

Granular Group Pile의 팽창파괴에 대한 극한지지력의 평가

Estimation of Ultimate Bearing Capacity for Bulging Failure of Granular Group Piles

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 고용일²⁾, Yong-Il Koh, 강인규³⁾, In-Kyu Kang, 김진홍⁴⁾, Jin-Hong Kim

1) 홍익대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dep't of Civil Eng., Hong-Ik University

2) 한라건설 기술연구소 차장, Deputy General Manager, R & D Center, Hanla Engr. Corp.

3) (주)브니엘컨설턴트 책임, Chief Engineer, Vniel Consultant Co., Ltd.

4) (주)한석 ENG 이사, Director/P.E. Geotechnical Div. Hansuk Engineering Co., Ltd.

SYNOPSIS : Granular compaction piles improve the performance of foundation on soft ground both by transferring the applied load to greater depths and by reducing drainage path lengths and hence speeding consolidation. Granular compaction piles are rarely used singly and when used in groups there is potential for a significant group effect with the presence of adjacent granular piles providing confinement and preventing the near-surface deformation. In the present study, failure mechanism of granular group piles is investigated, and ultimate bearing capacity of granular group piles against bulging failure is estimated using the proposed method of analysis.

KEYWORDS : Granular group piles, Buring failure, Ultimate bearing capacity

1. 서론

Granular Compaction Pile(GCP)은 자갈이나 쇄석을 진동기로 다지면서 지중에 Granular Pile을 형성하여 지반을 보강하는 공법으로 기초의 지지력 증가와 침하량 감소 및 압밀배수에 의한 지반개량 효과 등이 있으나 국내에서는 아직 널리 사용하고 있지 않은 공법이다. 또한 GCP는 다양한 지반에 적용이 가능하며 특히 사질지반의 경우에는 지진시 액상화 방지에 효과적인 공법으로 조립토가 많은 국내 현장 여건으로 볼 때 활용성이 비교적 높은 공법이다.

본 연구에서는 Vesic의 공동팽창이론을 바탕으로 Granular Single Pile(GSP)의 극한지지력의 평가방법과 Granular Group Pile(GGP)의 팽창파괴에 대한 극한 지지력의 평가방법을 제안하였으며, 이를 수치 해석 결과 및 실험치와 서로 비교하였다.

2. Granular Single Pile

2.1 파괴형태

Granular Pile은 그 구성재료들의 입자들간 움직임이 구속되어 있는 강체상태가 아니므로 일반 콘크리트 말뚝과는 다른 파괴양상을 나타내며, 여러 실험결과에 의하면 그림 1과 같이 팽창파괴(bulging failure), 국부전단파괴(local punching failure) 및 일반전단파괴(general shear failure) 등의 세가지 형태로 나타난다.

Granular Single Pile은 말뚝의 길이가 짧을 경우에는 국부전단파괴 및 일반전단파괴가 일반적인 파괴형태이며, 말뚝의 길이가 길 경우에는 약 1~3D정도의 깊이에서 팽창파괴가 발생하는 형태가 일반적인 파괴형태이다.

파괴(local punching failure) 및 일반전단파괴(general shear failure) 등의 세가지 형태로 파괴가 발생한다. 특히 Granular Single Pile의 길이가 짧을수록 국부전단파괴 및 일반전단파괴가 일반적인 파괴형태이며, 말뚝의 길이가 길수록 팽창파괴가 일반적인 파괴형태로 나타난다. 그리고 이 때의 팽창파괴 중심깊이는 실험결과에 따르면 대략 말뚝직경의 1~3배 정도이다.

