

연약점성토위 사질토에 위치한 기초 거동

Behavior of Footings on Sand Layers Overlying Soft Clay

유 남 재¹⁾, Nam-Jae Yoo, 박 병 수²⁾, Byung-Soo Park, 강 인 구³⁾, In-Goo, Kang

1) 강원대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Kangwon N.U

2) 강원대학교 공과대학 토목공학과 박사수료, Graduate student, Dept. of Civil Eng., Kangwon N.U

3) 동일종합건설(주), Dongil Construction Co.

SYNOPSIS : A series of model footing tests on sand layers overlying soft clay under 1g and increased gravitational environments was carried out to investigate the characteristics of load-settlement curves, bearing capacity, and failure mechanism with ground deformation. Tests at 1g were performed with changing thickness and relative density of the overlying sand, the width of strip footing and the preconsolidation pressure applied to the soft clay layer. Centrifuge tests were also carried out with changing g-level and the selfweight consolidation time of the soft clay.

From test results, it was found that the bearing capacity increases with increasing relative density of the sand layer, the sand thickness-footing width ratio, undrained shear strength of soft clay related to its preconsolidation pressure, the g-level applied and selfweight consolidation time of soft clay. A punching shear failure mechanism, where a truncated cone shaped sand block between the footing base and the clay surface penetrates into clay, was observed.

Bearing capacities from test results were compared with estimation using the punching shear model. Predicted results using the punching shear failure model with an assumption of general shear failure mode are in good agreement with test results.

Keywords : sand overlying clay, ultimate bearing capacity, centrifuge model test

1. 서론

본 연구에서는 연약 점토지반위에 있는 사질토층에 위치한 기초의 거동에 대하여 조사하기 위하여 기초 폭, 상부 사질토층의 두께 및 상대밀도, 하부 점성토층의 비배수 전단강도 등을 변화시키면서 1g의 실내 모형실험을 수행하고 모형의 중력 수준과 하부 점성토의 자중압밀효과에 따른 모형기초 거동을 알아보기 위하여 원심 모형실험을 수행하였다. 연약점토위의 사질토 지반의 기초 설계 및 해석에서 일반적으로 사용되고 있는 전단관입모델을 중심으로 모형실험결과와 비교 분석하고 모델의 적용성과 한계성에 대하여 검토를 실시하였다.

연약점토 지반위의 사질토층에 위치한 기초의 지지력 산정과 관련하여 제안된 한계평형해석법에 기초한 것으로 하중확산모델과 관입전단모델 그리고 동력학적 해석방법으로 구분할수 있으며 유한요소 또는 유한차분법을 이용한 수치적모델이 있다(Burd 와 Frydman,1996).

연약점토위의 사질토층의 지지력 평가를 위하여 사용되고 있는 전단 관입 모델은 Meyerhof(1974)가 평판앵커의 상향력추정과 관련한 파괴메카니즘을 응용하여 Fig.1 에 보인바와 같은 파괴메카니즘을 근거하여 해석방법을 제시하였다. 실제의 파괴메카니즘은 상부층의 하부로 갈수록 활동선이 점진적으로 확장될 것으로 추정하였으나 계산 편의상 연직축면의 활동선을 가정하였다.

본 방법에서는 지표면상의 띠기초의 극한지지력을 기초 연단에서 수직면을 따라 수동파괴상태가 형성되

는 것으로 가정하여 수직면에 작용하는 수동토압, P_p 을 고려하여 다음과 같이 기초의 극한지지력을 구하였다.

$$P_u = BN_c c_u + 2P_p \sin \delta \quad (1)$$

한편, Meyerhof(1974)는 P_p 의 값은 다음식에 의하여 구할 것을 제안하였다.

$$P_p = \frac{\frac{1}{2} \gamma H^2 K_p}{\cos \delta} \quad (2)$$

여기서, K_p 는 수동토압계수이고, δ 는 전단면의 마찰각이다.

