

Scale Effect를 고려한 기초의 지지력 및 침하량 산정을 위한 모형실험

Model Tests on the Bearing Capacity and Settlement of Footing Considering Scale Effect

정 형 식*¹ Chung, Hyung-Sik

김 도 열*² Kim, Do-Yeol

김 정 호*³ Kim, Jung-Ho

Abstract

The scale effect should be considered to determine the bearing capacity and settlement of footings from Plate-Load Test, because of the size difference between a footing and a loading plate. To analyze characteristics of bearing capacity and settlement according to the difference of loading plate sizes, model tests were performed with four different sizes of square plate, which are B=10, 15, 20 and 25cm, on five different kinds of subsoil. Based on the analyzed results, this paper also proposes a method of bearing capacity and settlement determination, where scale effect is considered depending on the mixing ratio of sand and clay. Until now, uneconomic constructions have been conducted because of unreasonable evaluation in estimating bearing capacity and settlement of footings from Plate-Load Test in fields. In the application of the formula proposed in this research to field problems, it is expected that evaluation of bearing capacity and settlement of footings can be more reliable and more economic construction can be achieved.

요 지

재하판과 실제기초의 크기가 상이하므로 평판재하시험으로부터 실제 기초지반의 지지력 및 침하량을 산정할 때, Scale Effect가 고려되어야 한다. 본 논문에서는 5종류의 모형기초지반을 형성하고, 크기가 각각 10cm, 15cm, 20cm, 25cm인 4가지 크기의 정사각형 평판으로 재하시험을 실시하여 재하판의 크기에 따른 지지력 및 침하 특성을 분석하였다. 또한 분석된 결과를 토대로 하여, 평판재하시험으로부터 실제기초의 지지력 및 침하량을 산정할 때, 모래와 점토의 혼합비율에 따라 Scale Effect를 합리적으로 고려할 수 있도록 식을 제안하였으며, 식에서 지지력 산정계수(a, b)와 침하량 산정계수(c, d)는 모래와 점토의 혼합비율에 따라 구할 수 있도록 그림으로 제시하였다. 지금까지는 현장 기초지반에 대한 지지력 및 침하량을 합리적으로 평가할 수 없어 비경제적인 시공이 되어왔으나, 본 연구에서 제안한 지지력 및 침하량 산정방법에서는 모래와 점토의 혼합비율을 고려하여 기초지반의 지지력 및 침하량을 보다 합리적으로 추정할 수 있으므로 기초지반의 안정성 여부에 대한 확신과, 또한 경제적인 시공이 가능할 것으로 판단된다.

Keywords : Model test, Plate-load test, Scale effect, Settlement, Ultimate bearing capacity

*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

*2 정회원, 경북대학 토목설계과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungbok College, tykim@kyungbok.ac.kr)

*3 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 박사수료 (Member, Ph.D Candidate, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

1. 서론

일반적으로 재하폭이 클수록 파괴활동면이 커져서 전단저항이 커지게 되므로 지지력은 증가하게 되고, 또한 침하량도 지중으로 미치는 압력의 범위가 커지기 때문에 실제기초의 침하량은 재하시험에서 측정된 침하량 보다 크게 발생하게 된다. 따라서 현장에서 가장 일반적으로 적용되고 있는 평판재하시험은 재하판의 크기와 실제기초의 크기가 상이하므로 실제기초의 지지력 및 침하량은 Scale Effect를 고려하여 산정되어야 하며, 최근 구조물기초설계기준(2002)에서도 Scale Effect를 고려할 것을 명시하고 있으나 이에 대한 구체적인 적용방법은 수록되어 있지 않다.

재하시험으로부터 실제기초의 지지력 및 침하량을 산정할 때, Scale Effect와 관련하여 일반적으로 알려져 있는 기존의 식을 고찰해 보면, 지지력의 경우 모래지반에서는 기초폭에 비례하여 증가되며, 점토지반에서는 기초폭에 무관한 것으로 표현되어 있다. 또한 침하량의 경우에는 모래지반에서는 Terzaghi & Peck(1967)이 제안한 시험식과 같이 기초폭에 따라 침하량이 증가하는 형태이며, 점토지반에서는 기초폭에 비례하여 침하량이 증가하는 것으로 표현되어 있다.

그러나 지지력과 기초폭의 관계에 대해 Clark(1998)과 Zhu 등(2001)은 조밀한 모래지반에서의 지지력을 원심모형실험 및 해석적방법으로 구하였는데 기초폭의 승수 형태로 증가한다고 제안하였다. 또한 침하량과 기초폭의 관계에 있어서도 Bond(1961)는 모래에 대한 재하시험 결과로부터 침하량은 기초폭의 승수형태로 증가한다고 제안하였고, Schultze & Sheriff(1973), Meyerhof(1974), Zolkov(1974) 등은 침하량은 기초폭의 \sqrt{B} 형태로 증가한다고 제안하였다. 국내에서의 최근의 연구결과에서도 재하판의 크기에 따른 지지력 및 침하특성을 분석한 결과에 의하면 기존의 Scale Effect 적용식과는 많은 차이가 있음을 보여주고 있다(정형식 등, 2002).

또한 Scale Effect와 관련하여 일반적으로 알려져 있는 기존의 식은 순수모래와 순수점토에 관한 식이며, 실제 현장에서와 같이 모래와 점토 등이 혼합되어 있는 흙에 대해서는 적용이 곤란하며, 이에 대한 적절한 관계식이 없어 평판재하시험으로부터 실제기초의 지지력 및 침하량 산정시 항상 불리한 경우에 대하여 지지력 및 침하량을 산정하므로 기초의 지지층은 심도가 깊어지게 되고, 또한 기초지반의 안정성에 대해 확신을 갖지

못하고 있다.

따라서 본 논문에서는 모형실험을 실시하여 재하판의 크기 및 모래와 점토의 혼합비율에 따른 지지력 및 침하 특성을 분석하고자 하였으며, 또한 분석된 결과를 토대로 하여, 평판재하시험으로부터 실제기초의 지지력 및 침하량을 산정할 때, 모래와 점토의 혼합비율에 따라 Scale Effect를 합리적으로 고려할 수 있는 방법을 제안하고자 하였다.

2. Scale Effect 적용식

2.1 지지력에 관한 Scale Effect

식 (1)의 Terzaghi 지지력공식에서 점착력이 0인 사질토 지반의 지표면에 설치된 기초의 지지력은 기초의 폭에 비례하는 형태가 되며, 반면 $\phi=0$ 인 포화된 점성토에서는 기초폭에는 무관한 형태가 된다. 따라서 실제기초의 지지력을 산정할 때, Scale Effect와 관련하여 일반적으로 알려져 있는 기존의 식 (2), (3)과 같이 된다.

$$q_{ult} = \alpha c N_c + q N_q + \beta \gamma B N_\gamma \quad (1)$$

여기서, α, β : 기초의 형상계수
 N_c, N_q, N_γ : 지지력계수
 q : 토피하중 ($\gamma \times D_f$)
 B : 기초폭

$$q_{u(\text{기초})} = q_{u(\text{평판})} \times \frac{B(\text{기초})}{B(\text{평판})} \quad (\text{모래}) \quad (2)$$

$$q_{u(\text{기초})} = q_{u(\text{평판})} \quad (\text{점토}) \quad (3)$$

2.2 침하량에 관한 Scale Effect

무한깊이의 탄성물체 위에 있는 기초의 즉시침하량은 식 (4)와 같이 기초폭에 비례하는 형태이다(Harr, 1966).

$$S_i = q B \frac{1-\mu^2}{E_s} I_s \quad (4)$$

여기서, q : 기초에 작용하는 응력증가(kgf/cm²)
 μ : Poisson 비
 B : 기초의 최소폭
 E_s : 변형계수
 I_s : 영향계수