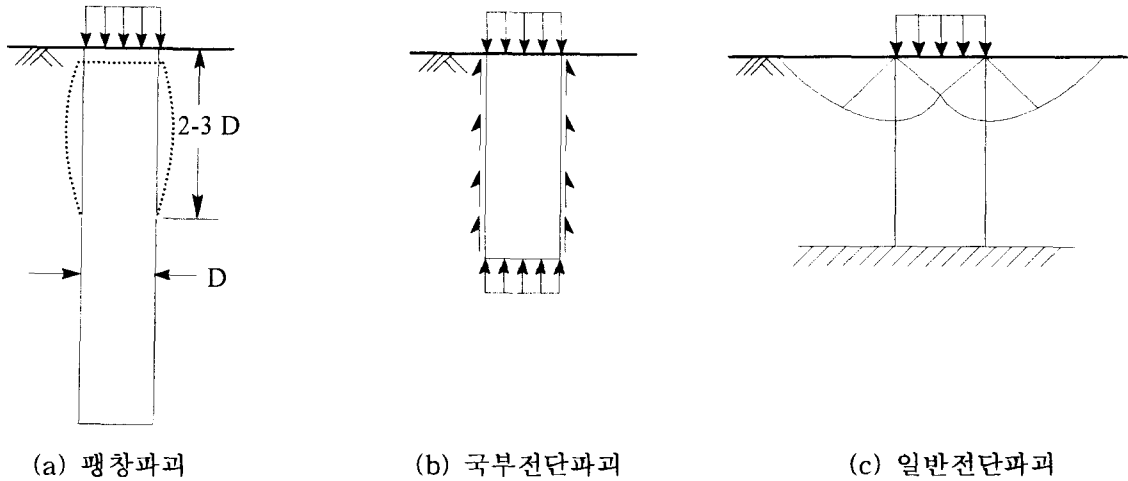


그림 1. Granular Single Pile의 대표적인 파괴형태

2.2 극한지지력의 결정

Granular Single Pile의 극한지지력은 말뚝의 길이에 따라 파괴모드가 달라지기 때문에 말뚝의 길이에 따라 적절한 파괴형태를 판단하여 이 때의 지지력을 평가하여야 한다. 따라서 임의의 깊이에서의 각 파괴모드별 지지력을 평가하여 작은값을 그 지점에서의 지지력으로 판단할 수 있다.

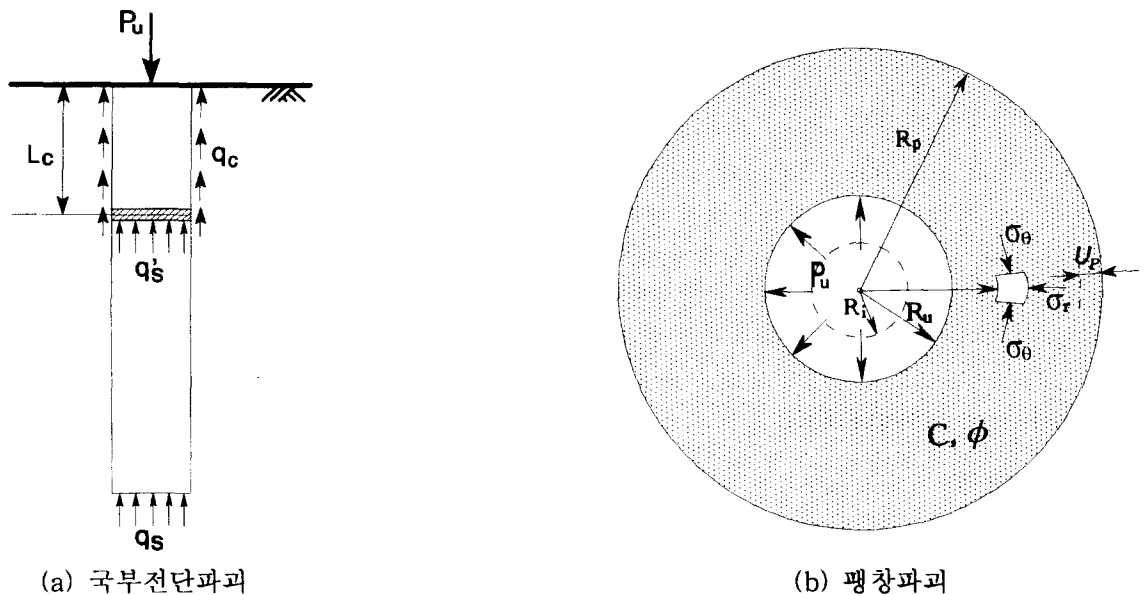


그림 2. Granular Single Pile의 각 파괴모드별 극한지지력의 평가

2.2.1 국부전단파괴 형태에 대한 극한지지력

Granular Single Pile의 임의의 지점에서 국부전단파괴에 대한 극한지지력은 말뚝의 주변마찰력과 선단지지력의 합으로 식(1)과 같이 평가할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Q_{ult} &= Q_s + Q_b \\
 &= (\pi \cdot L \cdot D \cdot C_t) + \left(N_c \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot C_b \right)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, Q_s : 임의 깊이 위쪽에서 유발되는 주면마찰력, Q_b : 말뚝의 선단지지력

L : 지표에서 임의 지점까지의 깊이, D : 말뚝의 직경,

C_1, C_2 : 각각 말뚝의 주면과 선단에서 발생하는 점착력

N_c : 말뚝선단의 지지력 계수(장주의 경우 일반적으로 9.0)