그러나, 전단관입모델은 실제의 파괴메카니즘을 고려하여 한계평형이론에 의하여 비교적 잘 정립된 해석 방법으로 알려져있으나 전단 관입시 기초전단직하의 응력집중및 상하부 두층 경계면의 전단변형에 따른 응력상태 및 전단강도 변화 (Dembiki 와 Odrobinski, 1973), 극한 또는 최대하중에 도달하는 침하량의 차이로 인하여 사질토층의 점진적 파괴와 점성토 지반의 국부 전단 파괴 발생 가능성 (Vesic, 1975; Jacobsen, 등., 1977; Hanna 와 Meyerhof, 1980; Kenny 와 Andrawes, 1997), 과도한 기초 관입시 관입초기의 상부 사질토층의 관입형상 유지 여부 (Craig 와 Chua, 1990) 등과 관련하여 그의 적용성이 의문시되고 있다. 따라서 본연구에서는 모형실험을 통하여 모형의 적용성과 한계성에 대해 평가하고자 한다.

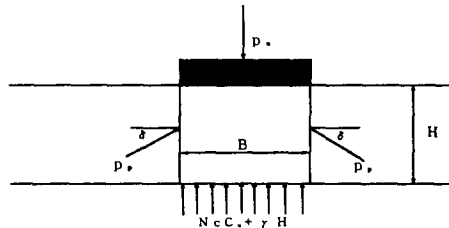


Fig.1. Punching shear model

2. 실험 방법과 내용

2.1 실험 방법

상부 사질토층과 하부 점토층으로 된 성층 지반에 위치한 대상기초의 거동을 조사하기 위하여 그의 거동에 영향을 주는 변수를 다양하게 변화시키면서 1g 모형 실험과 원심모형실험을 수행하였다.

모형지반의 상부에 성형한 사질토는 입도분포가 균등한 중립질 모래(SP)의 주문진 표준사이고 하부 점성토지반은 부산 인근에서 채취하여 재성형한 해성점토로서 물성은 Table 1에 정리한 바와 같다.

Table 1. Basic soil properties

Sand	Grain Size Distribution		D_{max} (g/cm ³)	D_{min} (g/cm ³)	Specific Gravity	Relative Density (%)	Triaxial Compression Test		Direct Shear Test	
							ϕ (degree)	c (kg/cm ²)	ϕ (degree)	c (kg/cm ²)
	$C_u=1.19$	$D_{10}=0.21\text{mm}$	1.682	1.384	2.6	45	35.56	0.0	38.59	0.0
	$C_g=1.01$					80	43.09	0.0	45.80	0.0

Clay	USCS	Grain Size Distribution	G_s	LL	PL	Cc	k (cm/sec) ($e=1.5$)
		CL					

한편, 점성토 시료의 모형기초재하 실험조건에 따른 비배수 전단강도를 구하기 위하여 기초재하 시험과 동일한 방법으로 토조에 시료를 성형한후 원형의 시료를 채취하여 삼축압축시험기를 사용하여 비압밀

비배수 전단 강도시험을 수행하였으며 휴대용 베인(hand vane) 시험기를 사용하여 토조내의 시료에 대하여 베인 시험을 수행하였다. Fig.2 는 실험결과를 시료 성형시 연직유효응력, $\sigma_{v,}'$ 에 대한 비배수 전단강도의 변화로 표시한 것으로 회귀분석에 의하여 $c_u=0.22\sigma_{v,}'$ 의 관계식을 얻을 수 있었다.

Fig.3 에 보인바와 같이 모형실험에 사용된 토조 (폭 20 cm , 길이 45 cm, 높이 30 cm)는 고강도의 알루미늄으로 제작되었으며 토조의 전면판은 투명한 plexiglas 를 사용하여 모형재하 시험시 모형기초의 거동, 상부 모래층에 일정한 간격의 높이로 수평하게 포설한 염색사의 활동선, 하부 점토층에 연직방향으로 일정한 간격으로 삽입한 kaolinite에 의한 변위 형상을 각각 확인할 수 있도록 하였고 전면판 내부에 격자망을 그려 부착하여 기준좌표로 하므로써 그의 판독을 용이하도록 하였다.

