

# Technical Manual for HGEO-FDN



## 목차

<b>1. 개요</b>	<b>5</b>
1.1 프로그램의 특징 및 기능	5
1.1.1 프로그램의 특징	5
1.1.2 프로그램의 주요 기능	5
1.1.2.1 직접기초	5
1.1.2.2 말뚝기초	6
1.2 프로그램의 구성	7
1.2.1 단계별 구성	7
1.2.2 직접기초	7
1.2.2.1 General Information	7
1.2.2.2 Soil Layer Information	8
1.2.2.3 Foundation Information	9
1.2.2.4 Settlement Calculation	10
1.2.2.5 Bearing Capacity Calculation	11
1.2.2.6 Result & Report	12
1.2.3 말뚝기초	13
1.2.3.1 General Information	13
1.2.3.2 Soil Layer Information	13
1.2.3.3 Pile Information	14
1.2.3.4 Bearing Capacity Calculation	15
1.2.3.5 Bearing Capacity Calculation (Micro Pile)	17
1.2.3.6 Result & Report	18
<b>2. 토질분류 및 특성</b>	<b>19</b>
2.1 토질분류 및 토질 정수	19
2.1.1 토질분류	19
2.1.2 설계에 사용하는 토질정수	20

2.2	연약지반의 분류 .....	22
2.2.1	연약지반의 판단기준 .....	22
2.2.2	연약지반의 고려 .....	23
2.3	지하수위 .....	23
3.	직접기초 .....	24
3.1	직접기초의 지지력 산정 .....	24
3.2	지중응력분포 .....	24
3.2.1	탄성이론에 근거한 이론식(Boussinesq's method) .....	24
3.2.1.1	구형하중 (Rectangular Load) .....	24
3.2.1.2	띠형하중 (Strip Load) .....	24
3.2.1.3	원형하중 (Circular Load) .....	25
3.2.2	2:1 Method .....	25
3.3	침하계산 .....	26
3.3.1	탄성(즉시)침하 .....	26
3.3.1.1	Schmertmann's Method .....	26
3.3.1.2	Elastic Theory .....	27
3.3.2	압밀침하 .....	28
3.3.2.1	압축지수 이용 .....	28
3.3.2.2	체적압축계수 이용 .....	29
3.4	극한지지력 계산 .....	29
3.4.1	BS Code .....	29
3.4.1.1	Coarse Soils (Sands and gravels) .....	29
3.4.1.2	Fine Soils (Silts and Clays) .....	31
3.4.2	AASHTO .....	31
4.	말뚝기초 .....	31
4.1	말뚝의 지지력 .....	31

<b>4.2</b>	<b>항타말뚝(Driven) 지지력 계산</b>	32
<b>4.2.1</b>	<b>주면마찰저항(Shaft Resistance) 계산</b>	32
4.2.1.1	Sandy Soil	32
4.2.1.2	Clayey Soil	34
<b>4.2.2</b>	<b>선단지지력(End Bearing) 계산</b>	34
4.2.2.1	Sandy Soil	34
4.2.2.2	Clayey Soil	35
<b>4.3</b>	<b>현장타설말뚝(Bored Pile) 지지력 계산</b>	36
<b>4.3.1</b>	<b>주면마찰저항(Shaft Resistance) 계산</b>	36
4.3.1.1	Sandy Soil	36
4.3.1.2	Clayey Soil	36
<b>4.3.2</b>	<b>선단지지력(End Bearing) 계산</b>	37
4.3.2.1	Sandy Soil	37
4.3.2.2	Clayey Soil	37
<b>4.4</b>	<b>마이크로파일(Micropile) 지지력 계산</b>	38
<b>4.4.1</b>	<b>마이크로파일 개요</b>	38
<b>4.4.2</b>	<b>마이크로파일의 설계 컨셉</b>	39
<b>4.4.3</b>	<b>마이크로파일의 지지력</b>	40
<b>4.4.4</b>	<b>마이크로파일 재료의 허용하중(Structural Design)</b>	41
4.4.4.1	상부 케이싱 설치구간 축방향 허용하중	41
4.4.4.2	하부 케이싱 미설치구간 축방향 허용하중	42
<b>4.4.5</b>	<b>수평방향 허용하중</b>	43
4.4.5.1	p-y analysis	43
4.4.5.2	말뚝 두부조건(Micro Pile – Footing connection)	44
<b>4.4.6</b>	<b>좌굴검토</b>	45

## 1. 개요

### 1.1 프로그램의 특징 및 기능

#### 1.1.1 프로그램의 특징

HGEO-FDN 는 직접기초와 말뚝기초를 대상으로 자동화된 지지력 제공을 그 목적으로 하는 프로그램이다. 직접기초의 경우 지반 지지력과 기초 침하량 기준을 모두 만족하는 지반 지내력을 제공하며, 하부 연약지반의 압밀침하가 예상되는 경우 이를 고려한 지내력 산정이 가능하다. 또한 프로젝트 수행 국가에서 주로 통용되는 Code 를 선택하여 계산방법을 일괄 변경할 수 있으며, 현재는 BS Code 와 AASHTO 가 구현된 상태이다. 말뚝기초는 제원·재료·시공방법(Driven/Bored)별 지지력 계산이 가능하며, 특히 압축, 인발지지력 산정에 주안점을 두었다. 계산된 지지력 및 상세 계산 과정은 보고서 형태로 출력이 가능하다.

#### 1.1.2 프로그램의 주요 기능

본 프로그램의 주요기능을 요약하면 다음과 같다.

##### 1.1.2.1 직접기초

- SPT N 치에 기반한 시추공의 정보 저장 및 불러오기가 가능하며, 복수의 시추공에 대한 동시 계산 수행이 가능
- 각 시추공에 대해 지층 정보를 제한 없이 추가하여 보다 상세한 계산 가능
- 연약지반 존재에 따른 압밀 계산 여부 선택 가능
- 기존 제공하던 기초 규격, 근입심도별 지지력 외에도 규격 외 기초에 대한 개별 입력이 가능함
- 직사각형, 원형, 띠형 기초에 대한 지지력 계산 가능
- Boussinesq 식 및 2:1 응력분포법에 의한 응력증가량 계산
- 침하계산은 Schmertmann's Settlement Calculation 을 기반으로 하며, 추가로 탄성론에 의한 침하계산이 가능함

- Code 선택에 따라 직접기초 지지력 공식 변경 적용, 기존의 이론 공식(Terzaghi, Meyerhof, Hansen 등)을 동시에 계산하여 결과 비교 가능.
- 하부 지층 물성치를 최악의 조건(Worst Condition) 및 가중평균을 이용하여 선별 적용 가능.
- 요약된 계산결과를 프로그램 화면상에서 확인할 수 있으며, 상세한 계산 결과는 보고서 형태로 출력 가능.

### 1.1.2.2 말뚝기초

- SPT N 치에 기반한 시추공 정보 저장/불러오기가 가능하며, 복수의 시추공에 대해 동시 계산을 수행함.
- 연약지반 존재에 따른 주면마찰력 고려 여부 선택 가능
- 말뚝 형식별(Driven or Bored) 말뚝 재료 기준을 반영한 지지력 제공
- 말뚝 재료별 제원의 Database화로 설계 적용성 극대화
- 토질 조건 등을 고려하여  $\alpha$  method,  $\beta$  method, SPT N 등 사용자가 계산방법을 선택하여 주면, 선단 지지력 계산 가능
- 지지력 산정 결과는 성과품 제출을 위해 보고서 형태로 출력 가능.

### 1.2 프로그램의 구성

#### 1.2.1 단계별 구성

본 프로그램은 단계별로 지지력 산정에 필요한 값들을 입력하도록 되어있으며, 일련의 과정을 거침으로써 입력 데이터의 누락을 방지하고 반복 작업을 최소화하고자 하였다. 각 단계는 탭(Tab) 형태로 분리되어 있으며 직접기초 및 말뚝기초 선택 시 다른 프로세스를 거치게 된다. 단, 지반조건(Soil Layer Information) 탭은 직접기초와 말뚝기초에서 거의 동일하며(각 경우에서 압밀관련 정수 및 주면마찰력 고려 여부는 별개로 입력 필요), 해당 입력값을 공유할 수 있다.

#### 1.2.2 직접기초

##### 1.2.2.1 General Information

- 프로젝트 명, 국가, 해당 국가에서 선호되는 Code & Standard 을 선택할 수 있다.
- Project Operation Period : 직접기초 지지력 산정 시 입력하며 압밀침하 및 탄성침하에서의 Creep 영향 계산에 사용된다.
- Code & Standard : 직접기초의 경우에만 선택하며, 현재 BS Code 와 AASHTO 가 구현된 상태이다.

The screenshot displays the 'General Information' tab of the HGEO-FDN software. The interface includes a menu bar with 'File', 'Report', and 'Help'. The main window shows the following fields:

- Project Name: Dream comes true
- Country: Paradise
- Foundation Type: Shallow
- Code & Standard: BS Code
- Project Operation Period: 30 (year)
- Document Created: 2022-11-15
- Notes: (Empty text area)

Figure 1 Shallow - General information Tab

## 1.2.2.2 Soil Layer Information

- 지지력 산정을 위해 필요한 지반조건 및 물성치를 입력하는 탭으로, 시추공별로 층을 나눠 입력이 가능하다.
- Source of Information : 토질 조건을 입력하는 데 기반이 되는 지반조사 데이터로 SPT, CPT, PMT 등을 선택할 수 있으며, 현재는 SPT 만 구현이 된 상태이다.
- 직접기초 지지력 계산을 위해 탄성계수(E), 전단강도(c), 내부마찰각( $\phi$ )이 필요하며 모든 물성치는 입력된 지반조사 데이터 결과(SPT 등)에 따라 자동계산되거나 직접 값을 입력(User)할 수도 있다. 지지력 산정에 필요한 토질 정수 및 물성치에 대한 상세는 '2.1.2 설계에 사용하는 토질정수' 부분 참조.
- 시추공별로 입력된 데이터는 엑셀 형태로 저장(Export) 및 불러오기(Import)가 가능하며, 편리성을 위해 엑셀에서 필요한 데이터를 작성한 후 불러오기로 일괄 입력할 수 있다.
- **[Consolidation]** 체크박스를 선택하면 압밀관련 정수를 입력할 수 있는 칸이 생성된다. 압밀계산을 위해 압축지수( $C_c$ )나 압축계수( $a_v$ )를 선택할 수 있으며 초기간극비( $e_0$ )는 공통으로 입력이 필요하다.

시추공 추가, 삭제, 입력된 자료 저장(Export) 및 불러오기(Import)

Source of Information: SPT

Soil Layer Information

Soil Data Sheet Add Borehole Delete Borehole

지반조사 결과(SPT 등) 입력

Consolidation 선택 시 압밀 계산 가능

No.	Soil Depth (GL-m)	Soil Thk. (m)	Unit Weight $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	Soil Type	SPT N	Elastic modulus E (kPa)	Undrained Shear Strength (kPa)	Consolidation	Cc	e0
1	2.0	2.0	17.0	Sand	15	E=1000N 15,000	User			
2	2.0	4.0	18.0	Sand	15	E=1000N 15,000	User			
3	2.0	6.0	18.0	Clay	10	E=400N 4,000	C=6.25N 60.00			0.855
4	2.0	8.0	18.0	Sand	20	E=1000N 20,000	User			
5	2.0	10.0	18.0	Sand	25	E=1000N 25,000	User			
6	2.0	12.0	18.0	Sand	25	E=1000N 25,000	User			
7	2.0	14.0	18.0	Sand	20	E=1000N 20,000	User			
8	2.0	16.0	18.0	Sand	30	E=1000N 30,000	User			
9	2.0	18.0	18.0	Sand	35	E=1000N 35,000	User			
10	2.0	20.0	18.0	Sand	35	E=1000N 35,000	User			
11	10.0	30.0	18.0	Sand	40	E=1000N 40,000	User			
12	30.0	60.0	19.0	Sand	50	E=1000N 50,000	User			
13	50.0	110.0	19.0	Sand	50	E=1000N 50,000	User			

Save Next

Figure 2 Shallow - Soil Layer Information Tab



## 1.2.2.3 Foundation Information

- 물의 단위중량(기본값=9.81kN/m<sup>3</sup>), 지하수위, 기초의 형상(원형, 띠형, 직사각형), 크기 및 근입심도 등을 입력할 수 있는 탭이다.
- Foundation Matrix Type : 기초 규격, 근입심도에 따른 지지력을 표 형태로 출력하기 위해 기초 폭(B), 기초 길이/폭 비 (L/B), 근입심도 (D<sub>f</sub>)를 각각 **선택표**로 구분하여 입력해야 한다. 예를 들어 기초 폭이 각각 1m, 2m, 3m, 4m, 5m 이고 L/B 비가 1, 2, 3, 4, 5 이며 근입심도가 1m, 2m, 3m 인 여러 기초에 대한 지지력을 한번에 산정하기 위해서는 아래 Figure 3 과 같이 입력이 필요하다. 입력 결과 총 75 가지 기초 케이스에 대한 지지력이 표 형태로 출력된다.
- Foundation Type : Foundation Matrix Type 의 결과에 포함되지 않는 규격 외 기초에 대한 지지력 산정이 필요한 경우, 예를 들어 폭이 3m, 길이가 4m, 근입심도가 1.5m 인 개별기초에 대한 계산은 'Foundation Type'에 별도로 입력하여 동시 계산이 가능하다. 입력 예시는 아래 Figure 3 참조.

