

2. 고강도 H 형강 말뚝의 설계

2.1 설계기준

○ 말뚝 허용지지력 결정

말뚝재료의 허용지지력과 지반의 허용지지력 중 작은 값으로 결정

○ 일반적인 지지력 공식

$$R_U = R_P + R_S = q_p \cdot A_p + f_s \cdot A_s$$

R_U : 연직 지지력

Q_p : 극한 선단 지지력

Q_s : 극한 주면 마찰력

q_p : 단위 선단 지지력

f_s : 단위 주면 마찰력

A_p : 말뚝 선단 단면적

A_s : 말뚝 주면적

$$q_p = q_0 \cdot N_q$$

$$f_s = \sigma_v \cdot K_s \cdot \tan \delta$$

2.2 지지력 산정방법

구 분	방 법	비 고
이론적 해석방법	Terzaghi, Vesic 등에 의한 방법	이론적 해석방법
현장시험 자료를 이용하는 방법	SPT, CPT, PMT 자료 등	현장 시험 자료를 이용하는 방법
동적 항타공식에 의한 방법	Hiley, Danish 등 400여종	현장 시험항타시 자료를 이용하는 방법
파동이론 해석에 의한 방법	WEAP(Wave Equation Analysis of Pile Driving)	컴퓨터 프로그램으로 지지력 및 항타 관련 현상해석
재하시험에 의한 방법	동재하실험 정재하 시험 정동재하 시험(Statnamic, Pseudo Static)	항타 시공관리와 지지력 자료 확인

* 가장 합리적인 설계지지력 산정방법은 현장시험자료, 파동이론에 의한 방법으로 지지력을 산정하고, 시공 전에 재하시험으로 확인하여 적용한다.

2.3 설계시 유의사항

1) 안전율의 적용

말뚝의 지지력 산정에 사용되는 안전율은 지지력 산정방법, 지반조건, 말뚝 설치 방법, 시공정도등에 따라 적용한다.

- ① 이론적 해석방법이나 경험적 해석방법등에 의한 경우 = 2.5 ~ 3
- ② 재하시험을 수행하고 항복하중이 명확히 판정된 경우 = 2
- ③ 재하시험을 수행하고 항복하중이 명확하게 판정되지 않은 경우 = 2.5

2) H말뚝의 폐색효과

H 말뚝과 같은 개단 말뚝의 경우 지반에 타입되는 동안 관내도에 의한 폐색 정도는 지반조건, 관입 깊이, 말뚝크기, 선단부 형상, 시공장비등에 좌우된다.

H 말뚝의 폐색효과는 FHWA 에서 제시하는 기준에 따라 선단지지력 및 주변마찰력 계산시 해당 면적을 아래와 같이 고려하되, 경험적인 자료를 뒷받침하거나 현장에서 확인하는 과정을 거치도록 제안하고 있다.

○ H 말뚝의 지지력계산시 폐색효과 고려 방법

구 분	주면부	선단부	비 고
사질토	박스면적	박스면적	Nordlund 방법
점성토	플랜지의 마찰력 + 웨브의 전단력	박스면적	균은 점토인 경우 별도 고려

3) N값의 보정

일반적으로 이론적인 자유 낙하에너지의 60%를 N_{60} 이라 하여 N 값의 표준 값으로 인정하고 있다. 현장에서 실측된 N_m 값을 표준에너지에서의 N_{60} 으로 수정하는 데에는

아래와 같은 관계식을 적용하여 보정한다.

$$N_{60} = N_m (e_m / 60)$$

N_{60} : 이론적 자유 낙하에너지의 60%인 경우의 N 값

N_m : 실측된 N 값

e_m : 실측에너지 효율(%) = SPT 실측값, 52~53%

상재하중에 대한 보정은 다음 식을 이용하여 실시한다.

$$N' = N_{60} \cdot \sqrt{(100 / \sigma_{vo}')}$$

N' : 수정된 N 값

N_{60} : N_{60} 으로 수정된 N 값

σ_{vo}' : 조사위치에서의 연직 유효응력(단위: kPa)

4) 군말뚝 조건의 고려

- 선단 지지력은 말뚝간격에 거의 영향을 받지 않는다.
 - 사질토 지반에서는 지반다짐으로 주변 마찰력이 증가한다.
 - 점성토 지반에서는 주변 지반교란으로 주변 마찰력이 감소되나
소배토 말뚝인 H 말뚝의 경우 그 영향이 적다.
- 말뚝 중심간 최소간격이 2.5D 이상의 경우 군말뚝 효과 고려하지 않음.