그러나 사질토 지반의 경우 식 (4)에서 변형계수(E_s)는 구속압력에 따라 변하고 기초아래 흙의 구속압력은 기초폭에 따라 다르며, 또한 자연상태의 기초지반은 깊이에 따라 변형계수가 증가하므로 침하량은 기초폭에 비례하지 않는다. 이에 대해 Terzaghi & Peck(1967)은 조립토(Coarse-grained soils)에서 실시한 재하시험 결과로부터 식 (5)와 같이 침하량과 기초폭의 관계에 대한 실험식을 제안하였다. 반면 점성토 지반의 경우 $\mu=0.5$ 이고 변형계수(E_s)도 깊이에 관계없이 비교적 일정하므로 침하량은 기초폭에 비례하게 되며, 따라서 기초폭에 따른 실제기초의 침하량은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$S_{(기초)} = S_{(평판)} \left(\frac{2B_{(기초)}}{B_{(기초)} + B_{(평판)}} \right)^2 \quad (\text{모래}) \quad (5)$$

$$S_{(기초)} = S_{(평판)} \frac{B_{(기초)}}{B_{(평판)}} \quad (\text{점토}) \quad (6)$$

2.3 모래와 점토의 혼합비율을 고려한 Scale Effect 제안식

본 연구에서는 기존의 Scale Effect 적용식을 일반화하여 현장기초지반의 조건, 즉 모래와 점토의 혼합비율에 따라 Scale Effect를 합리적으로 적용할 수 있도록 식 (7), (8)과 같이 제안하였다.

$$q_{u(기초)} = q_{u(평판)} \left[\frac{aB_{(기초)} + bB_{(평판)}}{B_{(평판)}} \right] \quad (7)$$

$$S_{(기초)} = S_{(평판)} \left[\frac{cB_{(기초)} + (c+d)B_{(기초)}}{cB_{(기초)} + (c+d)B_{(평판)}} \right]^{2c+d} \quad (8)$$

지지력에 관한 기존의 Scale Effect 적용식인 식 (2), (3)으로부터 모래와 점토의 혼합비율을 고려할 수 있는 일반식의 형태로 표현하면 식 (7)과 같이 표현된다. 식 (7)에서 $a=1, b=0$ 일 때 식 (2)와 동일한 형태가 되며, $a=0, b=1$ 일 때 식 (3)과 동일한 형태가 된다.

마찬가지로 침하량에 관한 기존의 Scale Effect 적용식인 식 (5), (6)으로부터 모래와 점토의 혼합비율을 고려할 수 있는 일반식의 형태로 표현하면 식 (8)과 같이 표현된다. 식 (8)에서 $c=1, d=0$ 일 때 식 (5)와 동일한 형태가 되며, $c=0, d=1$ 일 때 식 (6)과 동일한 형태가 된다.

식 (7)에서 a, b 는 지지력과 관련된 계수이므로 지지력 산정계수라고 명명하였고, 식 (8)의 c, d 는 침하량과 관련된 계수이므로 침하량 산정계수라고 명명하였다.

지지력 산정계수(a, b)와 침하량 산정계수(c, d)는 다양한 종류의 흙에 대해 재하판의 크기를 변화시키면서 재하시험을 실시하여, 재하판의 크기에 따른 지지력 및 침하량의 변화특성을 분석하여 구할 수 있으며, 본 연구에서는 모형실험을 실시하였다.

3. 모형실험

3.1 실험장치

여러 종류의 흙에 대하여 재하판의 크기에 따른 지지력 및 침하특성을 분석하기 위해 모형실험을 실시하였다. 실험장치는 그림 1과 같이 모형토조, 하중지지대, 모형기초, 하중계, 변위계 등으로 구성되어 있으며, 모형토조는 지반의 전단파괴 범위를 고려하여 가로 2,000mm, 세로 2,000mm, 높이 1,000mm(내공규격 1,700×1,700×850)의 철근콘크리트로 제작하였고, 반력장치는 H-beam과 철판을 사용하여 하중지지대를 제작하였다. 또한 모형기초는 그림 2와 같이 각각의 크기가 10cm, 15cm, 20cm, 25cm인 정사각형 평판을 제작하여 실험에 사용하였다.

3.2 모형기초지반

모형기초지반은 모래와 점토를 사용하여 중량비율을

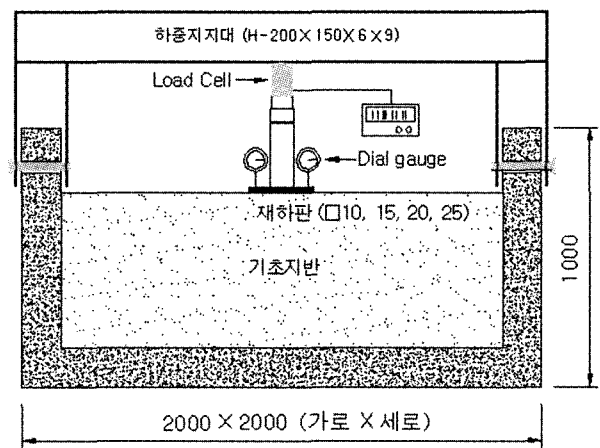


그림 1. 모형실험장치 개요도

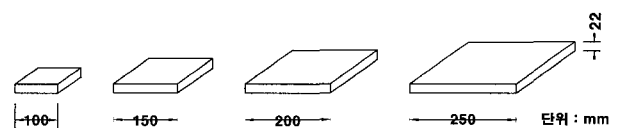


그림 2. 모형기초(재하판)

조절함으로써 순수모래(100 : 0), 모래:점토 혼합토(75 : 25), (50 : 50), (25 : 75), 순수점토(0 : 100)로 5종류의 흙을 조제하였으며, 최적함수비 상태에서 다짐층수를 3층, 4층, 5층으로 3가지의 다짐상태로 소형콤팩터를 사용하여 최종높이가 60cm가 되도록 형성하였다.

다짐층수를 3층, 4층, 5층으로 3가지의 다짐상태에 대해 실험하였는데, 이는 본 연구에서는 동일한 지반상태에서 단지 재하판의 크기에 따른 지지력 및 침하량의 변화특성, 즉 Scale Effect에 대한 분석이 목적이므로 동

표 1. 재료의 물리적 특성

구분	Gs	No.200 통과율 (%)	액성한계 (%)	소성 지수	USCS
모래	2.65	0.17	NP	—	SP
점토	2.61	92.5	43	25	CL

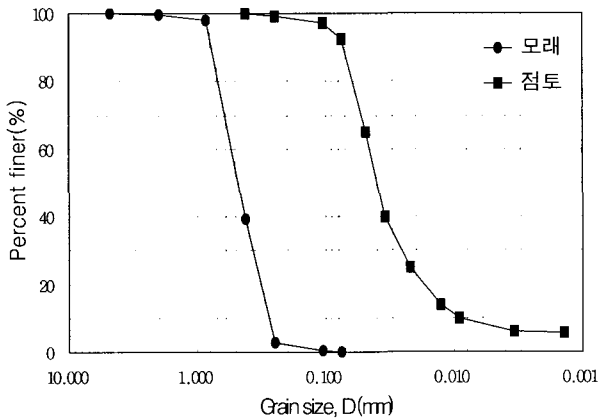


그림 3. 입도분포곡선

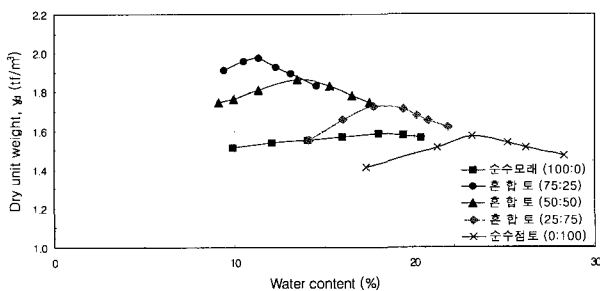


그림 4. 다짐곡선

표 2. 최대건조단위중량($\gamma_{d,max}$) 및 최적함수비(w_{opt})

