 비슷한 값을 보이기 때문에 두 개 중 작은 값으로 검토하거나, 설계에서 작은 값을 고려하지 않아야 한다.

표 3. 마이크로 파일의 재료특성(KDS 41 19)

말뚝종류 종류, Bar, Casing	설계조건			fy/0.4Fy		
	Thr.Bar Fy(MPa)	Casing Fy(MPa)	재하하중 (kN/EA)	Bar	Conc.	Casi.
CASE-1	550	550	3000	207.5	26.0	191.2
A품, D75, D216t10	220	220	1500	0.94	0.96	0.87
CASE-2	350	355	3000	210.5	27.2	200
B품, D75, D216t9	140	140	1500	1.50	1.01	1.43
CASE-3	550	275	3000	247.6	33.2	257.2
A품, D75, D216t4.8	220	100	1500	1.13	1.23	2.57

그림 7과 같이 세 가지에 대한 해석을 수행한 결과 외부케이싱과 내부 철근의 발생된 응력은 다음과 같다. 케이싱 두께, 허용응력의 값과 상관없이 외부케이싱과 내부 철

근의 응력은 비슷한 값을 보인다. 이것은 동일한 변형률을 갖고 철은 허용강도와 상관없이 탄성계수가 동일하기 때문에 비슷한 값이 나타난다.

지가 되도록 축력, 모멘트, 전단력 그리고 좌굴에 대한 안정 등을 고려해야 한다. 이는 ‘건축물의 구조기준 등에 관한 규칙’ 에서도 규정하고 있다.

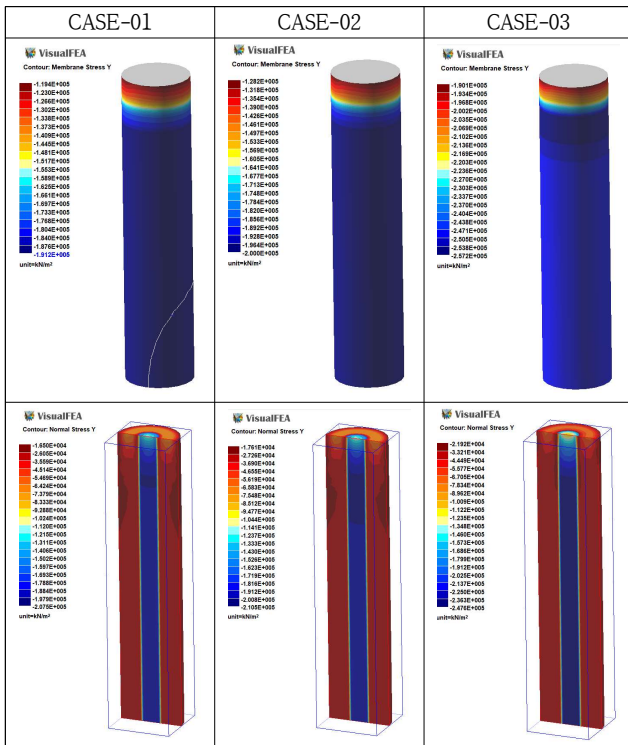


그림 7. FEM 해석에 의한 소구경 말뚝의 분석

4. 결론

4.1 변경된 기준 주요 검토

소구경 말뚝에 대한 국내기준은 최근에 변경되면서 국제빌딩기준(IBC)을 준수하여 변경되었다. 건축물에서는 생소하게 접근되는 공학적 특성과 지반과의 상호 작용 등으로 말뚝의 설계에 많은 문제점을 해결하도록 되어 있다. 내진설계를 하는 구조물이나 경사지에 설치되는 말뚝과 같이 수평력이 작용되고, 말뚝이 공기, 물, 연약지반, 액상화 지반 등에 노출되어 있는 경우는 말뚝을 기둥으로 분류하여 설계를 해야 한다.

4.2 소구경 말뚝의 설계 시스템

본 연구에서는 소구경 말뚝에 필요한 재료 특성과 규격에 적합한 설계하중을 표 2에 제시하였으며, 이러한 설계 제시표가 합리적인 검토인지 검증하기 위하여 유한요소 해석을 수행하여 소구경 말뚝에 발생하는 응력을 검토하여 안정성을 확인하였다. 그 결과는 표 3에 제시하였다. 말뚝의 설계 절차는 수평 지지와 비지지부로 구분하여 단면을 결정하고 결정된 단면에서는 지반-구조물 상호작용을 고려할 수 있는 P-y해석을 통하여 모멘트, 전단력을 산정하고 구조내력에 대한 안정성을 검토한다.

기준이 변경되기 전까지는 말뚝은 오직 축력에만 저항하는 구조물로 검토하였으며, 변경된 기준에서는 수평 지

참고문헌

1. 건축물 기초 구조기준, KDS 41 19, 2022.10.11.
2. 이강주 & 윤태호, 건축물 말뚝기초 내진설계 지침연구, 대한건축학회, 2022.8, pp165-167
3. 안성윤&이강주, 변경된 구조기준에 최적화된 건축기초 내진설계매뉴얼, 2020, 에스와이텍
4. 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙[시행 2021.8.27.][국토교통부령 제882호, 2021.8.27., 제1장 총칙
5. 일본건축학회, 철근콘크리트와 기초구조부재의 내진설계지침(안)동해설, 2017
6. Architectural Institute of Japan, AIJ Standard for Structural Design of Reinforced Concrete Boxed-Shaped Wall Structures,
7. FEMA P-749, Earthquake-Resistant Design Concepts, 2010. 12.
8. Kim, T.H., Ahn, K.K. and An. S.Y. (2021), Behavioral Analysis of Triaxial Micropile (TMP) through Field Loading Test and 3D-numerical Analysis, J. of the Korean Geo-Environmental Society, Vol.22, No.4, pp.15-23.