

연약점토 지반에 있는 STONE COLUMN의 지지력 산정

이 윤 주*

(96년 6월 26일 접수)

Bearing capacity analysis of stone column in soft clay soils

Yun-Ju Lee

Key Words : Stone Column(자갈기둥), Bearing Capacity(지지력), Soft Clay Soils(연약점토 지반), Bulging Failure Mode(팽창성파괴형상), Cavity Expansion Theory(공동 팽창이론), Coefficient of Passive Earth Pressure(수동토압계수), Upper Hard Layer(지표의 강한층), Group Efficiency(군효율), Stone Column Load Test(자갈기둥하중재하시험)

Abstract

Use of stone column for deep ground treatment in soft clay soils is an effective method. The stone column significantly increases load carrying capacity of the soft clay soil. A analysis method for bearing capacity of stone column in soft clay soil is developed. The capacity made by developed method are compared wity observed values from field load test and a reasonable correlation is noted.

1. 서론

석유화학 플랜트들은 입지확보의 어려움과 해상과의 운송 연계 때문에 해안에 건설되는 경우가 많다. 해안은 퇴적 및 융기등의 작용에 의해 연약한 점토지반으로 구성된 경우를 자주 접할 수 있으며 이로 인하여 넓은 플랜트 지역에 걸쳐 지반개량을 할 필요가 종종 발생한다. 특히 큰 용량의 저장탱크(storage tank)등이 연약지반에 놓일 경우 지지력 및 침하문제를 극복하기 위해 깊은 깊이까지 연약지반을 개량한 대형기초의 건설이 불가피하게

되었다.

연약지반에 건설되는 대형기초는 많은 비용과 긴 공기 때문에 기초형태 선택에 많은 제약을 받으며 지지되는 구조물의 특성, 건설기간 및 건설비용 등을 고려하여 지반처리 방법을 결정하게 된다. 연약지반 처리방법으로는 치환공법, 동적 압밀공법, 화학적 처리공법, 열처리공법, 샌드드레인(sand drain)공법, 그라우팅(grouting)공법, 말뚝공법, fabric 설치공법 및 stone column(또는 granular piles) 건설공법 등이 있다.

Stone column 건설공법은 건설 가격이 타 공법

* 현대중공업 해양구조기술개발부

보다 저렴하고 이에 대한 연구가 많이 진척되고 있기 때문에 근래 이용 빈도가 증가하는 경향이다. Stone column에 대한 연구는 1980년대 초에 Mitchell등에 의해 연구가 진행되었으며^{1),7),8)} 1980년대 말부터는 Ranjan과 Rao등에 의해 연구가 진행되어 많은 성과를 이루었다^{2)~5)}.

본 논문에서는 연약점토 지반에 설치된 stone column의 지지력 산정에 대해 Ranjan등이 제시한 기존 산정방법을 검토하고 변형된 새로운 지지력 공식을 제시하였다. 또한 새로 제시된 지지력 공식을 현장 실험 결과와 비교 및 검토하였다.

2. 이론적 접근

2.1 파괴형상

연약지반에 건설된 stone column의 일반적인 파괴형상은 일반 콘크리트 말뚝과는 다르게 Fig. 1와 같이 팽창성 파괴형상인 것으로 관찰되었다^{5),7)}. 팽창성 파괴형상은 stone column이 자갈이기 때문에 하중에 의해 stone column 자체가 파괴되는 현상이다. 일반적인 연약지반은 상부에 있는 흙이 약하