5) 부식기준 고려

○ 국내기준

기준, 지침, 시방서	부식속도 및 부식한계
구조물 기초 설계기준 (건설교통부 1986)	HWL이상 0.3mm/년
	HWL과 해저간 0.1mm/년
	해저니토층 0.03mm/년
	육상 대기중 0.1mm/년
	흙속(지하수위위) 0.03mm/년
	흙속(지하수위아래) 0.02mm/년

○ 일본기준

기준, 지침, 시방서	부식속도 및 부식한계
항만시설의 기준.동해설 (일본항만협회 1979)	HWL이상 0.3mm/년
	HWL과 해저간 0.1mm/년
	해저니토층 0.03mm/년
	육상 대기중 0.1mm/년
	흙속(지하수위위) 0.03mm/년
	흙속(지하수위아래) 0.02mm/년
건축기초 구조설계기준 (일본건축학회, 1975.5)	* 부식한계 0.02mm X 내용연수
건축성 주택국 건축지도 806호 (1978. 11)	* 지반의 부식시험을 행한 경우, 연간부식한계(mm/yr) X 80(또는 내용연수) * 부식시험을 행하지 않은경우 2mm
동경도 건축 구조 설계 지침 (1978. 5)	* 연간부식한계(mm/yr) X 80 * 말뚝의 주변흙에 접한 표면 2mm
구조물설계 표준해설 (일본 국유철도, 1974. 6)	* 말뚝의 주변흙에 접한 표면 2mm * 6cm이상의 두께인 콘크리트내에 접한 표면 은 무시함
도로교시방서 동해설 IV 하부구조편 (일본도로협회, 1979. 8)	* 해수나 유해한 공장폐수 등의 영향을 받지않는 경우에 부식조사를 행하지 않으며, 방식처리도 하지 않을 때는 상시수중 또는 토중에 있는 부분(지하수중에 있는 부분도 포함)에 대해서

