

마이크로파일의 설계법

Design Method for Micropiles

1. 개요
2. 마이크로파일의 분류
3. 마이크로파일의 설계
4. 마이크로파일 설계 예

김원철

Kim Won Cheul

한양대학교 토목공학과 겸임교수

Adjunct Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ

천병식

Chun Byung Sik

한양대학교 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

마이크로파일의 설계법

Design Method for Micropiles

김원철¹⁾, Kim Won Cheul, 천병식²⁾, Chun Byung Sik

¹⁾ 한양대학교 토목공학과 겸임교수

Adjunct Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

²⁾ 한양대학교 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

개요(SYNOPSIS)

This study addresses preliminary design and construction specification for micropiles. Especially several design methods for micropiles in sands, clays or mixed soil layers are described.

The bearing capacity of micropiles are mainly depended upon the shaft resistance. Therefore, the pressure of grouting is one of the most important design parameters for the bearing capacity evaluation of micropile. There is no theoretical way to evaluate the shaft resistance of micropile up to now because grouting method is another key parameter for micropile design approach. Because of above reasons, the present design approaches of the micropile are based on the collected field data. The bearing capacities of designed micropiles should be verified by static load tests before and after construction at the planned site.

Key Words : Micropiles, Bearing Capacity, Shaft Resistance

1. 개요

일반적으로 말뚝은 변위말뚝(displacement pile)과 대체말뚝(replacement pile)으로 나뉘어 지는 데 (Fleming et al., 1985), 마이크로파일은 변위말뚝(replacement pile)으로 분류되며 일반적으로 소구경(직경이 300mm 이하)이며 보통 강재로 보강된다. 마이크로파일은 주변 구조물이나 지반 그리고 환경에 최소한으로 영향을 주면서 시공되며, 시공하기(접근하기) 곤란한 환경과 모든 종류의 토질조건에서 시공 가능하다. 또한 그라운드 앵커나 그라우팅 시공장비로 수평이하의 어떠한 각도로도 시공 가능하다. 또한 시공과정에서 진동과 소음이 적고, 건물 천장이 낮은 곳에서도 시공이 가능하므로 마이크로파일은 기존 건물의 기초보강에 종종 이용된다. 따라서 기존 기초구조물에서 마이크로파일을 설치하기 위해서 특수한 천공장비가 이용되기도 한다.

일반적으로 가장 많이 적용되는 마이크로파일의 크기는 12~17 cm 이고 이보다 더 작은 마이크로파일도 적용되고 있다. 마이크로파일은 그라운드 앵커와 비슷한 방식으로 그라우트와 지반의 마찰력으로 강재가 지지하는 외부하중을 지반으로 전달한다. 마이크로파일의 선단지지력은 직경이 작으므로 보통 무시한다. 그라우트/지반 부착력은 주로 지반조건이나 그라우팅 방법(i.e., 압력식 주입, 중력식 주입)에 따라 크게 좌우된다. 천공방법도 그 영향이 작긴 하지만 부착력에 영향을 미친다.

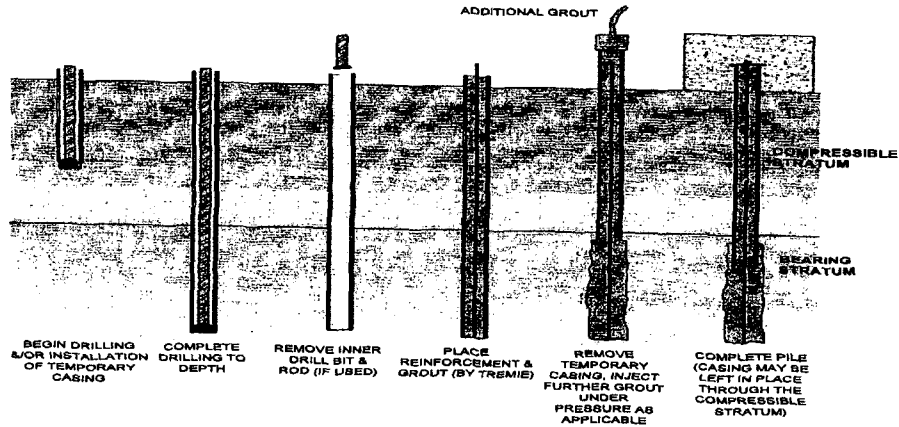


그림 1.1 마이크로파일의 시공순서

2. 마이크로파일의 분류

2.1 말뚝거동에 의한 분류

2.1.1 Case1 마이크로파일

Case1 마이크로파일은 기존의 말뚝을 대신하여 구조물의 하중을 좀더 견고하고 안정적인 깊은 지반에 전달하기 위해 사용된다. 수직 및 수평력에 직접적으로 견디는 이러한 마이크로파일을 Case1 마이크로파일이라 한다(그림 2.1).

하중은 주로 구조적으로는 보강된 강재에 의해, 지반공학적 측면(geotechnically)으로는 개개 말뚝의 그라우트/지반의 부착영역에 의해 지지된다. 북미에서의 대부분을, 그리고 세계적으로도 마이크로파일의 적용의 적어도 90% 이상이 Case1 마이크로파일을 포함한다. 이러한 말뚝은 비록 무리로 설치되더라도 말뚝이 개별적으로 하중을 지지한다고 보고 설계하게 된다. Case1 마이크로파일의 전형적인 배치가 그림 2.2에 나타나 있다.

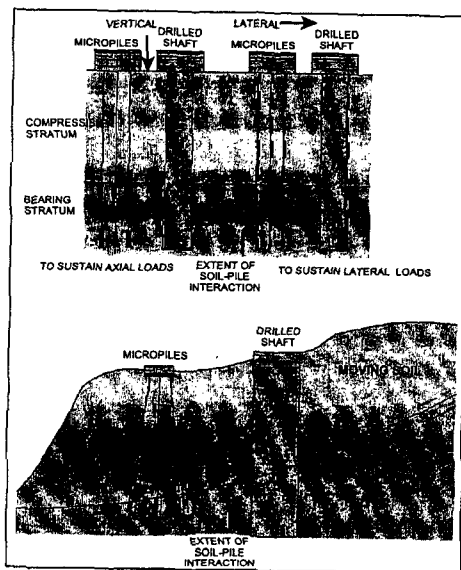


그림 2.1 CASE1 마이크로파일

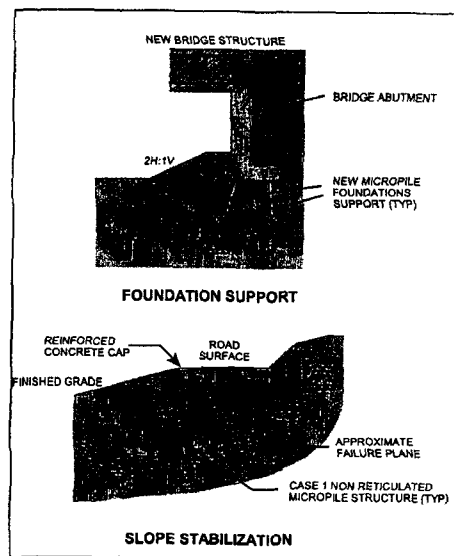


그림 2.2 CASE1 마이크로파일의 배치

2.1.2 Case2 마이크로파일

Case2 마이크로파일은 지반을 그물식으로 에워싸듯이 보강하여 하중에 견디도록 지반/말뚝 복합체를 형성한다. 보강된 지반의 한 구성요소인 그물식 마이크로파일은 구조물의 지지와 지반의 안정을 위해 사용되어진다. 이러한 말뚝을 Case2 마이크로파일이라 한다(그림 2.3).

구조물의 하중은 말뚝 개개가 아닌 보강된 지반 전체에 작용하게 된다. Case2 마이크로파일은 Case1 마이크로파일보다 보강을 적게 하게 되는데 이는 Case1 마이크로파일처럼 개개의 말뚝이 직접적으로 하중을 받지 않기 때문이다. 이 말뚝은 그물식으로 설치되어 지반을 보강하여 지반/말뚝 복합체를 형성시킨다. 그림 2.4는 그물식 마이크로파일의 전형적인 배치를 나타낸 것이다.

