

# 대형 평판재하시험을 이용한 얇은 기초의 침하에 대한 크기효과 평가

## Evaluation of Size Effects of Shallow Foundation Settlement Using Large Scale Plate Load Test

김 경 석<sup>1</sup> Kim, Kyung-Suk

이 상 래<sup>2</sup> Lee, Sang-Rae

박 영 호<sup>3</sup> Park, Young-Ho

김 성 환<sup>4</sup> Kim, Sung-Hwan

### Abstract

This paper addresses the size effect of shallow foundation settlement in very dense weathered granite soil commonly encountered in bridge foundation. Load-settlement curves measured from the plate load tests of 5 different plate sizes in 2 sites were analyzed. The test results showed that the ground beneath the plate was considered not to reach the failure state and the settlement continuously increased proportionately as load increased. The result implies that settlement would govern the stability or serviceability of foundation on very dense weathered soil. The size effect is expressed as a relationship of subgrade reaction modulus to the size of plate. Compared with the previous relationships, the size effect in this result was more prominent and indicated that settlement prediction using the previous method could possibly underestimate the settlement of foundation in dense weathered granite soil.

### 요 지

교량기초의 지지층인 조밀한 화강풍화토 지반에서 얇은 기초의 침하에 대한 크기효과를 평가하고자 하였다. 이를 위해 지반조건이 유사한 2개 현장에서 재하판 크기를 다르게 하여 평판재하시험을 수행하였다. 시험결과 재하판 하부 및 주변 지반의 파괴는 관찰되지 않았으며 하중 증가에 따라 침하가 비례하여 증가하였다. 이러한 결과는 대상지반에 지지되는 기초의 안정성 또는 사용성은 침하가 지배하는 것을 의미한다. 침하에 대한 기초크기 효과는 압력-침하곡선의 기울기로 표현되는 지반반력계수와 기초폭의 관계로 표현하였다. 기존에 제안된 관계식과 비교해 볼 때 본 실험 결과는 크기효과가 더 크게 나타나며, 이는 기존에 제안된 관계식은 조밀한 화강풍화토 지반에 지지된 기초의 침하를 과소평가할 수 있음을 나타낸다.

**Keywords :** Plate Load Test, Settlement, Shallow Foundation, Size Effect, Weathered Granite Soil

### 1. 서 론

교량의 얇은 기초는 표준관입시험에서 N값이 50회 타격시 15cm 미만 관입되는 조밀한 풍화토 또는 풍화

암 지반조건보다 양호한 지반에 지지되도록 설계·시공되고 있으며 허용지지력과 허용침하량 두 가지 관점에서 모두 만족하는 결과를 보여야 안정성이 확보되는 것으로 간주한다. 지지력 공식에 의한 기초의 지지력은

1 정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (Member, Associate Researcher, Korea expressway corporation, Tel: +82-32-371-3372, Fax: +82-32-371-3379, kskim2k4@ex.co.kr, 교신저자)

2 정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (Associate Researcher, Korea expressway corporation)

3 정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 연구위원 (Senior Research Director, Korea expressway corporation.)

4 정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 건설본부장 (Executive Managing Director, Korea expressway corporation.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

기초폭에 비례하여 증가하지만 발생하는 침하량도 기초 폭에 비례하여 증가해 허용침하량을 초과하게 되므로 일정 크기 이상의 기초 설계는 허용침하량에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다(Meyerhof, 1956; Terzaghi, 1943, D'Appolonia 등, 1968). Terzaghi(1943)는 허용침하량을 25mm로 두는 경우 기초폭이 1.2m 이상이 되면 침하량에 의해 허용지지력이 결정되는 것으로 언급한 바 있다. 얇은 기초의 침하예측 방법은 많은 연구자들이 제안한 바 있으며 탄성론과 현장시험(SPT, CPT, PMT) 결과를 이용한 경험적 방법을 통해 산정할 수 있다. 하지만 Briaud와 Gibens(1997)에 의하면 동일한 지반조건에서도 사용하는 방법에 따라 침하 예측 결과가 큰 차이를 보이고 있어 침하예측의 신뢰성은 여전히 낮다고 볼 수 있다. 실제 기초의 시공단계에서는 설계 하중하에서 발생하는 침하량 확인을 위해 직경 0.3m의 원형강관을 이용한 평판재하시험을 실시하는 과정을 거치며 이때 실제 기초와 평판의 크기 차이를 고려하기 위해 침하에 대한 크기 효과를 적용하게 된다.

기초의 침하에 대한 크기효과는 많은 연구자들에 의해서 제시되어 왔으며 국내에서는 Terzaghi와 Peck(1948)이 제안한 경험적 방법을 통상적으로 사용하고 있다. 하지만 이 방법은 상대밀도를 일정하게 한 사질토에 대하여 0.3m의 재하판과 다른 크기의 재하판에 대한 제한된 시험결과를 비교하여 얻어진 결과로서, 이후의 연구자에 의하면 시험자료의 분산정도가 심하므로 가능하다면 기초가 시공되는 지반조건에 맞는 크기효과를 평가하여 사용하도록 권장하고 있다. Bond(1961)에 의하면 Terzaghi와 Peck(1948)이 제안한 크기 효과식은 기초크기가 0.3m 이하인 경우에는 적용할 수 없으며 기초 크기가 0.3m 이상인 경우에는 침하량을 과다하게 예측한다고 언급한 바 있고, Bjerrum과 Eggstad(1963)는 상대밀도가 다른 지반에서 실시한 현장재하시험과 실내시험자료를 토대로 사질토에서 기초의 침하에 대한 크기효과는 하나의 경향을 가진 곡선으로 정의할 수 없으며 상대밀도에 따라 분산이 매우 크게 나타난다고 하였으며 크기효과에 대한 상한값과 하한값의 범위를 제시한 바 있다. D'Appolonia 등(1968)은 3.6m폭의 실제 기초에서 발생한 침하량과 0.3m 재하판에서 구한 침하량을 비교하였으며 Terzaghi와 Peck(1948)의 제안식이 실제 침하량을 약 3배 이상 과소평가하는 것을 확인한 바 있다. 이러한 결과는 사질토 지반에서의 기초의 크기효과는 지반의 상대밀도, 입자의 크기, 지하수위, 근입깊이 등에 따라 분산이 매우 크기 때문에 하나

의 식으로 정량화하는 것은 매우 어렵고 지반조건에 따라 침하에 대한 크기효과를 달리 평가해야 할 필요성을 제기한다.

