

1. 직접기초 설계

1.1 직접기초 적용범위 및 설계조건

1.1.1 직접기초 적용범위

직접기초는 지반이 좋은 조건, 풍화암 정도 이상인 경우에 적용할 수 있다. 다음 [표 4.1]은 개략적인 지지력 평가를 수행한 결과이며, N값에 따른 지반의 지지력과 직접기초가 가능한 지반이라고 판단된다. 다음은 지반의 N값으로 적용가능한 층수별 필요 지지력을 표시한 것이며, 침하검토가 추가되는 경우 N=20 이하에서는 지지층으로 하지 않는 것이 건물의 안정성을 확보하는 것이라 판단된다. N=20~30 범위인 경우는 병용기초(Piled Raft Foundation)를 적용하는 것이 건물의 안정성을 확보하는 것이다.

N	qult(kPa)	qa(kPa)	건물층수	지압응력(kPa)	비고
10	256	85.33	5	75	OK
15	384	128.00	6	90	OK
20	512	170.67	8	120	OK
25	640	213.33	10	150	OK
30	768	256.00	15	225	OK
35	896	298.67	16	240	OK
40	1024	341.33	20	300	OK
50	1280	426.67	25	375	OK
60	1536	512.00	30	450	OK

1.1.2 직접기초 설계조건

직접기초의 설계조건은 다음과 같이 가정한다.

- 지상 5층 / 지하 1층 / 층간높이 3.0m
- 건물무게 : 15.0kN/m^2
- 건물 밑면적 : B=10.0m, L=10.0m
- 지역 : 서울시 성북구
- 내진등급 : I 등급 지역
- 지반조건 : 풍화암 N=60

1.2 지진특성 산정

1.2.1 건축물의 중요도 결정

건축물 설계에서 내진 등급을 결정하기 위해서는 중요도를 결정하는데, 중요도(1)에 대한 내용은 다음과 같다. 5층 이상이고 다가구가 거주하는 것으로 분류한다면 중요도(1)에 해당된다고 판단된다.

- (1) 연면적 1,000 m² 미만인 위험물 저장 및 처리시설
- (2) 연면적 1,000 m² 미만인 국가 또는 지방자치단체의 청사·외국공관·소방서·발전소·방송국·진신전화국
- (3) 연면적 5,000 m² 이상인 공연장·집회장·관람장·전시장·운동시설·판매시설·운수시설(화물 터미널과 집배송시설은 제외함)
- (4) 아동관련시설·노인복지시설·사회복지시설·근로복지시설
- (5) 5층 이상인 숙박시설·오피스텔·기숙사·아파트
- (6) 학교
- (7) 수술시설과 응급시설 모두 없는 병원, 기타 연면적 1,000 m² 이상인 의료시설로서 중요도(특)에 해당하지 않는 건축물

1.2.2 내진등급과 중요도 계수 결정

건축물의 중요도가 결정되면, 적용 내진 등급과 중요도 계수를 결정한다. 다음은 설계기준에서 제시한 내진등급과 중요도 계수이다.

- 건물의 중요도 : 중요도(1)
- 내진등급 : I
- 내진등급에 따른 중요도 계수 : 1.2

내진등급과 중요도계수

건축물의 중요도 ¹⁾	내진등급	내진설계 중요도계수(I_E)
중요도(특)	특	1.5
중요도(1)	I	1.2
중요도(2), (3)	II	1.0

1) KDS 41 10 05 (3.건축물의 중요도분류)에 따름

※ KDS 41 17 00 : 2019 건축물 기초구조 설계기준

계획하는 건축물의 지하실이 있는 경우는 다음 사항을 참조하여 중요도를 결정하며, 그렇지 않은 경우는 지상 구조물의 내진등급을 따르며, 본 검토에서는 지상구조물의 지반등급을 따른다.

- 지하구조물은 건축물로 분류된 구조물(단독 지하주차장, 지하역사, 지하도 상가 등)과 건축물의 지상층과 연결되어 있는 지하구조물(공동주택의 지하주차장 등)이다.

- 지하구조물의 중요도

지하구조물의 중요도는 용도 및 규모에 따라 KDS 41 10 05 건축구조기준 총칙의 3. 건축물의 중요도 분류를 따른다. 다만, 지하층이 있는 건축물에서 지하층이 지상층에 비하여 넓은 평면을 가지는 경우, 지상층으로부터 전달되는 하중을 부담하는 영역 및 주요한 횡력(토압, 수압 등)을 지지하는 부재는 지상층의 중요도를 따르며, 그외 부분의 중요도는 지하층의 용도에 따라서 중요도계수를 다르게 적용할 수 있다.

1.2.3 유효지반가속도 산정

가. 지진구역 계수 이용방법

우리나라 지진구역 및 이에 따른 지진구역계수(Z)는 각각 국가설계기준(KDS 17 10 00 : 2018 내진설계 일반)을 따른다.

$$S = z \times I = 0.11 \times 2.0 = 0.22$$

지진구역

지진구역	행정구역	
I	시	서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 울산, 광주, 세종
	도	경기, 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남, 강원 남부1
II	도	강원 북부2, 제주
1 강원 남부(군, 시) : 영월, 정선, 삼척, 강릉, 동해, 원주, 태백		
2 강원 북부(군, 시) : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천, 속초		

※ KDS 17 10 00 : 2018 내진설계 일반

지진구역계수(평균재현주기 500년에 해당)