2.2.2 팽창파괴 형태에 대한 극한지지력

Granular Single Pile의 임의의 지점에서 팽창파괴에 대한 극한지지력은 Vesic(1972)의 공동팽창이론으로 부터 식(2)와 같이 평가할 수 있다.

$$Q_{ult} = (F_q \cdot q + F_c \cdot c) \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) A_t \tag{2}$$

여기서, q : 임의 지점에서의 연직토압

$$F_q = (I_{rr}' \sec \phi)^{\frac{\sin \phi}{1 + \sin \phi}} (1 + \sin \phi)$$

$$F_c = C \cot \phi \cdot (F_q - 1)$$

$$I_{rr}' = \frac{I_r}{1 + I_r \cdot \Delta \cdot \sin \phi}$$

$$I_r = \frac{E}{2(1 + \nu)(c + q \tan \phi)}$$

2.2.3 한계깊이의 결정

한계깊이(L_c)는 그림 3과 같이 국부전단파괴 형태에 대한 지지력과 팽창파괴 형태에 대한 지지력 값이 서로 같은 지점까지의 깊이로 정의한다. 따라서 Granular Single Pile의 길이가 한계깊이보다 길 경우에는 팽창파괴 양상을 나타내며, 한계깊이보다 짧을 경우에는 국부전단파괴 양상을 나타내는 것을 알 수 있다. 일반적으로 한계깊이는 말뚝직경의 2~3배 정도이므로 대부분의 Granular Single Pile은 팽창파괴 형태가 지배적인 파괴모드이다.

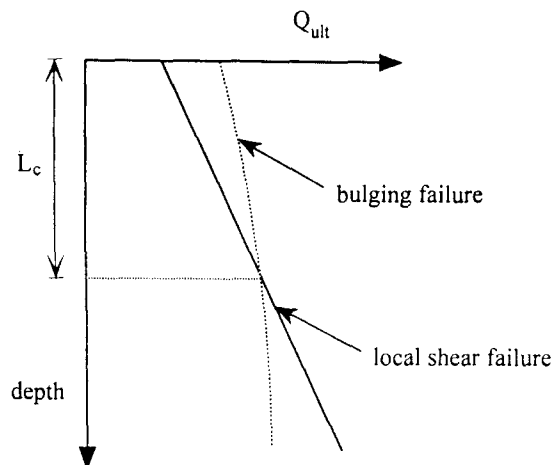


그림 3. 한계깊이의 결정

3. Granular Group Pile의 지지력이론

3.1 대표적인 파괴형태

Granular Group Pile의 파괴형태는 여러 실험결과에 의하면 그림 4와 같이 팽창파괴와 활동파괴로 구분되며, 팽창파괴는 Granular Single Pile의 경우와는 달리 기초의 중앙부로 갈수록 팽창파괴의 중심부가 점점 깊어지는 원추형 형태를 나타낸다. 즉 최외곽 말뚝의 팽창으로 인해 Granular Pile 주변의 구속응력이 인접말뚝으로 전이됨으로써 내부에 설치된 말뚝은 외곽말뚝에 비해 더 큰 구속압이 작용하기 때문에 말뚝 내부로 갈수록 팽창파괴의 중심깊이가 깊어지는 경향을 나타낸다. 또한 활동파괴는 Granular Group Pile의 설치폭에 비해 말뚝의 길이가 짧을 경우 예상되는 파괴형태로 도로 기초지반의 보강 및 매립공사 등과 같은 대단위 공사시에 검토하는 파괴형태이다.

따라서 건물 기초지반의 보강 등과 같은 소규모 공사시의 Granular Group Pile의 파괴형태는 대부분 팽창파괴 형태로 나타나므로 본 연구에서는 팽창파괴로 한정하여 Granular Group Pile의 지지력을 결정하였다.