기존의 연구결과는 대부분 인공적으로 조성된 사질토 지반에 대하여 재하판의 크기를 1.0m 내외로 둔 소규모 시험결과를 이용한 것으로서 실제 얇은 기초의 지지층으로 자주 나타나는 매우 조밀한 화강풍화토 지반에 대해서는 적용의 한계가 있다. 본 연구에서는 매우 조밀한 화강 풍화토 지반조건에 대하여 최대 4.0m까지 크기를 달리한 평판재하시험을 실시하여 하중-침하 거동을 분석하고 기초의 침하에 대한 크기효과를 평가하고자 하였다.

## 2. 얇은 기초의 크기 효과

얇은 기초의 크기효과는 지지력에 대한 관점과 침하에 대한 관점으로 구분된다. 지지력에 대한 기초크기 효과(effect of foundation size on bearing capacity)는 기초크기에 비례하여 지지력이 선형적으로 증가하지 않는 현상을 의미한다. 식 (1)과 같이 Terzaghi의 이론적인 지지력 공식에서는 기초폭과 관련된 지지력계수  $N_c$  값을 기초의 크기와 상관없이 지반의 내부마찰각에만 의존하는 값으로 가정하므로 지지력은 기초폭에 비례하여 증가해야 하지만, 기존 연구자들(De Beer, 1965; Clark, 1997)에 의하면  $N_c$  값이 기초폭에 따라 반비례하여 감소하는 것을 확인한 바 있다. Vesic(1973)는 기초폭의 증가에 따라 기초 하부지반의 구속압이 달라지면 파괴면을 따라 발휘되는 전단강도비( $\tau_f/\sigma_{vo}$ )가 감소하는 것이라고 제시한 바 있으며, Meyerhof(1965)는 이러한 효과가 Mohr-Coulomb 파괴포락선의 비선형성의 결과라고 설명하고 있다. 하지만 기초 크기에 따른 지지력 효과는 정량적으로 확인하기 힘든 부분으로서 실무에서는 반영되지 않고 있는 실정이다.

$$q_{ult} = cN_c + \gamma D_f N_q + 0.5\gamma B N_\gamma \quad (1)$$

여기서,  $c$ 는 점착력,  $\gamma$ 는 단위중량,  $D_f$ 는 근입깊이,  $N_c, N_q, N_\gamma$ 는 지지력계수이다.

침하에 대한 기초크기 효과(effect of foundation size on settlement)는 기초의 크기에 따라 침하량이 비례하여 증가하지 않는 것을 의미한다. 사질토 지반에서 침하량 예측은 식 (2)와 같이 탄성론에 근거한 식을 이용하여 산정할 수 있는데, 다른 조건이 모두 동일하다고 가정할 때 서로 다른 크기를 갖는 기초의 침하량은 식 (3)과 같이

비례식으로 표현될 수 있다. 하지만, 실제 기초의 침하량은 기초하부지반의 초기응력상태, 심도에 따른 지반조건 및 압축특성의 변화, 포아송비의 차이 등 매우 다양한 특성에 의존하므로 식 (3)을 이용한 침하량의 예측은 한계가 있다.

$$s_i = \frac{qB(1-\nu^2)I_s}{E} \quad (2)$$

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{B_1}{B_2} \quad (3)$$

여기서,  $q$ 는 기초에 작용하는 압력,  $B$ 는 기초의 크기(폭),  $\nu$ 는 지반의 포아송비,  $I_s$ 는 기초의 영향계수,  $E$ 는 지반의 변형계수이다.

침하에 대한 기초크기 효과는 크기를 달리한 평판재하시험 결과로부터 침하량을 비교하여 구한 경험식으로 표현되는데 Terzaghi와 Peck(1948)은 상대밀도가 같은 사질토지반에 재하판의 크기를 달리하여 실시한 실험결과로부터 식 (4)과 같은 경험식을 제안한 바 있다. 이 식은 기존 연구에서 그 한계가 확인되었음에도 불구하고 현재까지 가장 광범위하게 사용되고 있다.

$$s_f = s_p \left( \frac{2B}{B+0.3} \right)^2 \quad (4)$$

여기서,  $s_f$ 는 기초의 침하량,  $s_p$ 는 0.3m 재하판으로부터 측정된 침하량,  $B$ 는 기초폭(m)이다.

침하에 대한 기초크기효과는 다른 연구자들에 의해서도 수행된 바 있으며, Bond(1961)는 지반종류와 상대밀도에 따라서 침하에 대한 기초크기효과가 달라지는 것을 실험을 통해 식 (5)와 같이 제시한 바 있다.

$$s_f = s_p \left( \frac{B_f}{B_p} \right)^n \quad (5)$$

여기서,  $s_f$ 는 기초의 침하량,  $s_p=0.3m$  재하판으로부터 측정된 침하량,  $B_p$  기준재하판의 크기,  $B_f$ 는 기초의 크기이고,  $n$ 은 지반종류에 따라 달라지는 값으로서 점토지반에서는 0.03~0.05, 모래질점토에서는 0.08~0.1, 조밀모래에서는 0.08~0.5, 중간조밀모래에서는 0.25~0.35, 느슨한 모래에서는 0.2~0.25의 범위를 갖는다.