지진구역	I	II
지진구역계수, Z	0.11	0.07

※ KDS 17 10 00 : 2018 내진설계 일반

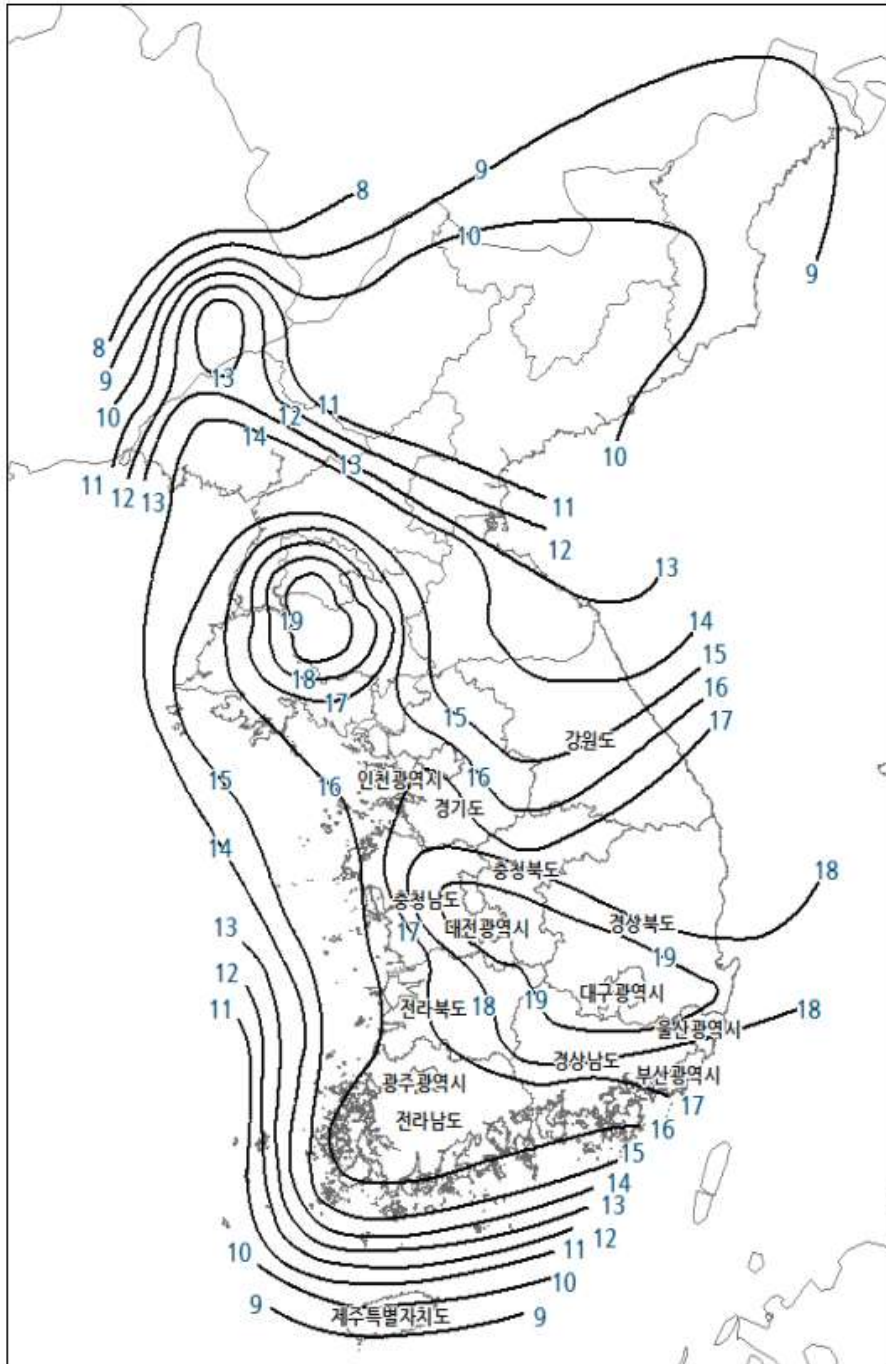
위험도 계수

평균재현주기(년)	50	100	200	500	1,000	2,400	4,800
위험도계수, I	0.40	0.57	0.73	1	1.4	2.0	2.6

※ KDS 17 10 00 : 2018 내진설계 일반

나. 지도에서 검색

다음은 지도에서 검색하는 방법으로, 서울은 2400년 기준으로 0.16에 가깝다.



국가지진위험지도, 재현주기 2400년 최대고려지진의 유효지반가속도(S)% (소방방재청, 2013)

1.2.4 지반 증폭계수

단주기 지반증폭계수 F_a 와 1초 주기 지반증폭계수 F_v 는 각각 다음 [표 4.6], [표 4.7]과 같으며, 지반의 등급은 조사를 하지 않은 경우는 S_5 또는 S_6 로 정하고, 조사하지 않은 경우는 S_4 로 정할 수 있다. 원칙적으로 지반조사는 하여야 한다.

- $S = 0.22$, 지반등급 S_4
- $F_a = 1.4$
- $F_v = 2.0$

정확하게는 $S=0.2$, $F_a=1.4$ 와 $S=0.3$, $F_a=1.2$ 의 중간값을 보간법을 이용하여 $S=0.22$ 의 F_a , F_v 의 값을 산정하는 것이다. 안정성을 고려하여 높은 값을 적용할 때는 문제가 없다.

단주기지반증폭계수, F_a

지반종류	지진지역		
	$s \leq 0.1$	$s=0.2$	$s=0.3$
S_1	1.12	1.12	1.12
S_2	1.4	1.4	1.3
S_3	1.7	1.5	1.3
S_4	1.6	1.4	1.2
S_5	1.8	1.3	1.3

* s는 설계스펙트럼 가속도 산정식 (4.2-1)에 적용된 값이다. 위 표에서 s의 중간값에 대하여는 직선보간한다.

1초주기 지반증폭계수, F_v

지반종류	지진지역		
	$s \leq 0.1$	$s=0.2$	$s=0.3$
S_1	0.84	0.84	0.84
S_2	1.5	1.4	1.3
S_3	1.7	1.6	1.5
S_4	2.2	2.0	1.8
S_5	3.0	2.7	2.4

* s는 설계스펙트럼 가속도 산정식 (4.2-1)에 적용된 값이다. 위 표에서 s의 중간값에 대하여는 직선보간한다.

- (1) 지하층 및 지상층 건물의 설계에는 단일값의 대표지반증폭계수를 사용해야 하며, 이때 대표지반증폭계수는 각 지반조사 위치에서 결정된 값의 평균값으로 정하거나, 설계상에 가장 불리한 값으로 정한다. 하나의 지하층 구조로 연결된 복수의 지상층 건물의 설계에도 단일값의 대표지반증폭계수를 사용한다.
- (2) 건물이 급격한 경사지에 건설되는 경우 대표지반증폭계수는 각 지반조사위치에서 결정된 값 중에서 설계상에 가장 불리한 값으로 정한다.
- (3) F_a 와 F_v 값을 부지고유역의 지진응답해석을 수행하여 결정할 수 있다. 이 경우 부지고유응답해석으로 산정한 설계스펙트럼가속도 S_{DS} 와 S_{D1} 는 지진구역계수(Z)와 2400년 재현주기에 해당하는 위험도계수(I) 2.0을 곱한 값에 [표 4.6], [표 4.7]의 (2)항에 제시된 해당지반의 증폭계수를 적용하여 구한 값의 80% 이상이어야 한다.