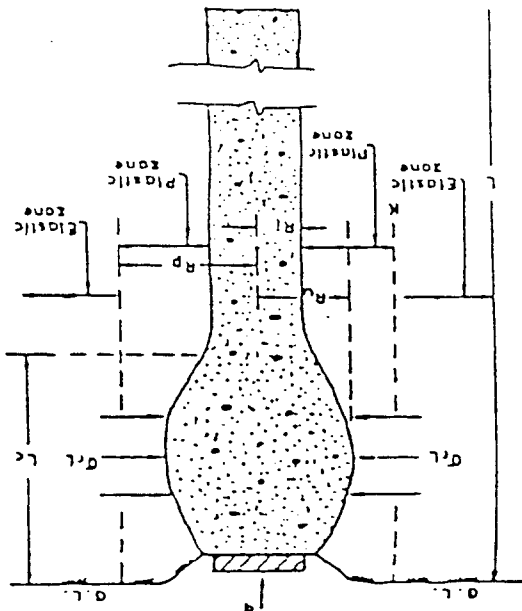


Fig. 1 Bulging failure mode of single stone column

고 또한 stone column에 작용되는 힘은 stone column의 단면의 깊이가 깊어질수록 줄어들기 때문에 팽창성 파괴가 stone column 상부에서 발생하는 것으로 이해되고 있다.

Huges와 Withers⁷⁾는 연약점토 지반에 있는 stone column 지름(D)과 한계깊이(critical length, Lc)의 관계를 연구하였다. 일반적인 Lc/D는 4.1 정도이며 한계깊이 밑에 있는 stone column 단면은 힘을 받지 않는 것으로 관찰되었다. 그 이유는 stone column의 팽창 현상에 의해 한계깊이 내에서 주변마찰력이 증가하기 때문인 것으로 이해되고 있다. 정확한 주변마찰력의 크기는 아직 알려지지 않고 있으나 점토의 비배수전단강도(undrained shear strength)에 가까운 것으로 추정하고 있다. Ranjan과 Rao는 Lc/D의 비율을 4-5로 사용하여 stone column의 지지력을 산정하였다²⁾.

2.2 공동팽창이론

Ranjan과 Rao는 팽창성 파괴현상을 공동팽창이론(cavity expansion theory)을 이용하여 해석함으로써 stone column의 지지력을 산정하였다(Fig. 1 참조)^{2),3)}. 공동팽창이론에 대한 평형방정식(equilibrium equation)은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

한계 평형 조건을 고려하여 식 (1)에 대한 해를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{rL} = CF_c + \sigma_m F_q \quad (2)$$

여기서 σ_{rL} 는 공동의 반지름방향 한계응력(lateral limit stress), F_c 와 F_q 는 무차원공동팽창계수(dimensionless cylindrical expansion factors)이고, σ_m 은 지반깊이 Z에서의 평균법선응력(mean normal stress), C는 점토의 비배수전단강도이다. F_c 와 F_q 는 내부마찰각(internal friction angle, ϕ)와 경도지수(rigidity index, I_r)의 함수이며 그 관계는 Fig. 2에 나타나있다. I_r 는 다음과 같다.

$$I_r = \frac{E_s}{2(1+\mu)(C+\sigma_m \tan \phi)} = \frac{G}{S} \quad (3)$$

여기서 E_s 는 지반의 영계수(Young's modulus), μ 는 포이슨비(Poisson ratio), G 는 전단계수(shear modulus), S 는 전단강도(shear strength)이다.

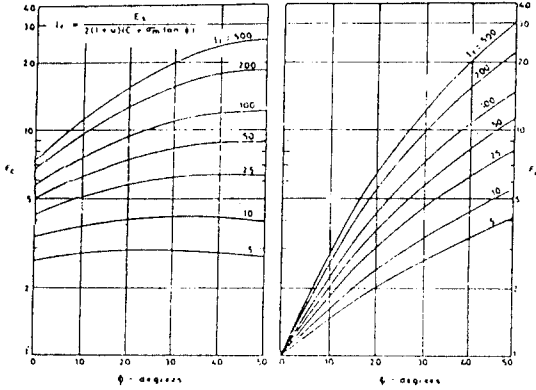


Fig. 2 Cylindrical expansion factors

점토의 경우 $\phi=0$, $\mu=0.5$ 이므로

$$F_c = 1 + \text{Ln}(I_p), \quad F_q = 1 \quad (4)$$

이다. 따라서 점토의 경우 공동의 반지름방향 한계 응력 σ_{rL} 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\sigma_{rL} = C(1 + \text{Ln}(I_p)) + \sigma_m \quad (5)$$