Parry(1978)는 침하량 예측에 있어 기초하부 지반조건변화를 고려하기 위해서 평판재하시험뿐만 아니라 표준

관입시험의 결과를 추가하는 식 (6)를 제시한 바 있다.

$$s_f = s_p \frac{B_f (N_m)_p}{B_p (N_m)_f} \quad (6)$$

여기서  $N_m$ 은 기초하부 2B심도까지의 평균 N값( $=\frac{1}{6}(3N_1+2N_2+N_3)$ ),  $(N_m)_p$ 은 시험재하판에 대한 평균 N값,  $(N_m)_f$ 은 시험재하판에 대한 평균 N값이고,  $N_1$ 은  $\frac{2}{3}B$ 까지 평균 N값,  $N_2$ 는  $\frac{2}{3}B \sim \frac{4}{3}B$ 사이의 평균 N값,  $N_3$ 는  $\frac{4}{3}B \sim 2B$ 까지의 평균 N값이다.

표현방식이 차이가 있긴 하지만 국내 도로교시방서(2000)에서는 하중-침하 곡선의 기울기인 지반반력계수를 이용하여 침하에 대한 크기효과를 고려하는 방법이 식 (7)과 같이 제시되어 있다.

$$k_v = k_{vo} \left( \frac{B}{B_o} \right)^{-3/4} \quad (7)$$

여기서,  $k_v$ 는 기초의 연직방향 지반반력계수,  $k_{vo}$ 는 지름 0.3m의 평판시험에서 구한 지반반력계수,  $B$ 는 기초의 환산재하폭,  $B_o$ 는 0.3m이다.

이상에서 살펴본 것과 같이 사질토에 지지된 직접기초의 침하에 대한 크기효과는 다양한 형태의 식으로 제시된 바 있지만, 대부분의 제안식은 지반조건을 한정시킨 소형의 평판재하시험에서 제안된 것으로서 국내 교량의 얇은 기초의 지지층으로 사용되는 매우 조밀한 화강풍화토 지반에 대한 적용성은 확인해 볼 필요가 있다.

### 3. 현장 평판 재하 시험

#### 3.1 대상현장 및 지반조건

본 연구에서는 두 개의 현장에서 크기를 달리한 평판재하시험을 실시하여 매우 조밀한 화강풍화토에 지반에 대한 얇은 기초의 침하에 대한 크기효과를 평가하고자 하였다. 현장의 위치는 경상남도 거창시 인근의 산업단지(Site-A)와 고속도로 건설현장(Site-B)으로서 산지를 절토하여 매우 조밀한 풍화토층이 노출된 상태이다. 지반조건을 확인하기 위하여 시추조사와 표준관입시험(SPT)을 실시하였고, 교란시료에 대한 물성시험과 블록샘플을 채취하여 실내시험을 실시하였다.

시추조사는 풍화토층이 노출된 상태에서 최대 재하판 크기의 2.5배인 평균 10m심도까지 실시하였으며 시험부지 내 지반조건의 변동성 확인을 위해 시험위치와 인접한 위치에 대해서도 조사를 실시하였다. Fig. 1에는 모든 시추조사에서 실시한 SPT N값을 나타낸 것으로서 30cm를 관입하지 못한 상태에서 타격횟수가 50회를 초과하는 경우 30cm관입시의 타격횟수로 환산하여 표시하였다. 지표면 근처에서의 평균 SPT N값은 65~88정도로 나타나며 약 10m까지 선형적으로 증가하는 형태를 나타낸다. 심도 10m에서의 평균 SPT N값은 약 300~375정도를

나타낸다.

교란시료와 블록시료에 대한 시험결과는 Table 1에 나타내었다. 대상지반의 흙은 통일분류상 SW-SM으로 분류되고 블록시료에서 구한 건조단위중량과 간극비 값의 범위는 매우 조밀한 상태를 나타내고 있다. 전단강도는 블록시료를 성형한 시료에 대해 삼축압축시험을 실시하여 구하였는데, 사질지반임에도 불구하고 점착력이 있음을 알 수 있으며 내부마찰각은 변동성이 크게 나타났다. 이는 시료의 불균질성에 기인한다고 볼 수 있다. Table 1에는 대상지반에서 수행한 공내재하시험(PMT)과