1.2.5 설계스펙트럼 가속도

(1) 단주기와 주기 1초의 설계스펙트럼가속도 S_{DS} , S_{D1} 은 다음 식에 의하여 산정한다.

$$S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times 2/3$$

$$S_{D1} = S \times F_v \times 2/3$$

여기서, F_a 와 F_v 는 각각 [표 4.6]과 [표 4.7]에 규정된 지반증폭계수이다.

(2) 기반암의 깊이가 20m를 초과하고 지반의 평균 전단파속도가 360m/s 이상인 경우, [표 4.7]에 규정된 F_v 의 80%를 적용한다.

(3) 지반분류가 S_5 이고 기반암의 깊이가 불분명한 경우, [표 4.6]과 [표 4.7]에 규정된 F_a 와 F_v 의 110%를 적용한다.

$$S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times 2/3 = 0.2 \times 2.5 \times 1.4 \times 2/3 = 0.4667$$

$$S_{D1} = S \times F_v \times 2/3 = 0.2 \times 2 \times 2/3 = 0.2667$$

1.2.6 고유주기의 약산법

근사 고유주기 T_a (초)는 다음 식에 따라 구한다.

$$T_a = C_t h_n^x$$

여기서,

$C_t = 0.0466$, $x=0.9$: 철근콘크리트모멘트골조

$C_t = 0.0724$, $x=0.8$: 철골모멘트 골조

$C_t = 0.0731$, $x=0.75$: 철골 편심가새골조 및 철골 좌굴방지가새골조

$C_t = 0.0488$, $x=0.75$: 철근콘크리트전단벽구조, 기타골조

h_n : 건축물의 밑면으로부터 최상층까지의 전체높이(m)

- (1) 강성에 영향을 줄 수 있는 비보강채움벽이 있는 철근콘크리트모멘트골조, 철골모멘트골조의 주기는 상기식에 2/3를 곱하여 산정한다. 콘크리트 전단벽체가 주요 횡저항 시스템인 경우에는 기타골조의 주기식을 적용한다.
- (2) 철근콘크리트와 철골 모멘트저항골조에서 12층을 넘지 않고, 층의 최소높이가 3m 이상일 때 근사고유주기 T_a 는 아래 식에 의하여 구할 수 있다.

$$T_a = 0.1N$$

여기서, N : 층수

- (3) 12층 이하인 경우 다음식으로 산정할 수 있다.

$$T_a = 0.1N \cong 0.1 \times 5 = 0.5$$

$$T_a = C_t \times 5^x = 0.0466 \times 5^{0.9} = 0.1986$$

여기서, $C_t = 0.0466$, $x=0.9$: 철근콘크리트모멘트골조

1.2.7 지진응답계수

- (1) 지진응답계수 C_s 는 다음과 같이 구한다.

$$- R = 4, I_E = 1.2$$

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left[\frac{R}{I_E} \right]} = \frac{0.4667}{\left[\frac{4}{1.2} \right]} = 0.140$$

- (2) 산정한 지진응답계수 C_s 는 다음 값을 초과하지 않아야 한다.

$$T \leq T_L : C_s = \frac{S_{D1}}{\left[\frac{R}{I_E} \right] T} = \frac{0.2667}{\left[\frac{4}{1.2} \right] \times 0.1986} = 0.403$$

$$T > T_L : C_s = \frac{S_{D1} T_L}{\left[\frac{R}{I_E} \right] T^2} = \frac{0.2667 \times 5}{\left[\frac{4}{1.2} \right] \times 0.1986^2} = 10.142$$

- (3) 그러나 지진응답계수 C_s 는 다음 값 이상이어야 한다.

$$C_s = 0.044 S_{DS} I_E = 0.044 \times 0.4667 \times 1.2 = 0.0246 \geq 0.01$$

여기서, I_E : 표 2.2-1에 따라 결정된 건축물의 중요도계수

R : 표 6.2-1에 따라 결정한 반응수정계수

S_{DS} : 4.2에 따른 단주기 설계스펙트럼가속도

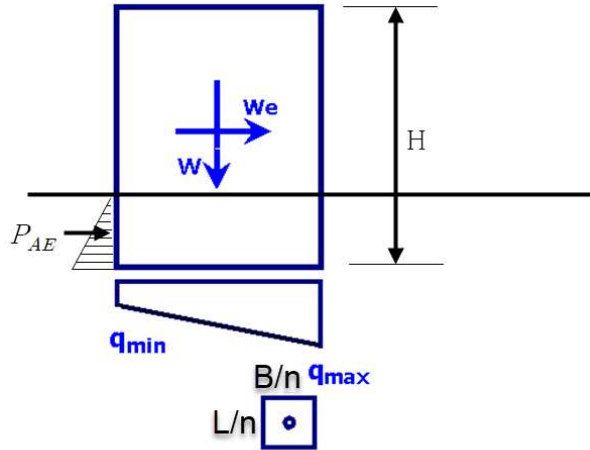
S_{D1} : 4.2에 따라 결정한 주기 1초에서의 설계스펙트럼가속도

T : 7.2.3에 따라 산정한 건축물의 고유주기(초)

T_L : 5초

1.3 건축물 지진에 의한 하중

건물 기초 하부에 지진으로 발생하는 하중은 건물에 발생하는 지진력과 같기 때문에 다음과 같이 산정한다. 주의할 점은 지하층이 있는 경우, 그림과 같이 지진토압을 산정하여 추가해야 하며, 이때 하중조합의 원칙을 따라야 한다. 또한 지하구조물 지진 등급을 다르게 할 경우는 지하층과 지상층, 토압으로 나누어 산정해야 한다.