The screenshot displays the 'Foundation Information' tab in the HGEO-FDN software. The interface is divided into several sections:

- Information:** Contains input fields for 'Unit Weight of Water (kN/m<sup>3</sup>)' (value: 9.81), 'Groundwater Depth d (m)' (value: 3), and 'Footing Type' (dropdown: Rectangular).
- Foundation Matrix Type:** This section is highlighted with a red box. It contains input fields for 'Foundation Width B (m)' (value: 1,2,3,4,5), 'L/B Ratio' (value: 1,2,3,4,5), and 'Foundation Depth D<sub>f</sub> (m)' (value: 1,2,3). To the right of these fields, a red text box states: '기초 규격, 근입심도에 따른 지지력을 표 형태로 출력. 선택표로 입력값 구분'.
- Foundation Type:** This section is also highlighted with a red box. It contains a table for 'Customized' foundation parameters:
 

Customized	
Foundation Width B (m)	3
Foundation L/B Ratio	1.33
Foundation Depth D <sub>f</sub> (m)	1.5
- Diagram:** On the right side, there is a diagram of a foundation. It shows a rectangular foundation of width 'B' and depth 'D<sub>f</sub>' embedded in the ground. The groundwater level is indicated by a blue triangle at depth 'd'.

At the bottom right of the window, there are 'Save' and 'Next' buttons.

Figure 3 Shallow - Foundation Information Tab

### 1.2.2.4 Settlement Calculation

- 침하계산을 위해 필요한 정보를 입력하는 탭이다. 'Calculation Purpose'에서는 침하계산 목적을 선택할 수 있으며, **[Target Settlement]**를 선택할 경우 지반 지내력을 계산하기 위한 허용 침하량을 빈칸에 입력해야 한다. 지반 지내력이 목적이 아니라 상부 하중에 의한 침하 정도를 계산하고자 하는 경우에는 **[Settlement under Load q(kPa)]** 선택 후 빈칸에 상부하중 q(kPa)를 입력하면 된다.
- Settlement Calculation method : 기본적인 탄성침하 계산 방법으로 BS code, AASHTO 모두 Schmertmann's Settlement Calculation 을 적용하고 있다.
- Additional Method : Schmertmann's method 외에 다른 방법으로 탄성침하를 계산할 수 있으며, 탄성론에 의한 침하량 산정 방법을 옵션으로 선택할 수 있다.
- Stress Distribution for Consolidation Settlement Calculation : 압밀침하 계산 시 응력분포를 고려하기 위한 항목이다. Boussinesq 방법이나 2:1 응력분포법을 선택할 수 있으며, 기본적으로 Boussinesq 방법을 적용한다.

Calculation Purpose: Target Settlement (mm) 25

Settlement Calculation Method: Schmertmann's Settlement Calculation

$$S_i = C_i C_{\gamma} (q - q') \sum \frac{I_z}{E}$$

Additional Method: Equation from the Theory of Elasticity

$$S_i = q_0 B' \frac{1 - \nu^2}{E_s} m I_s I_F$$

Stress Distribution for Consolidation Settlement Calculation: Boussinesq's Method

- 지반 지내력 산정 시 **[Target Settlement]** 선택 후 허용 침하량 입력

- 지내력과 무관하게 상부 하중(q)에 의한 침하량 산정 시 **[Settlement under load q(kPa)]** 선택 후 상부하중 입력

Figure 4 Shallow - Settlement Calculation Tab

### 1.2.2.5 Bearing Capacity Calculation

- Factor of Safety : 극한지지력에서 허용지지력을 계산하기 위한 안전율을 입력하며, 기본적으로 3 을 적용한다.
- Bearing Capacity Calculation Method : General Information 탭에서 선택한 Code & Standard 에 따라 결정되며, 각 Code 에서 극한지지력 계산 시 사용하는 식이 표시된다.
- Additional Method : Terzaghi, Meyerhof, Hansen 등 다른 방법으로 극한지지력을 계산하여 그 결과를 비교할 수 있다.
- Sub-layer Strength Properties (c,  $\Phi$ ) : 극한지지력 계산 시, 하부 지반이 다층인 경우가 많다. 이 때 각 층의 강도정수 중 가장 불리한 값을 적용하여 보수적인 결과를 얻기 위해서는 Worst Condition, 각 층의 두께에 따라 강도정수를 가중평균으로 적용하고 싶을 경우 Weighted Average 를 선택한다.

HGeo-FDN [HGeo-FDN\_20221117.bcs]

File Report Help

General Information Soil Layer Information Foundation Information Settlement Calculation **Bearing Capacity Calculation**

Factor of Safety

Bearing Capacity Calculation Method

For Coarse Soils  

$$R_u/A' = c' N_c s_c i_c d_c g_c r_c + q' N_q b_q s_q i_q d_q g_q r_q + 0.5 \gamma' B' N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma d_\gamma g_\gamma r_\gamma$$

For Fine Soils  

$$R_u/A' = N_c c_u s_c d_c + q_{vb}$$

Additional Method

$$q_u = \alpha c N_c + \beta \gamma B' N_\gamma + q N_q$$

Sub-layer Strength Properties (c,  $\Phi$ )

Diagram: Foundation width B, depth D<sub>f</sub>

Save Next

Figure 5 Shallow - Bearing Capacity Calculation Tab

## 1.2.2.6 Result & Report

- Figure 6 에서 상부 메뉴 중 Report - Export to Excel 메뉴를 선택하면 보고서형태로 결과를 출력할 수 있다.
- 지반 지내력 계산을 위해서는 Result 탭을 제외한 모든 탭에서의 입력 과정을 완료해야 하며, 침하량만 계산하고자 하는 경우(Calculation Purpose : Settlement under Load q)에는 'Settlement Calculation' 탭까지만 완료하면 된다.
- Export to Excel 메뉴 선택 시 팝업되는 창에서 출력하고자하는 결과 항목을 선별할 수 있다. 예를 들어 시추공(Borehole), 기초 규격(Matrix form or 개별기초), 침하 계산 방법(Settlement), 지지력 계산 방법(Bearing Capacity) 중 출력하고 싶은 항목만 체크하여 보고서로 작성할 수 있다.

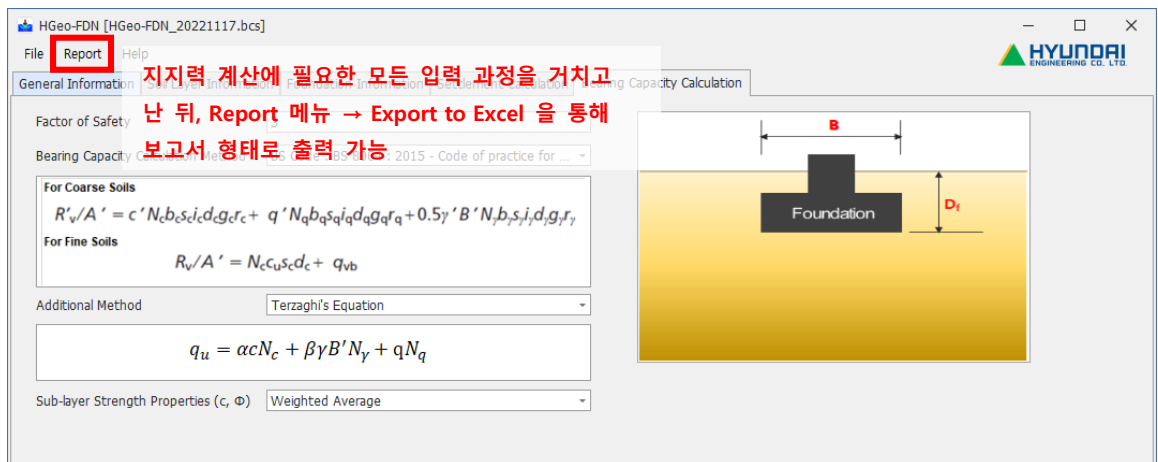


Figure 6 Shallow - Result Tab

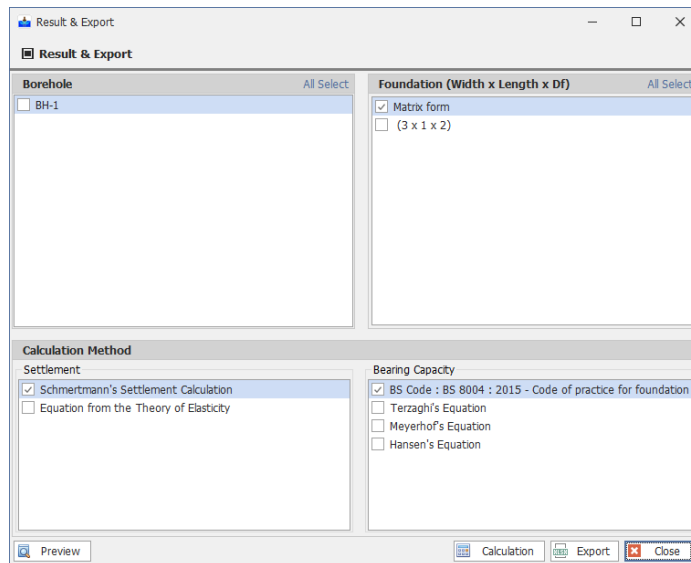


Figure 7 Result Export to Excel 메뉴 선택 시 팝업 : 보고서 출력항목 선택

### 1.2.3 말뚝기초

#### 1.2.3.1 General Information

- General Information 탭에서 Foundation Type 을 **[Pile]**로 선택 시 단계별 탭이 재구성 된다. 말뚝기초 지지력 계산 시에는 Code & Standard 및 Project Operation Period 는 입력이 불필요하며, 블라인드 처리된다.

The screenshot displays the HGEO-FDN software window with the title bar 'HGeo-FDN [HGeo-FDN\_20221118-Pile.bcs]'. The menu bar includes 'File', 'Report', and 'Help'. The 'General Information' tab is active, showing fields for 'Project Name' (Dream comes true), 'Country' (Paradise), and 'Foundation Type' (Pile). A 'Document Created' dropdown shows '2022-11-18'. A 'Notes' text area is present below these fields. The bottom right corner has 'Save' and 'Next' buttons. The Hyundai Engineering Co., Ltd. logo is in the top right corner.

Figure 8 Pile – General Information Tab

#### 1.2.3.2 Soil Layer Information

- 직접기초의 Soil Layer Information 과 [Skin Friction] 부분을 제외하고는 동일하며 데이터를 서로 공유할 수 있다. Soil Data 를 저장/불러오기 시 Soil Thickness, 단위중량, Soil Type, 지반조사 결과 데이터(SPT N 등)만 유효데이터로 간주하므로, 직접기초에서 Export 했던 데이터를 동일하게 Import 해서 사용할 수 있다.
- **[Skin Friction]** : 말뚝기초 지지력 산정 시에만 선택 가능하며, 연약지반의 영향을 고려하기 위한 항목이다. 연약지반이 존재할 경우 해당 지층 상부의 주변마찰력은 고려하지 않는 경우가 많다. 주변마찰력을 계산하고자 하는 지층에 대해서만 체크를 해주고, 주변마찰력을 무시하고자 하는 지층에 대해서는 체크를 해제하면 된다.