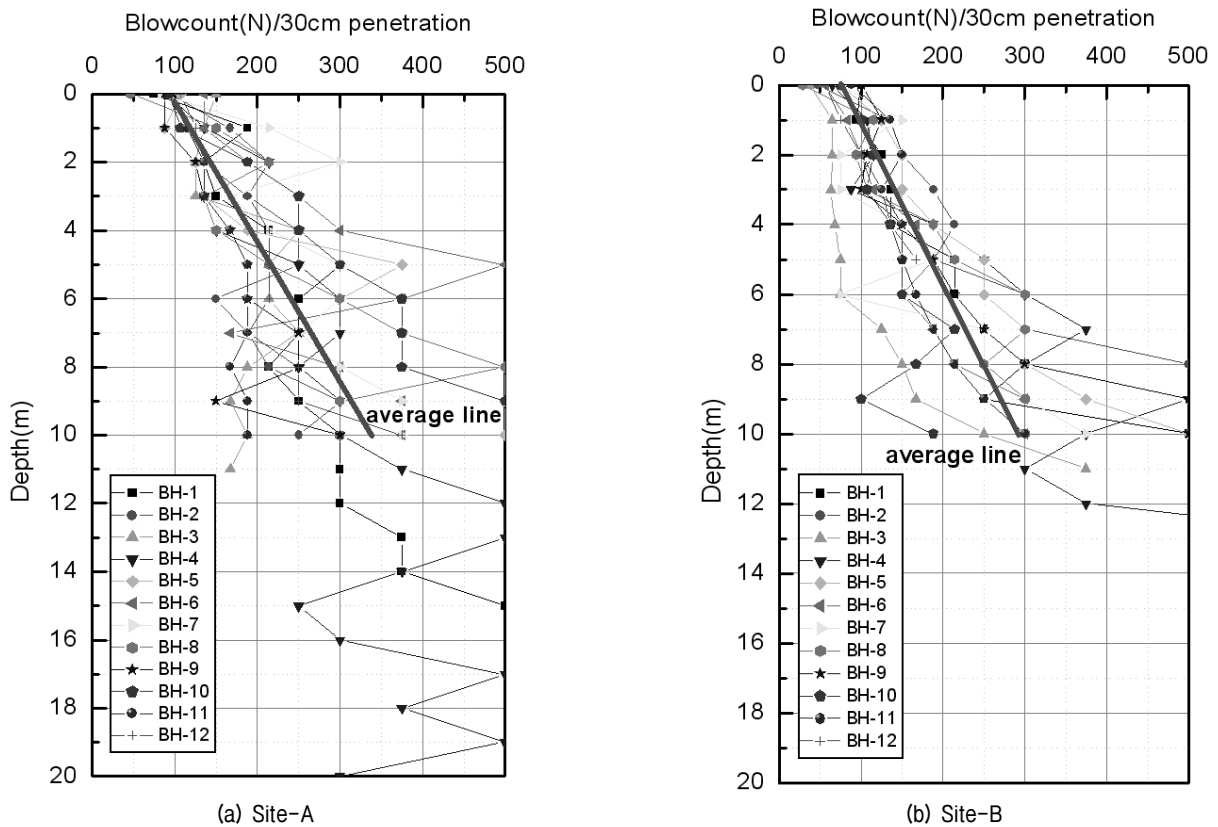


Fig 1. Depth profile of SPT-N value

Table 1. Soil properties from laboratory and field tests

		SITE-A	SITE-B	Remark
Soil type and classification		weathered granite soil, SW-SM	weathered granite soil, SW-SM	
Percent finer than No.200	%	11.5 ~ 17.8	8.0 ~ 13.8	wet sieving
Dry Unit Weight	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	22.3 ~ 22.6	21.8 ~ 22.6	Block Sample
Void Ratio	$e$	0.19 ~ 0.20	0.18 ~ 0.21	Block Sample
Shear Strength	$c$ (kPa)	100 ~ 105	45 ~ 95	Triaxial Test (block sample)
	$\phi$ (°)	27 ~ 54.5	31.5 ~ 47.0	
Deformation Modulus	$E_s$ (MPa)	110 ~ 189	324 ~ 551	PMT
Shear Wave Velocity	$v_p$ (m/s)	270 ~ 620	209 ~ 526	

전단파속도시험 결과를 참고적으로 기록하였다.

### 3.2 평판재하시험 및 시험결과 분석

평판재하시험은 직경이 0.3m, 0.75m, 1.5m, 2.4m, 4.0m 인 정방형 재하판(□)을 이용하였다. 재하판은 4.0m의 경우 별도의 철근콘크리트 블록을 제작하여 시험을 실시하였고, 그 이외의 재하시험에서는 강재판을 사용하였다. 강재판은 접촉압을 일정하게 유지하고 시험과정에서 변형되지 않도록 하기 위해 보강한 판을 사용하였다. Fig. 2와 Table 2에는 Site-A위치에서의 평판재하시험 평면위치도와 평판재하시험 내용을 나타내었다.

Fig. 3에는 Site-A와 Site-B에서 수행한 평판재하시험 결과를 압력-침하곡선으로 나타내었다. 시험 결과에서는 단위면적당 압력이 증가함에 따라 침하량도 지속적으로 증가하며 최대하중까지 뚜렷한 변곡점을 나타내지 않아 항복 또는 극한상태에 도달 여부를 확인하기 어려웠다. 큰 압력상태시험결과에서는 재하판의 크기가 커질수록 동일한 압력하에서 침하량이 증가하는 형태를 나타낸다.

시험이 완료된 후에 재하판 하부와 주변의 지반 상태

를 관찰해보면, 직경 0.3m의 소형 재하판의 경우에는 주변 지반이 균열과 함께 약간 솟아오르는 상태가 확인되지만 0.75m 이상 크기의 재하판에서는 주변지반의 균열이나 솟음이 확인되지 않고 관입파괴 형상만이 관찰되었다 (Fig. 4).