흙종류	$\gamma_{d,max}$ (tf/m ³)	w_{opt} (%)	$0.9 \times \gamma_{d,max}$ (tf/m ³)
순수모래(100:0)	1.586	18.0	1.427
혼합토(75:25)	1.980	11.5	1.782
혼합토(50:50)	1.870	14.0	1.683
혼합토(25:75)	1.725	18.0	1.553
순수점토(0:100)	1.575	23.5	1.418

일한 지반상태에서의 지지력 및 침하량을 획득하여야 하지만 소형콤팩터를 사용할 경우 다짐정도에 있어 약간의 차이가 있을 수 있고, 또한 시료토의 반복 사용으로 인해 함수비가 변화하여 지반의 다짐상태가 달라질 수 있으므로 이를 배제할 목적으로 3가지 다짐상태로 모형실험을 실시하였다.

모형기초지반 형성에 사용된 모래는 세척된 해사이며, 점토는 도자기 제조를 위해 정제된 젖은 상태의 고령토를 자연상태에서 건조시켜 덩어리 상태로 만든 다음, 분쇄기를 이용하여 분말상태로 준비하여 사용하였다. 모래와 점토에 대한 입도분석결과는 그림 3과 같고, 재료의 물리적 특성은 표 1과 같다. 모형지반 형성에 사용된 5종류의 흙에 대한 다짐시험결과는 그림 4와 같고, 흙의 최대건조단위중량 ($\gamma_{d,max}$) 및 최적함수비(w_{opt})는 표 2와 같다.

3.3 실험방법

모형실험은 토조내에 5종류의 흙으로 모형기초지반을 형성하고, 이에 대해 그림 2와 같이 크기가 각각 다른 4종(□10, □15, □20, □25cm)의 정사각형 재하판을 사용하여 재하시험을 실시하였다. 먼저 크기가 작은 재하판을 사용하여 재하시험을 실시한 후, 모든 흙을 토조밖으로 파내어 기초지반을 다시 형성하여 더 큰 재하판에 대해 재하시험을 실시하였다.

하중재하는 20ton 용량의 유압잭으로 재하속도를 일정하게 유지하는 방법으로 재하하였고, 유압잭 위에 Load cell을 설치하여 하중재하에 정확성을 기하였다. 재하시험 종료후에는 현장밀도시험을 실시하여 모형기초지반의 다짐상태를 측정하였다.

4. 결과분석 및 고찰

4.1 극한지지력(q_u) 및 침하량(S)

재하시험으로부터 항복 및 극한하중을 산정하는 방법에는 최대극률법, $\log P - \log S$ 법, $S - \log t$ 법, $P - dS/d(\log t)$ 법, 그리고 재하판 직경의 10%에 해당하는 침하량을 극한하중으로 보는 방법이 있다. 본 연구에서는 모래지반에서는 다짐상태가 실내다짐의 90% 이상으로 양호하게 다짐되어 재하시험시 하중을 더 이상 증가시킬 수 없는 극한상태가 확인되어 극한하중을 구할 수 있었다. 반면

표 3. 흙의 종류별 및 재하폭에 따른 재하시험결과

모형지반 종류	재하판의 크기	다짐층수	건조단위중량 (tf/m ³)	극한지지력 (tf/m ²)	허용지지력 (tf/m ²)	허용지지력에서의 침하량 (mm)	
순수모래 (100:0)	□10	3	1.469	64.9	21.63	1.23	
		4	1.514	72.1	24.03	1.14	
		5	1.526	75.0	25.00	1.00	
	□15	3	1.465	75.6	25.20	1.77	
		4	1.510	83.0	27.67	1.60	
		5	1.534	88.9	29.63	1.35	
	□20	3	1.470	87.5	29.17	2.30	
		4	1.506	97.5	32.50	2.00	
		5	1.536	104.0	34.67	1.90	
	□25	3	1.455	93.3	31.10	2.85	
		4	1.500	102.9	34.30	2.50	
		5	1.531	115.0	38.33	2.20	
	혼합토 (75:25)	□10	3	1.730	32.3	10.77	1.30
			4	1.815	46.5	15.50	1.10
			5	1.871	57.6	19.20	1.00
□15		3	1.738	37.9	12.63	1.95	
		4	1.802	52.0	17.33	1.63	
		5	1.860	65.9	21.97	1.20	
□20		3	1.730	41.6	13.87	2.70	
		4	1.799	58.5	19.50	2.20	
		5	1.861	77.9	25.97	1.70	
□25		3	1.722	42.0	14.00	3.30	
		4	1.795	61.4	20.47	2.70	
		5	1.870	87.0	29.00	2.00	
혼합토 (50:50)		□10	3	1.627	20.3	6.77	1.10
			4	1.669	22.7	7.57	0.95
			5	1.710	25.1	8.37	0.80
	□15	3	1.621	22.9	7.63	1.80	
		4	1.663	25.0	8.33	1.53	
		5	1.720	30.2	10.07	1.10	
	□20	3	1.630	24.9	8.30	2.40	
		4	1.685	29.2	9.73	1.90	
		5	1.735	34.1	11.37	1.30	
	□25	3	1.642	28.0	9.33	2.80	
		4	1.690	31.9	10.63	2.40	
		5	1.731	36.9	12.30	1.80	
	혼합토 (25:75)	□10	3	1.481	18.4	6.13	1.10
			4	1.532	21.0	7.00	0.95
			5	1.560	22.1	7.37	0.85
□15		3	1.485	20.2	6.73	1.80	
		4	1.529	22.5	7.50	1.50	
		5	1.580	25.9	8.63	1.20	
□20		3	1.478	21.4	7.13	2.60	
		4	1.539	24.8	8.27	1.95	
		5	1.599	28.0	9.33	1.50	
□25		3	1.481	22.7	7.57	3.20	
		4	1.519	24.9	8.30	2.65	
		5	1.601	30.0	10.00	2.00	
순수점토 (0:100)		□10	3	1.337	16.9	5.63	1.10
			4	1.355	17.5	5.83	1.10
			5	1.380	17.9	5.97	0.95
	□15	3	1.335	17.7	5.90	1.75	
		4	1.354	18.3	6.10	1.65	
		5	1.400	19.5	6.50	1.35	
	□20	3	1.329	18.5	6.17	2.30	
		4	1.374	20.0	6.67	2.05	
		5	1.401	20.4	6.80	1.80	
	□25	3	1.339	19.9	6.63	2.90	
		4	1.361	20.5	6.83	2.70	
		5	1.391	21.1	7.03	2.40	

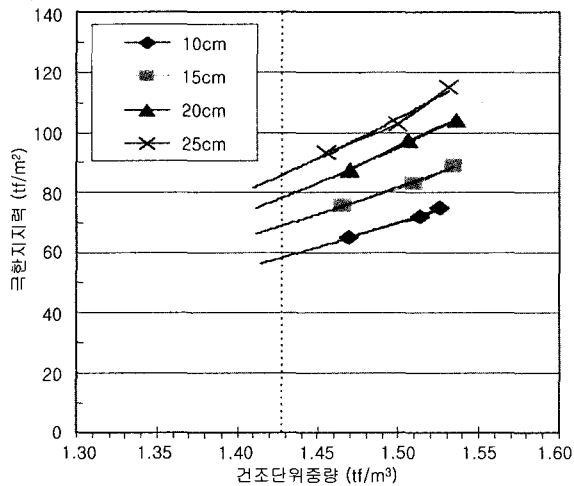
점토가 혼합된 지반에서는 P-S의 관계곡선에서 뚜렷이 꺾이는 부분이 없이 완만하게 계속적으로 침하가 발생되어 항복하중을 구하기가 곤란하여 재하판 크기의 10% 침하량을 극한하중으로 산정하였다. 5종류의 모형기초 지반에 대해 재하판의 크기를 변화시키면서 측정된 재하시험결과는 표 3에 나타내었다. 표 3에서 침하량(S)은 극한지지력의 1/3인 허용지지력에서의 침하량을 하중(P)-침하(S)곡선으로부터 읽어서 수록한 것이다.