모형지반의 상부 사질토는 시료 강사장치를 사용하여 상대밀도 45%와 80%의 균질한 모형지반을 각각 조성하였고 하부 점성토층은 slurry 상태의 시료를 강제압밀 시킴으로써 점성토지반을 성형하였다.

실험내역은 Table 2 에 보인 바와 같이 다양한 실험조건을 변화시키면서 1g 응력상태와 원심모형 실험을 수행하였다. 1g 모형실험에서는 상부 사질토의 상대밀도 변화 (내부 마찰각 및 단위 중량 변화), 기초폭에 대한 사질토 두께비, 기초폭, 하부 점성토 지반의 전단강도 등이 기초의 거동에 영향을 주는 주요 인자로 보고 그들을 변수로 하여 실험을 수행하였다.

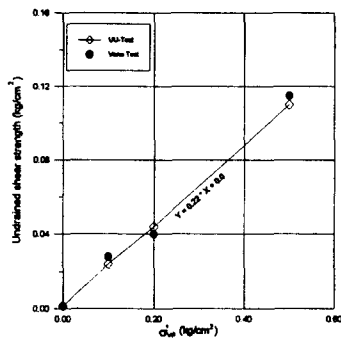


Fig.2. Relationship between undrained shear strength and preconsolidation pressure

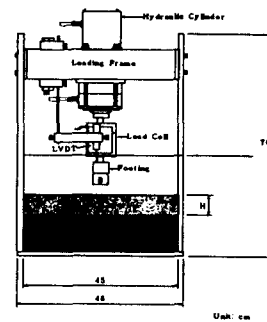


Fig.3. Schematic of model setup

Table 2. Testing matrix

1g model test					centrifuge model test									
sand thickness - footing width ratio	footing width B(cm)	Dr (%)	preconsolidatio n applied to clay	H/B	applied g-level	Dr (%)	footing width B(cm)	H/B	preconsolidatio n applied to clay	G-level				
				0.0										
				0.5										
				1.0										
relative density of sand	footing width B(cm)	H/B	0.2(kg/cm ²)	Dr (%)	80	4	0.5	0.2(kg/cm ²)		1				
				45						20				
				80						30				
										40				
footing width	Dr (%)	H/B	0.2(kg/cm ²)	footing width B(cm)	consolidation time of clay	Dr (%)	footing width B(cm)	H/B	0.2(kg/cm ²)	time (hour)				
				2						80	4	0.5	0.2(kg/cm ²)	
				3										
				4										
preconsolidation applied to clay	Dr (%)	footing width B(cm)	NC	H/B	80	4	0.5	G-level 30G		1				
			0.1							2				
			0.2							3				
			0.5							4				

한편, 원심모형실험은 중력수준과 압밀시간을 변화시키면서 실험을 실시하였다. 중력수준 변화 시험에서는 동일한 모형지반과 기초 조건에서 소정의 중력수준까지 가속시킨 후 기초재하시험을 수행하므로써 주어진 하부 점성토의 전단 강도 상태에서 사질토의 증가된 자중효과가 기초거동에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

또한, 30g의 일정한 중력수준에서 시료의 자중압밀시간을 변화 시킨후 기초 재하 시험을 수행하므로써 압밀시간 경과 및 점성토 지반의 압밀도 증가로 인한 비배수 전단강도의 변화가 예상되는 바, 그에 관련한 기초의 거동에 대하여 조사하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 균질한 사질토층

하부의 점성토 지반 없이 균질한 사질토로만 조성된 모형지반에 대한 1g 상태하의 기초재하 실험결과 얻은 정규화된 하중강도-정규화된 침하비 관계를 Fig.4 와 같이 나타내었다. 여기서, q 는 하중강도, s 는 기초 침하량을 나타내고 있다. 그림에서 보인 바와 같이 축척효과 (scale effect)에 의한 기초폭 증가로 약간의 정규화된 하중강도의 감소와 10%의 침하비에서 최대하중강도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 조밀한 모래지반의 하중 실험결과와 같이 최대하중 이후의 급격한 잔류 하중강도로 감소하고 있음을 알 수 있다.