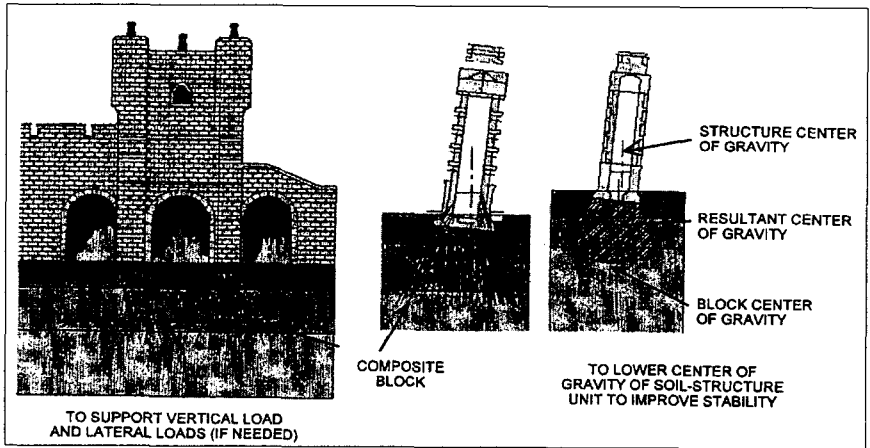


그림 2.3 CASE2 마이크로파일

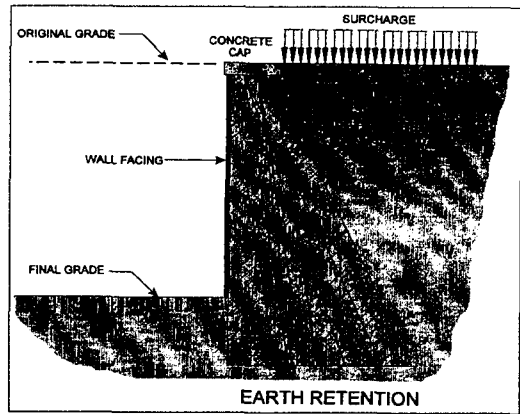


그림 2.4 CASE2 마이크로파일의 배치

2.1.3 Case1 + Case2 마이크로파일

Case1과 Case2 마이크로파일의 개념이 혼용되어 사용되기도 한다. 한 예로 그림 2.5과 같이 사면의 안정을 위해 파괴면 아래까지 설치된 마이크로파일을 들 수 있다. 최근의 연구(Pearlman, et al., 1992)에 따르면 말뚝/지반 상호작용은 오로지 활동면 근처에서만 일어난다. 이러한 경우 말뚝이 하중에 직접적으로 저항하게 되므로 Case1 마이크로파일이 해당된다. 파괴면 위쪽의 말뚝무리는 보강된 지반 복합체의 연속성을 유지하는 일부 구성요소이므로 Case2에 해당된다. 그러므로 위의 예는 Case1과 Case2의 중간

개념이다.

그물식 마이크로파일(Case2)과 Case1 마이크로파일 그룹은 비록 그 기하학적 형상이 비슷할지라도 거동이나 설계에는 분명한 차이가 있다.

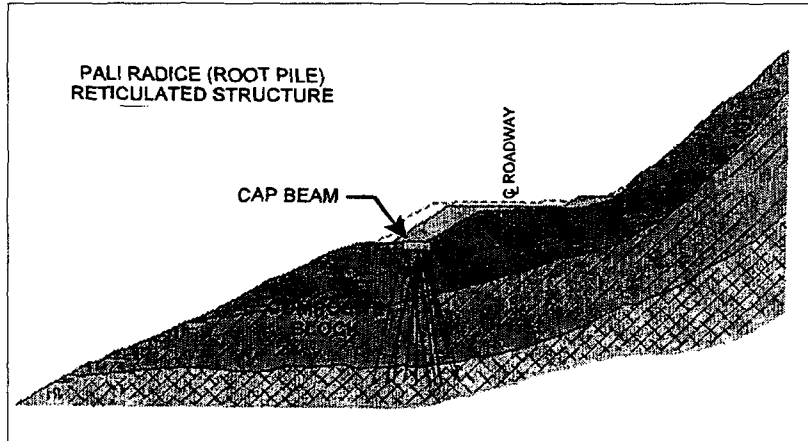


그림 2.5 Case1 마이크로파일과 Case2 마이크로파일이 혼용된 경우

2.2 그라우팅 방법에 의한 구분

그라우트/지반의 부착력에 가장 민감하게 영향을 미치는 요소는 그라우팅 방법이다. 그라우팅 방법에 따라 직접적으로 부착력이 변화하게 된다. 그라우팅 방법이나 압력에 따라 마이크로파일을 문자(A~D)를 사용하여 분류하며 천공 케이싱이나 보강재에 따라 세부적으로 분류하게 된다. 마이크로파일을 도식적으로 분류한 것이 그림 2.6에 나타나 있다.

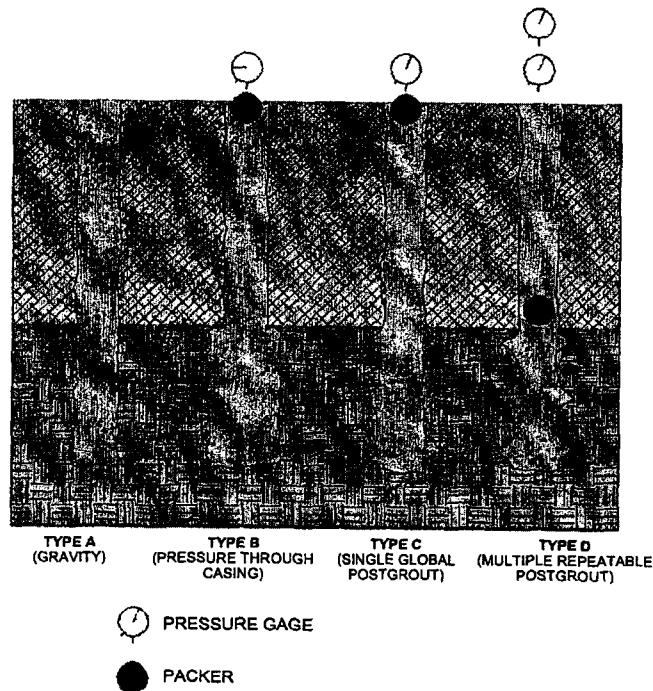


그림 2.6 그라우팅 방법에 의한 마이크로파일의 분류

2.2.1 중력에 의한 그라우팅 (Gravity Fill) - Type A 마이크로파일

중력에 의해 그라우팅하는 것으로 그라우트를 트레미 파이프(tremie pipe)를 통해 선단에서부터 공내에 채운다. 주입되는 것과 비슷한 품질의 그라우트가 공의 입구로 유출될 때까지 주입을 계속해야하며, 가압을 하지 않으므로 모래-시멘트 모르타르나 시멘트 그라우트가 사용된다. 시멘트 그라우트는 물-시멘트비(W/C, 중량비)가 보통 0.45~0.50이며, 유럽에서 사용되고 있는 모래-시멘트 모르타르의 모래-시멘트비는 1:1 또는 1:2 이다. 인장력에도 저항할 수 있도록 천공구멍의 하단을 저부 확대하기도 하지만, 이러한 경우는 드물다.

이러한 방법은 높은 압력으로 주입되는 다른 방법에 비해 많이 사용되지 않으며, 현재는 단단한 점성토에 설치되는 낮은 지지력을 갖는 말뚝이나 기초 지반이 암반인 경우에만 사용된다.

2.2.2 가압 그라우팅 (Pressure Grouting) - Type B 마이크로파일

일시적으로 설치하였던 강재 케이싱을 추출하면서 시멘트 그라우트를 압력을 가하여 주입한다. 주입압은 보통 0.5~1 MPa 이며, 주변지반의 수압파쇄와 그라우트 재료의 지나친 소모의 가능성 그리고 케이싱을 추출하는 동안 케이싱 주변의 밀폐유지 여부에 따라 주입압은 제한된다.