4.2 건조단위중량 (γ_d)과 극한지지력(q_u) 및 침하량(S)의 관계

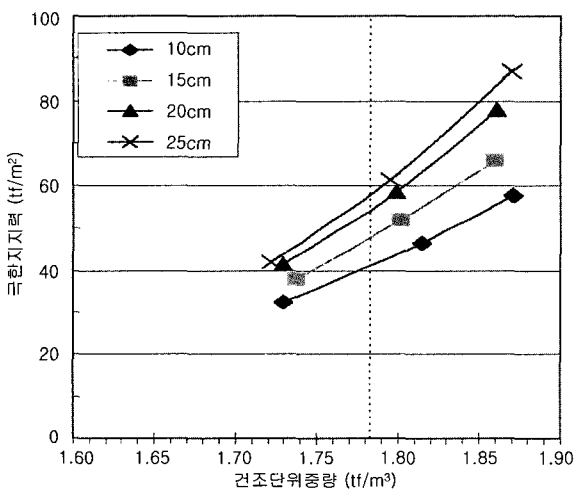
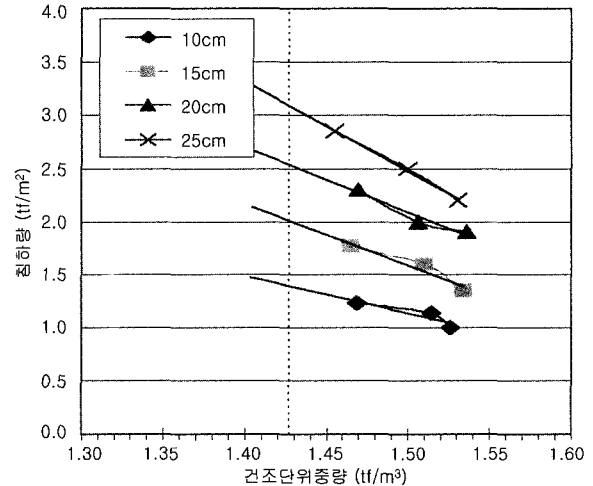
여러 가지 흙에 대해 재하판의 크기에 따른 지지력 및 침하량의 변화특성, 즉 Scale Effect에 대한 분석이

목적이므로 동일한 지반상태에서 구한 지지력 및 침하량을 획득하여 분석에 적용하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 표 3의 재하시험결과를 그림 5와 같이 건조단위중량 (γ_d)-지지력(q_u), 건조단위중량 (γ_d)-침하량(S)의 관계로 나타낸 후, $0.9 \times \gamma_{d, max}$ 에 해당하는 지지력 및 침하량을 산정하여 분석에 적용하였으며, 그림 5에서 수직점선은 $0.9 \times \gamma_{d, max}$ 에 해당하는 건조단위중량을 의미한다.

건조단위중량 (γ_d)-침하량(S)의 관계곡선에서 침하량(S)은 극한지지력의 1/3인 허용지지력에서의 침하량을 하중(P)-침하(S)곡선으로부터 읽어서 수록한 것으로 이는 식 (4)가 탄성이론에 근거하고 있고, 또한 실무에서 기초설계시 허용지지력 이내로 설계하므로 주로 요구되는 침하량은 허용지지력 이내에서의 침하량이기 때



(a) 순수모래 (100 : 0)



(b) 혼합토 (75 : 25)

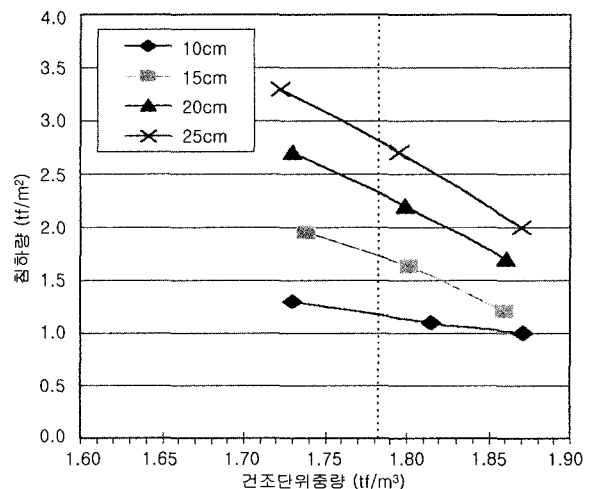
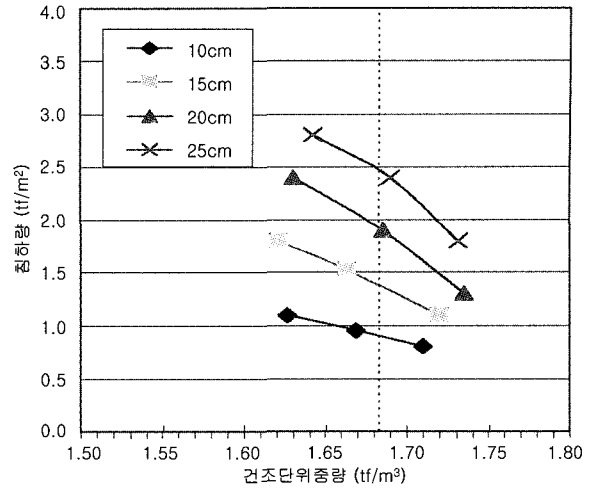
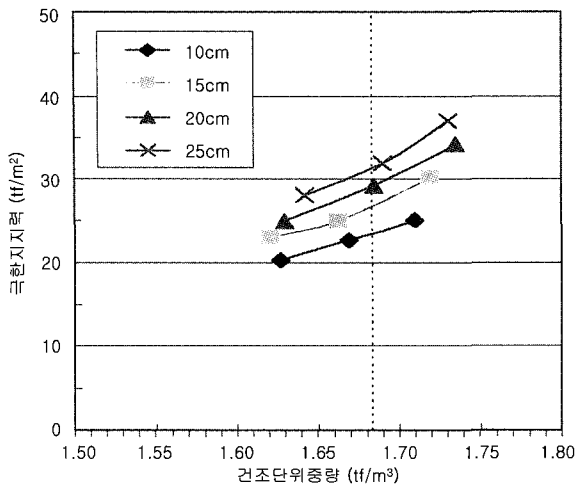
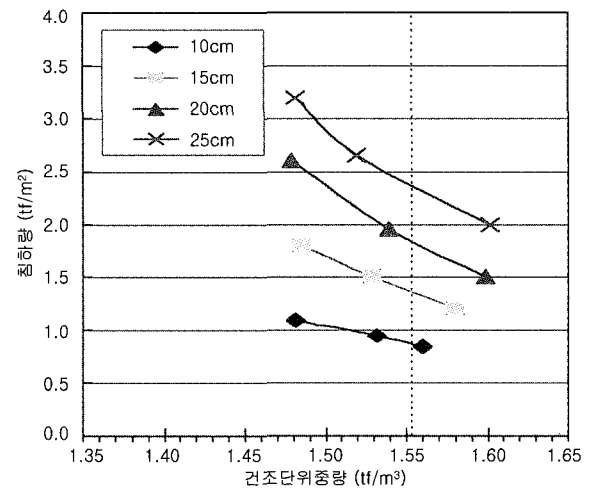
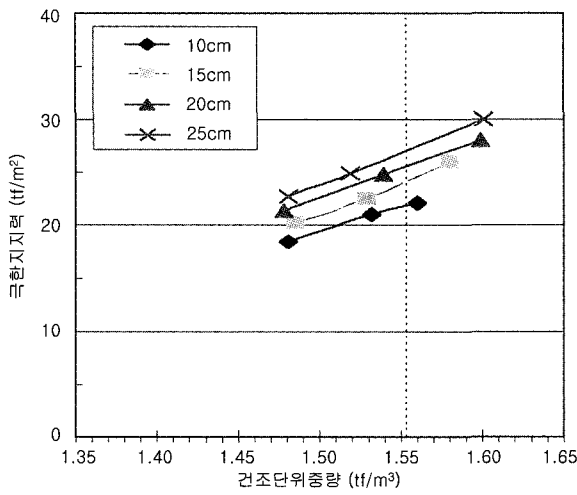