3.2 균질한 점토층

기초폭 $B=4\text{cm}$ 의 1g 상태의 균질한 점토층에 대한 기초재하 실험결과를 무차원화한 하중강도-침하비로 Fig.5 에 도시하였다. 곡선은 최대강도를 보이지 않고 지속적으로 증가하는 국부전단 파괴의 형태로 무차원화한 하중강도값이 80%의 침하비에서 4.66으로 이론적인 비배수 상태의 지지력 계수 N_c 값 ($= \pi + 2.0 = 5.14$)에 근접하고 있음을 알 수 있다.

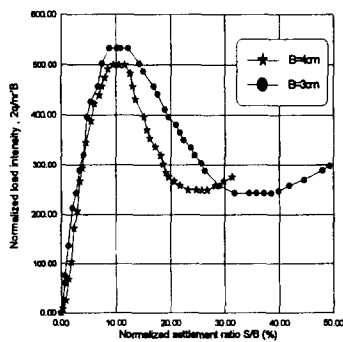


Fig.4. Normalized load intensity-settlement curves for uniform sand

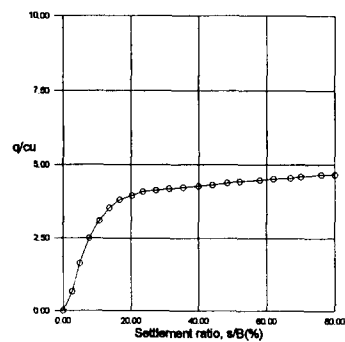


Fig.5. Normalized load intensity-settlement curve for uniform clay

3.3 연약점토층 위의 사질토층

3.3.1 사질토층두께/기초폭의 영향

기초폭에 대한 사질토의 두께비 (H/B)을 변화시킨 실험결과(사질토의 상대밀도= 80%, 하부점성토의 선형하중= 0.2kg/cm^2) 얻은 정규화된 하중강도-침하곡선이 Fig.6 에 나타나 있다. 곡선의 초기 기울기와

정규화된 하중강도는 기초폭에 대한 사질토의 두께가 증가할수록 증가하고 있다. $H/B = 0.5$ 와 1.0 인 경우는 $H/B = 0$ 인 점성토의 재하실험 결과와 유사한 하중-침하 곡선을 보인 반면에, $H/B = 2.0$ 인 경우는 Fig.4의 사질토에 대한 실험 결과 ($H/B = \infty$)와 비슷한 경향을 나타내고 있다.

Fig.7은 모형지반의 H/B 가 변화하는 경우에 지반 변형 및 파괴메카니즘을 나타내고 있다. $H/B = 2.0$ 인 경우, 상부의 사질토층에서는 균질한 사질토층에 대한 기초재하 실험결과와 유사한 형상의 지반변형과 활동선 형성이 관찰되었으며 하부의 점성토 지반에서는 기초직하부의 부분적인 침하와 인접부의 용기가 관찰되었다. 상부 사질토층의 확연한 활동선의 형성에 비하여 하부의 점성토 지반에서는 전반전단 파괴의 모습을 관찰하기 힘들었다.