지진시 건축물 토압산정 방법

- (1) 건축물의 무게는 별도의 구조계산식 없는 경우 안전측으로 다음과 같이 산정한다.

$$W = Nq_b BL = 5 \times 15 \times 10 \times 10 = 7,500 \text{ kN}$$

여기서, N : 건물 층수
 q_b : 건축 면적당 하중(15.0kPa)
 B, L : 폭

- (2) 밀면전단력 V 는 다음과 같이 산정한다.

$$V_E = W_E = C_s W = 0.140 \times 7500 = 1050 \text{ kN}$$

여기서, C_s : 식 (7.2-2)에 따라 산정한 지진응답계수
 W : 고정하중과 아래에 기술한 하중을 포함한 유효 건물 중량

- (3) 지진시 지진에 의한 수직 증가력은 약식방법으로 수평가진력의 1/2의 값을 적용할 수 있다. 정밀 구조계산서가 있는 경우는 계산서를 적용한다.

$$W_{EP} = 0.5 W_E = 0.5 \times 1050 = 525 \text{ kN}$$

- ① 일반적으로 지하구조물에 대한 지진해석 및 내진설계를 위한 지진토압은 응답변위법, 시간이력해석법을 이용하여 계산할 수 있다.
- ② 지표면으로부터 기반암까지 토사의 깊이가 15.0m 이내이고, 지표면으로부터 지하구조물 기초의 저면까지의 깊이가 토사 깊이의 2/3 이하인 경우 지진토압은 ①에서 기술된 두 가지 방법 이외에 추가로 등가정적법을 적용하여 구할 수 있다. 등가정적법에 의한 지진토압은 지표면에서 지하구조물 저면까지 깊이가 증가함에 따라 선형으로 증가하는 토압분포를 가지며 다음 식으로 구한다.

$$P_{ae} = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_{ae}$$

$$K_{ae} = 0.75 \times EPGA_{ff}$$

$$EPGA_{ff} = S \times F_a \times \frac{2}{3}$$

여기서, P_{ae} : 등가정적법에 의한 지하구조물의 지하외벽에 작용하는 지진토압의 합력

$$P_{ae} = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_{ae} = \frac{1}{2} \times 19 \times 3^2 \times 0.154 = 13.167 \text{ kN/m}$$

$$P_{ae} = 13.167 \times L = 13.167 \times 1 = 13.167 \text{ kN}$$

γ : 지하외벽과 접하는 토사지반의 평균 단위중량

H : 지표면에서 지하외벽의 저면까지의 깊이

K_{ae} : 지진토압계수

$$K_{ae} = 0.75 \times EPGA_{ff} = 0.75 \times 0.2053 = 0.154$$

$EPGA_{ff}$: 해당지반 지표면에서의 최대유효지반가속도

$$EPGA_{ff} = S \times F_a \times \frac{2}{3} = 0.22 \times 1.4 \times \frac{2}{3} = 0.2053$$

S : 유효지반가속도

F_a : [표 4.6]의 단주기 지반증폭계수

1.4 기초 접지압 산정

1.4.1 상시

상시에 대한 하중은 다음과 같이 산정한다.

$$\sigma_e = \frac{P}{A_f} = \frac{7500}{BL} = \frac{7500}{10 \times 10} = 75 \text{ kN}$$

여기서, σ_e : 설계용 접지압(kN/m²)

P : 기초자중을 포함한 기초판에 작용하는 수직하중(kN)

A_f : 기초판의 저면적(m²)

1.4.2 지진시

편심하중을 받는 기초의 접지압은 하중조합계수를 고려하여 다음과 같이 산정하며, 우선 편심에 의한 접지압계수를 산정한다.

$$\textcircled{1} \text{ 약식법 : } \sigma_e' = \frac{P}{A'} = \frac{P}{B'L} = \frac{P}{B'L} = \frac{B}{B'} \left(\frac{P}{BL} \right) = \frac{B}{B'} \sigma_e = \alpha \sigma_e$$

② 강도설계법 적용시 :

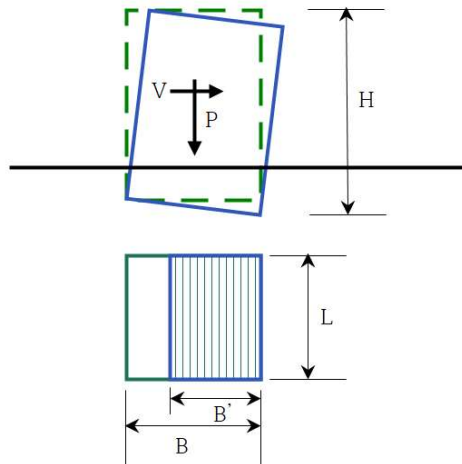
$$M = V \left(\frac{H}{2} \right) = (1.0 \times 1050) \left(\frac{18}{2} \right) + (1.0 \times 131.67) \left(\frac{3}{2} \right) = 9647.505 \text{ kN-m}$$

$$e = \frac{M}{P} = \frac{9647.505}{W + W_{EP}} = \frac{9647.505}{7500 + 0.5 \times 0.14 \times 7500} = 1.2022$$

$$\alpha = \frac{B}{B'} = \frac{B}{B - 2e} = \frac{10}{10 - 2 \times 1.2022} = 1.3165$$

$$\sigma_e = \alpha \cdot \frac{P}{A_f} = 1.3165 \cdot \frac{7500 + 0.5 \times 0.14 \times 7500}{10 \times 10}$$

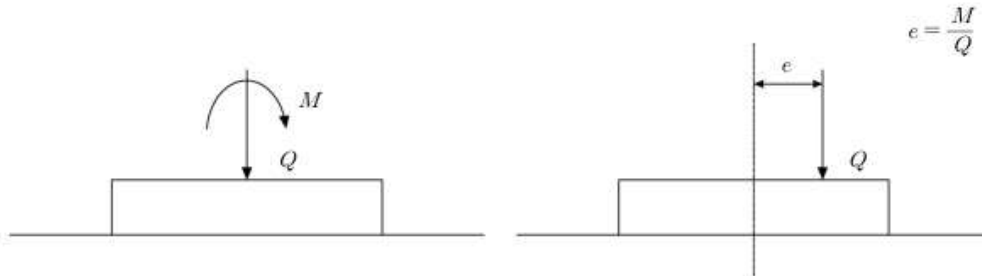
$$= 1.3165 \times 80.25 = 105.65 \text{ kPa}$$



기초 접지압 산정방법

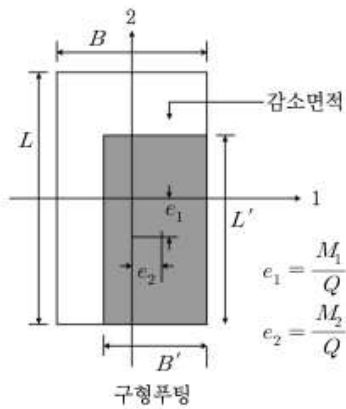
라. 편심하중에 대한 보정

해설 그림 4.2.13과 같이 기초에 편심하중이 작용할 경우, 지지력 공식의 B 와 L 을 유효 폭과 길이 B' 와 L' 로 대체하여 사용한다. 푸팅에 모멘트가 작용할 때 등가의 수직하중과 편심거리는 해설 그림 4.2.13과 같이 구한다.