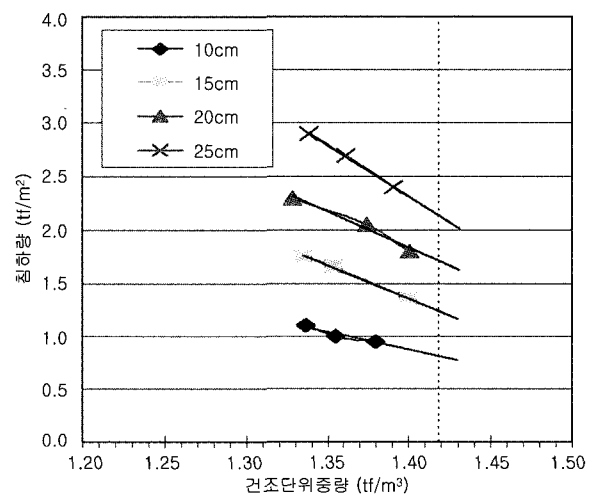
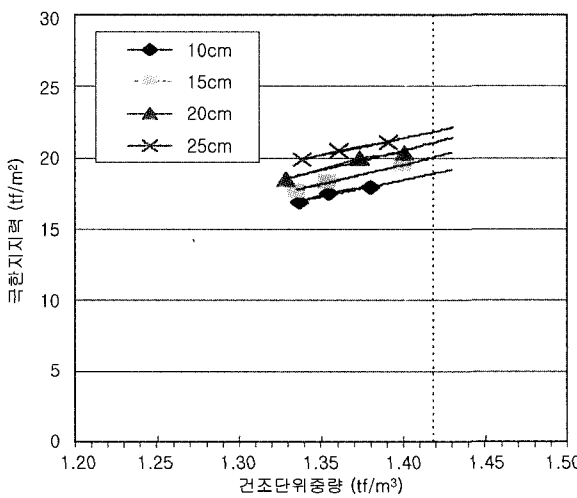
그림 5. 건조단위중량 (γ_d)-극한지지력(q_u) 및 건조단위중량 (γ_d)-침하량(S)의 관계



(c) 혼합토 (50 : 50)



(d) 혼합토 (25 : 75)



(e) 순수점토 (0 : 100)

그림 5. (계속) 건조단위중량 (γ_d)-극한지지력(q_u) 및 건조단위중량 (γ_d)-침하량(S)의 관계

문이다.

그림 5의 결과를 보면 동일한 다짐을 실시하였으나 순수모래에서는 $0.9 \times \gamma_{d, \max}$ 이상으로 다짐되었으며, 순수점토에서는 $0.9 \times \gamma_{d, \max}$ 이하로 다짐상태가 양호하지 못하였다. 분석결과를 보면 건조단위중량이 증가함에 따라 모든 흙에서 극한지지력은 증가하였고, 반면 침하량은 감소하는 것으로 나타났다.

4.3 재하폭에 따른 지지력(q_u) 및 침하량의 변화

4.3.1 지지력(q_u)의 변화

동일한 지반상태에서 재하판의 크기에 따른 지지력의 변화특성을 분석하기 위해 그림 5에서 $0.9 \times \gamma_{d, \max}$ 에 대응되는 극한지지력을 산정하여 표 4에 정리하였으며, 재하판의 크기에 따른 지지력의 변화양상은 그림 6과 같다. 또한 10cm 재하판에서 구한 지지력으로 15cm,

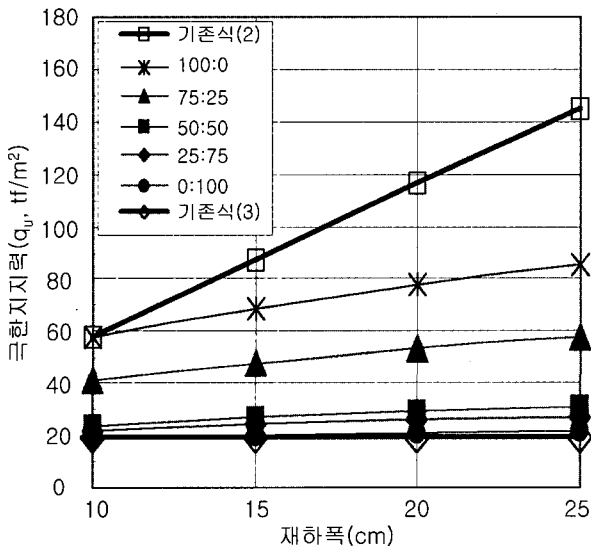


그림 6. 재하판의 크기에 따른 극한지지력의 변화

20cm, 25cm의 재하판의 극한지지력을 나누어, 재하판의 크기에 따른 극한지지력의 증가비율을 표 4에 나타내었다. 표 4에서 순수모래지반(100:0)에 대한 결과를 보면, 재하판의 크기가 2.5배 커질 때, 1.48배 정도로 극한지지력이 증가하여 기존의 Scale Effect 적용식인 식 (2)와 같이 비례적으로 증가하지는 않았다. 순수점토지반(0:100)에서도 극한지지력은 재하판의 크기가 2.5배 커질 때, 1.15배 정도로 약 15% 극한지지력이 증가하여, 식 (3)과는 달리 재하판의 크기가 커짐에 따라 극한지지력이 조금 증가하는 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 모형기초지반을 형성할 때, 포화점토지반의 형성이 곤란하여 기존의 Scale Effect 적용식과는 조건이 다른 최적함수비 상태에서 다짐되었으므로 기초지반이 불포화 상태이고, 따라서 흙에 내부마찰각이 존재하기 때문인 것으로 판단된다.

4.3.2 침하량(S)의 변화

마찬가지로 재하판의 크기에 따른 침하량의 변화특성을 분석하기 위해 그림 5에서 $0.9 \times \gamma_{d, \max}$ 에 대응되는 침하량을 산정하여 표 5에 정리하였다. 재하판의 크기가 커짐에 따라 극한지지력이 증가하고, 허용지지력 또한 증가하게 되므로 동일한 압력하에서 단지 재하판의 크기에 따른 침하량의 변화양상을 분석하기 위해서는 동일한 압력하에서의 침하량, 즉 단위압력당 침하량이 요구된다. 따라서 재하판에서 발생한 침하량을 그때의 허용지지력으로 나누어 단위압력당 침하량(S/q_u)을 계산하여 표 5에서 괄호 안에 정리하였으며, 재하판의 크기에 따른 단위압력당 침하량의 변화양상은 그림 7과 같다.