얕은 기초의 파괴는 흙의 밀도가 느슨한 경우 관입전단파괴(punching shear failure)가 우세하고 조밀한 사질

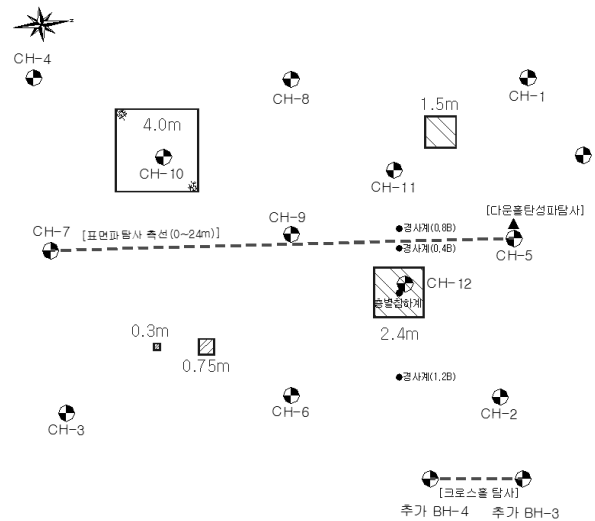
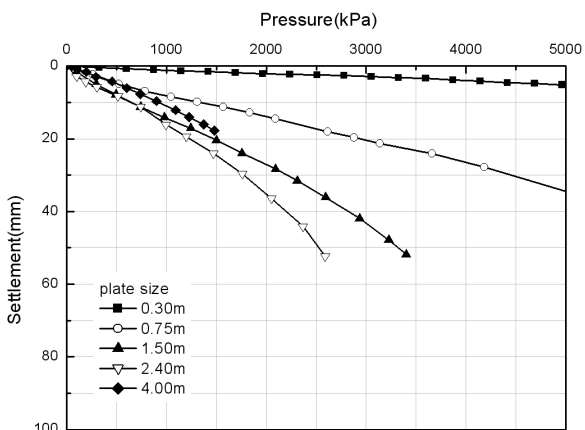


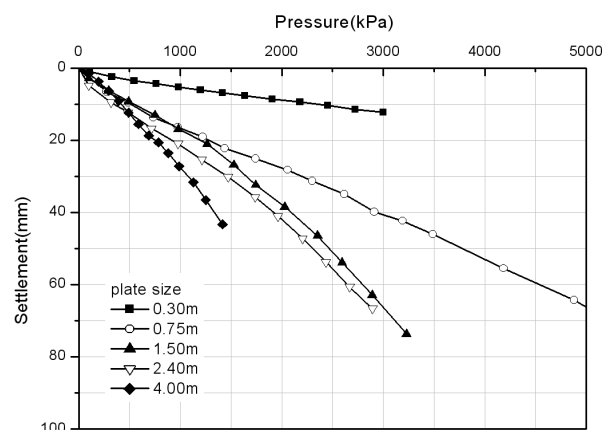
Fig 2. Test plan at Site-A

Table 2. Plate dimensions and maximum test pressures

Size of Plate (B, m)	Dimension of plate	Maximum Test Pressure (kPa)	
		Site A	Site B
0.3	0.30 m × 0.30 m × 0.03 m steel plate	22,890	2,998
0.75	0.75 m × 0.75 m × 0.04 m steel plate	7,674	6,976
1.5	1.50 m × 1.50 m × 0.04 m steel plate	3,401	4,316
2.4	2.40 m × 2.40 m × 0.05 m steel plate	2,589	2,895
4.0	4.00 m × 4.00 m × 1.50 m reinforced concrete	1,478	1,416



(a) Site-A



(b) Site-B

Fig. 3. Pressure-settlement curves

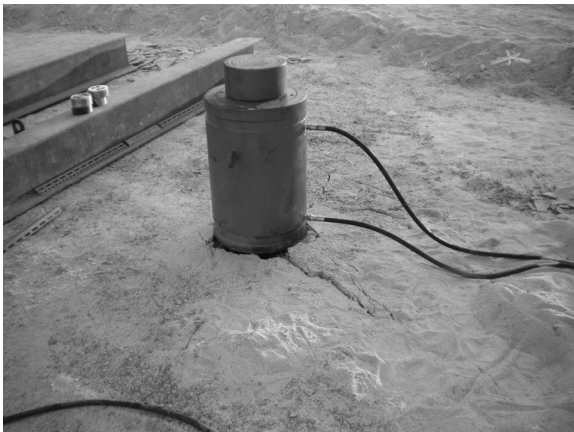
토에서는 전반전단파괴(*general shear failure*)가 우세한 것으로 알려져 있으며, 조밀한 사질토에서는 가해지는 하중이 증가함에 따라 초기에는 관입전단파괴가 먼저 발생하게 되고 하중이 점차 증가하면 기초의 모서리 부분을 따라 소성상태가 진행되어 파괴면이 완전히 발달하는 전반전단파괴로 진행되는 형태를 나타낸다.

조밀한 사질토 지반으로 간주되는 지반에서 관입전단 파괴 형태가 발생하는 이유는 파괴에 도달시킬 만큼의 충분한 압력이 가해지지 않았을 가능성이 있다. Tatshoka 등(1936)에 의하면 침하량이 기초폭의 약 70% 정도까지 발생할 때 전반전단파괴 형태가 발생하며 그 이하의 변형에서는 지반파괴가 아닌 입자의 압축과 미끄러짐 층의 발생으로 인해 관입전단파괴나 국부전단파괴의 형상을 보이는 것을 실험을 통해 증명할 바 있다. 본 연구에서 수행한 재하시험은 하중 수준이 1,500~3,000kPa 정도의 압력까지 가한 상태지만 침하량이 기초폭의 10~30%정

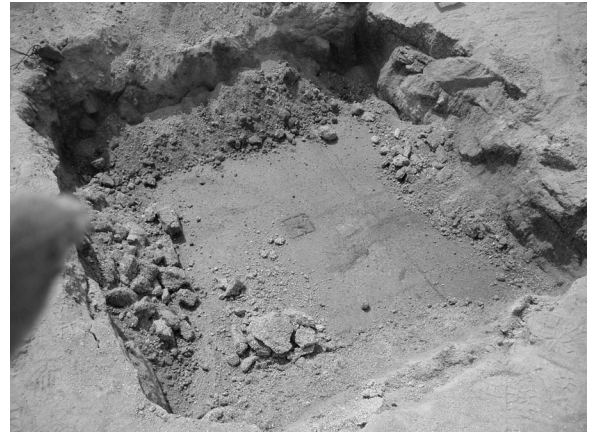
도만 발생한 상태이므로 지반은 관입전단파괴만 진행되고 전반전단 파괴까지 진행되지 않았음을 간접적으로 추정할 수 있다.