2.3 Stone column과 주위 지반에 의한 하중분담

실제로 대형 stone column 기초의 경우 면적 A 에 작용된 하중 Q 는 단면적 A_p 를 갖는 stone column 반력 Q_p 와 면적 A_s 를 갖는 주위 지반의 반력 Q_s 에 의해 지지된다고 가정하여 작용하중 Q 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = Q_p + Q_s \quad (6)$$

탄성영역내에서 단위하중 q_p 와 q_s 는 각각의 영계수 E_p 와 E_s 에 비례한다고 가정하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{q_p}{q_s} = \frac{E_p}{E_s} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_p = q \left(\frac{E_p}{\alpha E_p + (1-\alpha)E_s} \right) \quad (8)$$

$$q_s = q \left(\frac{E_s}{\alpha E_p + (1-\alpha)E_s} \right) \quad (9)$$

여기서 α 는 stone column 단면적 A_p 와 총단면적 A 의 비 A_p/A 이다.

2.4 평균법선응력, σ_m

지반에 하중이 가해지지 않은 상태에서 평균법선응력 σ_m' 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_m' = 1/3(1+2K_0)\sigma_v \quad (10)$$

여기서 σ_v 는 지반 깊이 Z 에서의 수직응력이다. 작용된 하중 q 에 의해 지표에 단위 하중 q_s 가 작용되면 지중응력이 증가하게 되며 증가된 평균법선응력 $\delta\sigma_m'$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\delta\sigma_m' = 1/3(1+2K_0)q_s \quad (11)$$

점토의 경우 $\phi=0$, $K_0=1$ 이므로 총법선응력 σ_m 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_m = \sigma_m' + \delta\sigma_m' = \sigma_v + q_s \quad (12)$$

2.5 Ranjan과 Rao에 의한 지지력 공식

Ranjan과 Rao는 1980년대 이후 stone column에 대해 많은 연구를 수행하였다^{2)~5)}. Ranjan등이 제안한 stone column 지지력 산정 공식을 요약하면 다음과 같다.

무차원공동팽창계수 F_c 를 나타내는 $1 + \text{Ln}(I_p)$ 는 연약점토의 경우 3.72에서 7까지 변화하며 여기서는 5가 사용되었다. σ_v 는 한계깊이의 중간에서의 지중 응력값을 사용하였으며 그 값은 $0.5\gamma_s L_c$ 로 표시될 수 있다. 여기서 γ_s 는 지반의 단위 중량을 나타낸다. 따라서 지중응력 σ_v 에 의한 공동의 반지름방향 한계응력 σ_{rL1} 은 식(5)를 변화시켜 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{rL1} = 0.5\gamma_s L_c + 5C \quad (13)$$

주위 지반에 작용되는 단위하중 q_s 에 의해 공동의 반지름방향 한계응력이 증가될 것이며 그 크기 σ_{rL2} 는 식(5)를 변화시켜 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{rL2} = q_s + 5C \quad (14)$$

따라서 총 한계응력 σ_{rL} 은 식(13)와 (14)을 더하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{rL} = 0.5\gamma_s L_c + q_s + 10C \quad (15)$$

Ranjan등은 stone column의 극한지지력과 한계응력 σ_{rL} 사이의 관계를 stone column의 수동토압계수(Rankine's) K_p 로 가정하였다. 따라서 stone column의 극한지지력 q_{ult} 와 허용지지력 q_{safe} 은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$q_{ult} = K_p \sigma_{rL} = K_p(0.5\gamma_s L_c + q_s + 10C) \quad (16)$$

$$q_{safe} = \frac{q_{ult}}{SF}, \quad SF = 2-3 \quad (17)$$

2.6 변형된 지지력 공식

본 논문에서는 Ranjan등이 제시한 지지력공식을 변형시켜 새로운 지지력공식을 다음과 같이 제시하였다.