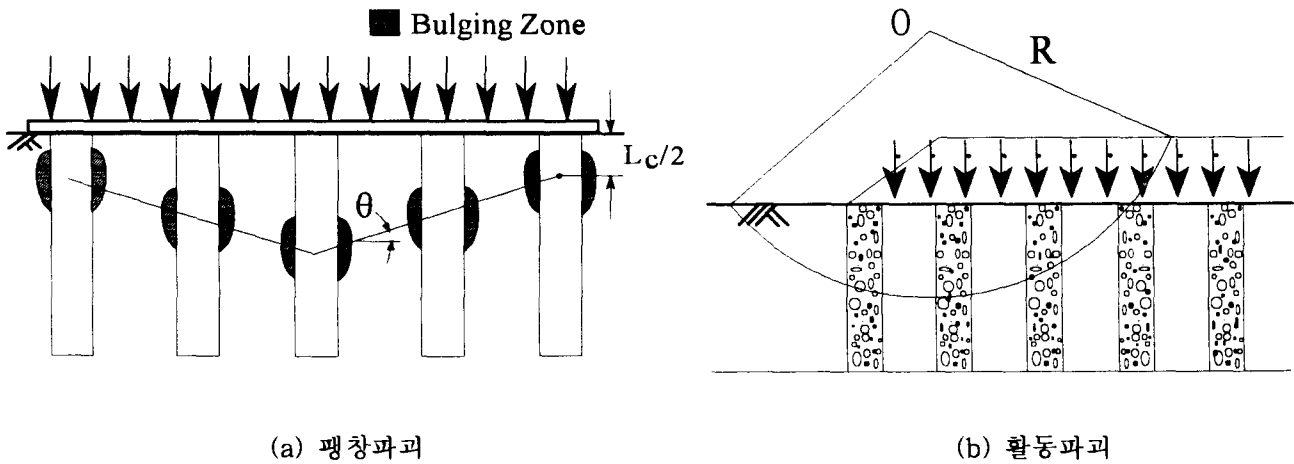


그림 4. Granular Group Pile의 대표적인 파괴형태

3.2 팽창파괴 형태에 대한 지지력

3.2.1 Granular Pile의 영향반경

Granular Pile의 영향반경은 말뚝이 팽창파괴 형태로 파괴가 진행될 경우 말뚝의 팽창압이 주변지반에 미치는 영향범위를 의미하며, 원통형 좌표계에서 공동팽창에 의한 체적팽창 조건식으로 부터 초기 말뚝의 반경과 공팽창 후의 말뚝의 반경사이의 관계식을 세우면 식(3)과 같다.

$$R_u^2 - R_i^2 = - [(R_p - U_p)^2 - R_p^2] + (R_p^2 - R_u^2) \Delta \quad (3)$$

여기서, R_i : 초기 말뚝의 반경, R_u : 공팽창 후의 말뚝의 반경

R_p : 소성구역의 반경, Δ : 체적변형을

$$U_p = \frac{1 + \nu}{E} R_p (\sigma_p - q)$$

$$\sigma_p = (P_u + c \cot \phi) \left(\frac{R_u}{R_p} \right)^{2 \sin \phi / (1 + \sin \phi)} - c \cot \phi$$

식(3)을 탄성론 및 Mohr-Coulomb 파괴규준을 적용하여 정리하면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{R_p}{R_u} = \sqrt{\frac{E \cdot \sec \phi}{2 \cdot (1 + \nu)(c + q \tan \phi) + E \cdot \Delta \cdot \sec \phi}} \quad (4)$$

식(3)에서 $R_u = R_i$ 로 할 경우 체적변형률 $\Delta=0$ 이 되므로 이를 식(4)에 대입하면 Granular Pile의 영향반경 R_e 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_e = \sqrt{\frac{R_i^2 \cdot E \cdot \sec \phi}{2 \cdot (1 + \nu)(c + q \tan \phi)}} \quad (5)$$

일반적으로 Granular Pile의 영향반경은 대략 말뚝직경의 3배정도의 범위에 있다.

3.2.2 팽창파괴시의 파괴면 형상

팽창파괴 형태에 대한 Granular Group Pile의 극한지지력은 팽창파괴 중심의 위치에 따라 크게 좌우되므로 팽창파괴의 중심위치를 정확히 예측할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 팽창파괴시의 Granular Group Pile의 파괴면을 치환율을 바탕으로 그림 4(a)와 같이 원추형으로 가정하였다. 여기서 Granular Pile에 의한 원지반의 치환율 및 말뚝간의 상호간섭효과가 없는 한계 치환율은 식(6) 및 (7)과 같이 정의된다.

$$\text{치환율, } \alpha = \frac{n \cdot A_p}{B \cdot L} \quad (6)$$

$$\text{한계 치환율, } \alpha_c = \frac{A_p}{\pi \cdot R_p^2} \quad (7)$$

또한 그림 4(a)에서 팽창파괴 중심깊이를 연결한 원추형 파괴면의 기울기 θ 는 식(8)과 같이 가정하였다. 즉 치환율이 1인 경우에는 파괴면의 기울기 $\theta = \theta_{\max}$ 가 되고 치환율이 한계 치환율인 경우에는 파괴면의 기울기 $\theta=0$ 으로 가정하였으며, 그 사이는 치환율에 따라 파괴면의 기울기가 선형적으로 변화하는 것으로 가정하였다.