각 재하판 크기별 극한파괴상태 도달여부를 확인하기 위하여 시험에서 구한 압력-침하곡선과 Terzaghi의 이론적 지지력공식(식 (1))으로 구한 극한지지력 및 안전율 3.0을 적용한 허용지지력을 Fig. 5에 나타내어 보았다. 시험은 지표면에서 수행하였으므로 극한지지력 산정시 근입심도( $D_f$ )값은 0으로 두고 계산하였다. Table 3에는 계산에 사용한 입력값으로서 대상 지반에서 실시한 시험 결과를 참고하여 결정하였다. 계산된 극한지지력값과 허용지지력은 Table 4에 나타내었다.

이를 보면 Site-A에서 폭 0.3m인 재하시험에서만 극한 지지력을 초과한 시험하중을 가하였고 다른 크기의 재하판에 대해서는 시험하중이 극한지지력까지 못한 상태에서 종료되었음을 알 수 있다. 침하량 관점에서는 재하

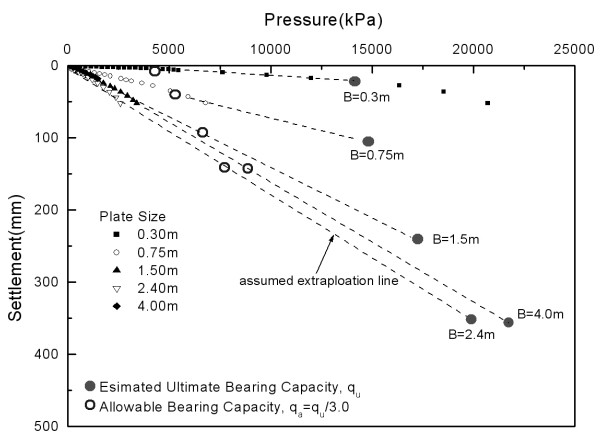


(a) 0.3 m plate load test

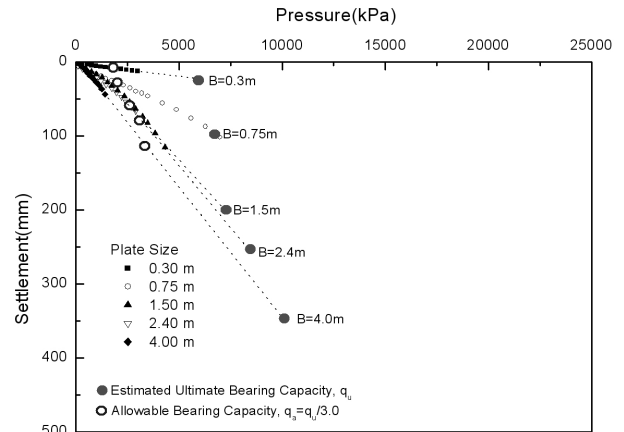


(b) 0.75 m plate load test

Fig. 4. Failure shape of ground during and after the test



(a) Site-A



(b) Site-B

Fig. 5. Pressure-settlement curves and ultimate bearing capacity

판이 큰 경우 허용지지력에 해당하는 침하량이 100mm를 초과하는 경우도 발생할 수 있음을 알 수 있다.

시험 결과는 교랑기초가 지지되는 매우 조밀한 풍화토 지반은 하중 증가에 따라 침하량이 비교적 선형적으로 증가하는 양상을 나타내고 교랑의 얇은 기초의 설계하중 수준인 500~1,000kPa의 하중 하에서는 항복이나 극한 상태의 거동이 나타나기 어려움을 의미하고 있다. 또한, 얇은기초의 지반의 허용지지력이 설계하중보다 크게 계산되더라도 발생하는 침하량은 허용치를 훨씬 상회할 가능성이 있음을 나타내며 따라서 조밀한 화강풍화토 지반에 시공되는 얇은 기초의 안정성은 지지력보다는 침하량 측면이 관리하는 것이 중요함을 의미한다.

#### 4. 침하에 대한 크기효과 평가

##### 4.1 지반반력계수를 이용한 크기효과

침하에 대한 기초크기 효과는 폭 0.3m의 재하판에 대한 시험결과를 기준으로 다른 크기의 재하판에 대한 침하를 예측하는 형태로 제시된다(식 (8)). 압력-침하곡선을 선형

으로 가정할 수 있는 경우에는 침하에 대한 크기 효과는 압력-침하곡선의 기울기인 지반반력계수로도 표현이 가능하다(식 (9)).

$$\frac{s}{s_{30}} = f\left(\frac{B}{B_0}\right) \quad (8)$$

$$\frac{K}{K_{30}} = \frac{1}{(s/s_{30})} = \frac{1}{f(B/B_0)} \quad (9)$$

여기서  $s$ 와  $s_{30}$ 은 각각 동일압력하에서 실제기초의 침하량 및 0.3m 재하판에서 발생한 침하량을 의미하고,  $B$ 와  $B_0$ 는 각각 실제기초의 폭 및 0.3m재하판,  $K_s$  및  $K_{30}$ 은 각각 실제기초 및 0.3m재하판에 대한 압력-침하곡선의 기울기를 나타낸다.

본 연구에서 대상으로 하는 조밀한 화강풍화토 지반에서는 압력-침하곡선이 거의 선형으로 나타나 침하에 대한 크기효과를 지반반력계수로 표현하고자 하였으며 Fig. 6에는 지반반력계수를 이용하여 침하에 대한 크기효과를 표현하는 방법을 나타내었다.