사질토에서 가압 그라우팅을 실시하면 그라우트는 침투주입이 되며 느슨한 흙 입자는 재배치된다. 또한 주입압에 의해 시멘트 현탁액 속의 물이 주변지반으로 빠져나가기 때문에 지반속에 최종 주입된 그라우트의 응결시간은 단축되고 높은 강도를 발휘하게 된다.

점성토에서 가압 그라우팅을 실시하면 사질토에서 보다 지반개량효과는 떨어지지만 수평으로 지반변위가 발생하여 다짐효과가 생기게 된다.

2.2.3 포스트그라우팅 (Postgrouting) - Type C, D 마이크로파일

지반의 수압파쇄나 주입시 그라우트가 케이싱을 따라 흐를 가능성이 있는 경우에는 케이싱을 추출하면서 충분히 높은 압력으로 그라우팅하는 Type B 마이크로파일은 사용할 수 없다. 이러한 연유로 포스트그라우팅 기술이 개발되었다. 이 방법은 공내에 먼저 그라우트(primary grout)를 채운후 특수한 그라우트 튜브를 통해 추가적으로 그라우트를 주입하는 것으로, 이때 추가 주입되는 시멘트 그라우트는 먼저 채워진 것에 비해 높은 물-시멘트(보통 0.50~0.75, 중량비)를 가지며 흙의 필터기능으로 인해 흙을 통과하는 동안 함수량이 적어지게 되어 큰 강도를 내게된다.

- Type C : 이 방식은 그라우팅 과정이 두 단계로 나뉘어 진다. 1)시멘트 그라우트를 Type A와 같이 중력에 의해 채운다. 2)먼저 채워진 그라우트(primary grout)가 경화하기 전(약 15~25분후)에 적어도 1MPa 정도의 압력으로 미리 설치한 슬리브 파이프(또는 보강 튜브)를 통해 먼저 채운 그라우트와 비슷한 그라우트를 팩커를 사용하지 않고 한번에 주입한다. 이 Type은 프랑스에서만 사용되고 있으며 IGU (Injection Globale et Unitaire)라고 한다.
- Type D : Type C와 비슷하게 두 단계의 과정으로 그라우팅을 실시한다. Type A, Type C와 마찬가지로 먼저 중력에 의한 그라우팅을 실시한다. 먼저 주입한 그라우트가 경화한 후(수시간 후) 2~8 MPa의 압력으로 미리 설치해 놓은 슬리브 파이프를 통해 추가적으로 주입을 하게 된다. 슬리브 파이프 내의 팩커를 사용하여 여러차례 각각의 깊이별로 주입을 실시한다. 포스트그라우팅시 보통 3~4단계로 나누어 주입을 실시하며 각 단계는 적어도 24시간의 시

간차이를 둔다. 세계적으로 흔히 사용되는 Type으로 프랑스에서는 IRS(Injection Répétitive et Sélective)라고 한다.

표 2.1에 그라우팅 방법에 따른 마이크로파일의 종류가 세부적으로 나타나 있다. 표에 제시된 세부적인 분류(숫자 1, 2, 3)는 천공 케이싱과 보강재에 따른 것이다.

표 2.1 그라우팅 방법에 따른 마이크로파일의 분류

Micropile Type and Grouting Method	Sub-type	Drill Casing	Reinforcement	Grout
Type A Gravity grout only	A1	Temporary or unlined(open hole or auger)	None, monobar, cage, tube or structural section	Sand/cement mortar or neat cement grout, tremied to base of hole (or casing), no excess pressure applied
	A2	Permanent, full length	Drill casing itself	
	A3	Permanent, upper shaft only	Drill casing in upper shaft, bar(s) or tube in lower shaft (may extend full length)	
Type B Pressure-grouted through the casing or auger during withdrawal	B1	Temporary or unlined(open hole or auger)	Monobar(s) or tube(cages rare due to lower structural capacity)	Neat cement grout is first tremied into drill casing/auger. Excess pressure(up to 1MPa typically) is applied to additional grout injected during withdrawal of casing/auger
	B2	Permanent, partial length	Drill casing itself	
	B3	Permanent, upper shaft	Drill casing in upper shaft, bar(s) or tube in lower shaft (may extend full length)	
Type C Primary grout placed under gravity head, then one phase of secondary "global" pressure grouting	C1	Temporary or unlined(open hole or auger)	Monobar(s) or tube(cages rare due to lower structural capacity)	Neat cement grout is first tremied into hole(or casing/auger). Between 15 to 25 minutes later, similiar grout injected through tube(or reinforcing pipe) from head, once pressure is greater than 1MPa
	C2	Not conducted	-	
	C3	Not conducted	-	
Type D Primary grout placed under gravity head(Type A) or under pressure (Type B). The one or more phases of secondary "global" pressure grouting	D1	Temporary or unlined(open hole or auger)	Monobar(s) or tube(cages rare due to lower structural capacity)	Neat cement grout is first tremied(Type A) and/or pressurized(Type B) into hole or casing/auger. Some hours later, similiar grout injected through sleeved pipe(or sleeved reinforcement) via packer, as many times as necessary to achieve bond
	D2	Possible only if regROUT tube placed full-length outside casing	Drill casing itself	
	D3	Permanent, upper shaft only	Drill casing in upper shaft, bar(s) or tube in lower shaft (may extend full length)	

3. 마이크로파일의 설계

마이크로파일의 기본적 설계개념은 예외적인 토질조건일 경우 좌굴에 대한 검토가 필요하다는 것 외에는 다른 일반적 말뚝의 설계개념과 많이 다르지 않으며, 지지력의 대부분은 주면마찰력에 기인한다. 또한 마이크로파일은 길이에 비하여 직경이 작기 때문에, 즉 말뚝의 선단면적이 근입된 말뚝 주변면적에 비하여 너무 작으므로 마이크로파일의 선단지지력은 일반적으로 설계에서 고려하지 않는다.

일반적으로 마이크로파일은 직경이 30 cm 미만인 말뚝으로 정의되는데 이 직경에 의한 선단지지력이 작지 않을 경우는 선단지지력도 설계에 고려되어야 할 것으로 사료되며 이 경우의 선단지지력 산정은 기존 말뚝의 설계방법에 준하여 산정 할 수 있다.

본 설계 방법은 일반적인 마이크로파일의 설계방법 즉, 선단지지력을 고려하지 않는 설계법을 마이크로파일의 그라우팅 방법과 대상토질별로 분류하여 기술한 것이다. 여기서 마이크로파일의 주요 지지력은 주면마찰력에 기인하므로 주면마찰력의 산정에 주안점을 두어 기술한다.

3.1 단일 마이크로파일

3.1.1 Type A (Gravity-Grouted) 마이크로파일

Type A 마이크로파일은 주로 비교적 견고한 점성토 혹은 Rock에 많이 적용된다. 이 경우의 주면마찰력(f_s)은 아래식으로 산정할 수 있다(AASHTO, 1992; O'Neill, 1994).

(1) 사질토

$$f_s = \beta \bar{\sigma}_{vz} \quad (3.1)$$

$$\beta = K_0 \tan \delta \quad (3.2)$$

여기서, β = 깊이에 따른 상수

K_0 = 정지토압계수

δ = 말뚝과 지반의 접촉면의 마찰각 (지반의 ϕ 값 적용)

$\bar{\sigma}_{vz}$ = 깊이 z 에서의 유효수직응력

O'Neill과 Hassan(1994)의 경험식에 의한 N 치와 β 의 관계는

$$N \geq 15 \text{일때 } \beta = 1.5 - 0.42 z^{0.34} \quad (\text{단, } 0.25 \leq \beta \leq 1.2) \quad (3.3)$$

$$N < 15 \text{일때 } \beta = (1.5 - 0.42 z^{0.34}) \frac{N}{15} \quad (3.4)$$

여기서, N = 표준관입시험에서 보정하지 않은 해머 타격횟수 (회/300 mm)

z = 대상토질의 깊이 (m)

(2) 점성토

점성토의 경우 주면마찰력(f_s)은 Tomlinson(1957)의 전응력 해석법에 의하여 다음 식으로 표시된다.

$$f_s = \alpha \cdot s_u \quad (3.5)$$

여기서, s_u = 비배수 전단강도

α = 전단강도에 따른 상수

여기서 비배수 전단강도(s_u)는 UU시험이나 일축압축강도시험에 의하여 구할 수 있으며, α 값은 그림 3.1에서 산정할 수 있다. 단, 주면마찰력을 산정할 시에는 앞에서 언급한 시험으로 구한 비배수 전단강도(s_u)값의 1/2을 적용하여 구한다. 그림 3.1에서 α 값을 결정할 때 Bruce(1994)에 의하면, α 값이 0.6~0.8일때 만족할만한 설계 결과를 얻었다고 한다.