2.6.1 한계응력

Ranjan과 Rao^{2),3)}가 제안한 식(14)는 주위 지반에 하중이 재하되지 않더라도, 즉 $q_s = 0$ 일때도 식(14)의 두번째항 $5C$ 때문에 σ_{rL2} 값이 존재하는 이론적 모순을 발견할 수 있다. 따라서 식(14)는 다음과 같이 바뀌어져야 한다.

$$\sigma_{rL2} = q_s \quad (18)$$

따라서 총 한계응력 σ_{rL} 은 식(13)와 (18)을 더하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{rL} = 0.5\gamma_s L_c + q_s + 5C \quad (19)$$

2.6.2 한계응력과 극한지지력의 관계

Ranjan과 Rao는 한계응력과 극한지지력의 관계를 Rankine의 수동토압계수 K_p 에 비례한다고 가정하였다. 그러나 Rankine의 수동토압계수는 수직응력과 수평응력의 관계를 평면파괴로 가정하여 정의하기 때문에 Fig. 1과 같이 팽창성 파괴형상으로 파괴되는 stone column인 경우엔 적합하지 않음을 알 수 있다.

Stone column의 팽창성 파괴현상을 형상화시키기 위해 Fig. 3과 같이 원추형 표면을 따라 stone column의 파괴가 일어난다고 가정하였다. 파괴면의 수평과 이루는 각도는 $45 + \phi_p/2$ 이다. Stone column이 파괴될 때 파괴면에 발생하는 응력에는 수직응력 σ_n 과 전단응력 τ_n 이 있으며 그 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_n = \sigma_n \tan \phi_p \quad (20)$$

여기서 ϕ_p 는 stone column의 내부마찰각을 나타낸다.

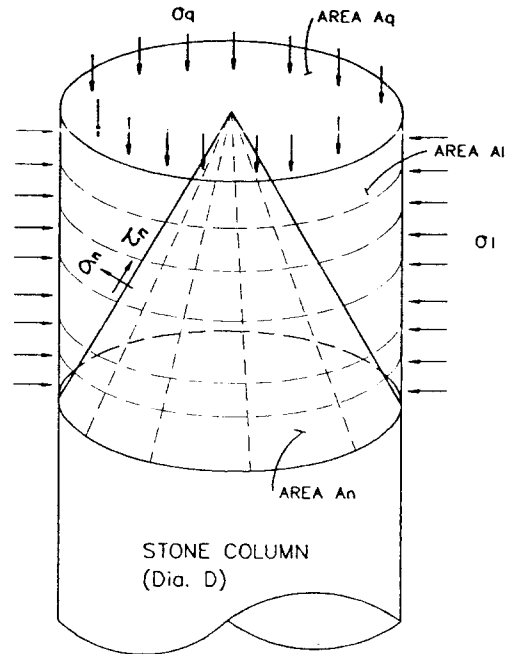


Fig. 3 Schematic bulging failure shape of stone column

Stone column 단면에 작용되는 총 힘 P_q 와 반 지름방향의 한계응력의 총 힘 P_l 은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_q = A_q \sigma_q = A_n (\sigma_n \cos(45 + \phi_p/2) + \tau_n \sin(45 + \phi_p/2)) \quad (21)$$

$$P_l = A_l \sigma_l = A_n (\sigma_n \sin(45 + \phi_p/2) - \tau_n \cos(45 + \phi_p/2)) \quad (22)$$

여기서 A_q 는 stone column의 단면적, A_l 은 파괴되는 부분의 바깥 표면적, A_n 은 파괴면의 표면적, σ_q 는 단면에 작용된 하중응력, σ_l 은 바깥 표면에 작용되는 한계응력을 나타낸다.

식(20)을 식(21)과 (22)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_l/P_q = A_l \sigma_l / A_q \sigma_q = 1 / \tan(45 + \phi_p/2) \quad (23)$$

$A_q = \pi d^2/4$, $A_l = \pi d^2/2 \tan(45 + \phi_p/2)$ 를 적용하여 정리하면 식(23)은 다음과 같다.

$$\sigma_l / \sigma_q = 1/2 \tan^2(45 + \phi_p/2) \quad (24)$$

$$\sigma_q = 2 K_p \sigma_l, K_p = \tan^2(45 + \phi_p/2) \quad (25)$$

Stone column의 내부마찰각 ϕ_p 는 35도에서 45도까지 변하며⁵⁾ stone column은 돌을 부셔서 만들어지기 때문에 입자표면이 날카롭고 stone column을 건설할 때 입자를 다지기 때문에 밀도도 높다. 따라서 Ranjan과 Rao가 제안한 내부마찰각 45도를 그대로 사용했으며 그 경우의 K_p 값은 5.83이다.