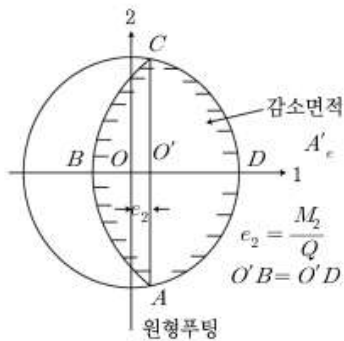


해설 그림 4.2.13 등가하중과 편심거리

유효폭 B' 와 L' 및 감소된 유효면적은 해설 그림 4.2.14에서 구할 수 있다.



구형푸팅



원형푸팅

$$L' = L - 2e_1, e_1 = \frac{M_1}{Q}$$

$$B' = B - 2e_2, e_2 = \frac{M_2}{Q}$$

$$A'_e = B' L'$$

$$e = \frac{M}{Q}$$

$$A'_e = 2S = B' L'$$

$$L' = \left(2S \sqrt{\frac{R + e_2}{R - e_2}} \right)^{1/2}$$

$$B' = L' \sqrt{\frac{R - e_2}{R + e_2}}$$

$$S = \frac{\pi R^2}{2} - \left[e_2 \sqrt{R^2 - e_2^2} + R^2 \sin^{-1} \left(\frac{e_2}{R} \right) \right]$$

여기서, R : 원형푸팅의 반경

해설 그림 4.2.14 편심하중에 의한 유효폭과 감소된 면적

1.5 기초지반 지지력 평가

1.5.1 문헌에 의한 허용지내력

기초설계는 지반조건, 구조물의 특성, 시공환경, 공기 등이 적합하고, 경제적으로 유리한 형식을 선정해야 한다. 기초의 계획심도에 따른 지반의 허용지지력은 지반조사의 표준관입시험 값인 N치를 기본으로 허용지지력을 다음과 같이 개략적으로 추정할 수 있다.

지반의 추정허용지지력

기초지반의 종류		상시 (kPa)	지진시 (kPa)	목표하는 값		비 고
				N치	일축압축강도 qu(kPa)	
암 반	균열이 적은 균일한 사암	2500	3750	-	10000이상	-
	균열이 많은 경암	1000	1500	-	10000이상	
	연암, 풍화암	600	900	-	1000이상	
자갈층	밀실한 것	600	900	-	-	표준관입시험의 N치가 15이하인 경우에는 기초지반으로서 부적당
	밀실하지 않은 것	300	450	-	-	
사질지반	밀실한 것	300	450	30~50	-	
	보통의 것	200	300	15~30	-	
점 성 토 지 반	몹시 단단한 것	200	300	15~30	200~400	
	단단한 것	100	150	8~15	100~200	
	보통의 것	50	75	4~8	25이하	

※ ① 도로설계 오령 제2권 P472, 도로설계실무편람(토질 및 기초) p222

② 암반의 허용지지력은 도로교 표준시방서(p623) 기준임

지반의 종류에 따른 허용지지력(q_a)

지 반		q_a (kPa)	N치	지 반		q_a (kPa)	N치
경 암 연 암 약간 또는 반고결의 이암		1000	100이상	점토질 지반	매우단단	20	15~30
		500	50이상		단 단	10	8~15
		300	30이상		중간 것	5	4~8
자갈층	밀 실	600	-		연한 것	2	2~4
	밀실하지 않은것	300			매우연한것	0	0~2
사질 지반	조 밀	300	30~50	Loam	단 단	15	5이하
	중 간	100~200	10~30		약간단단	10	3~5
	느 슨	50	5~10		연한 것	5	3이하
	매우느스	0	5이하	토목구조물의 설계			

1.5.2 설계식에 의한 허용지지력

가. 상시

(1) 지반의 허용지지력은 다음 식으로 산정한다.

- 허용지지력 :

$$q_a = \frac{1}{3}(\alpha \cdot c \cdot N_c + \beta \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot N_r + \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q)$$

여기서,

q_a : 허용지지력(kN/m²)

c : 기초저면 하부지반의 점착력(kN/m²)

γ_1 : 기초저면 하부지반의 단위체적중량(kN/m³)

γ_2 : 기초저면 상부지반의 단위체적중량(kN/m³)

(γ_1, γ_2 : 지하수위 위치를 고려하여 단위체적중량 값을 환산한다.)

α, β : [표 4.10]에 표시한 형상계수

N_c, N_r, N_q : [표 4.11]에 표시한 지지력계수 내부마찰각 ϕ 의 함수

D_f : 기초에 근접한 최저지반에서 기초저면까지의 깊이(m), 인접 대지에서 흩파기를 시행할 경우가 예상될 때에는 그 영향을 고려하여야 한다.

B : 기초저면의 최소폭(m), 원형일 때에는 지름

형상계수

기초저면의 형상	연속	정방형	장방형	원형
α	1.0	1.3	$1.0 + 0.3B/L$	1.3
β	0.5	0.4	$0.5 - 0.1B/L$	0.3
* B : 장방형 기초의 단변길이 L : 장방형 기초의 장변길이				

지지력계수

ϕ	N_c	N_r	N_q
0°	5.7	0.0	1.0
5°	7.3	0.5	1.6
10°	9.6	1.2	2.7
15°	12.9	2.5	4.4
20°	17.7	5.0	7.4
25°	25.1	9.7	12.7
30°	37.2	19.7	22.5
35°	57.8	42.4	41.4
40°	95.7	100.4	81.3
45°	172.3	297.5	173.3
48°	258.3	780.1	287.9
50°	347.5	1153.2	415.1

(2) $N=20$, $\phi = 30$ 일때

① 특별한 시험값이 없고 N 값만 조사한 경우는 보수적으로 $\phi = \sqrt{12N} + 15$ 을 적용한다.