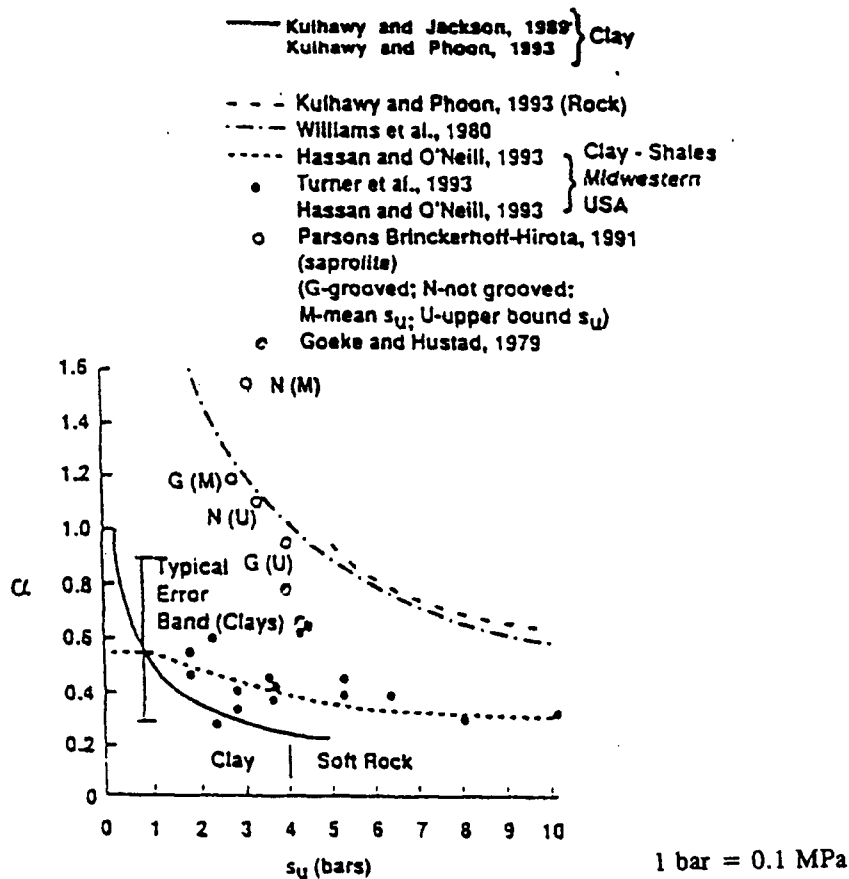


그림 3.1 점성토와 아주 약한 연암에서의 α 와 s_u 와의 관계 (O'Neill and Hassan, 1994)

(3) 압반

Littlejohn(1990)에 의하면, 일축압축강도(UCS)가 7 MPa 미만인 압반의 경우에 단위면적당 주변마찰력은 그 지반을 대표하는 암 시편의 최소 전단강도 이하의 값을 적용시켜야 하며, 암석의 전단강도값이나 현장에서의 Pull-out Test 결과가 없는 경우에 주변마찰력은 무결암의 일축압축강도의 1/10을 적용하고, 이 값도 4 MPa 이상을 넘을 수는 없다.

정확성은 떨어지나 지지력이 SPT로 구한 N치와 연계될 경우는 주변마찰력(f_s)은 10 N의 값을 적용시킬 수도 있다.

다음에 제시된 표 3.1를 이용하여 좀 더 상세하게 부착력을 결정할 수 있다.

표 3.1 그라우트와 압반 사이의 부착력 (Littlejohn and Bruce, 1977)

Rock type	Ultimate bond (MPa)	Factor of safety (ultimate)
Medium-Hard Basalt	5.73	3.4
Weathered Granite	1.50 ~ 2.50	
Basalt (Britain, Wycliffe-Jones, 1974)	3.86	2.8 ~ 3.2
Granite	4.83	3.1 ~ 3.5
Serpentine	1.55	2.6 ~ 3.5
Granite and Basalt	1.72 ~ 3.10	1.5 ~ 2.5
Competent Rock (where USC > 20 MPa)	USC ¹⁾ /10 < 4.2 MPa	
Concrete	1.38 ~ 2.76	1.5 ~ 2.5
Basalt (Britain, Parker, 1958)	6.37	3.3

¹⁾Unconfined Compressive Strength.

(4) The French Method (CCTG, 1993)

대상토질이 Clay, Silts, 혹은 Sand, Gravel일 경우 CPT Data에 의한 주변마찰력(f_s)은 다음과 같이 산정된다.

$$f_s = \min\left(\frac{q_c}{\beta_c}, q_{smax}\right) \quad (3.6)$$

여기서, q_c = 대상깊이에서 CPT로 구한 콘관입저항

β_c, q_{smax} = 토질과 말뚝 종류에 따른 계수 (표 3.2 참조)

먼저 표 3.3에서 q_c 값에 따라서 Soil Type을 결정한다. 그런 다음 표 3.2에서 Soil 과 Pile Type에 의해 결정된 계수를 식 (3.6)에 적용하여 주변마찰력을 산정한다.

표 3.2 토질과 마이크로파일 종류에 따른 β_c, q_{smax} 의 값 (CCTG, 1993)

Pile Type		Silt-Clays					Sands-Gravel		
		A	B		C		A	B	
bored	β_c	-	-	75 ¹	-	-		200	200
	q_{smax} (kPa)	15	40	80 ¹	40	80 ¹		-	120
bored with casing (withdrawn)	β_c	-	100	100 ²	-	100 ²		250	300
	q_{smax} (kPa)	15	40	60 ²	40	80 ²		40	120

¹Reaming and grooving before pouring concrete.

²Drilling in the dry, without rotating the casing.

The notation A, B, C indicate different types of soils according to the French classification (표 9.5.4)

표 3.3 흙의 분류 (CCTG, 1993)

Soil Type		Pressuremeter p_l (MPa)	Penetrometer q_c (MPa)
Clays, Silts	A-Soft Clays and Silts	< 0.7	< 3.0
	B-Stiff Clays and Silts	1.2 - 2.0	3.0 - 6.0
	C-Very Stiff Clay	> 2.5	> 6.0
Sand, Gravel	A-Loose	< 0.5	< 5
	B-Dense	1.0 - 2.0	8.0 - 15.0
	C-Very Dense	> 2.5	> 20.0
Marls	A-Soft	1.5 - 4.0	-
	B-Compact	> 4.5	-

(5) The French LCPC-SETRA (1992)

대상토질이 Clay, Silts, 혹은 Sand, Gravel 혹은 Marls(이회토)일 경우 PMT(Pressuremeter Test) Data에 의한 주변마찰력 산정은 다음과 같다.

$$p_i^* = p_l - u - K_o \bar{\sigma}_{vz} \quad (3.7)$$

여기서, p_i^* = 수정된 한계압력

p_l = PMT로 구한 한계압력

u = 공극수압

$\bar{\sigma}_{vz}$ = 대상깊이에서의 유효응력

K_o = 정지토압계수

모든 종류의 토질에서, 특히 시공방법, 주입압, Casing의 유무 등이 고려되고, PMT Data에 의한 한계 주변마찰력 산정방법은 다음과 같다.