$$\theta = \frac{\theta_{\max}}{1 - \alpha_c} (\alpha - \alpha_c) \quad (8)$$

$$\text{여기서, } (\alpha = 1 \text{ 일 때}) \theta_{\max} = 45^\circ + \frac{\phi_p}{2}$$

$$(\alpha = \alpha_c \text{ 일 때}) \theta_{\max} = 0^\circ$$

4. 분석 및 고찰

4.1 Granular Single Pile의 재하시험결과와의 비교

문헌조사로 부터 구한 Granular Single Pile의 재하시험결과와 본 연구에서 제시한 Granular Single Pile의 극한지지력 예측치를 비교·정리하면 표 1과 같다. 표 1에서 알 수 있듯이 재하시험에 의한 극한지지력값과 본 연구에서 제시한 예측치가 잘 일치하고 있는 것으로 판단된다.

표 1. 본 연구의 예측치와 Granular Single Pile의 재하시험결과와의 비교

원지반의 비배수 전단강도 (kPa)	Granular Pile의 내부마찰각 (°)	극한지지력 (kPa)				비 고
		재하시험 결 과	예 측 치			
			D=50cm	D=60cm	D=70cm	
19.4	37	488.9	461	466.8	472.8	Hughes and Withers(1974) ³⁾
19	30	300.2~357.2	329.8	332.3	334.8	Mokashi et al.(1976) ³⁾
20	36.5	400	469.4	475	481	Mori(1979) ³⁾
20	36.5	500	469.4	475	481	Broms(1979) ³⁾

4.2 Granular Group Pile의 무리효과

팽창파괴 형태에 대한 Granular Group Pile의 지지력은 공동팽창압에 의한 추가적인 구속압의 작용으로 지지력이 향상되며 본 연구에서 제시한 지지력 평가방법으로 부터 표 2의 관련정수에 대한 5×5 Granular Group Pile의 지지력을 계산한 결과는 표 3과 같다. 표 3에서 무리효과 η 는 식(9)와 같이 정의되며 말뚝직경 및 설치간격의 변화에 따른 무리효과가 변하는 그림 5와 같다.

$$\eta = \frac{\text{군항의 지지력}}{\text{단항의 지지력} \times N} \quad (9)$$

여기서, N : 말뚝의 본수(= 5×5 = 25본)

표 2. 분석에 사용한 관련정수

원 지 반					Granular Pile		
단위중량 (kN/m ³)	내부마찰각 (°)	비배수 전단강도 (kN/m ²)	탄성계수 (kN/m ²)	포화손비	내부마찰각 (°)	직 경 (cm)	설치간격
7	0	22	5000	0.33	38	50~70	1.5D~4.0D

그림 5에서 알 수 있듯이 Granular Group Pile의 무리효과는 말뚝의 직경 및 설치간격에 따라 다르나 단일말뚝에 비해 대략 2% 미만으로 지지력의 증가가 이루어지는 것을 알 수 있었다. 또한 이 때의 팽창파괴 중심깊이를 연결한 원추형 파괴면의 기울기 θ 는 20° 미만으로 계산되었다. 따라서 팽창파괴 모드에 대한 Granular Group Pile의 극한지지력은 단일말뚝만으로 하여 극한지지력을 평가하는 것보다는 다소 증가하나 큰 차이가 없으므로 단일말뚝의 지지력값에 말뚝본수를 곱하여 지지력을 결정하여도 안전측에서 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