$$\phi = \sqrt{12N} + 15 = 30$$

② 별도의 시험을 하지 않고 N 값만 있는 경우는 $C=0$ 로 간주한다. 표에 없는 값은 다음 식을 이용하여 산정하여도 된다.

$$N_q = \frac{e^{2(3\pi/4 - \phi/2)\tan(\phi)}}{2\cos^2(45 + \phi/2)}$$

$$N_r = \frac{2(N_q - 1)\tan(\phi)}{1 + 0.4\sin(4\phi)}$$

$$N_c = \cot(N_q - 1)$$

$$N_q = 22.5 \quad N_r = 19.7 \quad N_c = 37.2$$

$$q_u = \frac{1}{3}(\alpha \times c \times N_c + \beta \times \gamma_1 \times B \times N_r + \gamma_2 \times D_f \times N_q)$$

$$= \frac{1}{3}(1.3 \times 0 \times N_c + 0.4 \times (18 - 10) \times 10 \times 19.7 + 18 \times 3 \times 22.5)$$

$$= \frac{1}{3}(0 + 630.4 + 1215) = 615.13 \text{ kPa}$$

나. 지진시

(1) 지진시에 대한 기준은 명확하게 제시되어 있지 않으며, 지진시 내부마찰각은 평상시보다 2도 작고, 유효폭이 감소하는 식으로 응용하여 적용하면 다음과 같다.

$$\phi_{dy} = \phi - 2 = 30^\circ - 2 = 28$$

$$B_{dy} = B - 2e = 10 - (2 \times 1.2022) = 7.5956$$

$$N_q = 18.7 \quad N_r = 15.7$$

$$\begin{aligned}
q_{aE} &= \frac{1}{2}(\alpha \times c \times N_c + \beta \times \gamma_1 \times B \times N_r + \gamma_2 \times D_f \times N_q) \\
&= \frac{1}{2}(1.3 \times 0 \times N_c + 0.4 \times (18 - 10) \times 10 \times 15.7 + 18 \times 3 \times 18.7) \\
&= \frac{1}{2}(0 + 630.4 + 1215) = 756.1 \text{ kPa}
\end{aligned}$$

1.6 건축물 침하 평가

1.6.1 상시

침하는 즉시침하와 압밀침하에 대한 검토를 수행하여야 한다. 일반적으로 건축에서는 즉시침하와 압밀침하를 정확히 구별하지 못하여 건축물이 시공된 후 시간이 지난 다음 부등침하 또는 압밀침하로 건축물의 손상이 발생하는 경우가 있다. 건축물의 장기적인 안정을 위해서는 반드시 수행하여야 한다.

단순한 공학적인 용어로 정리하면 다음과 같다.

- 즉시침하 : 전단변형 또는 탄성침하
- 압밀침하 : 압축변형 또는 수축침하

가. 즉시침하

즉시침하는 간단하게 다음 식으로 간략하게 산정할 수 있다. 다음 식은 하부 지층이 단일지층 또는 다층지반을 단일지층으로 가정하여 산정할 수 있기 때문에 설계에 직접 사용하기는 어려울 수 있으며, 예비검토로 사용할 수 있다.

$$S_E = I_S(1-\nu^2)qB/E_S$$

여기서, S_E : 즉시침하량(m)

I_S : 기초저면의 형상과 강성에 따라 정해지는 계수, 표 4.1-3 참조

q : 기초에 작용하는 단위면적당 하중(kN/m²)

B : 기초의 단변길이(원형의 경우는 지름)(m)

L : 기초의 장변길이(m)

E_S : 지반의 탄성계수(kN/m²)

ν : 지반의 포아송비

침하계수 I_S (유연한 기초의 경우)

기초저면 형상		기초저면 상의 위치	I_S
원형(지름 B)		중앙	1.00
장방형($B \times L$)	$L/B=1$	중앙	1.12
	1.5		1.36
	2.0		1.52
	2.5		1.68
	3.0		1.78
	4.0		1.96
	5.0		2.10
	10.0		2.54

암반의 변형계수인 E_m 은 현장시험과 실내시험의 결과를 바탕으로 결정되어야 한다. 또는 E_m 은 암질지수(RQD)로부터 계산된 암반의 불연속면의 빈도를 고려한 저항계수 α_E 와 일축압축시험으로부터 구한 신선암의 탄성계수 E_0 를 곱하여 다음과 같이 구할 수 있다(Gardner, 1987).

$$E_m = \alpha_E E_0$$

여기서, $\alpha_E = 0.0231(RQD) - 1.32 \geq 0.15$

- 탄성계수 : $N=20$, $E_s = 0.7N_1 = 0.7 \times 20 = 14 \text{ MPa}$

$$S_E = I_S(1-\nu^2)qB/E_s = \frac{1.12(1-0.33^2)75 \times 10}{14000} = 0.0534 = 53.4\text{mm} > 25\text{mm} \dots \therefore \text{N.G}$$

따라서, $N=20$ 인 경우는 지지력은 안전하나, 지반의 즉시침하가 문제되므로 $N=20$ 인 경우에는 5층 건축물을 세우는 되는 문제가 있다.

미 해군성(1982)과 Bowles(1988) 이후에 수정된 다양한 흙에 대한 변형계수

흙의 종류	값의 전형적인 범위	포아송비 ν	N값을 이용한 E_s 의 산정	
	변형계수, E_s (MPa)		흙의 종류	E_s (MPa)
점성토: 부드럽고 민감 중간정도 굳거나 굳음 매우 굳음	2.4~15	0.4~0.5 (비배수)	실트, 사질토질 실트, 약간의 점착력 혼합토	$0.4N_1$
	15~50		매우 가늘거나 중간정도의 사질토와 약간의 실트질 사 질토	$0.7N_1$
	50~100		굵은 사질토와 약간의 자갈 이 섞인 사질토	$1.0N_1$
			사질토질의 자갈과 자갈	$1.1N_1$
황토 실트	15~60 2~20	0.1~0.3 0.3~0.35	사질토질의 자갈과 자갈	$1.1N_1$
가는 사질토: 느슨 중간 조밀	7.5~10 10~20 20~25	0.25	S_u 을 이용한 E_s 의 산정	
				$400S_u \sim 1000S_u$
			부드럽고 민감한 점성토 중간정도 굳거나 굳은 점성토	$1 \ 5 \ 0 \ 0$ $S_u \sim 2400S_u$
사질토: 느슨 중간 조밀	10~25 25~50 50~75	0.20~0.35 0.30~0.40	매우 굳은 점성토	$3 \ 0 \ 0 \ 0$ $S_u \sim 4000S_u$
			q_c 을 이용한 E_s 의 산정	
			사질토질의 흙	$4q_c$
자갈: 느슨 중간 조밀	25~75 75~100 100~200	0.2~0.35 0.3~0.4	q_c 을 이용한 E_s 의 산정	