Source of Information: SPT

Groundwater Level (GL-m): 0

ERr (Energy Efficiency): 60

No.	Soil Depth (GL-m)	Soil Thk. (m)	Unit Weight $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	Soil Type	SPT N	Elastic modulus E (kPa)		Undrained Shear Strength c (kPa)		Friction Angle $\Phi$ (degrees)		Skin Friction
						Method	Value	Method	Value	Method	Value	
1	2.0	2.0	17.0	Sand	15	E=1000N	15,000	User		$\Phi=\sqrt{12N+15}$	28	<input checked="" type="checkbox"/>
2	2.0	4.0	18.0	Sand	15	E=1000N	15,000	User		$\Phi=\sqrt{12N+15}$	28	<input checked="" type="checkbox"/>
3	2.0	6.0	18.0	Clay	10	E=400N	4,000	C=6.25N	60.00	User		<input checked="" type="checkbox"/>
4	2.0	8.0	18.0	Sand	20	E=1000N	20,000	User		$\Phi=\sqrt{12N+15}$	30	<input checked="" type="checkbox"/>
5	2.0	10.0	18.0	Sand	25	E=1000N	25,000	User		$\Phi=\sqrt{12N+15}$	32	<input checked="" type="checkbox"/>
6	2.0	12.0	18.0	Sand	25	E=1000N	25,000	User		$\Phi=\sqrt{12N+15}$	32	<input checked="" type="checkbox"/>
7	2.0	14.0	18.0	Sand	20	E=1000N	20,000	User		$\Phi=\sqrt{12N+15}$	30	<input checked="" type="checkbox"/>
8	2.0	16.0	18.0	Sand	30	E=1000N	30,000	User		$\Phi=\sqrt{12N+15}$	34	<input checked="" type="checkbox"/>
9	2.0	18.0	18.0	Sand	35	E=1000N	35,000	User		$\Phi=\sqrt{12N+15}$	35	<input checked="" type="checkbox"/>
10	2.0	20.0	18.0	Sand	35	E=1000N	35,000	User		$\Phi=\sqrt{12N+15}$	35	<input checked="" type="checkbox"/>
11	10.0	30.0	18.0	Sand	40	E=1000N	40,000	User		$\Phi=\sqrt{12N+15}$	36	<input checked="" type="checkbox"/>
12	30.0	60.0	19.0	Sand	50	E=1000N	50,000	User		$\Phi=\sqrt{12N+15}$	36	<input checked="" type="checkbox"/>
13	50.0	110.0	19.0	Sand	50	E=1000N	50,000	User		$\Phi=\sqrt{12N+15}$	36	<input checked="" type="checkbox"/>

주면 마찰력 적용 여부 선택

Figure 9 Pile – Soil Layer Information Tab

## 1.2.3.3 Pile Information

- 말뚝 지지력 산정에 사용될 말뚝의 재료와 제원을 선택할 수 있는 탭으로, 여러 개의 제원을 추가하여 동시에 계산이 가능하다.
- 총 7 지 종류의 말뚝(RC Pile, PC Pile, PC Spun Pile, PHC Pile, Steel Pile, Bored Pile, Micro Pile)을 적용할 수 있으며 API, JIS, KS Standard 를 기반으로 기준 제원이 등록되어 있어 사용자가 선택하여 계산을 수행할 수 있다. 이중에서 총 6 가지 종류의 말뚝을 동시에 등록 및 계산이 가능하다.
- 말뚝의 제원별 특성값은 사전에 계산되어 등록되어 있으나, 해당 값을 변경하고 싶을 경우 제원 옆의 버튼을 클릭하여 변경할 수 있다. 변경된 값은 수정 중인 Save file 에만 적용되며 프로그램 자체에 내장된 제원표에는 영향이 없다.

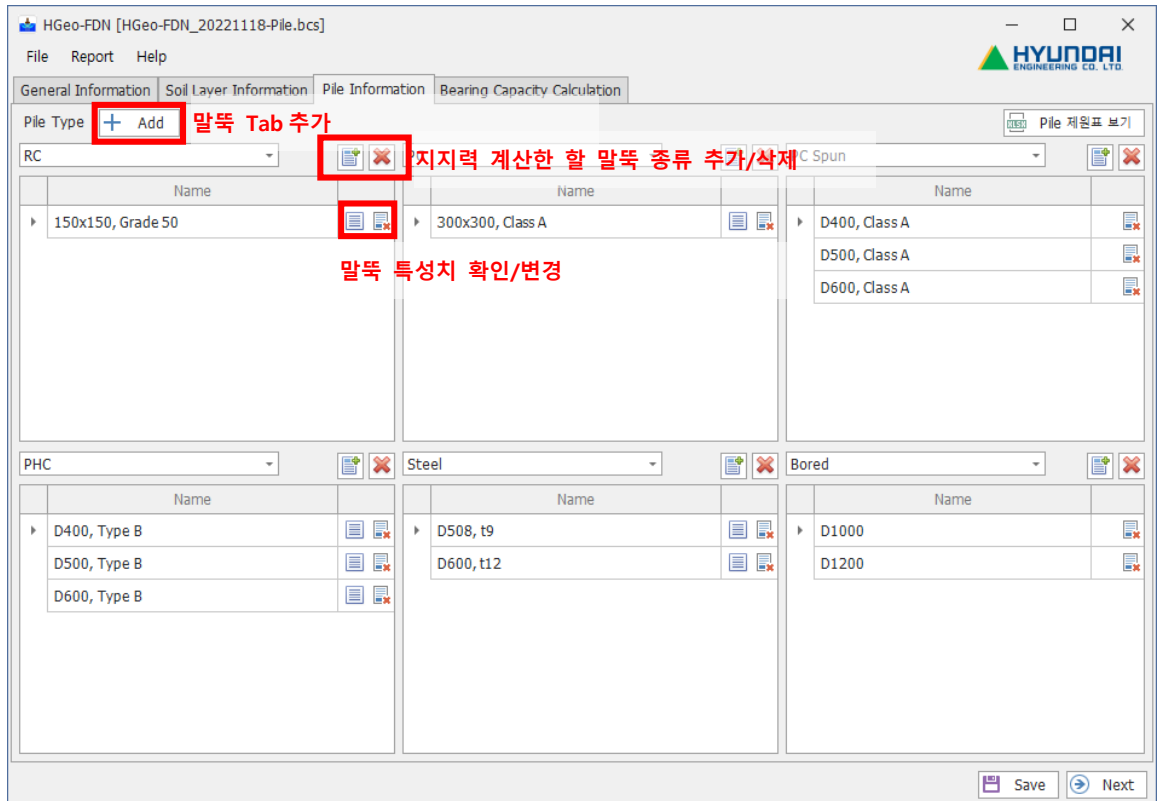


Figure 10 Pile – Pile Information Tab

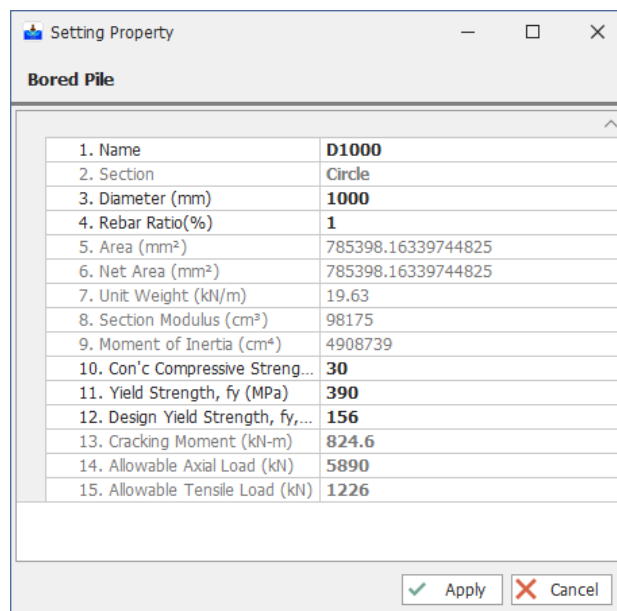


Figure 11 Pile Properties Setting 화면 : 확인/수정/저장 가능

## 1.2.3.4 Bearing Capacity Calculation

- 말뚝의 지지력 계산을 위한 안전율, Pile Cutoff level, 주변/선단 마찰력 계산 방법 등을 입력하는 탭이다.

- Factor of Safety : 압축 및 인발지지력에 대한 안전율을 입력할 수 있다. 수평지지력은 L-Pile 을 활용한 상세검토가 진행되어야 하므로, 본 프로그램에서는 수평지지력은 고려하지 않았다.
- Information : 말뚝 길이를 결정하기 위한 Finished Platform Level, Pile Cutoff Level 입력이 필요하다. 물의 단위중량은 기본값인 9.81kN/m<sup>3</sup> 이 입력되어 있다.
- Calculation Method for Pile Axial Resistance : PC Pile & Steel Pile 과 같은 Driven Pile 과 현장타설말뚝(Bored)은 시공 방법이 다르기 때문에 주면, 선단지지력의 계산도 다른 방식으로 진행된다. 따라서 항타로 말뚝을 시공할 경우 위쪽의 Precast Concrete Pile & Steel Pile 항목을 이용하면 되고, 현장타설말뚝의 경우 아래쪽의 Bored Pile 항목을 이용해서 계산을 하게 된다.

HGeo-FDN [HGeo-FDN\_20221118-Pile.bcs]

File Report Help

General Information Soil Layer Information Pile Information Bearing Capacity Calculation

**Factor of Safety**

Compression: 3  
Tension: 3

**Information**

Unit Weight of Water (kN/m<sup>3</sup>): 9.81  
Final Grade Level (m EL): 0  
Pile Cutoff Level (GL m): 0

**기성말뚝에 대한 계산 상세 입력**

**Calculation Method for Pile Axial Resistance**

**Precast Concrete Pile & Steel Pile**

Side Resistance  
Sandy Soil: SPT N  
Clayey Soil: SPT N  
Factor of Correlation: 2

Limitation of side resistance  
Sandy Soil: 125  
Clayey Soil: 125

Toe Resistance  
Sandy Soil: SPT N  
Clayey Soil: SPT N  
Factor of Correlation: 300

Limitation of toe resistance  
Sandy Soil: 12000  
Clayey Soil: 12000

**Bored Pile 현장타설말뚝에 대한 계산 상세 입력**

Side Resistance  
Sandy Soil: SPT N  
Clayey Soil: α method  
Factor of Correlation: 2

Limitation of side resistance  
Sandy Soil: 200  
Clayey Soil: 200

Toe Resistance  
Sandy Soil: SPT N  
Clayey Soil: Nc\* method  
Factor of Correlation: 57.4

Limitation of toe resistance  
Sandy Soil: 4300  
Clayey Soil: 4300

Save Next

Figure 12 Pile – Bearing Capacity Calculation Tab

- 각 계산 상세에서의 입력값 및 지지력 계산 방법은 4.2 항타말뚝 지지력 계산과 4.3 현장타설말뚝 지지력 계산 부분을 참조.
- Limitation of side/toe resistance : 각 단위 주면/선단저항값의 상한을 설정하기 위한 항목으로 Default 값이 설정되어 있으며 변경이 가능하다.



### 1.2.3.5 Bearing Capacity Calculation (Micro Pile)

- Micro Pile Capacity 평가를 위한 안전율, 재료, 지반 및 구조 평가, bearing plate 등을 입력하는 탭이다.
- Structural Design 은 L-Pile 을 통해 계산된 작용하중을 재료의 허용값과 비교 평가한다.
- Geotechnical Design 은 지층 조건을 직접입력하여 허용지지력을 평가하며, 내장된 극한주면마찰력 자료를 활용할 수 있다.

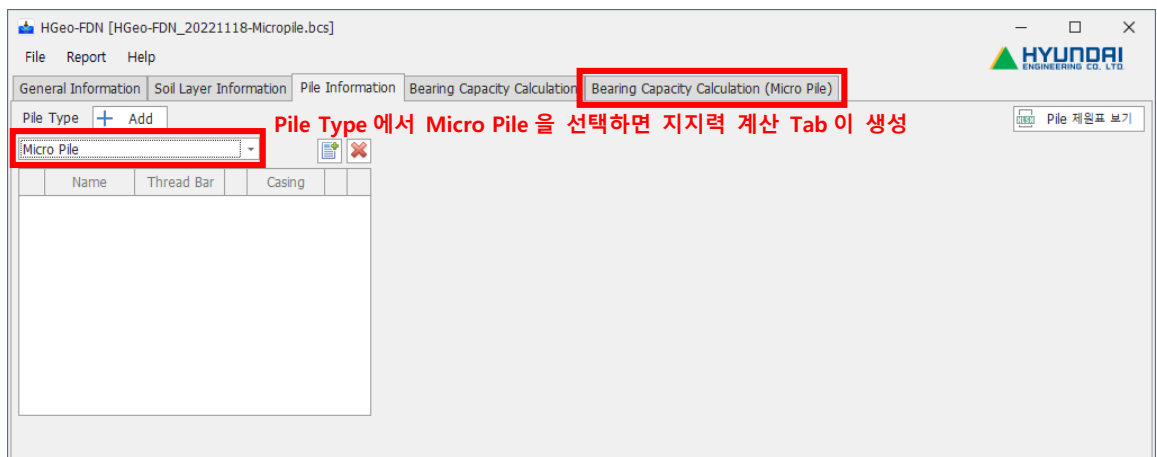


Figure 13 Pile – Bearing Capacity Calculation(Micro Pile) Tab

**Factor of Safety**

Compression: 2.5  
Tension: 2.5

**Materials**

Type: Type 1  
Bar: Dia. = 65 mm,  $f_y$  = 520 MPa  
Casing: Dia. = 216.3 mm,  $f_y$  = 275 MPa  
Grouting:  $F_c$  = 24 MPa

**Structural Design**

Maximum Axial Compression Load  $P_c$  = 300 kN  
Head Condition: Fixed  
Maximum bending moment by L-pile  $M_{max}$  = 18 kNm  
Allowable Horizontal Load by L-pile  $Q_{ha}$  = 16 kN  
Horizontal Displacement by L-pile  $Sh$  = 6.2 mm

**Information**

Final Grade Level (m EL): 0  
Unit Weight of Water (kN/m<sup>3</sup>): 9.81

**Geotechnical Design**

BH-1

Soil Layer	Depth (m)	$\tau_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	Side Friction (kN)	Ultimate Capacity ...
	0	0		

Allowable Compression Capacity  $P_{compression}$  = 0 kN  
Allowable Tension Capacity  $P_{uplift}$  = 0 kN

**Bearing Plate**

Concrete Strength  $f_{ck}$  = 25 MPa  
Allowable Compression Strength of Steel  $f_{sa}$  = 140 MPa

Save Next

Figure 14 Pile – Bearing Capacity Calculation(Micro Pile) Tab

### 1.2.3.6 Result & Report

- 직접기초와 동일하게 상부 메뉴 중 Report – Export to Excel 메뉴를 선택하면 보고서형태로 결과를 출력할 수 있다.
- 좌측 Borehole 항목에서는 출력할 시추공을 선택하고, 우측 Pile Type 에서는 계산서에 출력할 재원을 선택할 수 있다.