- ① 표 3.3에서 Soil Type을 결정.
- ② 표 3.4에서 표에 제시된 조건에 맞는 Q_i curve를 선정.
- ③ Q_i curve와 앞에서 산정한 p_i^* 으로 그림 3.2에서 한계 단위 주변마찰력 산정.

표 3.4 토질과 마이크로파일 Type에 따른 Qi curve (CCTG, 1993)

Micropile Type		Clay/Silt			Sand/Gravel			Chalk			Marls		Rocks
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	
Type A	Drilled-Dry	Q1	Q1,Q2 ⁽¹⁾	Q2,Q3 ⁽¹⁾	N.A.			Q1	Q3	Q4,Q5 ⁽¹⁾	Q3	Q4,Q5 ⁽¹⁾	Q6
	Drilled-with Mud	Q1	Q1,Q2 ⁽¹⁾		Q1	Q1,Q2 ⁽²⁾	Q2,Q3 ⁽²⁾	Q1	Q3	Q4,Q5 ⁽¹⁾	Q3	Q4,Q5 ⁽¹⁾	Q6
	Drilled-Casing (casing retrieved)	Q1	Q1,Q2 ⁽³⁾		Q1	Q1,Q2 ⁽²⁾	Q2,Q3 ⁽²⁾	Q1	Q2	Q3,Q4 ⁽³⁾	Q3	Q4	N.A.
	Drilled-Casing (casing left in place)	Q1			Q1	Q2	(4)			Q2	Q3	N.A.	
Type B	Injected-Low Pressure	Q1	N.A.		Q3	N.A.	Q2	Q3	Q4	Q5		N.A.	
Type C, D	Injected-High Pressure ⁽⁶⁾	N.A.	Q4	Q5	Q5	Q6	N.A.	Q5	Q6	Q6		Q7 ⁽⁷⁾	

- (1) Reaming and grooving before pouring concrete.
 - (2) Long piles (> 30m).
 - (3) Drilling in the dry, without twisting the casing.
 - (4) In the case of Chalk, the skin friction may have low values for certain types of piles. A specific study is required for each case and the skin friction cannot be increased without a verification by loading testing.
 - (5) Without casing left in place (rough contact).
 - (6) Selective and repetitive injection at a low rate of flow.
 - (7) (6) and proper grouting of the fissured mass, especially for micropiles for which load tests are recommended.
- N.A. = Not Applicable.

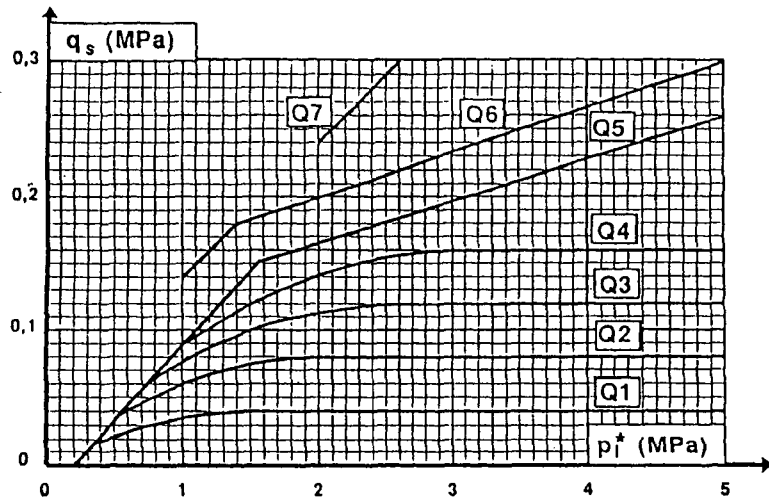


그림 3.2 지반조건과 p_i^* 값에 따른 한계 단위 주면마찰력 ($f_s = q_s$) (CCTG, 1993)

(6) Lizzi(1985)에 의하여 제시된 실험식

$$Q_s = \pi D L K_l I \quad (3.8)$$

여기서, Q_s = 축방향 극한지지력 (kN)

D = 말뚝의 직경 (m)

L = 말뚝의 길이 (m)

K_l = 말뚝 주변의 평균 부착력 (kPa)

I = 말뚝의 직경에 따른 무차원 계수

위에서 제시된 K_l , I 와 말뚝의 유효한계길이(limit effective transfer length, L_{max})는 표 3.5과 3.6에서 구할 수 있다.

표 3.5 계수 K_l 과 L_{max} 의 값 (Lizzi, 1985)

Soil	K_l (kPa)	L_{max} (m)
Soft soil	50	30
Loose soil	100	-
Soil of average compactness to consistency	150	20
Very stiff soil	200	12-17
Gravels, sands	200	8-12

표 3.6 무차원 계수 I 값 (Lizzi, 1985)

Diameter of pile (m)	I
$D = 0.10$	1.00
$D = 0.15$	0.90
$D = 0.20$	0.85
$D = 0.25$	0.80

3.1.2 Type B (Pressure-Grouted) 마이크로파일

Type B 마이크로파일은 Type A와는 달리 마이크로파일 Casing을 빼면서 압력을 가하여 그라우팅을 한다. 따라서 말뚝의 직경이 Casing의 직경보다 커지게 되며 이러한 연유로 Type B 마이크로파일의 주변마찰력(f_s)은 주입압에 의하여 좌우된다. 주변마찰력을 대상지반에 따라 산정하는 방법은 다음과 같다.

(1) 사질토

$$f_s = p_g \tan \bar{\phi} \quad (3.9)$$

여기서, p_g = 주입압

$\bar{\phi}$ = 흙의 유효마찰각, 주로 SPT로 구한 N 치와 ϕ 와의 관계에서 산정

Turner(1995)에 의하면

$$f_s = \beta \bar{\sigma}_{vz} \quad (3.10)$$

$$\beta = K' \tan \bar{\phi} \quad (3.11)$$

여기서, β = 깊이에 따른 상수

$\bar{\sigma}_{vz}$ = 깊이 z 에서의 유효수직응력

K' = 보정계수

$\bar{\phi}$ = 흙의 유효마찰각

이 방법은 사질토 및 자갈의 유효마찰각이 $30^\circ \sim 40^\circ$ 이고 주입압이 0.2~0.35 MPa 일 경우 K' 값의 크기는 4~7의 범위를 가지며 실험에 의해 제안된 식이다.

(2) 점성토와 연암

Type A와 같은 설계방법을 적용하여 설계한다. 특히 프랑스 시방서(CCTG, 1993)와 같은 방법으로 설계한다.

3.1.3 Type C, D (High-Pressure) 마이크로파일

Type C, D 마이크로파일은 1 Mpa 이상의 주입압으로 그라우팅한 말뚝으로 특히 연약한 지반과 지표면 부분에서의 주면마찰력의 증대에 효과적인 말뚝이다. 주입압에 의한 주면마찰력의 증가 크기는 이론적으로 산정이 불가능하므로, 설계시에는 경험식에 의하여 산정한다. 여러 가지 실험식이 있으나 일반적으로 설계에 적용하는 가장 대표적인 제안식을 제시한다. 이 방법은 여러 사람(Ostermayer, 1974; Fujita et al., 1977; Ostermayer and Scheele, 1978; Koreck, 1978; Jones and Turner, 1980; Jones and Spencer, 1984 등)에 의하여 연구된 것을 Bustamante and Doix(1985)가 정리한 경험치에 근거를 둔 것으로 다음과 같다.

주입압에 의한 직경의 확대는 다음 식으로 표현된다.

$$D = \alpha_c D_0 \tag{3.12}$$

여기서, D = 유효직경

α_c = 보정계수

D_0 = 주입전의 천공 직경

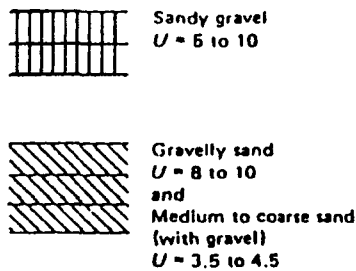
말뚝 종류와 대상 토질별 보정계수는 표 3.7에 수록되어 있다.