	일반적으로 2mm의 부식두께를 고려
--	---------------------

6) 부마찰력

○ 발생가능지반조건

연약지층($N' \leq 6$ 인 점토, 실트층)상부에 매립층이 있는 경우
연약층의 압밀 침하로 주면 부마찰력 발생

○ 중립점 위치

지반 침하와 말뚝의 침하가 같아서 상대적 이동이 없는 점
압밀층 높이(H) = $n \cdot H$

N	지지층조건
0.8	마찰 말뚝
0.9	모래층 지지층
1	암반, 굳은 지지층

○ 부마찰력

$$Q_{ns} = f_n \cdot A_s$$

$$f_n = \beta \cdot \sigma'_v$$

구분	β
점토	0.2~0.25
실트	0.25~0.35
모래	0.35~0.5

σ'_v : 유효상재압

A_s : 주면면적

○ 설계 허용 지지력

$$Q_a = (Q_P + Q_S - Q_{ns}) / \text{Factor of Safety}$$

2.4 정적 지지력 산정방법

1) 산정방법

구분	공식	결정계수		비고
		선단지지력	주변마찰력	
Meyerhof 방법	선단지지력 $(40N'_B D_B) / b \cdot A_p$ 주변마찰력 $0.2N'(\leq 10t/m^2)A_s$	N'_B :말뚝선단 부근 평균 N 값 (선단아래3D 선단상향 8D 사이의 평균 N 값) D_B :지지층 근입깊이 b :말뚝 폭	N' :평균수정 N 값 A_s :주면면적(m^2)	사질토 적용
DM-7 방법	선단 지지력 -사질토 $q'N_q \cdot A_p$ 주변 지지력 -사질토 $K_0 \sigma'_v \tan \delta \cdot A_s$ -점성토 $C_A \cdot A_s$	q' :선단부의 연직 유효응력 N_q :지지력 계수 A_p :선단면적	K_0 :시공조건에 따 른 토압계수 σ'_v :각층의 연직 유효응력 δ :말뚝과 흙사이 마찰각 C_A :부착력(t/m^2) A_s :주면면적(m^2)	항타 말뚝 $K_0:1.0$ 강재 $\delta:20^\circ$
FHWA	선단지지력 -사질토 $\alpha \cdot P_d \cdot N_q \cdot A_p$ 주변지지력 -사질토 $K_\delta \cdot C_F \cdot P_d \cdot \sin \delta \cdot C_d \cdot d$ -점성토 $C_a \cdot C_d \cdot d$	A_p :선단단면적(m^2) α :말뚝의 폭 및 깊이에 관한 계수 P_d :각층의 상재유 효응력 N_q :지지력계수	K_δ :수평토압계수 C_F : K_δ 에 대한계수 P_d :유효상재응력 δ :말뚝과 흙사이 의 마찰각 C_a :부착력 $C_d \cdot d$:주면면적	말뚝의 종류 및 내부 마찰 각에 따라 결 정되는 계수 적용
US ARMY	선단지지력 -사질토 $q'N_q \cdot A_p$ 주변지지력 -사질토 $K_0 \sigma'_v \tan \delta \cdot A_s$ -점성토 $\alpha C_u \cdot A_s$	q' :선단부의 연직 유효응력 N_q :지지력계수 A_p :선단면적	K_0 :시공조건에 따 른 토압계수 σ'_v :각층의 연직 유효응력 δ :말뚝과 흙사이 마찰각 αC_u :부착력(t/m^2) A_s :주면면적(m^2)	항타말뚝 $K_0:1.25 \sim 2.0$ 강재 δ : $0.67 \sim 0.83\phi$

SPT/CPT	선단지지력 $q_c \cdot A_p$ 주면지지력 $\eta \cdot q_c A_s$	q_d : 선단 지지력 A_p : 선단면적	η : 마찰계수 A_s : 주면면적(m ²)	
---------	---	--------------------------------	--	--

2) Meyerhof방법

SPT(표준관입시험)결과를 활용한 경험적 방법으로 사질토지반에 시공된 말뚝의 지지력 계산방법

1) 선단지지력 공식

$$f_p = 4N'_B \cdot D_B / b \leq 40N'_B$$

f_p : 단위 선단지지력

N'_B : 말뚝선단부근 평균 N 값

N'_0 : 지지층 상부층의 평균 N 값

D_B : 지지층 근입깊이

b : 말뚝 폭

$$R_p = f_p \cdot A_p$$

R_p : 선단지지력

A_p : 선단면적(m²)

○ 선단지지력 계산방법

- 유효 상재압을 구한 후 N 치를 수정 N 값으로 환산한다.
- 선단 상부층의 평균 N 치를 구한다.
- 선단 부근의 평균 N 값을 구한다(선단 상향 8D ~ 하향 3D 사이의 평균값)
- 근입 깊이 값을 결정하여 단위 선단지지력을 구한다.
- 단위 선단지지력은 $40N_B$ 보다 크지 않아야 한다.
- 단위 선단지지력에 선단면적을 곱하여 선단 지지력을 구한다.

2) 주면 마찰력 공식

$$f_s = 0.2N' \leq 10(t/m^2)$$

N' : 각 토층의 수정된 N 값의 평균치

A_s : 주면면적(m²)

$$R_s = f_s \cdot A_s$$

R_s : 주면 지지력

A_s : 주면면적(m²)

○ 주면 마찰력 계산방법

- 실측된 N 치의 수정 N 값을 구한다.
- 각층별로 수정된 N 값의 평균값을 구한다.
- 각 층별로 단위 주면마찰력을 구한다.
- 각 층별로 단위 주면마찰력에 주면면적을 곱하여 층별 주면마찰력을 구한다
- 각층별 주면마찰력을 합하여 전체 주면마찰력을 구한다.