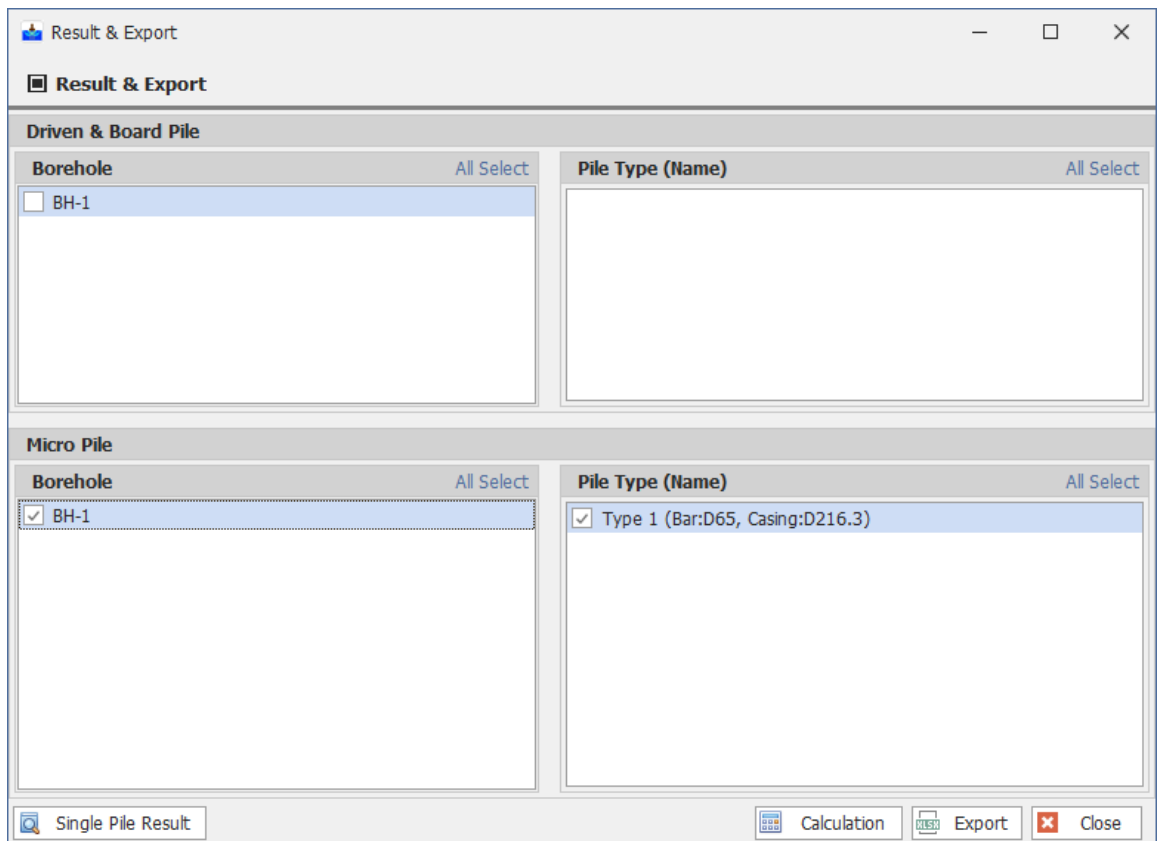


Figure 15 Pile - Result & Export – Report/Export to Excel 메뉴 선택 시 팝업 : 보고서 출력 항목 선택

## 2. 토질분류 및 특성

### 2.1 토질분류 및 토질 정수

#### 2.1.1 토질분류

본 프로그램에서는 지반 Input data 입력 시 토질을 4 가지로 분류한다. Sand, Silt, Clay, Rock 으로 전체 토질을 크게 분류하고 있으며 Rock 은 풍화암(Weathered Rock) 정도의 강도를 가진 암으로 간주하고 있다(N 치 50blow/10cm 이상). 연 암(Soft Rock) 이상의 암반에 대해 일축압축강도를 고려한 지지력을 산정하고자 하는 경우는 아직 본 프로그램에서는 구현하지 못하고 있으며, 별도 계산이 필요한 실정이다.

토질을 분류하는 기준은 각각의 기준별로 USCS, AASHTO, USDA 등 다양한 방법을 제시하나, 본 매뉴얼 및 프로그램에서는 주로 통일분류법(USCS)에 의한 토질 분류를 고려하였으며 Gravel 은 Sand 에 포함되는 것으로 간주하였다.

Table 5.2 Unified Soil Classification System (Based on Material Passing 76.2-mm Sieve)

Criteria for assigning group symbols				Group symbol
Coarse-grained soils More than 50% of retained on No. 200 sieve	<b>Gravels</b> More than 50% of coarse fraction retained on No. 4 sieve	Clean Gravels Less than 5% fines <sup>a</sup>	$C_u \geq 4$ and $1 \leq C_c \leq 3^c$ $C_u < 4$ and/or $C_c < 1$ or $C_c > 3^c$	GW GP
		Gravels with Fines More than 12% fines <sup>a,d</sup>	$PI < 4$ or plots below "A" line (Figure 5.3) $PI > 7$ and plots on or above "A" line (Figure 5.3)	GM GC
	<b>Sands</b> 50% or more of coarse fraction passes No. 4 sieve	Clean Sands Less than 5% fines <sup>b</sup>	$C_u \geq 6$ and $1 \leq C_c \leq 3^c$ $C_u < 6$ and/or $C_c < 1$ or $C_c > 3^c$	SW SP
		Sands with Fines More than 12% fines <sup>b,d</sup>	$PI < 4$ or plots below "A" line (Figure 5.3) $PI > 7$ and plots on or above "A" line (Figure 5.3)	SM SC
Fine-grained soils 50% or more passes No. 200 sieve	<b>Silts and clays</b> Liquid limit less than 50	Inorganic	$PI > 7$ and plots on or above "A" line (Figure 5.3) <sup>e</sup> $PI < 4$ or plots below "A" line (Figure 5.3) <sup>f</sup>	CL ML
		Organic	Liquid limit—oven dried Liquid limit—not dried $< 0.75$ ; see Figure 5.3; OL zone	OL
	<b>Silts and clays</b> Liquid limit 50 or more	Inorganic	$PI$ plots on or above "A" line (Figure 5.3) $PI$ plots below "A" line (Figure 5.3)	CH MH
		Organic	Liquid limit—oven dried Liquid limit—not dried $< 0.75$ ; see Figure 5.3; OH zone	OH
	Highly organic soils	Primarily organic matter, dark in color, and organic odor		Pt

<sup>a</sup>Gravels with 5 to 12% fine require dual symbols: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.

<sup>b</sup>Sands with 5 to 12% fines require dual symbols: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

$$^c C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

<sup>d</sup>If  $4 \leq PI \leq 7$  and plots in the hatched area in Figure 5.3, use dual symbol GC-GM or SC-SM.

<sup>e</sup>If  $4 \leq PI \leq 7$  and plots in the hatched area in Figure 5.3, use dual symbol CL-ML.

Table 1 Unified Soil Classification System

### 2.1.2 설계에 사용하는 토질정수

본 프로그램에서 기초의 지지력 계산에 사용하고 있는 토질정수는 크게 단위중량, 탄성계수, 전단강도(특히 점토의 비배수 전단강도), 내부마찰각, 압밀관련 토질정수(압축지수, 압축계수, 초기간극비) 등이다.

토질정수는 실내시험 결과가 있을 경우 해당 결과를 활용하고, 혹은 지반조사 결과로부터 경험식/이론식을 적용한다. 지반조사 결과가 부족하거나 사용할 수 없는 경우, 기존 문헌으로부터 일반적인 값을 적용할 수 있다. Table 2, 3 에 일반적인 토질정수의 예시를 제시하였다.

종 별	형 상	중 량 (kN/m <sup>3</sup> )	비 고
암 석	화 강 암	26 ~ 27	자연상태
	안 산 암	23 ~ 27	"
	사 암	24 ~ 28	"
	현 무 암	27 ~ 32	"
자 갈	건 조	16 ~ 18	"
	습 기	17 ~ 18	"
	포 화	18 ~ 19	"
모 래	건 조	15 ~ 17	"
	습 기	17 ~ 18	"
	포 화	18 ~ 20	"
점 토	건 조	12 ~ 17	"
	습 기	17 ~ 18	"
	포 화	18 ~ 19	"
점 질 토	보 통	15 ~ 17	"
	역이 섞인 것	16 ~ 18	"
	역이 섞이고 습한 것	19 ~ 21	"
모래질 흙 자갈 섞인 토사 자갈 섞인 모래 호 박 돌		17 ~ 19	"
		17 ~ 20	"
		19 ~ 21	"
		18 ~ 20	"
사 석 조 약 돌		20	"
		17	"

Table 4 토공 재료의 개략적인 단위중량 (Ref. 한국도로공사 도로설계요령 2020)

본 프로그램에서는 입력된 SPT N 값을 기준으로 경험식을 적용하여 탄성계수(E), 비배수전단강도( $C_u$ ), 사질토의 내부마찰각( $\phi$ )이 자동으로 계산된다. 실험값이 있을 경우 직접 입력도 가능하다. 탄성계수의 경우 DM 7-01 를 참조하였으며, 비배수전단강도는 Terzaghi 의 제안에 따라  $C_u=6.25N$  을 적용하였다. 내부마찰각은 Dunham 공식 중 가장 불리한 조건으로 고려하였다( $\phi=\sqrt{12N + 15}$ ).

종 류		재료의 상태		단위체적 중 량 (kN/m <sup>3</sup> )	내 부 마찰각 $\phi$ (°)	점착력 C (kN/m <sup>2</sup> )	분 류 기 호 (통일분류)
흙 쌓 기	자갈 및 자갈 섞인 모래	다진 것		20	40	0	GW, GP
	모 래	다진 것	입도가 좋은 것	20	35	0	SW, SP
			입도가 나쁜 것	19	30	0	
	사질토	다진 것		19	25	30 이하	SM, SC
	점성토	다진 것		18	15	50 이하	ML, CL MH, CH
자 연 지 반	자 갈	밀실한 것, 입도가 좋은 것		20	40	0	GW, GP
		밀실하지 않은 것, 입도가 나쁜 것		18	35	0	
	자갈 섞인 모래	밀실한 것		21	40	0	"
		밀실하지 않은 것		19	35	0	
	모 래	밀실한 것, 입도가 좋은 것		20	35	0	SW, SP
		밀실하지 않은 것, 입도가 나쁜 것		18	30	0	
	사질토	밀실한 것		19	30	30 이하	SM, SC
		밀실하지 않은 것		17	25	0	
	점성토	굳은 것(손가락으로 강하게 눌러 조금 들어감)		18	25	50 이하	ML, CL
		약간 무른 것(손가락 중간정도의 힘으로 들어감)		17	20	30 이하	
		무른 것(손가락이 쉽게 들어감)		17	20	15 이하	
	점 토 및 실 트	굳은 것(손가락으로 세게 눌러 조금 들어감)		17	20	50 이하	CH, MH ML
		약간 무른 것(손가락의 중간정도 힘으로 들어감)		16	15	30 이하	
		무른 것(손가락이 쉽게 들어감)		14	10	15 이하	

Table 5 흙쌓기 재료, 자연지반의 일반적인 토질정수 (Ref. 한국도로공사 도로설계요령 2020)

Soil Type	E+s, /N
Silts, sands silts, slightly cohesive silt-sand mixtures	4
Clean, fine to med, sands & slightly silty sands	7
Coarse sands & sands with little gravel	10
Sandy gravels and gravel	12

Table 6 Correlation of Soil Modulus-SPT N value(DM7-01)

## 2.2 연약지반의 분류

### 2.2.1 연약지반의 판단기준

본 프로그램에서는 직접기초, 말뚝기초 지지력 계산 시 연약지반의 영향을 고려하고 있다. 연약지반의 분류기준은 문헌마다 조금씩 차이가 있으나, 일반적으로 점토의 경우 SPT N 치가 4 이하인 지반, 모래지반의 경우 SPT N 치가 10 이하인 지반을 연약지반으로 간주한다.