표 3.7 마이크로파일과 그라운드 앵커의 종류 및 토질에 따른 보정계수 (CCTG, 1993)

Soil type	Coefficient α_c			
	Anchor Type Micropile Type	⇒ ⇒	IGU Type C	IRS Type D
Gravel			1.3 - 1.4	1.8
Sandy Gravel			1.2 - 1.4	1.6 - 1.8
Gravelly Sand			1.2 - 1.3	1.5 - 1.6
Coarse Sand			1.1 - 1.2	1.4 - 1.5
Medium Sand			1.1 - 1.2	1.4 - 1.5
Fine Sand			1.1 - 1.2	1.4 - 1.5
Silty Sand			1.1 - 1.2	1.4 - 1.5
Silt			1.1 - 1.2	1.4 - 1.6
Clay			1.2	1.8 - 2.0
Marl			1.1 - 1.2	1.8

			SPT N (bl/0.3 m)
•	Gravelly sand $U = 1.6/0.16$	Very dense	120
♦		Dense	60
•		Medium dense	43
▲		Loose	11
x	Sandy gravel $U = 15/0.3$	Very dense	>130

where
 U Uniformity coefficient (D_{60}/D_{10})
 D_{60} Maximum particle size of the smallest 60 %
 D_{10} Maximum particle size of the smallest 10 %



Diameter of grouted bodies
 $D = 0.1$ m to 0.15 m

그림 3.3 앵커의 극한하중지지력 (Ostermayer and Scheele, 1978)

(2) 점성토

주면마찰력은 다음 식으로 산정한다.

$$f_s = \min [f_{s(p)} \text{ or } f_{s(s)}] \quad (3.13)$$

여기서, $f_{s(p)}$ = 극한주면마찰력, 그림 3.4에서 산정

$f_{s(s)}$ = 재주입에 의한 극한주면마찰력, 그림 3.5에서 산정

식 (3.13)의 적용시 Turner(1979)에 의하여 제시된 고려해야할 사항은

- ① 그림 3.4에서 초기주입압에의 주면마찰력을 설계에 적용한다. 단 대상지반이 그림 3.4의 토질과 일치하지 않을 경우는 앞에서 설명된 α 방법을 적용하여 주면마찰력을 산정한다.
- ② 대상토질이 그림 3.5에 제시한 것과 유사하고, 직경이 9.2~15 cm의 범위일 때는 그림 3.5에서 주면마찰력을 산정한다.

여기서 Turner(1995)에 의하여 설명된 바와 같이 재주입 효과에 의한 주면마찰력의 증가는 중간 내지

는 높은 소성의 점토질에 대한 연구에 바탕을 두기 때문에 그 외의 점성토인 경우에는 재주입압에 의한 주면마찰력의 증가는 현단계에서는 설계에 고려할 수 없다.

여기서 기술한 모든 설계방법은 경험식 내지는 이론식에 의하여 산정된 값이므로 설계에 적용시는 반드시 현장실험을 통하여 확인되어야 한다.

Failure load was reached	Failure load was not reached	Post-grouting	Type of soil	W_L %	I_p %	ρ / ρ_c %
▲	▲	Without	Silt, very sandy (marl) medium plasticity	~ 45	~ 22	~ 1.25
▲	▲	With				
●	○	Without	Clay (marl) medium plasticity	32-45	14-25	1.03-1.14
●	○	With				
●	○	Without				
●	○	With				
	○	Without	Silt medium plasticity	23-28	5-11	0.7-0.85
■		Without	Clay medium to high plasticity	48-58	23-35	1.1-1.2
■		With				
▼	▼	Without				

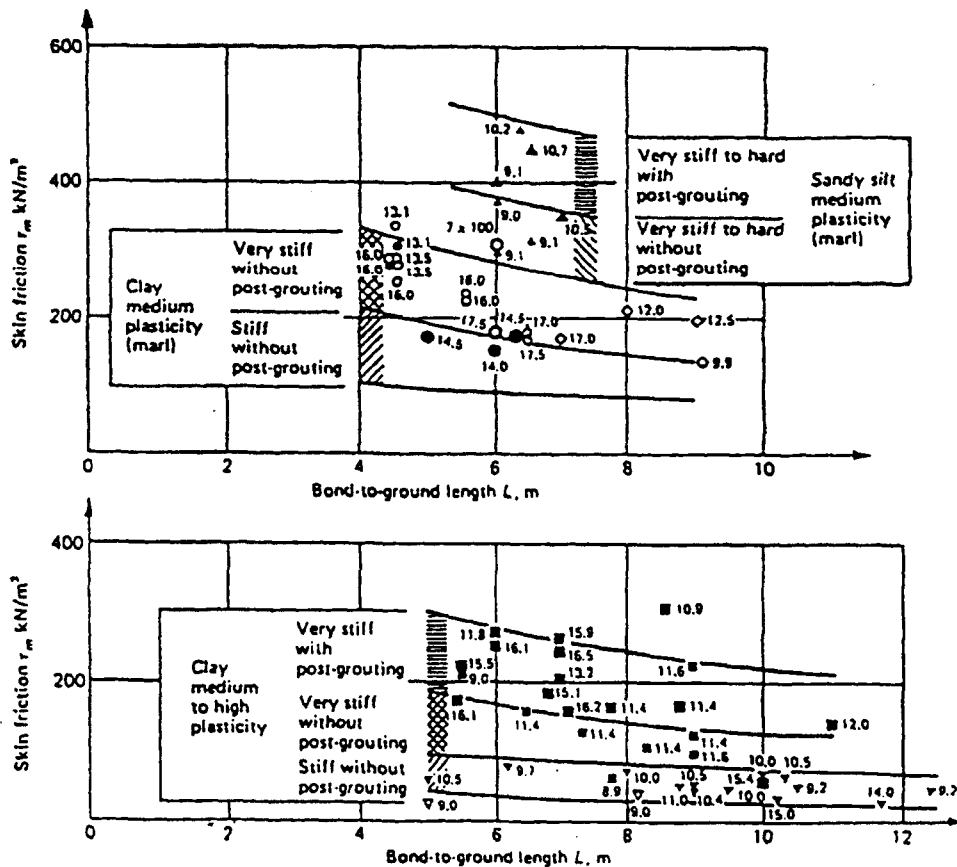


그림 3.4 점성토에서의 주면마찰력 (Ostermayer, 1975)

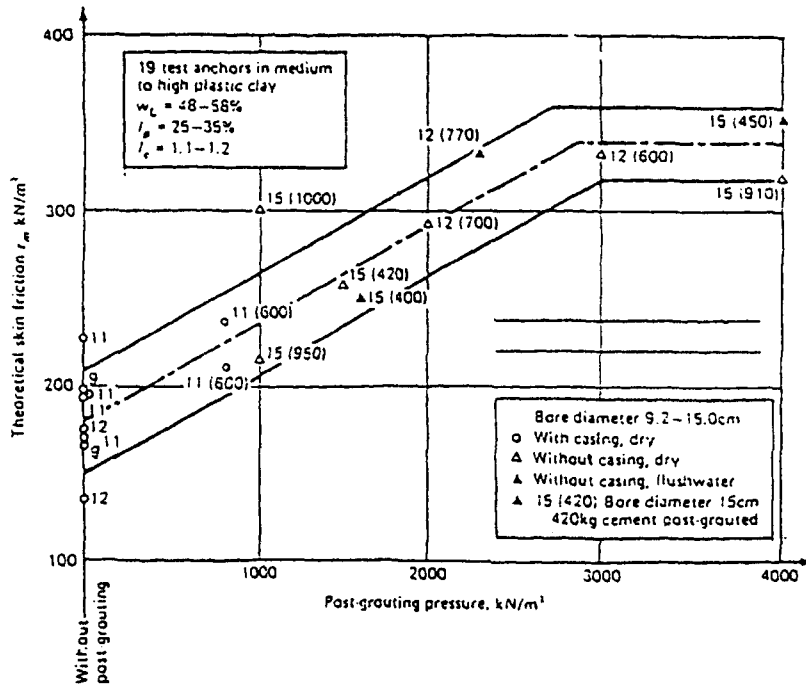


그림 3.5 포스트그라우팅 주입압에 따른 점성토에서의 주면마찰력 (Ostermayer, 1975)

표 3.8, 3.9에서 보여진대로 현장에서 실측된 마이크로파일 Type별 주면마찰력의 범위는, 시공방법과 시공자가 모두 각각 다름에도 불구하고, 앞에서 설명한 주면 마찰력(f_s) 산정 범위와 잘 일치한다. 따라서 앞에서 제시된 주면마찰력 산정방법은 마이크로파일의 축하중 지지력산정의 설계법으로 사용될 수 있다. 또한 표 3.8과 3.9는 주면마찰력 산정의 상한과 하한의 영역을 보여주는 현 단계의 기본영역으로 볼 수 있다.