Fig.7. (b)와 (c)에 보인바와 같이 $H/B=1.0$ 과 $H/B=0.5$ 의 경우에는 상부 사질토층에서는 기초 주변에서 약간의 용기가 관찰되었으며 기초아래에서 시작된 사다리꼴형의 활동체가 형성되어 그것이 점토지반의 상부 경계면에서 재하되는 형태로 점성토를 압축하는 모습의 변형 및 파괴메카니즘을 관찰하였다. 상부 사질토층에서는 사다리꼴의 전단관입 활동면의 형성이 확연하게 관찰되었고 하부 점성토층에 연직방향으로 설치한 kaolinite의 수평변위 형상으로 보아 전단파괴가 발생하였을 가능성이 있으나 점성토 상부의 경계면에서 확연한 용기의 모습을 관찰할 수 없었다. 또한, Fig.7 (d)의 점성토 지반에 대한 변위 관찰결과로 kaolinite의 상당한 수평변위와 그에 대응하는 불연속면의 연장에 의한 활동선의 관찰결과로 보아 전반전단 파괴의 가능성을 예상할 수 있으나 이와같은 결과는 모형기초의 과도한 관입에 의한 수평변위 발생가능성이 있을 뿐아니라 뚜렷한 모형지반 상부면의 용기를 관찰할수 없는 것으로 보아 국부 전단 파괴의 가능성을 예상할 수 있다. 이와같은 관측결과는 Fig.5의 균질한 점성토의 하중-침하 곡선과 관련지을 수 있다. Fig.8은 Hanna와 Meyerhof(1980)가 제안한 관입전단모델에 의한 이론식에 의한 추정치와 실험결과 얻은 극한 지지력값의 H/B 에 따른 변화를 비교한 것이다. $H/B=2.0$ 의 경우를 제외하고는 실험결과는 비교적 이론적인 값에 접근하고 있음을 알 수 있다.

한편, 균질한 사질토지반의 극한 지지력값 (0.993 kg/cm^2) 고려한 한계두께비(H/B), 즉 점성토의 지층이 영향을 미치지 않는 사질토의 두께비를 Hanna와 Meyerhof(1980)의 이론식을 사용하여 구하였다. Meyerhof(1974)는 대상기초에 대한 한계두께비, 4.0을 제안하였으나 그림에 도시된 바와 같이 3.0으로 산정되었다. 따라서, 얇은 기초의 전단 파괴시 활동선에 의한 연직깊이 (약 $0.7B$ 로 추정, 또는 안전측으로 $2.0B$)를 고려한 한계 두께비의 결정은 불안정한 설계이고 안전측의 설계로 기초폭의 4배 범위가 타당할것으로 판단된다.

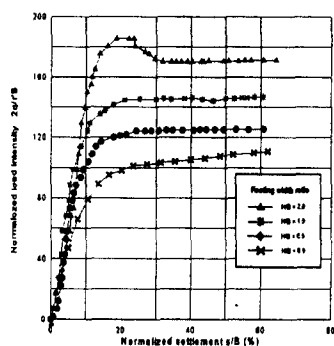


Fig.6. Normalized load intensity -settlement curves for footings on sand overlying clay

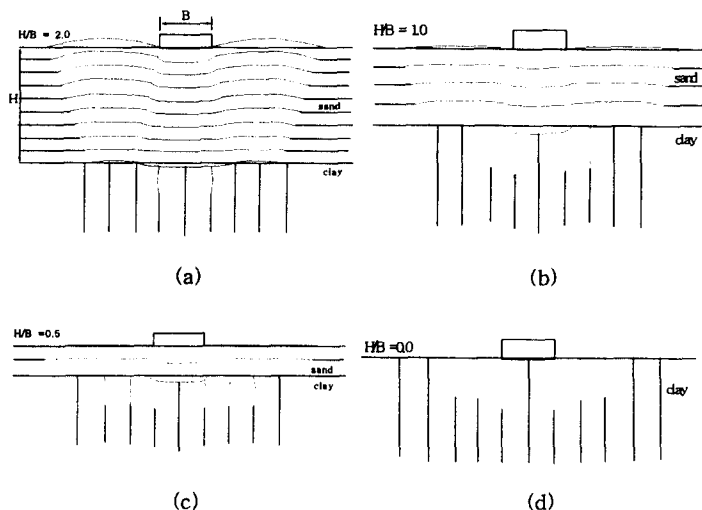


Fig.7. Ground deformation and failure mechanism

3.3.2 상부 사질토의 상대밀도

Fig.9는 상부 사질토층의 상대밀도의 변화에 따른 정규화된 하중강도-침하 곡선을 나타내고 있다. 정규화된 하중강도는 상대밀도에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 상부 사질토의 상대밀도 증가에

따른 단위중량 증가에 의한 정규화된 하중강도의 감소효과보다 내부 마찰각의 증가에 의한 정규화된 하중강도 값의 증가를 의미한다.