또한 10cm 재하판에서 구한 단위압력당 침하량으로 15cm, 20cm, 25cm의 재하판에서 구한 침하량을 나누

표 4. $0.9 \times \gamma_{d, \max}$ 에서의 극한지지력(q_u) 및 극한지지력 증가비율

(단위:tf/m²)

재하판크기 \ 흙종류	순수모래 (100:0)	혼합토 (75:25)	혼합토 (50:50)	혼합토 (25:75)	순수점토 (0:100)
10cm	58.0	41.0	23.5	21.8	18.9
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
15cm	68.9	47.8	26.6	24.1	20.1
	1.19	1.17	1.13	1.11	1.06
20cm	78.1	53.9	29.0	25.6	21.0
	1.35	1.31	1.23	1.17	1.11
25cm	85.8	57.7	31.3	27.1	21.8
	1.48	1.41	1.33	1.24	1.15

표 5. $0.9 \times \gamma_{d, \max}$ 에서의 침하량(S), 단위압력당 침하량(S/q_a) 및 침하량 증가비율 (단위:mm)

(단위:mm)

재하판 크기 \ 흙종류	순수모래 (100:0)	혼합토 (75:25)	혼합토 (50:50)	혼합토 (25:75)	순수점토 (0:100)
10cm	1.39 (0.072)	1.18 (0.086)	0.90 (0.115)	0.87 (0.120)	0.80 (0.127)
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
15cm	2.02 (0.088)	1.74 (0.109)	1.38 (0.156)	1.36 (0.169)	1.24 (0.185)
	1.22	1.27	1.35	1.42	1.46
20cm	2.54 (0.098)	2.32 (0.129)	1.92 (0.199)	1.83 (0.215)	1.70 (0.243)
	1.36	1.50	1.73	1.79	1.91
25cm	3.10 (0.108)	2.81 (0.146)	2.47 (0.237)	2.36 (0.261)	2.14 (0.294)
	1.51	1.69	2.06	2.18	2.32

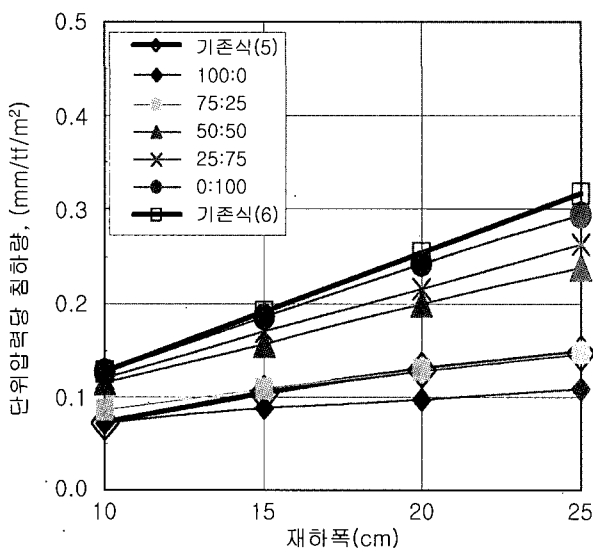


그림 7. 재하판의 크기에 따른 침하량의 변화

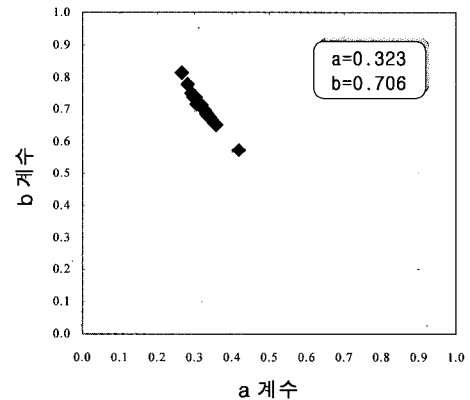
어, 재하판의 크기에 따른 침하량의 증가비율을 표 5에 나타내었다.

표 5에서 순수모래지반(100:0)에 대한 결과를 보면, 재하판의 크기가 커지면 침하량은 증가하였으나 Terzaghi & Peck(1967)의 실험식인 식 (5)에 의한 값만큼 증가하지는 않았으며, 재하판의 크기가 2.5배 커질 때, 1.51배 정도로 침하량이 증가하였다. 순수점토지반(0:100)에서도 식 (6)과 같이 비례적으로 증가하지는 않고, 재하판의 크기가 2.5배 커질 때 2.32배 정도로 침하량이 증가하였는데, 이는 본 연구에서의 실험조건이 최적함수비 상태에서 다짐되었기 때문인 것으로 판단된다.

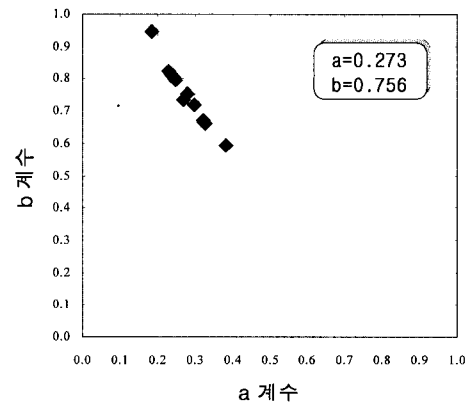
5. 모래와 점토의 혼합비율에 따른 Scale Effect

5.1 지지력 산정계수 (a, b)

표 4에 수록되어 있는 극한지지력(q_u) 값을 식 (7)에 대입하여 분석함으로써 지지력 산정계수(a, b)를 구하였다. 먼저 순수모래(100:0) 지반에서 4가지 크기의 재하판에서 측정된 극한지지력을 식 (7)에 대입하면 ①~⑥까

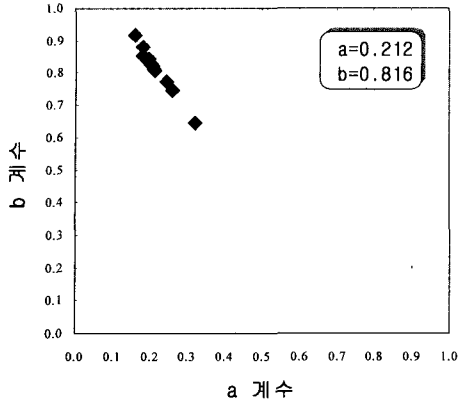


(a) 순수모래(100:0)

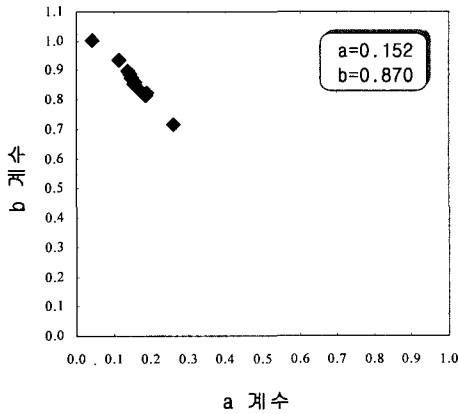


(b) 혼합토(75:25)

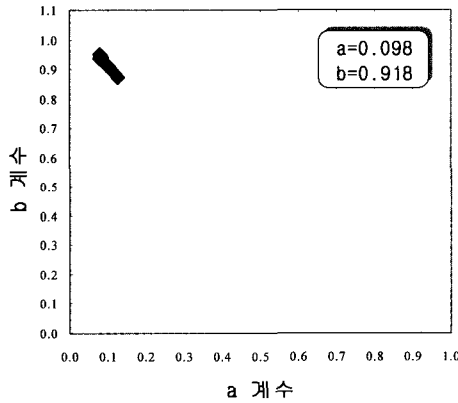
그림 8. 흙의 종류별 a, b 계수



(c) 혼합토(50:50)



(d) 혼합토(25:75)



(e) 순수점토(0:100)