3) 극한 지지력

$$R_U = R_P + R_S$$

4) 허용 지지력

$$R_A = R_U / \text{Factor of Safety}$$

○ 유효 상재압에 따른 N치 보정계수 표

유효상재압		보정 계수
(ton/ft ²)	ton/m ²	
0.00	0.00	2.0000
0.25	2.69	1.4700
0.50	5.38	1.2000
0.75	8.07	1.0800
1.00	10.76	1.0000
1.25	13.46	0.9400
1.50	16.15	0.8750
1.75	18.84	0.8000
2.00	21.53	0.7700
2.25	24.22	0.7400
2.50	26.91	0.7000
2.75	29.60	0.6600
3.00	32.29	0.6200
3.25	34.98	0.6000
3.50	37.67	0.5800
3.75	40.37	0.5600
4.00	43.06	0.5375
4.25	45.75	0.5200
4.50	48.44	0.5000
4.75	51.13	0.4875
5.00	53.82	0.4700

○ 점성토의 일축압축강도와 N값의 관계

N 값	컨시턴스	일축압축강도
<2	매우 연약	<0.25

2~4	연약	0.25~0.5
4~8	보통	0.5~1.0
8~15	견고	1.0~2.0
15~30	매우 견고	2.0~4.0
N>30	고결	>4.0

3) DM-7방법

DM-7 은 지지력 산정시 사질토지반에서는 Skempton 방법, 점성토에서는 Tomlinson 방법을 근간으로 하고 있다.

1) 선단 지지력 공식

○ 사질토

$$R_p = q' N_q \cdot A_p$$

q' : 선단부의 연직 유효응력

N_q : 지지력계수

A_p : 선단면적

○ 선단 지지력 계산방법

- 선단부 연직유효응력을 구한다.
- 흙의 내부 마찰각에 따른 지지력 계수 구함
- 선단면적을 구한다

지지력계수(N_q)

내부마찰각(ϕ)	26	28	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
향타밀도(N_q)	10	15	21	24	29	35	42	50	62	77	86	120	145

2) 주면지지력 공식

○ 사질토

$$R_s = K_0 \sigma'_v \tan \delta \cdot A_s$$

○ 점성토

$$R_s = C_A \cdot A_s$$

K_0 : 시공조건에 따른 토압계수

σ'_v : 각층의 연직 유효응력

δ : 말뚝과흙사이 마찰각

C_A : 부착력(t/m^2)

A_S : 주면면적(m^2)

○ 주면마찰력 계산방법

- 토압계수를 정한다(H 말뚝의 경우 1.0)
- 각 층의 유효연직응력을 구한다.
- 토압계수, 마찰각을 정한다.
- 부착력 값을 정한다.
- 주면면적을 구한다.

말뚝종류	K_0	δ
H말뚝	0.5~1.0	강재: 20° 콘크리트: $3/4\phi$
항타말뚝(PHC, 강관)	1.0~1.5	
굴착말뚝	0.7	

3) 극한지지력

$$R_u = R_p + R_s$$

4) 허용지지력

$$R_a = R_u / \text{Factor of Safety}$$

4) FHWA 방법

1) 선단지지력 공식

○ 사질토

$$R_p = \alpha \cdot P_t \cdot N_q \cdot A_p$$

○ 점성토

$$R_p = 9 \cdot C_u \cdot A_p$$

2) 주면지지력 공식

○ 사질토

$$R_s = K_\delta \cdot C_F \cdot P_d \cdot \sin \delta \cdot C_d \cdot D$$

○ 점성토

$$R_s = C_a \cdot C_d \cdot d$$

d : 임의 깊이

D : 말뚝 관입길이

K_δ : 임의깊이 d에서의 측방 토압계수

δ : 말뚝과 흙 사이의 마찰계수

C_F : K_δ 의 보정계수

P_d : 임의 깊이 구간에서의 유효상재압

ω : 수직에 대한 말뚝표면의 경사각

Φ : 흙의 내부마찰각

C_d : 임의 깊이에서의 말뚝 주면장

D : 말뚝 분절 길이

α : 말뚝깊이-폭에 관련된 무차원계수

N_q : 지지력계수

P_t : 말뚝 선단에서의 유효상재압

C_a :부착력

○ 지지력 산정방법을 단계적으로 설명하면 다음과 같다.

① 각 토층흙의 내부마찰각 Φ 를 결정한다.

- 각 토층 경계부에서의 유효 상재압력을 구한다.

- 산정된 유효 상재압력에 의해 그림 2에서 수정된 N' 를 구한다.

- 실내시험 결과나 N' 값으로부터 각 층의 내부마찰각을 구한다.