Hanna 와 Meyerhof(1980)의 전단 관입 모델에 의한 지지력 예측치와 실험값과 비교하여 Fig.10 에 도 시하였다. 상부 사질토층의 내부마찰각이 커질수록 지지력값이 다소 증가함과 함께 전반전단파괴를 고 려한 전단 관입모델이 실험값과 근접함을 알 수 있다.

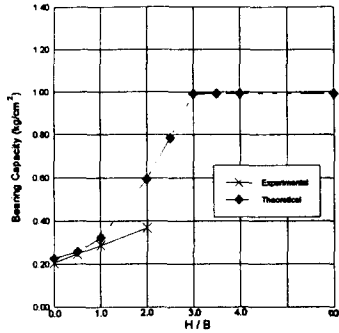


Fig.8. Comparison of experimental and predicted bearing capacity using punching shear model

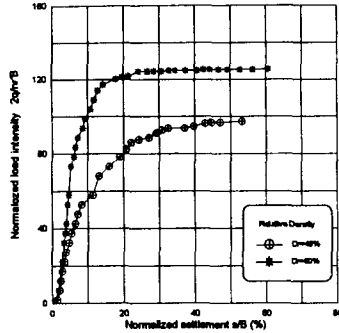


Fig.9. Normalized load intensity - settlement curves

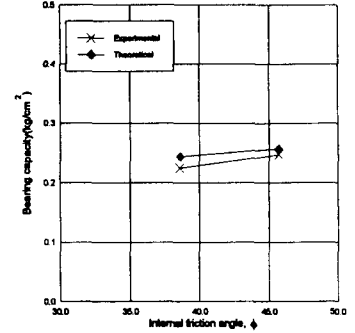


Fig.10. Comparison of experimental and predicted bearing capacity using punching shear model

3.3.3 기초폭

Fig.11 의 정규화된 하중강도-침하 곡선은 동일한 지반조건과 사질토 두께비 ($H/B = 0.5$)에서 기초폭을 변화시킨 실험 결과로 기초폭이 증가할수록 하중강도는 감소함을 알 수 있다.

Fig.12 에 보인바와 같이 동일한 두께비에서 기초폭의 변화는 극한지지력에는 영향이 없음을 알 수 있다.

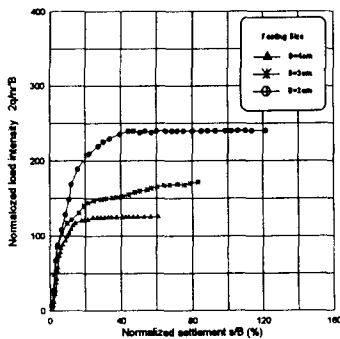


Fig.11. Normalized load intensity - settlement curves

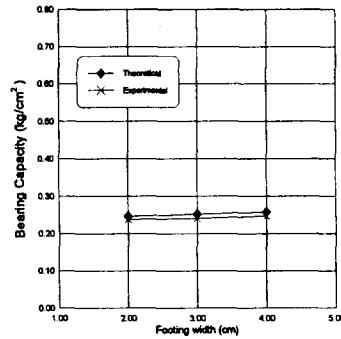


Fig.12. Comparison of experimental and predicted bearing capacity using punching shear model

3.3.4 점토의 비배수 전단 강도

Fig.13 은 하부 점토지반성형시 가한 선행압밀하중크기를 변화시킨 실험결과를 정규화된 하중강도-침하 곡선으로 나타낸 것이다. 동일한 실험조건에서 점토에 가한 선행압밀하중값이 증가할수록 하중강도가 증가함을 알 수 있다. 이는 선행압밀하중이 증가할수록 비배수전단강도가 증가함에 따른 하부점성토 지반의 저항력증가에 기인한 것으로 판단된다.

Fig.14 는 실험결과 얻은 지지력값을 이론식과 비교한 것으로 전반전단파괴를 고려한 관입전단 모델이

실험값에 근접함을 보여준다.