2.6.3 Stone column의 지지력

식(25)의 관계를 식(19)에 대입하면 다음과 같은 새로운 지지력 공식이 얻어진다.

$$q_{ult} = 2K_p(0.5\gamma_s L_c + q_s + 5C) \quad (26)$$

2.6.4 상부에 있는 강한 층의 영향

연약지반위에 프렌트등을 건설할때 일정높이를 비교적 양호한 흙으로 매립하게 되며 매립된 흙은 연약점토보다 상대적으로 강하다고 볼 수 있다. 지표에 상대적으로 강한 층이 존재하는 경우 팽창성 파괴현상이 강한층 바로 밑의 부분인 연약한 층에서 일어난다고 가정할 수 있으며 그 현상은 Fig.

4와 같이 설명될 수 있다. 이 경우 지중응력은 강한 층의 자중만큼 증가하고 또한 강한층에 있는 stone column의 표면 마찰력 만큼 지지력이 증가한다고 생각할 수 있다. 강한 층에서 발생된 마찰력은 팽창응력과, stone column과 흙사이의 결합 효과 때문에 마찰력이 매우 크다고 볼 수 있으며 그 크기는 강한 층의 비배수전단강도 C_h 로 가정하였다.

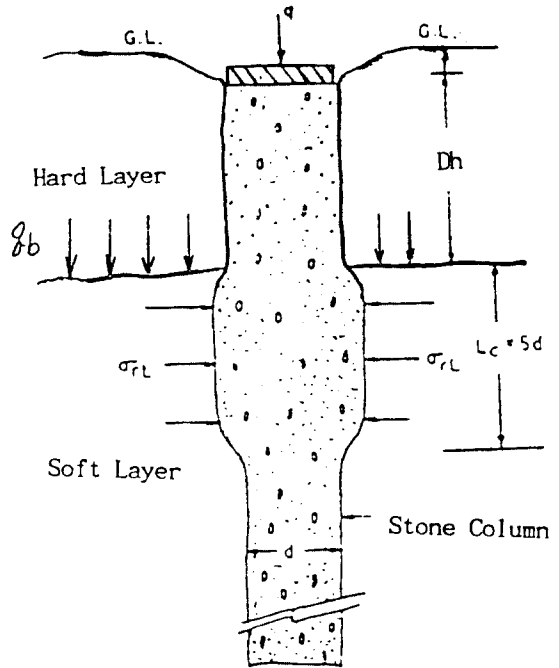


Fig. 4 Effect of hard layer on stone column failure

이러한 가정들을 고려하여 식(26)을 변형시키면 다음과 같은 지지력 공식을 얻을 수 있다.

$$q_{ult} = 2K_p(0.5\gamma_s L_c + 5C + q_s + q_b) + \pi D \cdot D_h C_h \quad (27)$$

여기서 q_b 는 강한층의 자중응력, D 는 stone column의 지름, D_h 는 강한층의 두께를 의미한다. 식(27)의 결과와 강한 층에서 팽창성 파괴현상이 발생된다고 가정할 때 얻어지는 지지력중 작은 값이 stone column의 지지력이 된다.

2.7 군효율

Stone column들이 군을 이루어 있는 경우 지지력에 변화가 있을 수 있다. 그러나 Ranjan에 의하면 stone column들 사이의 공간이 3D인 경우에 대해 군효율(group efficiency)은 1.0(0.9-1.1)에 매우 가까움을 실험을 통하여 검증하였다²⁾. 따라서 공간이 3D 이상인 경우엔 군효율은 무시될 수 있다.