그림 8. (계속) 흙의 종류별 a, b 계수

지 6개의 식이 만들어지며, 이들 식을 조합하여 ①-②, ①-③, ..., ⑤-⑥에 대해 연립방정식을 풀어서 a, b 계수를 구하였다. 마찬가지로 혼합토(75:25, 50:50, 25:75) 및 순수점토(0:100)에 대해서도 같은 방법으로 a, b 계수를 구하여 그림 8에 분포를 나타내었다. 그림 9는 모래와 점토의 혼합비율에 따른 a, b 계수의 변화를 나타낸 것이다.

$$10-15\text{cm} : 68.9 = 58.0 \left[\frac{a \times 15 + b \times 10}{10} \right] \text{---} \textcircled{1}$$

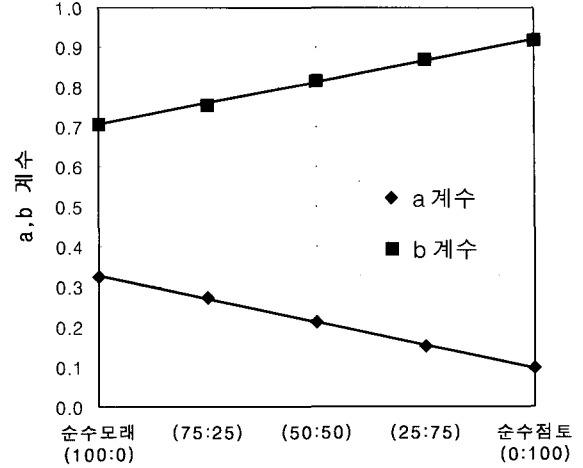


그림 9. 모래와 점토의 혼합비율에 따른 a, b 계수의 변화

$$10-20\text{cm} : 78.1 = 58.0 \left[\frac{a \times 20 + b \times 10}{10} \right] \text{---} \textcircled{2}$$

$$10-25\text{cm} : 85.8 = 58.0 \left[\frac{a \times 25 + b \times 10}{10} \right] \text{---} \textcircled{3}$$

$$15-20\text{cm} : 78.1 = 68.9 \left[\frac{a \times 20 + b \times 15}{15} \right] \text{---} \textcircled{4}$$

$$15-25\text{cm} : 85.8 = 68.9 \left[\frac{a \times 25 + b \times 15}{15} \right] \text{---} \textcircled{5}$$

$$20-25\text{cm} : 85.8 = 78.1 \left[\frac{a \times 25 + b \times 20}{20} \right] \text{---} \textcircled{6}$$

5.2 침하량 산정계수 (c, d)

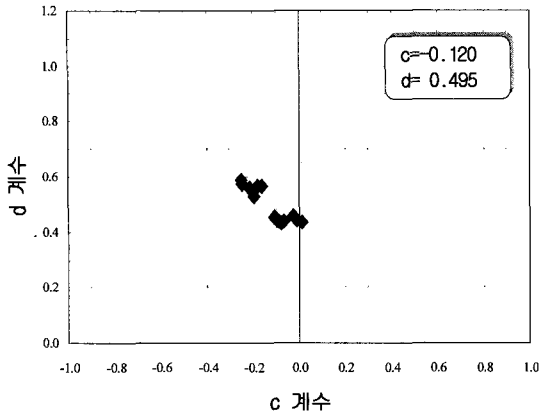
표 5에 수록되어 있는 허용지지력(q_a)에서의 단위압력당 침하량(S/q_a) 값을 식 (8)에 대입하여 분석함으로써 침하량 산정계수(c, d)를 구하였다. 먼저 순수모래(100:0) 지반에서 4가지 크기의 재하판에서 측정된 허용지지력에서의 단위압력당 침하량을 식 (8)에 대입하면 ①~⑥까지 6개의 식이 만들어지며, 이들 식을 조합하여 ①-②, ①-③, ..., ⑤-⑥에 대해 연립방정식을 풀어서 c, d 계수를 구하였다. 마찬가지로 혼합토(75:25, 50:50, 25:75) 및 순수점토(0:100)에 대해서도 같은 방법으로 c, d 계수를 구하여 그림 10에 분포를 나타내었다. 그림 11은 모래와 점토의 혼합비율에 따른 c, d 계수의 변화를 나타낸 것이다.

$$10-15\text{cm} : 0.088 = 0.072 \left[\frac{c \times 15 + (c+d) \times 15}{c \times 15 + (c+d) \times 10} \right]^{2c+d} \text{---} \textcircled{1}$$

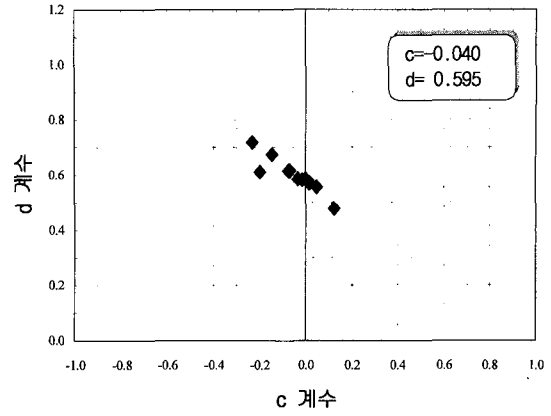
$$10-20\text{cm} : 0.098 = 0.072 \left[\frac{c \times 20 + (c+d) \times 20}{c \times 20 + (c+d) \times 10} \right]^{2c+d} \text{---} \textcircled{2}$$

$$10-25\text{cm} : 0.108 = 0.072 \left[\frac{c \times 25 + (c+d) \times 25}{c \times 25 + (c+d) \times 10} \right]^{2c+d} \text{---} \textcircled{3}$$

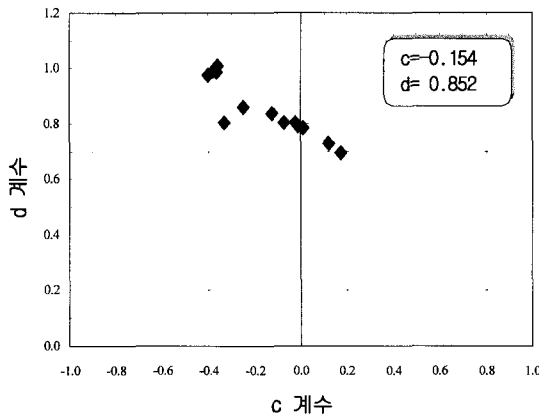
$$15-20\text{cm} : 0.098 = 0.088 \left[\frac{c \times 20 + (c+d) \times 20}{c \times 20 + (c+d) \times 15} \right]^{2c+d} \text{---} \textcircled{4}$$



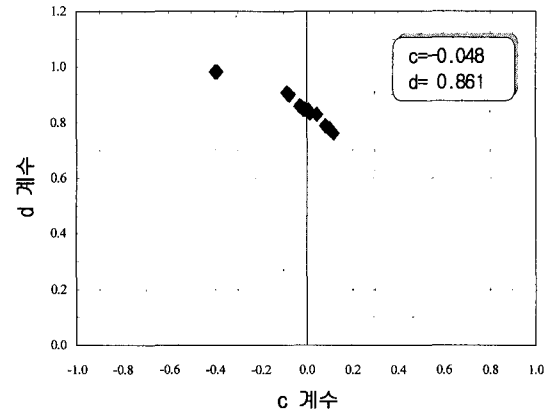
(a) 순수모래(100:0)