구 분	연약층 두께(m)	N 치	$q_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$q_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )
점성토 및 유기질토	10m 미만	4이하	8이하	0.60이하
	10m 이상	6이하	12이하	1.00이하
사질토		10이하	-	-

Table 7 한국도로공사 연약지반 판정기준(도로설계 실무편람)

지 반 구 분	토층 및 토질 구분			토질 정수			
				W <sub>n</sub> (%)	e <sub>o</sub>	q <sub>u</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	N치
이탄질 지 반	고 유기질점토 (Pt)	Peat	섬유질 고압축토	300이상	7.5 이상	<0.4	<1
		흑니	분해가 진척된 고 유기질토	300- 200	7.5 -5.0		
점토질 지 반	세 립 토	유기질토	소성도 A선 이하의 유기질토	200- 100	5.0 -2.5	<1.0	<4
		화산회질 점토	소성도 A선 이상, 화산회질 2차 퇴적점성토				
		Silt	소성도 A선 이하 Dilatancy대	100- 50	2.5 -1.25		
		Clay	소성도A선위 그 부근 Dilatancy대				
사질 지반	사 질 토	SM,SC	#200번체 통과량 15-50%	50- 30	1.25 -0.8	≒ 0	<10
		SP-SC SW-SM	#200번체 통과량 15%이하	<30	<0.8		

Table 8 토질특성에 따른 연약지반 판정기준(도로설계 실무편람)

### 2.2.2 연약지반의 고려

직접기초 지지력 계산 시 연약지반이 존재할 경우, 압밀침하를 고려해야 한다. 압밀침하를 고려하기 위해서는 압밀관련 정수(압축지수 또는 압축계수)의 입력이 필요하다. 말뚝기초 지지력 계산 시에는 연약지반에 대해 주변마찰력 고려 여부를 결정할 수 있다.

## 2.3 지하수위

지하수위의 위치에 따라 지반의 단위중량이 달라지게 되며, 지지력 산정 결과에 큰 영향을 미치므로 입력에 주의를 요한다.

### 3. 직접기초

#### 3.1 직접기초의 지지력 산정

직접기초의 허용지지력은 지반의 극한지지력과 허용침하량을 모두 고려해야 한다. 지반의 극한지지력을 안전율로 나눈 값과 허용침하량에 해당하는 접지압 중 작은 값이 지반의 지내력이다.

#### 3.2 지중응력분포

##### 3.2.1 탄성이론에 근거한 이론식(Boussinesq's method)

지면에 하중이 가해지면 지중의 수직응력이 증가하며, 응력 증가량  $\Delta\sigma$  는 하중 작용점 아래에서 가장 크지만 모든 방향으로 전이된다. 탄성 이론에 기초한 이론식을 사용하여 하중 작용 시 지중 임의 지점에서의 응력 증가량을 산정할 수 있다.

###### 3.2.1.1 구형하중 (Rectangular Load)

- 지중응력의 심도별 분포를 고려하여 Boussinesq 식을 이용하여 임의 심도에서의 응력증가량  $\Delta\sigma$  를 산정할 수 있다. 직사각형 응력 분포를 가정할 경우 직사각형 중심에서의 응력 증가량  $\Delta\sigma$  는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta\sigma = q_0 I_c$$

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{m_1 n_1}{\sqrt{1 + m_1^2 + n_1^2}} \frac{1 + m_1^2 + 2n_1^2}{(1 + n_1^2)(m_1^2 + n_1^2)} + \sin^{-1} \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2} \sqrt{1 + n_1^2}} \right]$$

$$m_1 = L/B, \quad n_1 = z/(B/2)$$

B, L : 기초의 폭과 길이

z : 응력증가량을 구하고자 하는 지중 임의 지점의 깊이

###### 3.2.1.2 띠형하중 (Strip Load)

- 띠형 기초에 대한 지중 응력 증가량은 아래와 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\Delta\sigma = \frac{q_0}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{z}{x - (B/2)} \right] - \tan^{-1} \left[ \frac{z}{x + (B/2)} \right] - \frac{Bz[x^2 - z^2 - (B^2/4)]}{[x^2 + z^2 - (B^2/4)]^2 + B^2 z^2} \right\}$$



B, x, z : Figure 16 참조

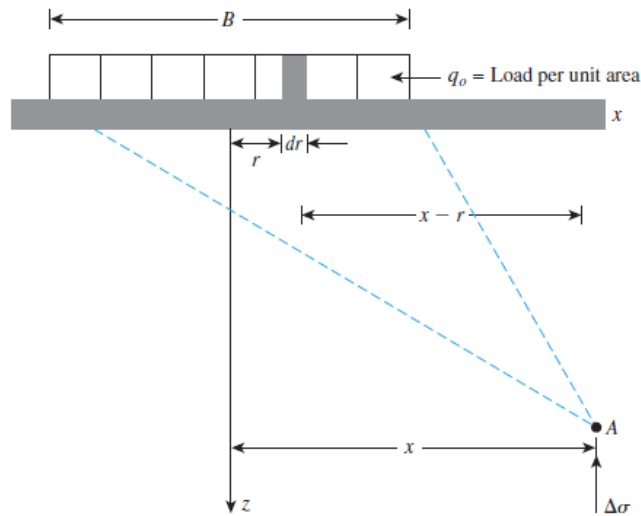


Figure 17 Vertical stress caused by a flexible strip load

### 3.2.1.3 원형하중 (Circular Load)

- 원형하중은 탱크와 같은 상부구조물 하부의 지반에서 발생하며, 하부 지반에서의 응력증가량은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta\sigma = q_0 \left\{ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{B}{2z} \right)^2 \right]^{3/2}} \right\}$$

### 3.2.2 2:1 Method

- 간편하게 기초 하부의 응력증가량을 계산할 수 있는 방법으로, 지중응력이 기초로부터 기울기 2(Vertical) : 1(Horizontal) 에 해당하는 면적에 분포한다고 가정한다. 깊이 z에서의 응력증가량은 아래와 같이 산정할 수 있다.

$$\Delta\sigma = \frac{q_0 \times B \times L}{(B + z)(L + z)}$$

$q_0, B, L, z$  : Figure 18 참조

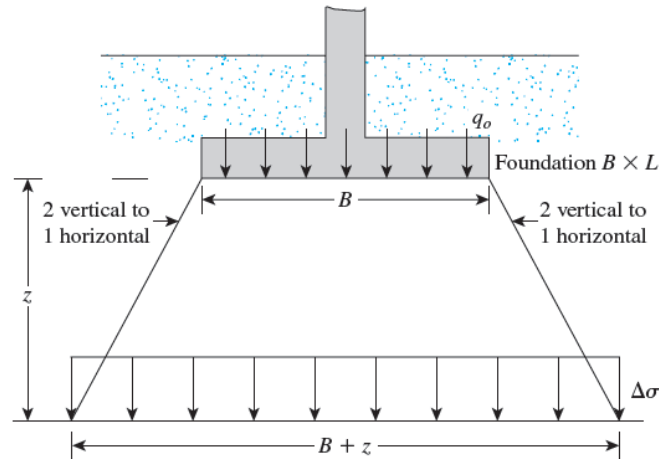


Figure 19 2:1 방법을 이용한 기초 하부에서의 응력증가량 계산

### 3.3 침하계산

총 침하량은 즉시침하와 장기침하의 합으로 표현할 수 있으며, 유기질토와 연약지반에서는 Creep 으로 인해 침하가 무한정 연장될 수 있으므로 특히 주의해야한다. 일반적으로 압밀침하가 발생하는 지반에서는 일부 소규모 기초를 제외하고는 직접기초의 적용이 어렵다.

#### 3.3.1 탄성(즉시)침하

##### 3.3.1.1 Schmertmann's Method

- 탄성침하 산정방법은 여러 가지가 있으나, 본 프로그램에서는 하부 지반을 층별로 구분할 수 있고 비교적 다양한 지반에 적용이 가능한 Schmertmann's Elastic Settlement Theory 를 이용하여 직접기초 침하량을 산정하였다. Schmertmann 의 침하량 산정방법은 BS Code 와 AASHTO 에서 공통적으로 언급하고 있는 방법이기도 하다.

$$S_i = C_1 C_2 (q - q') \sum \frac{I_z}{E} \Delta z$$

E : Elastic Modulus of Soil (kPa)

$I_z$  : Influence factor

$C_1$  : Coefficient of footing depth,  $C_1 = 1 - 0.5 q' / (q - q')$

$C_2$  : Coefficient of soil creep,  $C_2 = 1 + 0.2 \log(yr/0.1)$

$q'$  : Effective stress at footing depth =  $\gamma'D_f$

$q$  : Applied footing stress (contact pressure)

$\Delta z$  : Thickness of soil layer

### 3.3.1.2 Elastic Theory

- 탄성론에 근거한 탄성침하 계산식은 아래와 같다.

$$S_e = q_0(\alpha B') \frac{1 - \mu_s^2}{E_s} I_s I_f$$

$q_0$  : Net applied pressure on the foundation

$\mu_s$  : Poisson's ratio of soil

$E_s$  : 기초하부 지반( $z=0 \sim z=5B$ )의 평균 탄성계수

$B'$  :  $B/2$  (기초 중심부에서 침하 계산 시),  $B$ (기초 모서리에서의 침하 계산 시)

$I_s$  : Shape factor,

$$I_s = F_1 + \frac{1 - 2\mu_s}{1 - \mu_s} F_2$$

$$F_1 = \frac{1}{\pi} (A_0 + A_1), \quad F_2 = \frac{n'}{2\pi} \tan^{-1} A_2$$

$$A_0 = m' \ln \frac{(1 + \sqrt{m'^2 + 1})\sqrt{m'^2 + n'^2}}{m'(1 + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1})}, \quad A_1 = \ln \frac{(m' + \sqrt{m'^2 + 1})\sqrt{1 + n'^2}}{m' + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}}$$

$$A_2 = \ln \frac{m'}{n'\sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}}$$

$$m' = \frac{L}{B}, \quad n' = \frac{H}{B/2} (\text{기초 중심}), \quad n' = \frac{H}{B} (\text{기초 모서리})$$

$I_f$  : Depth factor,  $f\left(\frac{D_f}{B}, \mu_s, \frac{L}{B}\right)$

$\alpha$  : 침하를 계산하는 기초 위치에 따른 상수 ( $\alpha=4$  : 중심부,  $\alpha=1$  : 모서리)

$F_1, F_2, I_f$  는 Table 9 을 참조하여 적용할 수 있다.

$\mu_s$	$D_f/B$	$B/L$		
		0.2	0.5	1.0
0.3	0.2	0.95	0.93	0.90
	0.4	0.90	0.86	0.81
	0.6	0.85	0.80	0.74
	1.0	0.78	0.71	0.65
0.4	0.2	0.97	0.96	0.93
	0.4	0.93	0.89	0.85
	0.6	0.89	0.84	0.78
	1.0	0.82	0.75	0.69
0.5	0.2	0.99	0.98	0.96
	0.4	0.95	0.93	0.89
	0.6	0.92	0.87	0.82
	1.0	0.85	0.79	0.72

Table 10 Variation of  $I_f$  with  $D_f/B$ ,  $B/L$ , and  $\mu_s$

### 3.3.2 압밀침하

압밀침하 계산은 Terzaghi 의 1 차원 압밀방정식에 근거한 이론식을 사용하였으며, 아래와 같이 압축지수( $C_c$ ) 혹은 체적압축계수( $m_v$ )를 적용하여 계산할 수 있다.

#### 3.3.2.1 압축지수 이용

- 압밀 계산 시 선행압밀응력과 유효상재응력, 그리고 하중 증가량의 크기에 따라 세 가지 경우로 나누어 계산하는 것이 일반적이다. 본 프로그램에서는 계산의 복잡성을 최소화하기 위해 정규압밀점토 혹은 과압밀점토에 대한 압밀침하만을 고려하였다

- 정규압밀점토의 경우( $\sigma'_0 \geq \sigma_p'$ )

$$S_c = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot H \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}$$

- $\sigma'_0 < \sigma_p'$  이고  $\sigma_p < \sigma'_0 + \Delta\sigma'$  인 경우

$$S_c = \frac{C_r}{1 + e_0} H \log \frac{\sigma'_p}{\sigma'_0} + \frac{C_c}{1 + e_0} H \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_p}$$

- 과압밀점토의 경우( $\sigma'_0 + \Delta\sigma' < \sigma_p'$ )

$$S_c = \frac{C_r}{1 + e_0} H \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}$$

$\sigma'_0$  : 유효상재응력

$\Delta\sigma'$  : 하중 증가량(유효응력).