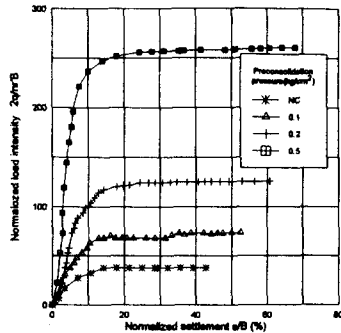


Fig.13. Normalized load intensity-settlement curves

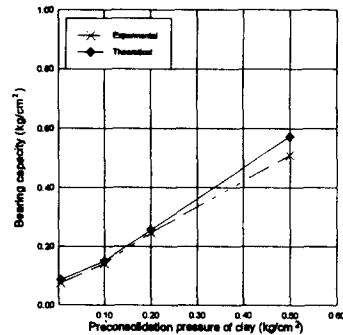


Fig.14. Comparison of experimental and predicted bearing capacities

3.3.5 중력 수준

동일한 지반과 기초제원에 대하여 모형에 가하여진 중력수준을 1, 20, 30, 40, 50 g 로 변화시킨 상태에서 수행한 실험 결과 얻은 정규화된 하중강도-침하 곡선과 g-level사이의 관계가 Fig.15 에 나타나 있다. 중력 수준이 증가함에 따라 정규화된 하중강도-침하 곡선에서 극한하중 및 초기 접선 탄성계수의 감소함을 알 수 있다. 이와같은 결과로 1g 모형 실험과 원심모형 실험 결과 그의 하중 침하 거동이 확연히 달라 질 수 있음을 알 수 있다. 이와 같은 차이는 중력수준 증가에 대응하는 기초폭, 사질토의 두께비 등의 축척에 대한 상사성 만족 여부, 중력수준증가에 따른 하부점성토지반의 응력이력변화 및 상부사질토의 내부 마찰각 감소에 따른 것으로 판단된다.

Fig.16 은 파괴모드를 고려한 Hanna 와 Meyerhof(1980)의 방법을 이용하여 구한 기초의 예상 지지력을 실험값과 비교한 것이다. 그림에 도시한 바와같이 이론적으로는 중력수준의 선형적 증가시 사질토지반의 단위중량와 함께 사질토내의 전단관입 활동체의 전단면에 작용하는 수평토압의 증가로 인하여 기초 지지력의 선형적 증가가 예상된다. 그러나, 실험값의 중력수준에 따른 비선형적인 증가 결과는 구속응력 증가에 의한 사질토의 내부마찰각의 점진적인 감소 및 벽마찰력의 유발 가능성에 기인한 것으로 판단된다.

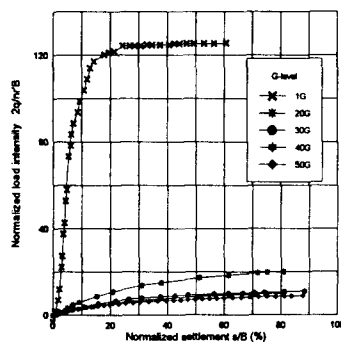


Fig.15. Normalized load intensity-settlement curves

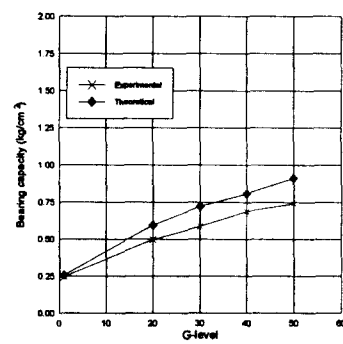


Fig.16. Comparison of experimental and predicted bearing capacities

3.3.6 점토층의 압밀시간

Fig.17 은 일정한 지반 및 기초 조건의 모형을 30g의 중력 수준으로 유지한 상태로 원심모형 가속시간을 각각 1, 2, 3, 4 시간으로 변화시킴으로써 하부 점성토의 자중압밀도 및 비배수 전단 강도 변화를 유