나. 압밀침하

압밀침하량 산정은 다음 식에 따른다. 단, 압축지수 C_c , 압밀계수 C_v 를 알 수 있는 경우 침하량을 별도 식으로 산정할 수 있다.

$$S = \int \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \cdot dz$$

여기서, S : 침하량(m)
 Z : 침하량을 산정하는 점에서 연직하방으로 측정된 깊이(m)
 e_1 : 응력 σ_{1Z} 에 대응하는 간극비
 e_2 : 응력 $\sigma_{2Z}(=\sigma_{1Z} + \Delta\sigma_Z)$ 에 대응하는 간극비
 σ_{1Z} : 건물시공 이전의 Z점에서 유효지중응력(kN/m²)
 $= \gamma H_1 + \gamma'(Z_s - H_1)$
 σ_{2Z} : 건물시공 이후의 Z점에서 유효지중응력(kN/m²)
 $= \sigma_{1Z} + \Delta\sigma_Z$

여기서, γ : 지반의 습윤단위체적중량(kN/m³)
 γ' : 지반의 수중단위체적중량(kN/m³)
 H_1 : 지하수위(지표면에서 지하수위 상단까지의 깊이, m)
 Z_s : 지표면에서 임의의 점까지의 깊이(m)

위 식에서 $\Delta e = e_1 - e_2$ 는 다음식으로 산정된다.

$$\Delta e = C_c \cdot \text{Log} \frac{\sigma_{1z} + \Delta\sigma}{\sigma_{1z}}$$

건축에 의한 지반 응력 증가되는 깊이 $H=1.5B$ 로 하면, 압밀침하는 다음과 같이 산정할 수 있다.

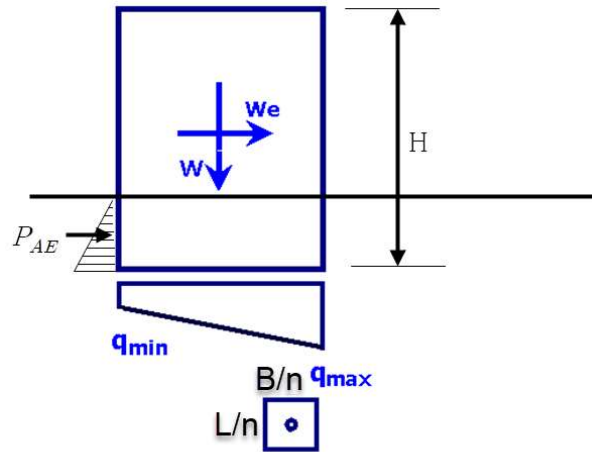
$$S = \frac{H}{1 + e_1} C_c \log \frac{\sigma_{1z} + \Delta\sigma}{\sigma_{1z}}$$

건축물기초를 압밀이 발생하는 지반에 설치하는 것은 아주 특수한 상황으로 그러한 경우는 지반의 압축지수 또는 하중에 대한 간극비 변화 시험을 수행하여 압밀침하를 산정한다.

그렇지 않은 경우, 압밀이 발생할 가능성이 높은 지반에서는 말뚝기초 또는 지반개량을 통하여 압밀침하가 발생하지 않도록 하고 설계한다.

4.6.2 지진시 및 지층을 고려한 상세 침하 검토

지진시 하중분포는 다음과 같으며, 이러한 경우는 단순식으로 침하량 산정이 불가능하다. 또한 지반의 지층이 대부분 다층이어서 지층별 침하량이 다를 수 있다.



지진시 건축물의 토압

이러한 경우 지중응력을 산정하여 침하량을 산정하는 방법을 적용한다.

건축구조 설계기준에서는 기초의 연직하중에 따라 생기는 지중응력의 연직방향성분은 다음 식에 따라 산정하도록 되어 있다.

$$\Delta\alpha_z = \frac{P_c \cdot 3Z_s^3}{2\pi \cdot R^5}$$

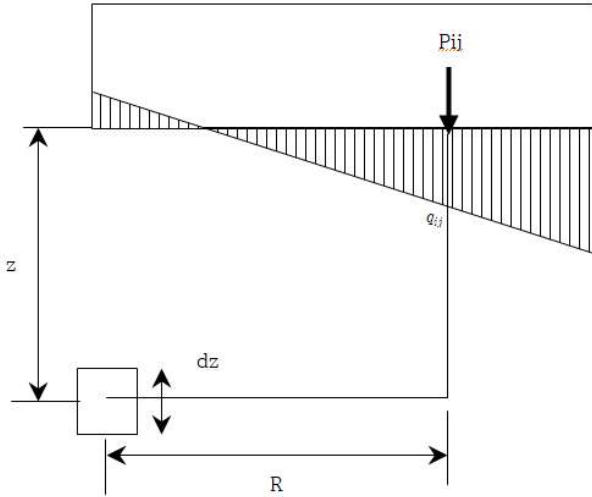
여기서, $\Delta\sigma_z$: 지중의 임의점에서의 연직응력증분(kN/m²)

P_c : 지표면에 작용하는 연직집중하중(kN)

Z_s : 지표면에서 임의의 점까지의 깊이(m)

R : 하중의 작용점에서 임의의 점까지의 거리(m)

위의 식을 이용하여 지진시 발생하는 수직 증가 지진하중과 수평지진력에 의한 삼각형 하중의 지반 응력 증분을 다음과 같이 산정할 수 있다.