3. 현장실험 결과와의 비교 및 검토

3.1 실험현장조건

인도내의 Ravva project 현장에서 single stone column의 하중재하실험을 수행하였다. 본 공사에는 Fig. 5와 같은 대형 원유저장탱크 3개가 건설될 예정이었다. 본 현장의 지반은 매우 연약하여 낮은 지지력과 높은 예상침하량 때문에 연약지반 개량이 필요하였으며 공비 및 공기등을 고려하여 stone column 기초를 사용하기로 결정하였다. 1개의 탱크기초를 형성시키기 위해 지름이 500mm, 길이가 10m되는 stone column을 약 1900개 사용하였다. Stone column사이의 공간은 약 3D정도로서 탱크 shell 부분에서는 shell의 무게에 의한 하중 증가와 본 기초와 같이 대형 탱크기초에서 지반이 탱크 바깥 방향으로 밀림으로써 stone column이 일면파괴되어 지지력이 저하되는 현상등을 고려하여 다른 부분보다 stone column들을 좀더 조밀하게 형성시켰다. Stone column의 재료는 75mm 이하의 쇠석을 사용하였으며 쇠석 알갱이가 매우 날카롭고 거칠어서 stone column의 내부 마찰각이 클 것으로 예상되며 본 설계에선 일반적으로 사용되는 45도의 내부 마찰각이 가정되었다.

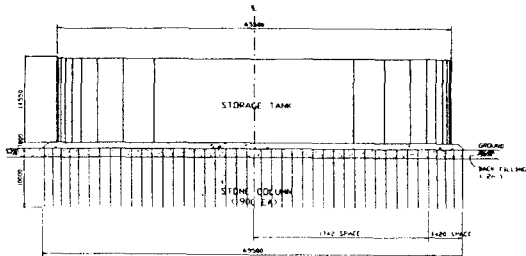


Fig. 5 Configuration of stone column foundation of oil storage tank

지반은 매우연약한 점토로 구성되어 있고 그 깊이는 50m 이상 일 것으로 추측되었다. SPT, 베인전단실험 등의 현장실험 데이터 등을 분석한 결과 점토의 비배수전단강도는 약 $3.7 T/m^2$ 일 것으로 예상되었다⁹⁾. 약 2m 정도의 깊이로 연약점토위에 성토를 하였는데 성토층은 점토성 실트로서 성토층의 비배수전단강도는 약 $15.3 T/m^2$ 정도로 예상되었다.

3.2 실험방법

본격적인 stone column 건설공사가 시작되기 전에 stone column의 하중재하실험을 수행하였다⁶⁾. Fig. 6에 실험 방법을 나타내었다. Single stone column위에 25mm두께의 강판을 놓아 하중이 stone column에 고루 분포되도록 하였으며 하중은 유압잭을 이용하여 작용시켰다. 4개의 dial gauge를 이용하여 stone column의 침하를 측정하였으며 dial gauge는 지반의 침하에 의한 영향을 최소화 하기 위해 stone column으로부터 1.25m 떨어진 위치에 고정시켰다.

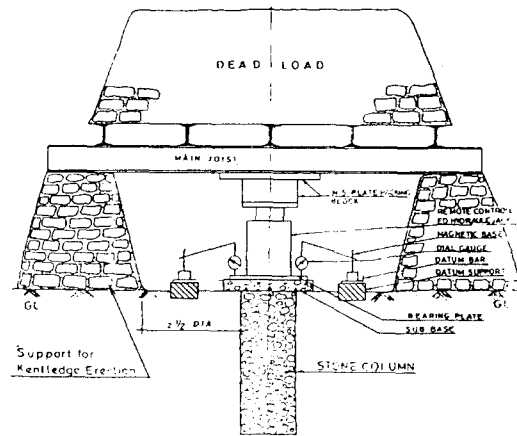


Fig. 6 Configuration of single stone column load test

3.3 실험결과 및 고찰

Fig. 7와 Fig. 8에 하중재하실험 결과를 나타내었다. Fig. 7은 각 하중에 대한 시간에 따른 처짐의

변화를 나타내고 있으며 Fig. 8은 하중에 따른 처짐의 변화를 나타내고 있다. Fig. 7으로부터 하중이 72.32Ton 까진 시간에 따라 처짐이 예상대로 증가하며 1 - 2 시간 이후 부터 처짐이 수렴되는 것으로 나타났으며 하중이 76.84Ton인 경우엔 1시간 이후부터 처짐이 갑자기 증가되어 stone column이 파괴됨을 알 수 있다. 따라서 본 stone column의 극한 지지력은 72.32Ton과 76.84Ton 사이에 존재함을 알 수 있다.