도한후 기초 재하 시험을 실시한 결과 획득한 정규화된 하중강도-침하 곡선을 나타내고 있다. 압밀시간 증가에 따른 점성토 지반의 비배수 전단 강도의 증가로 정규화된 하중강도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 소정의 압밀시간 경과후 하부 점성토 지반의 전단 강도를 간접적으로 추정하기 위하여 유한 변형을 압밀이론에 의한 연약 점성토 자중압밀 거동을 추정할 수 있는 유한 차분의 수치해석기법(Yoo, 등., 1995)을 사용하여 원심모형 실험 조건의 자중압밀 시간 경과후의 시료 깊이에 따른 간극비, 유효응력, 간극수압 분포를 산정한후 Fig.2의 유효응력과 비배수 전단강도의 실험 결과식을 사용하여 점성토깊이에 따른 비배수 전단 강도변화를 추정하였다.

한편, 이와같이 깊이에 따른 비선형적 비배수 전단 강도 분포에 대하여 등가의 평균 비배수 전단 강도를 결정하는 방법(Skempton, 1951)을 사용하여 Hanna와 Meyerhof의 이론식에 의한 지지력값을 실험값과 비교분석한 결과, Fig.18에 보인 바와 같이 서로 근접함을 알 수 있다.

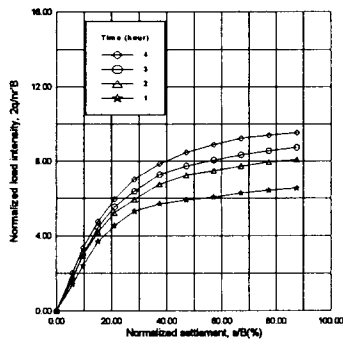


Fig. 17. Normalized load intensity-settlement curves

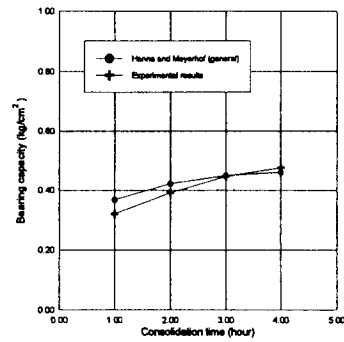


Fig. 18. Comparison of experimental and predicted bearing capacities using punching shear models

4. 결론

점성토 지반위 사질토층에 위치한 기초의 거동을 조사하기 위하여 모형실험을 수행하고 그의 극한 지지력 산정을 위한 기존의 해석방법과 실험결과를 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 1g 상태의 모형 실험 결과, 점성토지반위 사질토층에 위치한 기초의 극한지지력은 상부 사질토의 상대밀도(내부 마찰각), 상부 사질토층의 두께에 대한 기초폭의 비, 하부 점성토의 비배수 전단 강도가 증가할수록 그의 값이 증가함을 확인하였다.
2. 모형에 가하여진 중력수준과 점성토의 자중압밀 시간을 변화시킨 원심모형 실험결과, 중력수준과 자중압밀 시간증가에 따라 각각 상부 사질토의 자중증가에 의한 구속응력의 증가와 점성토의 비배수 전단강도의 증가에 의하여 기초의 극한 지지력이 증가함을 확인하였다.
3. 모형실험의 지반 변형관측 결과, 전단관입모델에서 제시한 상부 사질토 활동체의 하부 점성토 관입의 파괴 메카니즘을 관찰하였다.
4. 실험결과 얻은 극한 지지력값을 전반전단파괴, 국부전단파괴, 하중-침하 곡선의 파괴규준, 상부 사질토의 극한값에 대응하는 하부 점성토의 침하비 등을 고려한 보정계수를 사용한 관입전단모델에 의한 예측치와 비교한 결과, 전반전단파괴를 가정한 관입전단모델이 실험값과 근접하였다.

참고문헌

1. Hanna, A. M. and Meyerhof, G. G. (1980), "Design charts for ultimate bearing capacity of foundations on sand overlying soft clay," Can. Geotechnical Jour., Vol.17, No.2, pp.300-303.
2. Terzaghi, K. (1943), Theoretical soil mechanics, John Willey & Sons, Inc.