수직 증가 지진하중과 수평지진력에 의한 삼각형 하중

$$\Delta\alpha_z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{P_{ij} \cdot 3Z_s^3}{2\pi \cdot R^5} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{P_{ij} \cdot 3Z_s^3}{2\pi \cdot (\sqrt{X^2 + Y^2})^5}$$

단, 연직하중이 (-)인 경우는 0으로 한다. P_{ij}값은 기초를 적당한 개수로 나누어 산정한다.

$$B_i = B/M, L_j = L/N, P_{ij} = q_{ij} B_i L_j$$

이러한 경우 단순 산술식으로는 풀기가 어려우면 전산해석을 이용하여야 한다.

- 지진하중에 의한 하중분포 산정

① 지진시 수직하중 및 접지압

$$W_{vE} = C_{vy} W = \frac{1}{2} C_{cx} W = 0.5 \times 0.14 \times 7500 = 525 \text{ kN}$$

$$q_1 = W_{vE} / A = 525 / 100 = 5.25 \text{ kPa}$$

② 수평 지진하중에 대한 접지압

$$M = V \left(\frac{H}{2} \right) = (1.0 \times 1050) \left(\frac{18}{2} \right) + (1.0 \times 131.67) \left(\frac{3}{2} \right) = 9647.505$$

$$q_{\min} = q_1 - \frac{M}{Z} = q_1 - \frac{6M}{BH^2} = 5.25 - (6 \times 9647.505 / (10 \times 10^2)) = -52.635 \text{ kPa}$$

$$q_{\max} = q_1 + \frac{M}{Z} = q_1 + \frac{6M}{BH^2} = 5.25 + (6 \times 9647.505 / (10 \times 10^2)) = 63.135 \text{ kPa}$$

$$S = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{P_{ij}}{\pi E r} (1 - v^2)$$

바닥부의 응력 점하중을 다음과 같이 가정하여 프로그램을 이용하여 산정하면 다음과 같다.
바닥부 응력 점하중

P_1_1	P_1_2	P_1_3	P_1_4	P_1_5	P_1_6	P_1_7	P_1_8	P_1_9	P_1_10
P_2_1	P_2_2	P_2_3	P_2_4	P_2_5	P_2_6	P_2_7	P_2_8	P_2_9	P_2_10
P_3_1	P_3_2	P_3_3	P_3_4	P_3_5	P_3_6	P_3_7	P_3_8	P_3_9	P_3_10
P_4_1	P_4_2	P_4_3	P_4_4	P_4_5	P_4_6	P_4_7	P_4_8	P_4_9	P_4_10
P_5_1	P_5_2	P_5_3	P_5_4	P_5_5	P_5_6	P_5_7	P_5_8	P_5_9	P_5_10
P_6_1	P_6_2	P_6_3	P_6_4	P_6_5	P_6_6	P_6_7	P_6_8	P_6_9	P_6_10
P_7_1	P_7_2	P_7_3	P_7_4	P_7_5	P_7_6	P_7_7	P_7_8	P_7_9	P_7_10
P_8_1	P_8_2	P_8_3	P_8_4	P_8_5	P_8_6	P_8_7	P_8_8	P_8_9	P_8_10
P_9_1	P_9_2	P_9_3	P_9_4	P_9_5	P_9_6	P_9_7	P_9_8	P_9_9	P_9_10
P_10_1	P_10_2	P_10_3	P_10_4	P_10_5	P_10_6	P_10_7	P_10_8	P_10_9	P_10_10

$$S_{\min} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{\Delta P_{ij}}{\pi E R_{ij}} (1 - v^2) = 11.45 \text{ mm}$$

$$S_{\max} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{\Delta P_{ij}}{\pi E (R - R_{ij})} (1 - v^2) = 18.93 \text{ mm}$$

- 지진시 부등침하는 다음과 같다.

$$\delta = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{B} = \frac{18.93 - 11.45}{10,000} = 1/1336 < 1/500$$

- 지진시 건축물 최상단 움직이는 폭 : 건물의 높이가 18m인 경우

$$\delta_{dx} = H\delta = 18,000 \times (1/1336) = 13.47 \text{ mm}$$

- 만약 지층을 고려한 해석을 할 경우는 지중응력 증가식을 이용한다.

$$S_i = \frac{Q}{2\pi E r} \left[\frac{(1+v)z^2}{(r^2 + z^2)^{1.5}} + \frac{2(1-v^2)}{(r^2 + z^2)^{0.5}} \right]$$

$$S = \sum_{i=1}^n S_i$$

1.7 허용지내력 평가

1.7.1 상시

허용지지력식을 이용하는 경우는 침하에 대한 검토까지 하여야 한다. 허용침하 25mm를 기준으로 하여 표준관입시험 N값을 이용하여 간략하게 하는 경우는 침하와 지지력을 동시에 검토하여 간략하게 검토할 수 있다.

$$q_a = \frac{N_{55}}{0.08} \left(\frac{B+0.3}{B} \right)^2 \left(1 + \frac{D_f}{B} \right) \text{ (kPa)} \quad \text{for } 0 \leq D_f \leq B \text{ and } B \geq 1.2$$

여기서, q_a : 허용지내력(kPa)

N_{55}, N_{70} : 에너지 효율을 고려한 N값(0.75B 평균)

B : 기초 폭

D_f : 기초 깊이

$$q_a = \frac{N_{55}}{0.08} \left(\frac{B+0.3}{B} \right)^2 \left(1 + \frac{D_f}{B} \right) = (20/0.08) * ((10+0.3)/10)^2 * (1+3/10) = 344.79 \text{ kPa}$$

1.7.2 지진시

지진시 허용지내력은 상시지내력의 1.5배를 적용한다.

지반의 허용지내력(제18조 관련)

(단위 : kN/m²)

지 반		장기응력에 대한 허용지내력	단기응력에 대한 허용지내력
경암반	화강암·석록암·편마암·안산암 등의 화성암 및 굳은 역암 등의 암반	4000	각각 장기응력에 대한 허용지내력 값의 1.5배 로 한다.
연암반	판암·편암 등의 수성암의 암반	2000	
	혈암·토단반 등의 암반	1000	
자갈		300	
자갈과 모래와의 혼합물		200	
모래섞인 점토 또는 톱토		150	
모래 또는 점토		100	

※ 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙 [별표 8] <개정 2009.12.31.>

이 방법은 간략하게 산정할 수 있으나, 부등침하에 대한 문제가 될 수 있는 구조물에서는 적용하기 어려우며, 실트질 지반에서는 적용을 금하고 사질지반에 적용하도록 되어 있다.