- $C_c$  : 압축지수
- $C_r$  : 재압축지수
- $e_0$  : 초기 간극비
- $\sigma_p'$  : 선행압밀응력

### 3.3.2.2 체적압축계수 이용

- 체적압축계수에 의한 압밀침하량 계산은 아래와 같다.

$$S_c = m_v \cdot \Delta\sigma \cdot H$$

- $m_v$  : 체적압축계수,  $m_v = a_v / (1 + e_0)$  (cm<sup>2</sup>/kg)
- $a_v$  : 압축계수 (cm<sup>2</sup>/kg)
- $e_0$  : 초기 간극비

## 3.4 극한지지력 계산

Code & Standard 에 따라 극한지지력 계산방법은 조금씩 다르다. 아래에 BS Code, AASHTO 등 각 Code 에서 적용하고 있는 극한지지력 산정 공식을 정리하였다.

### 3.4.1 BS Code

#### 3.4.1.1 Coarse Soils (Sands and gravels)

$$q_u = c' N_c b_c s_c i_c d_c g_c r_c + q' N_q b_q s_q i_q d_q g_q r_q + 0.5 \gamma' B' N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma d_\gamma g_\gamma r_\gamma$$

- $c'$  : 흙의 유효 점착력
- $\gamma'$  : 지하수위를 고려한 기초 근입심도에서의 단위중량
- $q'$  : 기초 바닥에서의 유효상재하중
- $B'$  : 기초의 유효폭

- 지지력계수(Bearing Coefficients)의 계산

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}), \quad N_\gamma = \begin{cases} a \times e^{b\phi} & \text{for } \phi > 0^\circ \\ 0 & \text{for } \phi = 0^\circ \end{cases}, \quad N_c = (N_q - 1) \cot \phi$$

- Shape Factor

$$s_q = 1 + (B/L)\tan\varphi, \quad s_\gamma = 1 - 0.4(B/L), \quad s_c = 1 + (B/L)(N_q/N_c)$$

- Load inclination factors

$$i_q = \left[1 - \left(\frac{H}{V + A'c'\cot\varphi}\right)\right]^m, \quad i_\gamma = \left[1 - \left(\frac{H}{V + A'c'\cot\varphi}\right)\right]^{m+1}, \quad i_c = \begin{cases} i_q - \left(\frac{1-i_q}{N_c\tan\varphi}\right) & \text{for } \varphi > 0^\circ \\ 1 - \left(\frac{mH}{c'N_{cA'}}\right) & \text{for } \varphi = 0^\circ \end{cases}$$

- Base inclination (foundation tilt) factors

$$b_q = b_\gamma, \quad b_\gamma = (1 - \alpha\tan\varphi)^2, \quad b_c = \begin{cases} b_q - \left(\frac{1-b_q}{N_c\tan\varphi}\right) & \text{for } \varphi > 0^\circ \\ 1 - \left(\frac{2\alpha}{\pi+2}\right) & \text{for } \varphi = 0^\circ \end{cases}$$

- Ground inclination (surface inclination) factors

$$g_q = \begin{cases} (1 - \tan\omega)^2 & \text{for } \varphi > 0^\circ \\ 1 & \text{for } \varphi = 0^\circ \end{cases}, \quad g_\gamma \approx g_q, \quad g_c = \begin{cases} g_q - \left(\frac{1-g_q}{N_c\tan\varphi}\right) & \text{for } \varphi > 0^\circ \\ 1 - \left(\frac{2\omega}{\pi+2}\right) & \text{for } \varphi = 0^\circ \end{cases}$$

- Depth factors

$$d_q = 1 + 2\tan\varphi(1 - \sin\varphi)^2 \tan^{-1}(D/B)$$

$$d_\gamma = 1$$

$$d_c = \begin{cases} d_q - \left(\frac{1-d_q}{N_c\tan\varphi}\right) & \text{for } \varphi > 0^\circ \\ 1 + 0.33 \tan^{-1}(D/B) & \text{for } \varphi = 0^\circ \end{cases}$$

- Rigidity factors should be calculated from;

$$r_q = e^{[(-4.4+0.6B/L)\tan\varphi + \frac{3.07\sin\varphi\log 2I_r}{1+\sin\varphi}]}$$

$$r_\gamma = r_q$$

$$r_c = \begin{cases} r_q - \left(\frac{1-r_q}{N_c\tan\varphi}\right) & \text{for } \varphi > 0^\circ \\ 0.32 + 0.12(B/L) + 0.60\log I_r & \text{for } \varphi = 0^\circ \end{cases}$$

$\Phi$  : 흙의 내부마찰각

a : 0.0663 for a smooth foundation or 0.1054 for a rough foundation;

b : 9.3 or 9.6 for a smooth or rough foundation, respectively ( $\varphi$  : rad)

alternatively, b = 0.162 or 0.168, when  $\varphi$  is entered in degrees.

B : 기초폭

L : 기초의 길이

D : 기초의 근입심도

A' : 기초의 유효면적

H : 기초에 가해지는 수평하중

V : 기초에 가해지는 연직하중

$m : (2 + B/L) / (1 + B/L)$  for loading in the direction of B  
 or  $(2 + L/B) / (1 + L/B)$  for loading in the direction of L  
 $\alpha$  : Inclination of the underside of the footing from the horizontal  
 $\omega$  : Inclination of the ground surface below the horizontal in the direction  
 $I_r : G / (c' + \sigma'_v \tan \phi)$   
 $G$  : Soil's shear modulus of elasticity  
 $\sigma'_v$  : Vertical effective stress on the foundation.

#### 3.4.1.2 Fine Soils (Silts and Clays)

$$q_u = c_u N_c s_c d_c + q_{vb}$$

$c_u$  : 점토의 비배수 전단강도

$s_c$  : Shape factor,  $s_c = 1 + 0.21 \frac{B}{L} + 0.17 \sqrt{\frac{D}{B}}$

$d_c$  : Depth factor,  $d_c = 1 + 0.27 \sqrt{\frac{D}{B}}$

$q_{vb}$  : Total overburden pressure at the underside of the foundation

$N_c : \pi + 2$

#### 3.4.2 AASHTO

The general form of the ultimate bearing capacity equation, including correction terms, is:

$$q_{ult} = c N_c s_c b_c + q N_q C_{wq} s_q b_q d_q + 0.5 \gamma B_f N_\gamma C_{w\gamma} s_\gamma b_\gamma \quad 8-6$$

## 4. 말뚝기초

### 4.1 말뚝의 지지력

본 프로그램에서는 말뚝의 정역학적 지지력 산정공식과 지반조사결과를 활용하여 이론적 지지력을 계산하고 있다. 결과의 부정확성 및 해머, 항타장비의 불확실성 등으로 인해 동역학적 지지력 산정공식은 고려하지 않았다.

말뚝은 아래 그림과 같이 주면마찰저항과 선단지지력으로 상부 하중을 지지하며, 이를 식으로 간단하게 표현하면 다음과 같다.

$$Q_{ult} = Q_b + Q_s - W_p$$

$Q_{ult}$  : 말뚝의 극한지지력

$Q_b$  : 말뚝의 선단지지력,  $q_b \cdot A_b$  ( $q_b$  : 단위선단지지력,  $A_b$  : 말뚝선단의 면적)

$Q_s$  : 말뚝의 주면마찰저항,  $f_s \cdot A_s$  ( $f_s$  : 단위주면마찰저항,  $A_s$  : 말뚝주면의 면적)

$W_p$  : 말뚝의 자중

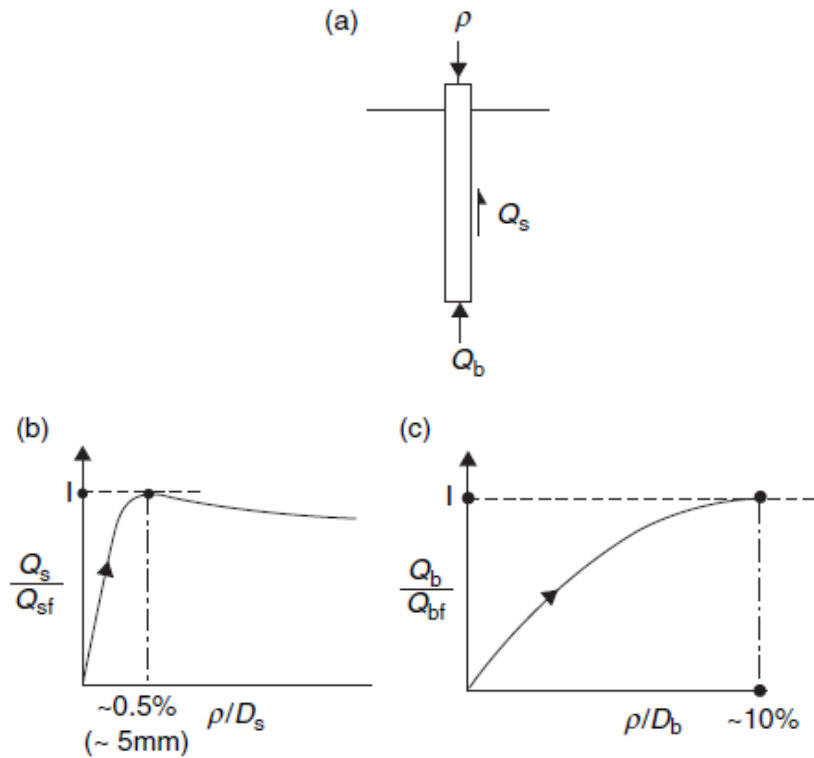


Figure 20 말뚝의 지지력 구성 및 거동

## 4.2 항타말뚝(Driven) 지지력 계산

RC, PC, Steel Pile 을 항타로 시공하는 경우 아래와 같은 절차로 지지력을 산정하며, 지지력 계산방법은 주로 FHWA NHI-05-042 Design and Construction of Driven Pile Foundations\_Vol. I 을 참조하였다.

### 4.2.1 주면마찰저항(Shaft Resistance) 계산

#### 4.2.1.1 Sandy Soil

- SPT N 치 활용 : 'Soil Layer Information' 탭에서 입력된 지층별 N 치에 일정 값을 곱해 단위주면마찰저항을 산정하는 방법으로, SPT N x (배수)가 단위주면마찰저항  $f_s(\text{kPa})$ 이다.

$$f_s(\text{kPa}) = xN$$



배수(x)에 해당하는 값은 지반조건에 따라 상이하며, 설계자의 판단에 따라 변경할 수 있으나 Sandy Soil 의 경우 보통 2 를 적용한다.

- Effective Stress  $\beta$  Method : 사질토의 경우 주면마찰저항이 유효응력의 영향을 받으며, 이를 고려하여 유효응력과 Coefficient  $\beta$ 의 곱으로 단위주면마찰저항을 산정하는 방법이다.

$$f_s(kPa) = \beta \sigma'_v$$

$\beta$  : Bjerrum-Burland beta coefficient =  $K_\delta \tan \delta$

$\sigma'_v$  : Vertical effective stress along the pile shaft (kPa).

$K_\delta$  : Coefficient of lateral earth pressure

$\delta$  : Friction angle between pile and soil

아래와 같이 API 의 제안에 따라  $K_\delta=1.0$  을 적용하였으며, 말뚝-지반 사이의 마찰각인  $\delta$  는 Table 11 를 참고하여 적용하였다. 단, Sandy Soil 의 밀도(Density)를 분류하는 과정에서 지반조사 결과값을 활용하여  $N \geq 50$  은  $\delta=35$ ,  $30 \leq N < 50$  인 경우는  $\delta=30$ ,  $10 \leq N < 30$  인 경우는  $\delta=25$ ,  $5 \leq N < 10$  인 경우는  $\delta=20$ ,  $N < 5$  이면  $\delta=15$  로 산정하였다.

API (1993) notes that assuming  $K_\delta=0.8$  for both tension and compression loading of unplugged, open ended pipe pile is appropriate. In addition, for the plugged or closed end case the assumption of  $K_\delta=1.0$  is recommended.

Density	Soil	Soil-Pile Friction Angle, $\delta$	Limiting Unit Shaft Resistance, (ksf)	$N_q$	Limiting Unit Toe Resistance, (ksf)
Very loose Loose Medium	Sand Sand-Silt* Silt	15	1.0	8	40
Loose Medium Dense	Sand Sand-Silt* Silt	20	1.4	12	60
Medium Dense	Sand Sand-Silt*	25	1.7	20	100
Dense Very Dense	Sand Sand-Silt*	30	2.0	40	200
Dense Very Dense	Gravel Sand	35	2.4	50	250

Table 12 Design Parameter Guidelines for Cohesionless Siliceous Soil (after API 1993)

#### 4.2.1.2 Clayey Soil

- SPT N 치 활용 : Sandy Soil 의 경우와 동일하게 'Soil Layer Information' 탭에서 입력된 지층별 N 치에 일정값을 곱해 단위주면마찰저항을 산정하는 방법.
- $\alpha$  Method : Cohesive Soil 에 대해 단위주면마찰저항이 비배수전단강도( $S_u$  또는  $C_u$ )에 비례한다고 가정하여 주면마찰력을 산정하는 방법으로, 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$f_s(kPa) = \alpha \cdot S_u$$

$\alpha$  : adhesion factor, 무차원

$S_u$  : 해당 지층에서의 비배수 전단강도

$\alpha$  는 아래와 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\alpha = 0.5 \psi^{-.5} \text{ when } \psi \leq 1.0$$

$$\alpha = 0.5 \psi^{-.25} \text{ when } \psi > 1.0$$

$$\psi = \frac{S_u}{\sigma'_{v0}}$$

$\sigma'_{v0}$  : Vertical effective stress at the sample depth (kPa)

### 4.2.2 선단지지력(End Bearing) 계산

#### 4.2.2.1 Sandy Soil

- SPT N 치 활용 : 주면마찰저항과 동일하게 지반조사 결과로 얻은 SPT N 치를 활용하여 단위선단지지력을 계산하는 방법이다.

$$q_p(kPa) = xN$$

항타말뚝, 사질토의 경우  $N=300$  을 일반적으로 적용한다.