표 3. Granular Pile의 직경에 따른 Granular Group Pile의 무리효과

Granular Pile의 직경 (cm)	설치간격	단항의 지지력 × N (kN)	군항의 지지력 (kN)	무리효과 η	치환율	파괴각 (°)	영향반경 (m)
50	1.5 D	2429.9	2468.9	1.0160	0.3492	20° 39'	2.42
	2.0 D		2455.5	1.0105	0.1964	10° 30'	
	2.5 D		2447.5	1.0072	0.1257	5° 48'	
	3.0 D		2441.8	1.0049	0.0873	3° 14'	
	4.0 D		2433.4	1.0014	0.0491	0° 42'	
60	1.5 D	2461.0	2513.9	1.0215	0.3492	20° 39'	2.91
	2.0 D		2392.4	1.0127	0.1964	10° 30'	
	2.5 D		2482.8	1.0089	0.1257	5° 48'	
	3.0 D		2476.0	1.0061	0.0873	3° 14'	
	4.0 D		2464.5	1.0014	0.0491	0° 42'	
70	1.5 D	2495.2	2549.9	1.0219	0.3492	20° 39'	3.39
	2.0 D		2531.1	1.0144	0.1964	10° 30'	
	2.5 D		2519.8	1.0099	0.1257	5° 48'	
	3.0 D		2511.8	1.0066	0.0873	3° 14'	
	4.0 D		2499.7	1.0018	0.0491	0° 42'	

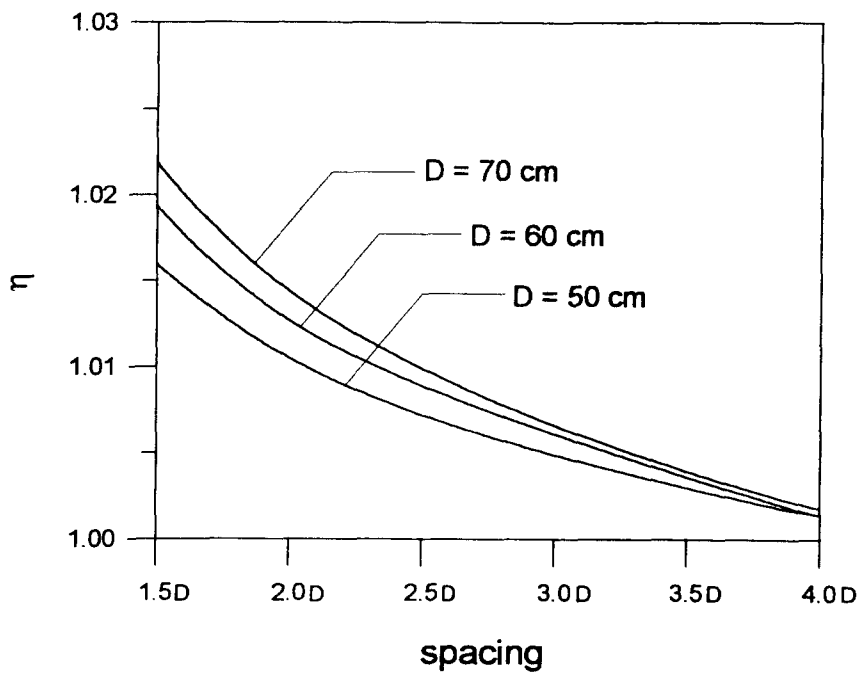


그림 5. 말뚝의 직경 및 설치간격의 변화에 따른 Granular Group Pile의 무리효과

5. 결론

이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 Vesic의 공동팽창이론을 바탕으로 Granular Single Pile의 지지력 평가방법과 Granular Group Pile의 팽창파괴에 대한 지지력 평가방법을 제시하였다.

(2) 문헌조사로 부터 구한 Granular Single Pile의 재하시험결과와 본 연구에서 제시한 Granular Single Pile의 극한지지력을 비교·분석한 결과 잘 일치하고 있는 것으로 판단되었다.

(3) Granular Group Pile의 무리효과는 말뚝의 직경 및 설치간격에 따라 다르나 단일말뚝에 비해 대략 2% 미만으로 지지력의 증가가 이루어지는 것을 알 수 있었다.

아울러 본 연구에서 가정한 Granular Group Pile의 팽창파괴면에 대해서는 앞으로 수치해석적인 검증 및 실험적인 연구결과가 요구되며, 장방형 및 비대칭형 무리형태에 대한 지지력 평가방법은 장차의 연구과제이다.

6. 참고문헌

- (1) Hu, W., Wood, D.M., and Stewart, W.(1997), "Ground Improvement using Stone Column Foundations : Results of Model Tests," Int. Conference on Ground Improvement Techniques, pp. 246-256.
- (2) Ranjan, G. and Rao, B.(1986), "Granular Pile for Ground Improvement," Proc. International Conference on Deep Foundations, Beijing, China, Vol. 1.
- (3) Ranjan, G.(1988), "Ground Treated with Granular Piles and its Response under Load," Geotechnical Engineering-Indian Experiences, Indian Geotechnical Society, pp. 345-404.
- (4) Vesic, A. S.,(1972) "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass", ASCE, Jour. of Geotech. Eng., pp. 265-290.