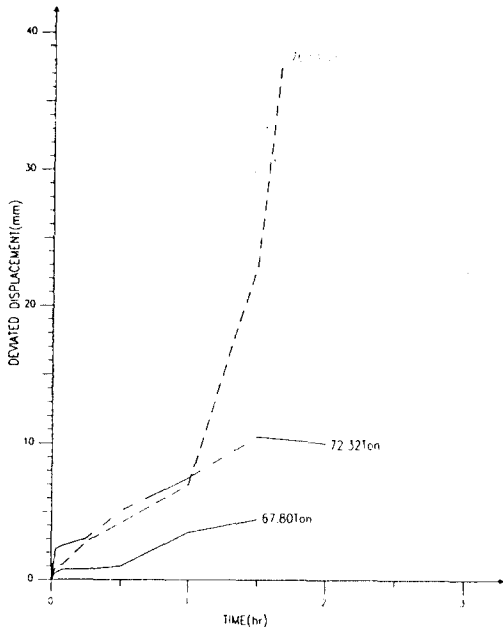


Fig. 7 Plot of deviated displacement vs. time

Fig. 8로부터 하중이 73Ton 이후부터 처짐이 갑자기 증가됨을 알 수 있다. 따라서 본 stone column의 극한지지력은 73Ton인 것으로 판단하였다. 일반적으로 stone column은 처짐이 지름의 10%정도일 때 극한지지력이 발생된다고 알려져 있는데 본 실험에선 73Ton에 대해 stone column 지름의 11%정도인 약 54mm의 처짐이 발생하여 일치된 결과를 얻었다. 따라서 stone column 단면적에 가해지는 하중응력은 $372 T/m^2$ 가 되었다.

Fig. 9에 강한 층의 두께에 따른 stone column의 지지력을 Ranjan등이 제안한 지지력공식 식(16)과 본 논문에서 제안한 지지력공식 식(27)을

비교하여 나타내었다. 여기서 식(16)은 강한 층의 영향을 고려할 수 없기 때문에 본 논문에서 제안한 방법과 같은 방법으로 다음과 같이 식(16)을 변형시켜 비교하였다.

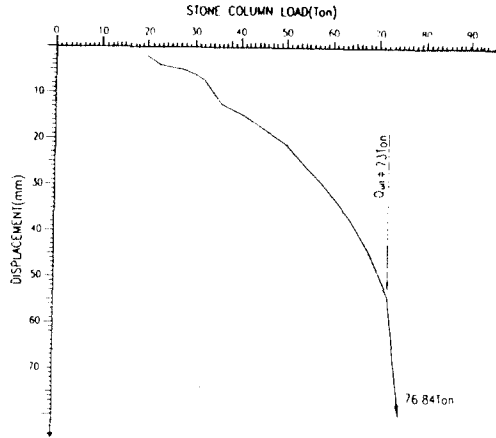


Fig. 8 Plot of displacement vs. applied load on stone column

$$q_{ult} = K_b(0.5\gamma_s Lc + 10C + q_s + q_b) + \pi D \cdot D_h C_h \quad (28)$$

또한 본 실험 결과도 함께 Fig. 9에 나타내었다. 여기서 q_s 는 본 실험 현장과 같은 $2.8 T/m^2$ 을 사용하였으며 비배수전단강도가 $3.7 T/m^2$ 와 $7 T/m^2$ 일 때에 대해 비교하였다. 그외의 모든 데이터는 본 실험 현장조건과 같은 것으로 가정하였다.

Fig. 9로부터 본 논문에서 제시한 지지력산정방법이 Ranjan등이 제시한 지지력 산정방법보다 약 10% 정도 큼을 알 수 있다. 하중 재하실험 결과는 본 논문에서 제시한 지지력산정 값보다 크게 나왔으나 비교적 일치하는 것을 알 수 있으며 Ranjan 등이 제시한 결과보다 본 논문에서 제시한 결과에 좀더 근접함을 알 수 있다. 또한 상부 강한 층의 두께가 14m 이상 되어야 상부층에서 팽창성 파괴 현상이 일어나므로 일반적인 stone column의 지지력은 하부의 연약 점토층에 의해 영향을 받음을 알 수 있다.