- $N_q$  Method : 사질토의 단위선단지지력은 아래와 같이  $N_q$  및 유효응력의 곱으로 계산할 수 있다.

$$q_p(kPa) = \sigma'_{v0} N_q$$

$\sigma'_{v0}$  : Vertical effective stress (kPa).

$N_q$  : Bearing Capacity Factor, 무차원

무차원인 Bearing Capacity Factor  $N_q$  는 Table 13 를 참고하여 산정하였다. 단, 주면마찰저항 산정 시와 동일하게 Sandy Soil 의 밀도(Density)를 분류하는 과정에서 지반조사 결과값을 활용하였으며  $N \geq 50$  은  $N_q=50$ ,  $30 \leq N < 50$  인 경우는  $N_q=40$ ,  $10 \leq N < 30$  인 경우는  $N_q=20$ ,  $5 \leq N < 10$  인 경우는  $N_q=12$ ,  $N < 5$  이면  $N_q=8$  로 산정하였다.

### 4.2.2.2 Clayey Soil

- SPT N 치 활용 : Sandy Soil 의 경우와 동일하게 지반조사 결과 SPT N 치를 활용하여 단위선단지지력을 계산하는 방법이다.

$$q_p(kPa) = xN$$

점성토의 경우 SPT N 방법은 잘 사용하지 않으나, 설계자의 판단에 따라 필요한 경우 적용할 수 있다.

- Nc Method : Clayey Soil 에서  $N_c=9$  를 적용하여, 아래와 같이 산정할 수 있다.

$$q_p(kPa) = N_c s_u = 9s_u$$

$N_c$  : Bearing Capacity Factor, Clayey Soil 에서  $N_c=9$

$s_u$  : 비배수전단강도(kPa)

### 4.3 현장타설말뚝(Bored Pile) 지지력 계산

현장타설말뚝의 지지력은 항타말뚝의 경우와 유사하나, 사용하는 공식과 수치에 일부 차이가 있다. 현장타설말뚝의 지지력 산정 방법 및 절차는 FHWA NHI-10-016 Drilled Shaft 를 주로 참조하였다.

#### 4.3.1 주면마찰저항(Shaft Resistance) 계산

##### 4.3.1.1 Sandy Soil

- SPT N 치 활용 : 항타말뚝의 경우와 동일
- Effective Stress  $\beta$  Method : 항타말뚝의 경우와 동일하게 유효응력에  $\beta$  를 곱해 단위주면마찰저항을 구하는 방법이다.

$$f_s(kPa) = \beta \sigma'_v$$

$$\beta \approx (1 - \sin \phi') \left( \frac{\sigma'_p}{\sigma'_v} \right)^{\sin \phi'} \tan \phi' \leq K_p \tan \phi' \quad K_p = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right)$$

$\phi'$  : 내부마찰각

$\sigma'_p$  : Effective vertical preconsolidation stress. Mayne(2007)의 제안에 의해 아래와 같은 식으로 구할 수 있으며,  $m=0.8$ (Silty sands to sandy silts)를 적용하였다. 아래 식에서  $N_{60}$  은 지반조사 결과값인 SPT N 치의 보정값이다.  $P_a$  는 대기압이며, kPa 단위로 100kPa 를 적용하였다.

$$\frac{\sigma'_p}{P_a} \approx 0.47 (N_{60})^m$$

##### 4.3.1.2 Clayey Soil

- $\alpha$  Method : 항타말뚝과 유사하게 Cohesive Soil 에 대해 단위주면마찰저항이 비배수전단강도( $S_u$  또는  $C_u$ )에 비례한다고 가정하여 주면마찰력을 산정하는 방법으로,  $\alpha$ 의 산정 방법에서 차이가 있다.

$$f_s(kPa) = \alpha \cdot S_u$$

$\alpha$  : adhesion factor, 무차원

$S_u$  : 해당 지층에서의 비배수 전단강도

$\alpha = 0$  between the ground surface and a depth of 5 ft or to the depth of seasonal moisture change, whichever is greater

$\alpha = 0.55$  along remaining portions of the shaft for  $\frac{s_u}{p_a} \leq 1.5$

$\alpha = 0.55 - 0.1 \left( \frac{s_u}{p_a} - 1.5 \right)$  along remaining portions of the shaft for  $1.5 \leq \frac{s_u}{p_a} \leq 2.5$

### 4.3.2 선단지지력(End Bearing) 계산

#### 4.3.2.1 Sandy Soil

- SPT N 치 활용 : O'Neill & Reese 의 제안에 따라 아래와 같이 SPT N 치에 57.4 를 곱한 값을 단위선단지지력으로 정한다.

$$q_p(kPa) = 57.4N \leq 4300$$

단, 상기 방법으로 선단지지력을 구할 때 상한치(4300kPa)에 주의해야 한다.

#### 4.3.2.2 Clayey Soil

- $N_c^*$  Method : 비배수 전단강도에 Bearing Capacity Factor  $N_c^*$ 를 곱해서 단위선단지지력을 구하는 방법이다.

$$q_p(kPa) = N_c^* s_u$$

$N_c^*$  : Bearing capacity factor. Table 14 참조.

$S_u$  : 말뚝 선단 아래 2D 부분에 해당하는 지층에서의 평균 비배수전단강도(kPa)

Undrained shear strength, $s_u$ (lb/ft <sup>2</sup> )	$I_r \approx \frac{E_u}{3s_u}$	$N_c^*$
500	50	6.5
1,000	150	8.0
2,000	250 - 300	9.0

$E_u$  = Undrained Young's Modulus

Table 15 Bearing Capacity Factor  $N_c^*$

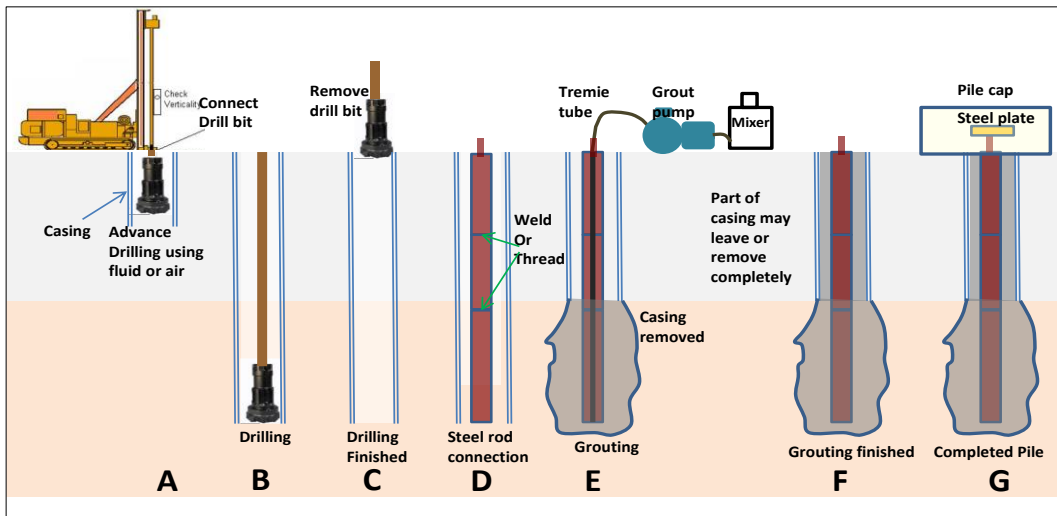
## 4.4 마이크로파일(Micropile) 지지력 계산

### 4.4.1 마이크로파일 개요

마이크로파일(Micropile)은 강재로 보강된 소구경(일반적으로 300mm 이하)의 비변위 말뚝으로, 지반천공, 보강재 설치 및 그라우팅(주입)의 순으로 시공된다. 마이크로파일은 주변구조물이나 지반 그리고 환경에 최소한의 영향을 주면서 시공되며, 접근하기 어려운 환경과 모든 종류의 토질조건에서 시공 가능하다.

마이크로파일의 구조적 지지능력은 하중의 대부분 또는 전부가 고강도 강재에 의해 발휘되며, 이러한 보강재의 단면적은 전체 파일 단면적의 절반을 차지하기도 한다. 마이크로파일은 그라우트와 지반의 마찰저항력으로 강재가 지지하는 외부하중을 지반으로 전달한다. 또한 일반적으로 지지력 산정 시 선단지지력은 무시한다.

마이크로파일의 지지력 산정 방법 및 절차는 FHWA NHI-05-039 Micropile Design and Construction 을 주로 참조하였다.

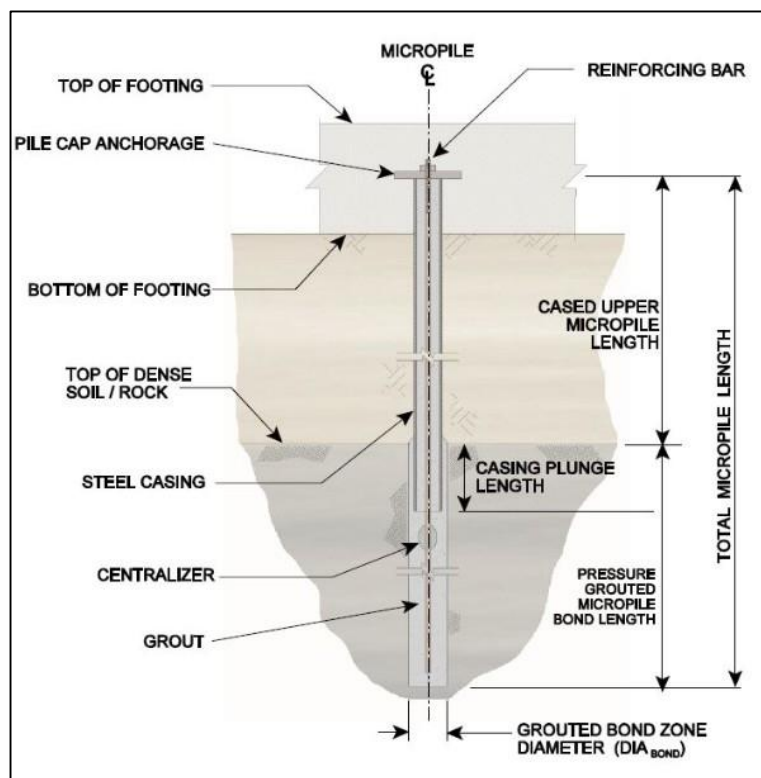


- A, B : 천공 및 임시 케이싱 설치, C : 천공 비트 제거  
 D, E : 보강재(강봉) 설치 및 그라우팅, 케이싱 인발  
 F : 추가가압 및 그라우팅 완료, G : Steel plate 및 pile cap 설치

Figure 21 마이크로파일 시공 과정

#### 4.4.2 마이크로파일의 설계 컨셉

- 마이크로파일의 설계 컨셉은 현장타설말뚝과 다소 차이가 있다. 전형적인 현장타설말뚝은 단면적이 커 강성 및 구조적 하중지지 능력이 크다. 따라서 설계 지지력은 주로 지반의 지지력으로 결정 된다. 이와 달리 마이크로파일은 상대적으로 단면적이 작기 때문에 말뚝 본체의 허용하중 값이 설계의 지배적인 요소가 되는 경우가 많다.
- 마이크로파일의 전형적인 단면형상은 아래의 그림과 같으며, 말뚝 상부의 케이싱 설치구간은 영구 강재 케이싱과 강봉(또는 철근)으로, 정착구간이 형성되는 말뚝 하부의 케이싱 미설치구간은 강봉(또는 철근)만으로 보강된다. 마이크로파일의 지지력은 시공과정, 특히 굴착 및 그라우팅 기술/방법에 따라 상당히 달라질 수 있다. 설계시 그라우트 체와 주변 지반과의 마찰저항값을 가정하여 마이크로파일의 지지력을 산정하므로, 시공시 재하시험을 통해 설계 지지력이 확보 되는지를 반드시 확인하여야 한다. 그러므로 재하시험 자체가 설계의 한 부분으로 인식되어야 할 필요가 있다.