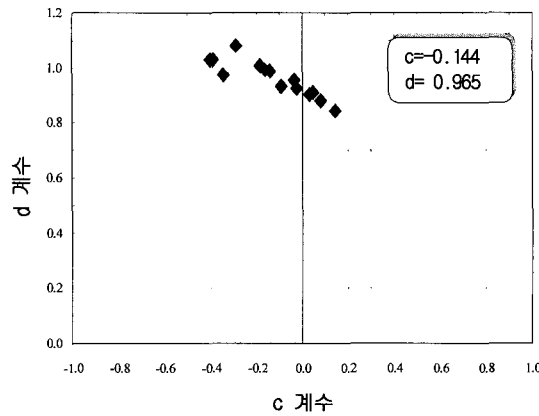
(b) 혼합토(75:25)



(c) 혼합토(50:50)



(d) 혼합토(25:75)



(e) 순수점토(0:100)

그림 10. 흙의 종류별 c, d 계수

$$15-25\text{cm} : 0.108 = 0.088 \left[\frac{c \times 25 + (c+d) \times 25}{c \times 25 + (c+d) \times 15} \right]^{2c+d} \text{---} \textcircled{5}$$

$$20-25\text{cm} : 0.108 = 0.098 \left[\frac{c \times 25 + (c+d) \times 25}{c \times 25 + (c+d) \times 20} \right]^{2c+d} \text{---} \textcircled{6}$$

5.3 고찰

평판재하시험으로부터 실제기초의 지지력 및 침하량

산정시, 현장기초지반의 조건, 즉 모래와 점토의 혼합비율을 고려하여 산정할 수 있는 일반식은 식 (7) 및 식 (8)과 같다. 여기서 지지력 산정계수(a, b)와 침하량 산정계수는(c, d)는 모래와 점토의 혼합비율에 따라 구할 수 있도록 그림 9와 그림 11에 제안하였다.

그러나 현장의 흙은 본 연구에서 실험에 사용된 흙과는 달리, 모래와 점토뿐만 아니라 자갈 및 실트가 포함

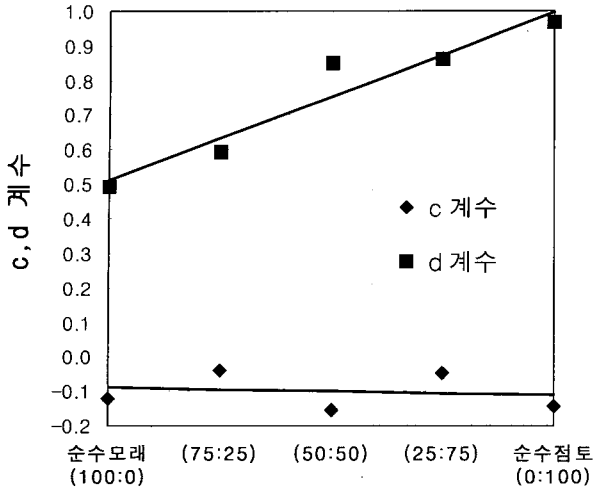


그림 11. 모래와 점토의 혼합비율에 따른 c, d 계수의 변화

되어 있으므로 이에 대해서는 향후에 계속적으로 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

평판재하시험으로부터 실제기초의 지지력 및 침하량 산정시, 현재의 연구결과를 적용하는 방법으로는 현장 기초지반에 대해 No. 200체 통과율을 기준으로 점토의 혼합비율을 결정하고, 그 외에는 모래의 혼합비율로 간주하여 지지력 산정계수(a, b) 및 침하량 산정계수(c, d)를 그림 9와 그림 11로부터 구하여 Scale Effect를 고려한 실제기초의 지지력 및 침하량을 개략적으로 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 재하판의 크기 및 모래와 점토의 혼합비율에 따른 지지력 및 침하량의 변화특성을 분석하고자 폭이 10, 15, 20, 25cm인 정사각형 재하판을 사용하여 모형실험을 실시하였다. 모형기초지반은 세척된 해사와 고풍토를 사용하여 5종류의 흙을 조제하여 사용하였고, 순수점토지반은 실험여건상 포화된 점토지반의 조성이 곤란하여 최적함수비 상태로 다짐하여 재하시험을 실시하였다. 모형실험을 수행하여 분석된 결론은 다음과 같다.

- (1) 5종류의 흙에 대한 재하시험결과 중에서 기존의 Scale Effect 적용식과 비교가 가능한 순수모래지반(100:0)에 대한 분석결과를 보면, 기존의 Scale Effect 적용식을 실무에 적용할 경우 지지력과 침하량을 과다하게 산정하는 것으로 분석되었다. 순수점토지반(0:100)에 대한 실험결과와는 최적다짐상태에서 수행된 결과이므로 기존의 Scale Effect 적용식과는 조건

이 상이하므로 비교의 대상이 되지 않으나, 최적다짐상태에서는 재하판의 크기가 커짐에 따라 지지력은 조금 증가하였으며, 침하량도 기존의 Scale Effect 적용식과는 달리 비례적으로 증가하지는 않았다.

- (2) 평판재하시험으로부터 실제기초의 지지력 및 침하량을 산정할 때, 현장 기초지반의 조건, 즉 모래와 점토의 혼합비율에 따라 Scale Effect를 고려할 수 있도록 식을 제안하였으며, 모래와 점토의 혼합비율에 따라 지지력 산정계수(a, b)와 침하량 산정계수(c, d)를 구할 수 있도록 그림으로 제시하였다.
- (3) 현장의 흙은 본 연구에서 실험에 사용된 흙과는 달리, 모래와 점토뿐만 아니라 자갈 및 실트가 포함되어 있으므로, 향후 이에대한 연구가 계속적으로 수행되어야 하며, 현재의 적용방법으로는 현장기초지반에 대해 No. 200체 통과율을 기준으로 점토의 혼합비율을 결정하고, 그 외에는 모래의 혼합비율로 간주하여 지지력 산정계수(a, b) 및 침하량 산정계수(c, d)를 구하여 Scale Effect를 고려한 실제기초의 지지력 및 침하량을 개략적으로 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 건설교통부(2002), "구조물 기초설계기준", pp.43-46.
2. 정형식, 김도열(2002), "재하판의 크기에 따른 지지력 및 침하특성", 韓國地盤工學會論文集, 한국지반공학회, 제18권, 제4호, pp.179-188.
3. 정형식, 김도열(2002), "평판재하시험으로부터 실제기초의 지지력 및 침하량 산정시 Scale Effect", 2002 가을학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.350-357.
4. Bond, D.W.(1961), "Influence of Foundation Size on Settlement. Geotechnique", Vol.11, No.2, pp.121-143.
5. Clark, J.I.(1998), "The settlement and bearing capacity of very large foundations on strong soils : 1996 R. M. Hardy lecture", Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, pp.131-144.
6. Harr, M.E.(1966), "Fundamentals of Theoretical Soil Mechanics", McGraw-Hill, New York.
7. Meyerhof, G.G.(1974), "General Report:Outside Europe, Proceedings Conference on Penetration Testing", Stockholm, Sweden, Vol.2, pp.40-48.
8. Schultze, F. and Sherif, G.(1973), "Prediction of settlements from evaluated settlement observations for sand", Proc., VIII, ICSMFE, Moscow, U.S.S.R., Vol.1.3, pp.225-230.
9. Terzaghi, K. and Peck, R.B.(1967), "Soil Mechanics in Engineering Practice", 2nd Ed., John Wiley and Sons. inc., New York, 729p.
10. Zhu, F., Clark, J.I. and Phillips, R.(2001), "Scale Effect of Strip and Circular Footings Resting on Dense Sand", Journal of the Geotechnical Engrg., ASCE, Vol.127, No.7, pp.613-621.
11. Zolkov, E.(1974), "The nature of sand deposit and the settlements of shallow foundations", Proc., I, Europe Sym. Penetr. Test, Stockholm, Sweden, Vol.2.2, pp.421-431.

(접수일자 2003. 9. 1, 심사완료일 2003. 10. 14)