표 3.8 극한주면마찰력

Soil Type	Ultimate Skin Friction (kN/m)			
	Cheney(1984) Ground anchors Type B	Lizzi(1985) Type B	Fondedile(1993) Root piles Type B	Nicholson (1989-1992) Pin-piles(Type B)
Soft Soil		16.5		72 120
Clayey Silt	22*			150
Stiff to Hard Clay	30 - 60*		112.5	123 225
Loose Soil		13.5 - 60		
Silty Sand	75 - 135			300
Soil of Average Compactness		78 - 105		225
Sand	105 - 285		135	630 375
Very Stiff Soil		132		
Dense Sand and Graval	150 - 300			450

* : Values obtained for augered anchors.

표 3.9 극한주면마찰력

Soil Type	Ultimate Skin Friction (kN/m) (ϕ assumed 200 mm)		Ultimate Skin Friction (kN/m)		
	CCTG (Type C)	CCTG (Type D)	Soletanche (1992)	Jorge, 1969 (Cheney, 1984)	Ostermayer (ϕ :10-15 mm)
Clays, Silts	A	<19	-		
	B	44 - 48	61 - 88	32 - 66	
	C	>50	109.5		
Sand, Gravel	A	<19	<19		51 - 66
	B	47 - 67	56 - 101		66 - 124
	C	>73	>131		124 - 168
Marls	A	88 - 146	111 - 161	50 - 61	73 - 146
	B	>161	>175		>146

ϕ : 마이크로파일의 직경

3.1.4 AASHTO, 1992, Design Code

미국에서의 마이크로파일 설계는 정립된 방법이 없으며, 일부 설계회사에서는 현장타설말뚝의 설계방법을 준용하고 있으나 이 방법은 과도한 설계법으로 알려져 있다. 여기서는 Drilled and Grouted Micropiles: state-of-Practice Review (FHWA, 1997)에 제시된 5개의 Design Code(표 4.1 참조)와 뒤에서 설명할 예제 문제(Modified French Code)를 통하여 각각의 마이크로파일 설계방법들을 비교하였다(4절 참조). 특히 마이크로파일 설계에 적용된 안전율은 현장타설말뚝에 적용한 것을 준용하고 있으며 표 3.10에 제시되었다.

표 3.10 제안된 안전율 (AASHTO, 1992)

Construction Control	Combination of Design / Construction control				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Subsurface Exploration	×	×	×	×	×
Static Calculation	×	×	×	×	×
Dynamic Formula	×				
Wave Equation		×	×	×	×
Dynamic Measurement and Analysis			×		×
Static Load Test				×	×
Factor of Safety	3.50	2.75	2.25	2.00 ⁽²⁾	1.90

(1) Construction control specified on plans

(2) For any combination of construction control that includes an approved static load test, a factor of safety of 2.00 may be used.

3.2 마이크로파일 그룹

3.2.1 축방향 극한지지력

무리말뚝의 축방향 극한지지력은 무리효율계수(group efficiency factor)와 직접적인 관계가 있다. 따라서 단일말뚝의 극한지지력을 산정하여 총 말뚝의 개수와 무리효율계수를 곱하여 전체무리말뚝의 축방향 극한지지력을 산정할 수 있다. 무리효율계수는 아래식과 같다.

$$\eta_v = \frac{Q_{gu}}{\sum_{i=1}^n Q_{iu}} \quad (3.14)$$

여기서, η_v = 무리효율계수 (group efficiency factor)

Q_{gu} = 무리말뚝의 축방향 극한지지력

Q_{iu} = 단일말뚝의 축방향 극한지지력

또한 무리말뚝의 경우 파괴가 블록형상으로 일어날 수 있으므로 블록파괴의 가능성에 대하여도 설계시 검토되어야 하며 블록파괴시 무리말뚝의 축방향 극한지지력은 식 (3.15)와 같다.

표 3.11 무리효율계수 η_v (French Code CCTG, 1993)

Soil Type Micropile Type	Cohesive	Cohesionless Loose and Medium Dense	Cohesionless Dense	Rock
Type A	$\eta_v = 1, s > 3D$ $\eta_v = \frac{1}{4} \left(1 + \frac{s}{D}\right), 1 \leq \frac{s}{D} \leq 3$ 블록파괴가능성 검토, 식 (3.15) 적용	식 (3.16) 블록파괴가능성 검토, 식 (3.15) 적용	식 (3.16) 블록파괴가능성 검토, 식 (3.15) 적용	$\eta_v = 1$
Type B, C, D	"	$\eta_v = 1$	"	$\eta_v = 1$

$$Q_{gu} = B_g L_g c N_c + 2(B_g + L_g) L c_{av} \quad (3.15)$$

여기서, Q_{gu} = 무리말뚝의 극한지지력

c = 말뚝저부의 점착력

L = 말뚝의 길이

N_c = 깊이 L 에서의 지지력계수

c_{av} = 지표면과 깊이 L 사이의 평균점착력

B_g = 무리말뚝의 가로길이

L_g = 무리말뚝의 세로길이

$$\eta_{ht} = 0.5791 \left(\frac{s}{D}\right)^{0.3251} \quad \text{for } 1 \leq \frac{s}{D} \leq 5.37 \quad (3.20)$$

$$\eta_{ht} = 1.0 \quad \text{for } \frac{s}{D} \geq 5.37 \quad (3.21)$$

여기서, s = 말뚝의 간격
 D = 말뚝의 직경

여기서 단일말뚝의 수평하중지지력은 Broms의 일반 말뚝의 수평하중지지력 산정과 같은 방법으로 구할 수 있다. 그러나 좀더 정밀한 설계를 위해 프로그램 COM624P, FLPier, FB Pier, Group 등으로 수평하중지지력을 산정할 수 있다.

3.3 구조설계 (Internal Structure Design)

마이크로파일은 일반적인 말뚝과는 다르게 좌굴에 대한 검토가 설계에 포함된다. 마이크로파일의 특성상 시공중에 마이크로파일의 주변이 흙으로 완전히 채워지지 않거나 혹은 말뚝 주변의 흙의 탄성계수 (E_s)가 0.5 MPa 미만일 경우 좌굴에 대한 안정성을 검토해야 한다. 이러한 경우 다음에 제시하는 식으로 마이크로파일의 좌굴이 일어나는 하중(F_{cb})을 산정할 수 있다.

$$F_{cb} = n_e^2 \times F_{ce} + \frac{1}{n_e^2} \frac{f_e^2}{F_{ce}} \quad (3.22)$$

여기서, $F_{ce} = \frac{\pi^2 E_p I_p}{4L^2}$ (자유단의 경우)

$$F_{ce} = \frac{\pi^2 E_p I_p}{L^2} \quad (\text{고정단의 경우})$$

$$f_e = \sqrt{E_p I_p E_s}, \quad l_0 = \sqrt[4]{\frac{4E_p I_p}{E_s}}$$

F_{ce} = Refers to the critical Euler buckling force

E_p = 말뚝의 탄성계수

I_p = 말뚝의 단면 2차모멘트

E_s = 말뚝 주변 지반의 탄성계수

L = 말뚝의 길이 ($L = 2l$)