#### 4.4.3 마이크로파일의 지지력

- 일반적으로 지반 지지력 산정시 하중은 주변마찰력으로만 전이하며, 그라우트와 지반 사이의 마찰저항력은 균등하다고 가정한다.
- 기준안전율은 2.0~2.5 를 적용하며, 지지층이 견고하여 소성변형이 발생되지 않고 시공품질관리가 우수하며, 재하시험을 수행하는 경우에는 안전율 2.0 을 고려할 수 있다.
- 마이크로파일의 허용 지반 지지력은 아래와 같이 산정된다.

$$P_{G-allowable} = \frac{\alpha_{bond}}{FS} \times \pi \times D_b \times L_b$$

where:

$\alpha_{bond}$  = grout to ground ultimate bond strength;

FS = factor of safety applied to the ultimate bond strength;

$D_b$  = diameter of the drill hole; and

$L_b$  = bond length

여기서, 설계하중을 지지하기 위한 마이크로 파일의 정착부 길이 산정은 상기 식을 변형하여 아래와 같이 사용한다. 여기서  $P_{G-allowable}$  은 설계하중과 동일한 값을 적용하면 된다.

$$L_b = \frac{P_{G-allowable} \times FS}{\alpha_{bond} \times \pi \times D_b}$$

- FHWA(2005)에서 제시하는 지반조건 및 마이크로 파일 종류에 따른 그라우트와 지반 사이의 극한마찰저항력( $\alpha_{bond}$ ) 값을 아래의 표와 같이 나타내었다. 유사한 지반조건에서의 마이크로파일 설계 및 시공이 없는 경우에는 제시되어 있는 값의 평균치보다 큰 값을 적용시켜서는 안된다.

SOIL / ROCK DESCRIPTION	GROUT-TO-GROUND BOND NOMINAL STRENGTHS (kPa)			
	TYPE A	TYPE B	TYPE C	TYPE D
<b>Silt &amp; Clay</b> (some sand) (soft, medium plastic)	35-70	35-95	50-120	50-145
<b>Silt &amp; Clay</b> (some sand) (stiff, dense to very dense)	50-120	70-190	95-190	95-190
<b>Sand</b> (some silt) (fine, loose-medium dense)	70-145	70-190	95-190	95- 240
<b>Sand</b> (some silt, gravel) (fine-coarse, med.-very dense)	95-215	120-360	145-360	145-385



<b>Gravel</b> (some sand) (medium-very dense)	95-265	120-360	145-360	145-385
<b>Glacial Till</b> (silt, sand, gravel) (medium-very dense, cemented)	95-190	95-310	120-310	120-335
<b>Soft Shales</b> (fresh-moderate fracturing, little to no weathering)	205-550	N/A	N/A	N/A
<b>Slates and Hard Shales</b> (fresh-moderate fracturing, little to no weathering)	515-1,380	N/A	N/A	N/A
<b>Limestone</b> (fresh-moderate fracturing, little to no weathering)	1,035-2,070	N/A	N/A	N/A
<b>Sandstone</b> (fresh-moderate fracturing, little to no weathering)	520-1,725	N/A	N/A	N/A
<b>Granite and Basalt</b> (fresh-moderate fracturing, little to no weathering)	1,380-4,200	N/A	N/A	N/A

#### 4.4.4 마이크로파일 재료의 허용하중(Structural Design)

##### 4.4.4.1 상부 케이싱 설치구간 축방향 허용하중

- 마이크로파일의 상부 케이싱 설치구간에서의 축방향 압축 허용하중(Allowable Compression) 산정 공식은 아래와 같다.

$$P_{c-allowable} = \left[ 0.4 f'_{c-grout} \times A_{grout} + 0.47 F_{y-steel} (A_{bar} + A_{ca \sin g}) \right]$$

where

$P_{c-allowable}$  = allowable compression load;

$f'_c$  = unconfined compressive strength of grout (typically a 28-day strength);

$A_{grout}$  = area of grout in micropile cross section (inside casing only, discount grout outside the casing);

$F_{y-steel}$  = yield stress of steel;

$A_{bar}$  = cross sectional area of steel reinforcing bar (if used); and

$A_{casing}$  = cross sectional area of steel casing.

$F_{y-steel}$  = the minimum of  $F_{y-bar}$  and  $F_{y-casing}$

허용압축하중 산정 시 마이크로파일 각 재료(그라우트, 강봉 또는 철근, 케이싱)의 변형률 적합성(strain compatibility)이 고려되어야 한다. AASHTO(2002) 설계기준에 의하면 콘크리트 최대 압축 변형률은 0.003 이다. 이를 준용하여 그라우트의 압축 변형률은 0.003 으로 제한되며 보강재의 변형률도 동일한 값으로 제한된다. 따라서 상기 축방향 압축 허용하중 공식에서 보강재의 항복응력은 1) 케이싱의

항복응력, 2) 강봉(또는 철근)의 항복응력, 3) 변형률이 0.003 일 때의 강재의 응력 값 중에서 최소값을 적용해야 한다.

- 축방향 인발 허용하중(Allowable Tension) 공식은 아래와 같다. 마찬가지로 보강재의 항복응력은 케이싱의 항복응력 및 강봉(또는 철근)의 항복응력 중 최소값을 적용해야 한다.

$$P_{t-allowable} = 0.55 F_{y-steel} \times (A_{bar} + A_{casing})$$

- 압축력과 휨모멘트가 동시에 작용하는 복합하중(Combined Axial Compression and Bending)의 경우 조합응력에 대한 안정성 검토가 필요하며 AASHTO(2002) 설계기준에 제시되어 있는 아래의 식으로 검토한다.

$$\frac{P_c}{P_{c-allowable}} + \frac{M_{max}}{M_{allowable}} \leq 1.0$$

- $P_c$  = maximum axial compression load;
- $P_{c-allowable}$  is determined from Eq. 5-1;
- $M_{max}$  = maximum bending moment in the micropile; and
- $M_{allowable} = F_b (=0.55 F_{y-casing}) \times S$ .

마이크로파일 단면 중심부에 있는 강봉은 케이싱에 비해 휨저항 능력이 작으므로 무시되었으며, 또한 보수적으로 전체 수직하중을 케이싱이 담당하는 것으로 간주한다.

#### 4.4.4.2 하부 케이싱 미설치구간 축방향 허용하중

- 축방향 압축 허용하중

$$P_{c-allowable} = [0.4 f'_{c-grout} \times A_{grout} + 0.47 \times F_{y-bar} \times A_{bar}]$$

- 축방향 인발 허용하중

$$P_{t-allowable} = 0.55 F_{y-bar} \times A_{bar}$$

#### 4.4.5 수평방향 허용하중

##### 4.4.5.1 p-y analysis

- 마이크로파일의 수평방향 허용하중을 산정하기 위해서는 single pile 에 대한 p-y 해석을 수행하여 수평변위 및 휨모멘트를 평가한다.
- p-y analysis with L-pile program (Reese)
- Allowable lateral deflection = 15mm
- Allowable bending moment = 허용휨압축응력 x 단면계수

Values of  $\epsilon_{50}$  for intact clays (after Reese et al., 2005)

Consistency of clay	$\epsilon_{50}$
Soft	0.020
Medium	0.010
Stiff	0.005

Values of  $\epsilon_{50}$  for stiff clays (after Reese et al., 2005)

Undrained shear strength		$\epsilon_{50}$
(kPa)	(psi)	
50 – 100	7.3 – 14.5	0.007
100 -200	14.5 – 29.0	0.005
300 -400	43.5 – 58.1	0.004

Soil-modulus parameter (k) for sands (after Reese et al., 2005)

Relative Density	Loose		Medium		Dense	
	(kPa/m)	(lb/in <sup>3</sup> )	(kPa/m)	(lb/in <sup>3</sup> )	(kPa/m)	(lb/in <sup>3</sup> )
Submerged Sand	5,430	20	16,300	60	33,900	125
Sand Above WT	6,790	25	24,430	90	61,000	225

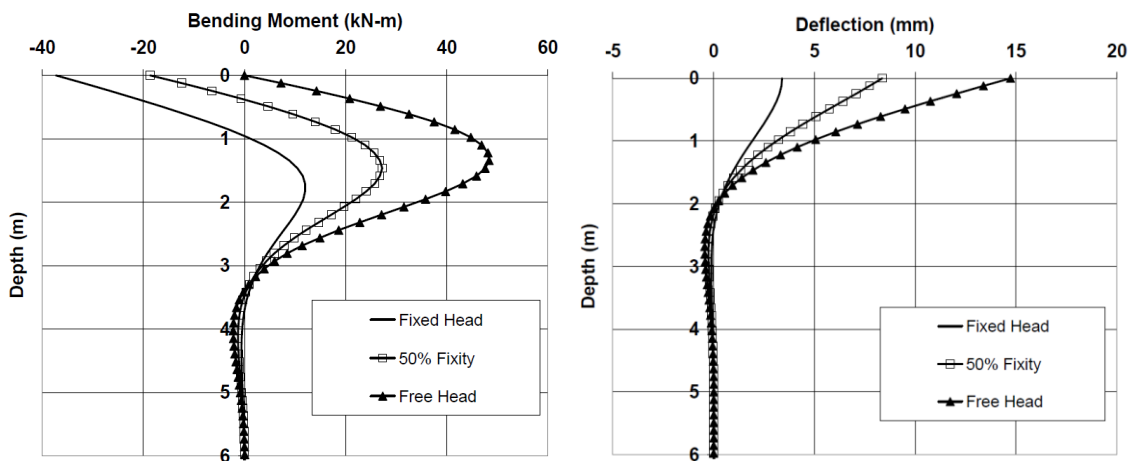
Soil-modulus parameter (k) for clays (after Reese et al., 2005)

Clay Consistency	Undrained Shear Strength		Static		Cyclic	
	(kPa)	(psi)	(kPa/m)	(lb/in <sup>3</sup> )	(kPa/m)	(lb/in <sup>3</sup> )
Soft	12 – 24	1.74 – 3.47	8,140	30	-	-
Medium	24 – 48	3.47 – 6.94	27,150	100	-	-
Stiff	48 – 96	6.94 – 13.9	136,000	500	54,300	200
Very Stiff	96 – 192	13.9 – 27.8	271,000	1,000	108,500	400
Hard	192 - 383	27.8 – 55.6	543,000	2,000	217,000	800

4.4.5.2 말뚝 두부조건(Micro Pile – Footing connection)

- 힌지조건 : 말뚝 두부가 기초에 30cm 이하 묻힘
- 고정조건 : 말뚝 두부가 기초에 60cm 이상 묻힘
- 묻힘길이 30~60cm(50% Fixity): Lpile 해석을 통해 힌지 및 고정의 중간값 산정

0 % Fixity (Pinned Head Condition)	50 % Fixity <sup>(1)</sup>	100 % Fixity (Fixed Head Condition) <sup>(1)</sup>
<p>Casing embedment of 300 mm (12 in.) or less or</p> <p>Reinforcing bar embedment with or without bearing plate or</p> <p>Any detail where top of micropile embedment is at or below the level of the bottom reinforcement of the footing</p>	<p>Casing embedment of 450 mm (18 in.) or</p> <p>Shear connection between casing and existing footing with minimum casing embedment of 450 mm (18 in.)</p>	<p>Casing embedment of 600 mm (24 in.) or more</p>



#### 4.4.6 좌굴검토

- 지중 공동, 연약지반 출현시 마이크로 파일 좌굴 평가가 필요하다.
- 마이크로파일 좌굴은 soil-pile interaction 문제이므로, 말뚝의 단면 및 강성, 지반의 전단강도 및 강성을 고려한 좌굴하중( $P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} + \frac{E_s l^2}{\pi^2}$ )을 평가한다.
- 위의 좌굴하중을 이용하여 아래와 같이 좌굴에 대한 한계 수평방향 지반변형계수를 유도하였다.

$$E_s^{LIMIT} = \frac{1}{\left[ \left( \frac{4I}{A^2} \right) \left( \frac{E}{F_y^2} \right) \right]}$$

- $E_s^{LIMIT}$  (한계 지반변형계수) <  $E_s$  (연약지반 변형계수) : 좌굴 가능성 없음

Elastic Constants of Soils Based on Soil Type(modified after AASHTO, 2002)

Soil Type	Range of Equivalent Elastic Modulus, kPa (ksf)
Clay	
Soft sensitive	2,400 - 14,400 (50 - 300)
Medium stiff	14,400 - 48,000 (300 - 1,000)
Very stiff	48,000 - 96,000 (1,000 - 2,000)
Loess	14,400 - 57,500 (300 - 1,200)
Silt	1,900 - 19,000 (40 - 400)

Elastic Constants of Various Soils Based on SPT N Value (modified after AASHTO, 2002)

Soil Type	Equivalent Elastic Modulus, kPa (ksf)
Silts, sandy silts, slightly cohesive mixtures	400 $(N_1)_{60}$ (8 $(N_1)_{60}$ )
Clean fine to medium sands and slightly silty sands	700 $(N_1)_{60}$ (14 $(N_1)_{60}$ )
Coarse sands and sands with little gravel	1,000 $(N_1)_{60}$ (20 $(N_1)_{60}$ )
Sandy gravels	1,200 $(N_1)_{60}$ (24 $(N_1)_{60}$ )

<끝>