- ② 말뚝과 흙사이의 마찰각 δ 를 산정한다.
 - 말뚝 단위길이당 체적에 의해 대체되는 흙의 체적 V 를 계산한다.
 - 그림 3 을 이용하여 δ / ϕ 를 구한다.
 - δ / ϕ 값으로부터 δ 를 산정한다.
- ③ 임의 깊이에서의 수평 토압계수 K_δ 를 결정한다.
 - 말뚝 단위길이당 배토되는 지반체적 V 와 말뚝표면 경사각도 ω 를 산정한 후 그림 4~7 을 이용하여 다음 과정에 의해 K_δ 를 산정한다.
 - 그림에서 V 와 ϕ 가 정확하게 일치하지 않을 경우에는 인접 곡선의 값에 의해 선형대수 보간법을 적용하여 값을 결정한다.
- ④ δ 와 ϕ 가 다를 경우 보정계수 C_F 를 산정한다(그림 8).
- ⑤ 각 지층의 중간위치 심도에서 평균 유효 상재압 P_d 를 산정한다.
- ⑥ 각 지층에서의 극한 주면마찰력 R_S 을 산정한다.
 - H 말뚝의 경우 말뚝 주면면적에 사각 Box 면적을 사용한다.
- ⑦ 말뚝 선단부근의 ϕ 로부터 지지력계수 N_q 와 α_t 계수 를 산정한다.
 - 그림 9 에서 말뚝 선단부근의 ϕ 로부터 말뚝 길이와 직경비에 관련된 계수 α_t 를 구한다.
 - 그림 10 에서 ϕ 에 해당하는 지지력계수 N_q 를 구한다.
 - ϕ 값이 표준관입시험 결과로부터 산정되는 경우 말뚝 선단으로부터 하부로 말뚝직경의 3 배 깊이 부분까지의 유효 상재항이 보정된 평균 N' 값을 이용하여 ϕ 를 추정한다.
- ⑧ 말뚝 선단부의 유효 상재압 $P_t(\leq 150\text{kpa})$ 를 계산한다.
- ⑨ 극한 선단지지력을 계산한다.
 - $R_P = \alpha_t \cdot N_q \cdot P_t \cdot A_P$ 산정식과 $R_P = q_l \cdot A_P$ 로 선단지지력을 산정하여 작은 값을 적용한다.
 - q_l 값은 그림 11 로부터 구한다. 이때, N 치에 의한 ϕ 산정은 ⑦항의 방식을 준용한다.

3) 극한 지지력

$$- R_U = R_P + R_S$$

4) 허용 지지력

$$- R_a = R_U / F.S$$

5) US ARMY 방법

1) 선단지지력 공식

○ 사질토

$$R_p = \sigma_v' N_q \cdot A_p$$

σ_v' : 선단부의 연직유효응력

N_q : 지지력계수

A_p : 선단면적

○ 선단지지력 계산방법

- 선단부 연직유효응력을 구한다.
- 선단부근은 N 치 평균은 상하 8D 이하로 한다
- N 치평균 값에 따른 흙의 내부마찰각을 구하고 이에 따른 지지력계수를 구함
- 선단면적을 구한다

지지력 계수(N_q)

내부마찰각(ϕ)		0	5	10	15	20	25	30	35	40	43	45
N_q	Terzaghi & peak	1	1.7	2.6	4	6	11	18	34	64	113	145
	Tomlinson	1	1.6	2.7	4.4	7.4	13	23	41	81	137	173
	Meyerhof	1	1.8	2.8	4.9	8.5	17	28	51	110	200	200

2) 주면지지력 공식

○ 사질토

$$R_s = K_0 \sigma_v' \tan \delta \cdot A_s$$

○ 점성토

$$R_s = C_A \cdot A_s$$

K_0 : 시공조건에 따른 토압계수

σ_v' : 각 층의 연직 유효응력

δ : 말뚝과 흙사이 마찰각

C_A : 부착력(t/m^2) = αc_u

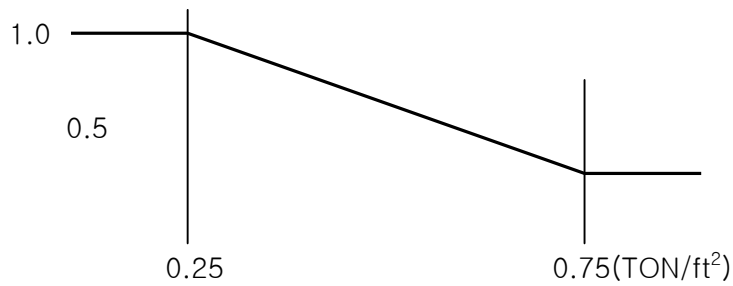
A_s : 주면면적(m^2)