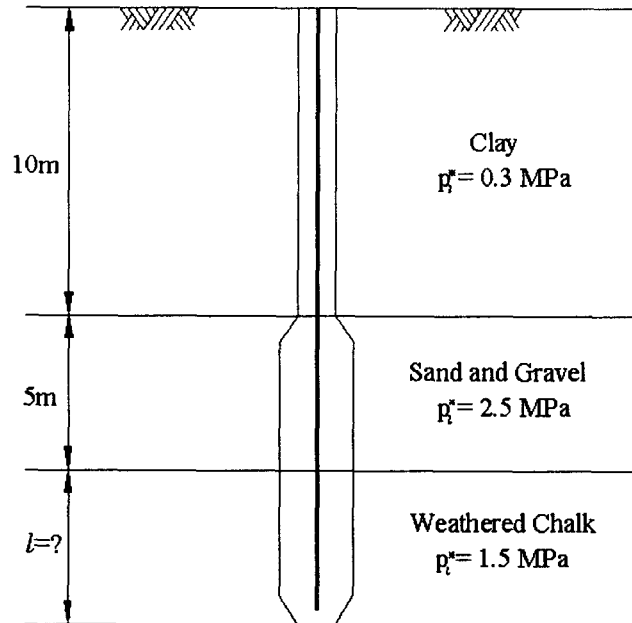
l_0 = Transfer length

D = 말뚝의 직경

n_e = 식 (3.22)의 주어진 조건에서 F_{cb} 값이 최소가 될 때의 정수값

4. 마이크로파일 설계 예

다음 그림과 같은 토질조건에서 Chalk층에서의 마이크로파일의 근입깊이를 결정하라.



Assumptions :

- Type C & D 마이크로파일
- $D = 100 \text{ mm}$ (굴착직경)
- Steel reinforcement : GEWI bar 50 mm
- 설계하중 : $P = 638 \text{ kN}$
- Service Life : $SL = 100 \text{ years}$

4.1 설계 결과 비교

여러 나라의 Design Code를 이용하여 Chalk층에서의 Type D 마이크로파일의 근입깊이를 계산한 결과는 아래 표 4.1과 같다.

표 4.1 Design Code 별 설계 결과치 비교

	French Code CCTG (1993)	German Code DIN 4128	U.S. Code AASHTO (1992)	British Code BS-8081 (1989)	PTI (1986)
Correction coefficient	-	2.0	-	-	-
F.S.	1.4	2.0	2.5	3.0	3.0
Q_{gravel} (kN)	202	235.5	120.57	260	260
Q_{chalk} (kN)	436	402.5	517.43	378	388
The required embedment length in the weathered chalk (m)	13.90	12.81	15.67	8.40	8.95

4.2 Modified French Code

4.2.1 Gravel

주어진 지반조건에서 $p_i^* = 2.5$ MPa 이므로 표 3.3에서 Soil Type을 B로, 표 3.4에서 Qi curve는 Q5로 결정한다.

그림 3.2에서 $p_i^* = 2.5$ MPa 과 Q5 curve의 조건으로부터 $q_s = f_s = 0.18$ MPa = 180 kPa 이다.

French Code에서 극한한계상태일 때의 안전율은 1.4이므로 F.S. = 1.4 적용한다.

주어진 토질조건이 Sandy Gravel이므로 표 3.7을 이용하여 Type C 마이크로파일일 때 $\alpha = 1.3$, Type D 마이크로파일일 때 $\alpha = 1.7$ 로 선정한다.

For Type C 마이크로파일

$$\begin{aligned} Q_{gravel} &= \frac{L_1 \times \pi \times D \times \alpha \times f_s}{F.S.} \\ &= \frac{5 \times \pi \times 0.1 \times 1.3 \times 180}{1.4} \\ &= 262.4 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

For Type D 마이크로파일

$$\begin{aligned} Q_{gravel} &= \frac{L_1 \times \pi \times D \times \alpha \times f_s}{F.S.} \\ &= \frac{5 \times \pi \times 0.1 \times 1.7 \times 180}{1.4} \\ &= 343.2 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

4.2.2 Chalk

For Type C 마이크로파일

$$\begin{aligned} Q_{chalk} &= 638 - 262.4 \\ &= 375.6 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

For Type D 마이크로파일

$$\begin{aligned} Q_{chalk} &= 638 - 343.2 \\ &= 294.8 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

표 3.4에서 Type C 마이크로파일은 Q5 curve, Type D 마이크로파일은 Q6 curve로 선정한다.

표 3.7에서 Chalk에 대한 확대계수는 제시된 값이 없으므로 확대계수는 적용하지 않는다. Chalk 층의 $p_l^* = 1.5 \text{ MPa}$ 이므로 그림 3.2에서 주변마찰력을 구하면

For Type C 마이크로파일

$$f_s = 140 \text{ kPa}$$

For Type D 마이크로파일

$$f_s = 180 \text{ kPa}$$

따라서, Chalk층에서의 마이크로파일의 근입깊이는

For Type C 마이크로파일

$$l_c = \frac{375.6 \times 1.4}{\pi \times 0.1 \times 140} = 11.96 \text{ (m)}$$

For Type D 마이크로파일

$$l_d = \frac{294.8 \times 1.4}{\pi \times 0.1 \times 180} = 7.31 \text{ (m)}$$

참 고 문 헌

- (1) AASHTO(1977), *Standard Specification for Highway Bridges*, Washington, DC, 469 pp., Revised 1992.
- (2) Amour, T., Groneck, P., Keeley, J., and Sharma, S.(2000), *Micropile Design and Construction Guidelines : Implementation Manual*, FHWA-SA-97-070, Federal Highway Administration, June.
- (3) Bruce, D. A.(1994), "Small-Diameter Cast-in-Place Elements for Load Bearing and In Situ Earth Reinforcement," Chapter 6 in *Ground Control and Improvement* by Xanthakos, P. P., Abramson, L. W., and Bruce, D. A., John Wiley and Sons, 87 pp.
- (4) Bruce, D. A., and Juran, I.(1997), *Drilled and Grouted Micropiles : State-of-Practice Review*, FHWA-RD-96-019, Federal Highway Administration, July.
- (5) Bustamante, M., and Doix, B.(1985), *Une Méthode pour le Calcul des Tirants et des Micropieux Injéctés*, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, LCPC, Paris, Nov.-Dec., pp. 75-92.
- (6) CCTG, Fascicule 62, Titre V(1992), *Technical Rules for the Design and Calculation of the Foundation of the Civil Engineering Works*, September.
- (7) Littlejohn, G. S., and Bruce, D. A.(1977), *Rock Anchors-State of the Art*, Foundation Publication Ltd., Brentwood, Essex, England, 50 pp.
- (8) Littlejohn, G. S.(1990), *Ground Anchorage Practice*, ASCE Conference, Design and Performance

- of Earth Retaining Structures, Cornell University, Ithaca, New York, June 18-21, pp. 692-733.
- (9) Lizzi, F.(1985), *Pali Radice (Root Piles) and Reticulated Pali Radice*, Underpinning, Surrey University Press, pp. 84-151.
- (10) O'Neill, M. W., and Hassan, K.(1994), "Drilled Shafts: Effects on Construction on Performance and Design Criteria," *Proceedings*, International Conference on Design and Construction of Deep Foundation, Vol. 1, December, pp. 137-187.
- (11) Ostermayer, M., and Scheele, F.(1978), "Research on Ground Anchors in Non-Cohesive Soils," *Revue Francaise de Geotechnique*, No. 3, pp. 92-97.
- (12) Pearlman, Seth L., Campbell, B. D., and Whitiam, J. L.(1992), "Slope Stabilization Using In Situ Earth Reinforcement," ASCE Specialty Conference on Stability and Performance of Slopes and Embankments, Vol. 2, Berkeley, CA, June.
- (13) Tomlinson, M. J.(1957), "The Adhesion of Piles Driven in Clay Soils," *Proceedings*, 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 66-71.
- (14) Turner, M. J.(1995), *Mike Turner Design Guides for Micropiles*, Personal Communication.