두 현장에 대하여 재하판 크기별 압력-침하곡선으로

Table 3. Soil properties used in calculation of ultimate bearing capacity

	$c$ (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (degree)	$N_c$	$N_\gamma$
Site A	88	22	44	151.95	262.60
Site B	77	22	39	85.97	95.03

Table 4. Calculated ultimate and allowable bearing capacities

	Site A		Site B	
	$q_u$ (kPa)	$q_a$ (kPa)	$q_u$ (kPa)	$q_a$ (kPa)
0.3 m	14,235	4,745	6,331	2,110
0.75 m	15,530	5,177	6,802	2,267
1.5 m	17,688	5,896	7,586	2,529
2.4 m	20,278	6,759	8,527	2,842
4.0 m	24,882	8,294	10,199	3,400

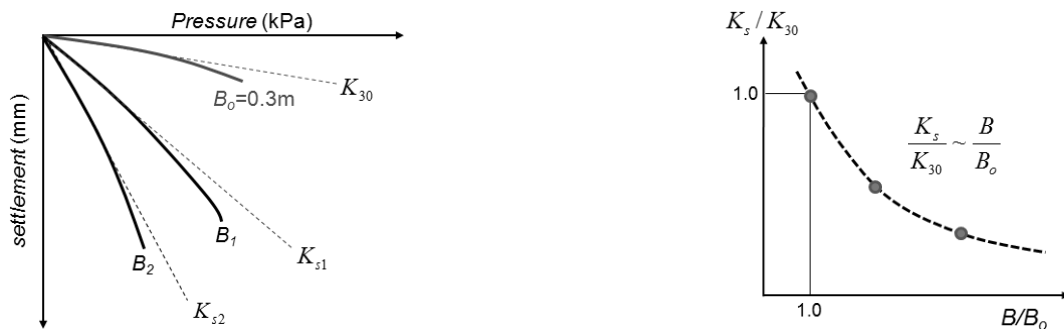


Fig. 6. Effect of foundation size on settlement in terms of coefficient of subgrade reaction

부터 구한 지반반력계수를 Table 5에 나타내었고, Fig. 7에는 재하판의 크기에 따른 지반반력계수를 도표로 도시하였다.

재하판의 크기가 증가함에 따라 지반반력계수는 감소하는 경향을 나타내지만 재하판의 크기가 1.5m 이상이 되면 감소경향이 현저히 줄어들게 되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8에는 0.3m 크기의 재하판으로 정규화한 기초폭 ( $B/B_0$ )과 지반반력계수 비율( $K_s/K_{30}$ )을 나타내었으며 실험값에 대한 최적곡선식을 구하여 함께 나타내었다. 두 현장의 심도에 따른 지반조건이 큰 차이가 없음에도 불구하고 Fig. 8의 지반반력계수 비율은 다르게 나타나는 데 이는 기준값이 되는 0.3m 재하판에서 구한 지반반력계수 값의 차이에 기인한다. 재하판의 크기에 따라 영향 심도가 달라짐을 고려할 때 지표면 근처 지반조건의 영향을 많이 받는 0.3m재하판에 대한 시험결과에 따라 관계가 차이가 발생하는 것을 알 수 있으며, 상대적으로 지표면 근처의 지반조건이 양호한 지반조건에서는 0.3m 재하판에 대한 지반반력계수가 커지므로 지반반력계수 비율( $K_s/K_{30}$ )은 감소하는 경향을 나타내는 것으로 사료된다.

$$\frac{K_s}{K_{30}} = \left\{ \frac{B+B_0}{2B} \right\}^4 \quad (10a)$$

Table 5. Measured coefficient of subgrade reactions

Plate Size (m)	Coefficient of Subgrade Reaction, $K_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	
	Site A	Site B
0.30	952,381	232,558
0.75	143,061	74,074
1.50	70,972	49,751
2.40	56,118	46,512
4.00	67,751	36,232

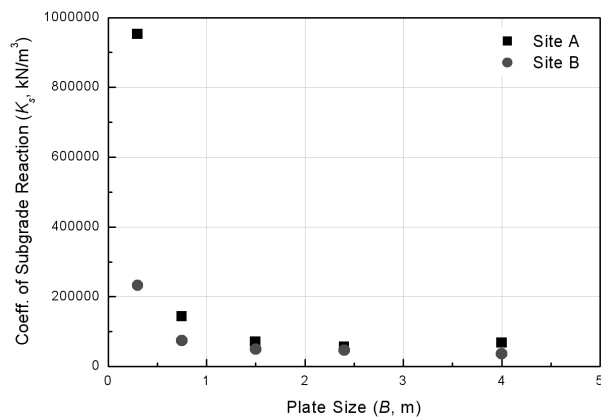


Fig. 7. Relation of  $K_s$  and plate size  $B$

$$\frac{K_s}{K_{30}} = \left\{ \frac{B}{B_0} \right\}^{-6/5} \quad (10b)$$

#### 4.2 기존 제안방법과의 비교

Fig. 9에는 기존의 침하에 대한 기초크기 효과에 대한 연구결과들을 함께 나타내었다. 기존연구와 본 연구에서 제안한 결과를 비교하기 위하여 본 연구에서 사용한 지반반력계수 비율( $K_s/K_{30}$ )은 식 (9)를 이용하여 침하비( $s/s_{30}$ )로 표현하였다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이 본 실험에 의한 결과는 기존 연구자들이 제안하는 크기효과식과 차이가 있음을 알 수 있는데, 본 연구의 시험결과와 제안식은 기존 연구자들의 결과에 비해 침하비율이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 하지만, Bjerrum과 Eggestad(1963)가 기초 크기에 따른 시험결과들을 수집하여 크기효과를 평가한 범위내에 포함되어 있다.