상대적으로 강한 상부층에 의해 지지력이 크게 증가함을 알 수 있으며 따라서 연약점토층이 상부

에 존재할 경우 skirt system과 같이 팽창성 파괴 현상이 일어나는 깊이를 증가시킴으로써 지지력을 크게 증가시킬 수 있다.

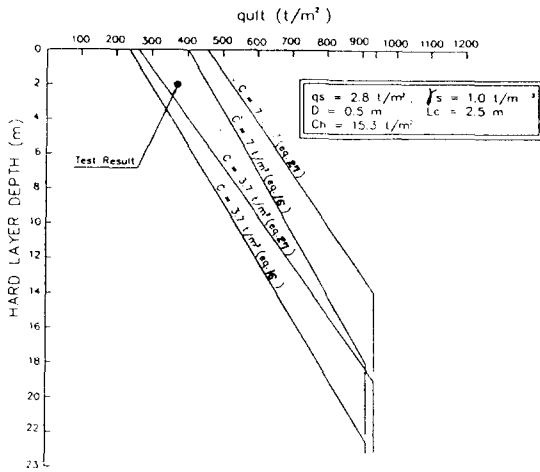


Fig. 9 Comparing the bearing capacity formulas vs. hard layer depth

4. 결론

Ranjan등이 제안한 지지력 공식을 변형하여 새로운 stone column의 지지력 공식을 제시하였다. 본 논문에서 수행한 예제를 기준으로 비교할 때 본 논문에서 제시한 지지력 산정방법은 Ranjan등이 제시한 지지력 산정방법과 약 10% 차이가 발생하였다.

상대적으로 강한 상부층에 의해 지지력이 크게 증가함을 알 수 있으며 연약점토층이 상부에서부터 존재할 경우 skirt system과 같이 팽창성 파괴 현상이 일어나는 깊이를 증가시킴으로써 지지력을 크게 증가시킬 수 있다.

하중재하실험 결과는 본 논문에서 제시한 지지력 산정 값보다 크게 나왔으나 비교적 일치하는 것을 알 수 있으며 Ranjan등이 제시한 결과보다 본 논문에서 제시한 결과에 좀더 근접함을 알 수 있다.

본 논문의 결과는 stone column 설계시 많은 참고가 될 수 있을 것으로 생각되며 본 논문에 대한 검증은 위해 앞으로 좀더 많은 연구와 실험이 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1) Aboshi, H. and Suematsu, N., "The State of the Art on Sand Compaction Pile Method", Proceedings Third International Geotechnical Seminar on Soil Improvement Methods, Nanyang Technological Institute, Singapore, 1985
- 2) Gopal, Ranjan and B. Govinda, Rao, "Load Bearing Capacity of Skirted Granular Piles", Indian Geotechnical Journal 21(2), 1991
- 3) Gopal, Ranjan and B. Govind, Rao, "Performance of Structure on Granular Piles Treated Ground", Symposium on Developments in Geotechnical Engineering(From Harvard to New Delhi 1936-1994), Asian Institute of Technology, Bangkok, 1994
- 4) Gopal, Ranjan and B.G. Rao, "Skirted Granular Piles - Installation Technique and Utility", Conference on Deep Foundations Practice, Singapore, 1990
- 5) Gopal, Ranjan, "Ground Treated with Granular Piles and Its Response under Load", Eleventh IGS Annual Lecture, India, 1988
- 6) Gopal, Ranjan, Ground Treatment for Oil Tanks at S. Yanam East Godavari Dist., Andhra Pradesh, India, 1995
- 7) J.M.O. Huges, N.J. Withers and D.A. Greenwood, "A Field Trial of the Reinforcing Effect of a Stone Column in Soil", Geotechnique, Vol.25, No.1, 1975
- 8) J.K. Mitchell and R.K. Katti, "Soil Improvement - General Report", Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.4, Stockholm, 1981
- 9) Vijay Nirman Co., Report on Soil Investigation and Recommendations for Foundation at S. Yanam, India, 1995