○ 주면 마찰력 계산방법

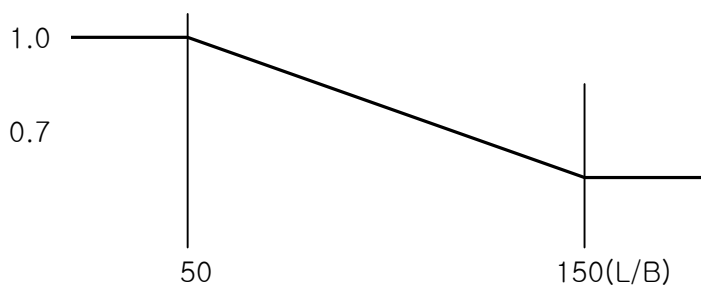
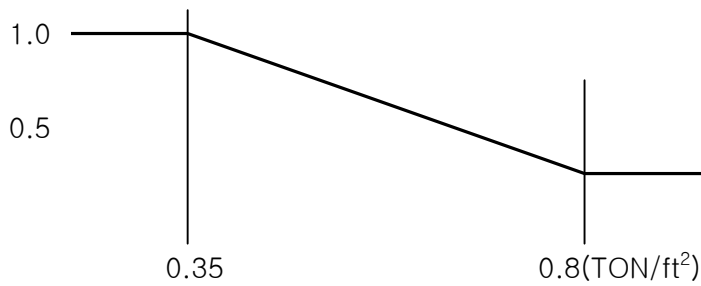
- 토압계수를 정한다(H 말뚝의 경우 1.5)
- 각 층의 유효연직응력을 구한다.
- 토압계수, 마찰각을 정한다.
- 부착력 값을 정한다.
- 주면면적을 구한다.

말뚝종류	K_0		δ
	Silt, clay	Sand	
항타말뚝(PHC,강관)	1.25	2	강재:0.75 Φ 콘크리트:0.95 Φ
굴착말뚝	1	1.5	

○ α 값 ($L/B \leq 50$)



○ α 값 = $\alpha_1 \times \alpha_2$ ($L/B > 50$)



3) 극한지지력

$$R_u = R_p + R_s$$

4) 허용지지력

$$R_a = R_u / \text{Factor of Safety}$$

6) SPT-CPT 방법

1) 선단지지력 공식

$$R_p = q_c \cdot A_p$$

q_c : 단위 선단지지력

A_p : 선단면적

- N' 치로 q_c 계산방법
 - 입력된 N 치 보정
 - N' 치를 $q_c = \alpha \cdot N' \leq 1500 \text{ t/m}^2$ 값으로 환산
 - 선단면적을 구한다

단위: ton/m^2

토질종류	stiff clay	clay	clayey silt	silt	silty sand	fine sand	sand	Coarse sand
α	10	10	15	20	35	40	60	80

- S_u 로 q_c 계산방법

N 치	S_u 비배수강도(kg/cm^2)	$q_c(\text{kg/cm}^2)$
2이하	0.25이하(매우 연약)	3이하
2~4	0.25~0.5(연약)	3~5.75
4~8	0.5~1.0(중간, 굳은점토)	5.75~10
15~30	1~2(굳은 점토)	10~20
	2~3.83(매우 굳은 점토)	20~40
30이상	3.83이상(단단한 점토)	40이상

2) 주면지지력 공식

$$R_s = \eta \cdot q_c \cdot A_s$$

η : 마찰계수

q_c : 단위지지력

A_s : 주면면적(m^2)

○ 마찰계수 계산

토질의종류	선단지지력(kg/cm ²)	마찰계수(η)
실트질 점토 및 느슨한 모래	$30 < q_c < 50$	1/30
적당한 굳기의점토	$20 < q_c < 80$	1/60
굳은 점토	$q_c > 20$	1/80
단단한 실트	$q_c > 50$	1/100
사질토	$100 < q_c \leq 150$	1/100
사질토	$q_c > 150$	1/200

3) 극한지지력

$$R_u = R_p + R_s$$

4) 허용지지력

$$R_a = R_u / \text{Factor of Safety}$$