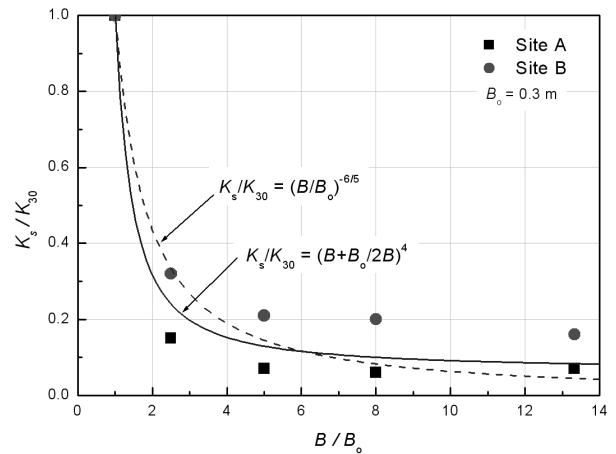


Fig. 8. Relation of  $K_s/K_{30}$  and  $B/B_0$

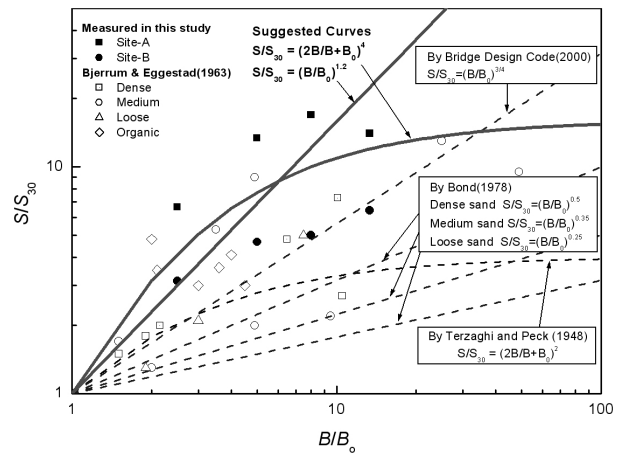


Fig. 9. Comparison of test result with previous studies



본 연구의 결과는 조밀한 화강풍화토 지반에서는 0.3m 재하판을 이용하여 실제 기초에 대한 침하량을 예측할 때 기존식보다 더 크게 평가되어야 함을 나타내며 기존 제안식을 이용할 경우 침하를 과소하게 평가할 수 있음을 의미한다.

## 5. 결론

이 연구에서는 매우 조밀한 화강풍화토 지반에 지지되는 얇은 기초의 하중-침하 거동을 분석하고 침하에 대한 크기효과를 평판재하시험을 통해 확인하고자 하였으며 이로부터 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) 평판재하시험에서 압력-침하 곡선은 최대시험하중까지 뚜렷한 변곡점이 없이 하중 증가에 따라 침하가 지속적으로 증가하는 형태로 나타나고, 재하판의 침하가 재하판 폭의 약 10%정도까지 발생하더라도 지반의 파괴형태는 관입전단파괴 양상으로 나타난다. 이론적인 극한지지력 값과 비교해볼 때 본 연구에서 수행한 평판재하시험은 시험하중이 극한지지력까지 못한 상태에서 종료된 것으로 추정된다.
- (2) 지반이 파괴에 도달하지 않더라도 큰 재하판의 경우에는 침하가 크게 발생할 수 있으며 이는 얇은 기초의 안정성은 지지력보다는 침하량 측면이 관리하는 것이 중요함을 의미한다.
- (3) 얇은 기초의 침하에 대한 크기효과는 기존 연구자들의 결과에 비해 침하비율이 크게 나타나는 것으로 확인되며, 이는 조밀한 화강풍화토 지반에서는 0.3m 재하판을 이용하여 실제 기초에 대한 침하량을 예측할 때 기존 제안식은 침하를 과소하게 평가할 수 있음을 의미한다.

- (4) 본 연구에서는 시험결과를 이용하여 조밀한 화강풍화토 지반에 대한 적용할 수 있는 크기효과식을 제안하였다.

## 참 고 문 헌

1. 국토해양부 (2000), “도로교 표준시방서”.
2. Bjerrum, L., and Eggestad, A. (1963), “Interpretation of Loading Test on Sand”, *Proceedings European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Wiesbaden, Vol.1, pp.135
3. Bond, D. (1961), “The influence of foundation size on settlement”, *Geotechnique*, Vol.11, No.2, pp.121-143.
4. Briaud, J. L and Gibbens, R. (1997), “Large Scale Load Tests and Data Base of Spread Footings on Sand”, *FHWA-RD-97-068*, FHWA, p.217.
5. Clark, J. I. (1998), “The Settlement and Bearing Capacity of very Large Foundations on Strong Soils: 1996 R. M. Hardy Keynote Address”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.35, pp131-145.
6. D'Appolonia, D. J., D'Appolonia, E., and Brissette, R. F. (1968), “Settlement of Spread Footings on Sand”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.94, pp.735-760.
7. De Beer, E. E. (1965), “The Scale Effect on the phenomenon of progressive rupture in cohesionless soils”, *Proc. of 6th Intl. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, Canada, pp.13-17.
8. Meyerhof, G. (1965), “Shallow Foundations”, *Jnl. of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.91, pp.21-31.
9. Parry, R. H. G. (1978), “Estimating Foundation Settlements in sand from Plate Bearing Tests”, *Geotechnique*, Vol.28, No.1, pp.107-118.
10. Tatsuoka, F., Sakamoto, M., Kawamura, T. and Fukushima, S. (1936), “Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressures”, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.1, pp.65-84.
11. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1948), “Soil Mechanics in Engineering Practices”, John Wiley & Sons, Inc., New York.
12. Terzaghi, K. (1943), “Theoretical Soil Mechanics”. John Wiley & Sons, Inc., New York.
13. Vesic, A. S. (1973) “Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations”, *Jnl. of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.99, pp.45-73.

(접수일자 2012. 5. 16, 심사완료일 2012. 7. 23)