

기초저면의 조도가 기초의 침하 특성에 미치는 영향

유 남 재* · 김 영 길** · 박 병 수***

Effect of Base Roughness of Footing on Settlement Characteristics of Footing

Nam-Jae Yoo * · Young-Gil Kim ** · Byung-Soo Park ***

ABSTRACT

This research is to investigate the effect of base roughness of footing on characteristics of load-settlement curve. Parametric experiments of small scaled model test were performed with changing the properties of base roughness of model footing; Gluing the vinyl, aluminum, sand paper, sand beneath the model footing surface. The width of model footing and relative density of soil foundation were also changed to investigate their effects on settlement characteristics of footing. The ultimate bearing capacity as well as the initial slope of load-settlement curve obtained from test results were compared with those from limit equilibrium methods proposed by Terzaghi, Hansen and Meyerhof. From test results, it was confirmed that the base roughness affected the failure mechanisms of showing different shapes of slip lines formed beneath the footing.

1. 서 론

기초구조물의 설계시 극한지지력 및 침하

량의 산정은 기본적인 설계조건인바, 이러한 기초의 극한지지력 및 침하량은 흙의 역학적 특성, 지반의 초기응력상태, 지하수위 조건, 기초의 물리적 특성과 기초의 설치방법, 하중재하방법에 의하여 결정된다. 한편 대부분의 기초설계시 지반이 강성재료로 형

* 강원대학교 공과대학 토목공학과 조교수
** 강원대학교 공과대학 토목공학과 박사과정
*** 강원대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

성되어 있다는 가정하에 전반전단파괴에 의하여 극한지지력을 산정하고있다.

이와같이 다양한 요인에 의하여 결정되는 기초지반의 극한지지력과 침하량에 대하여 종래에 많은 연구가 수행되었고 여러가지 설계 및 해석방법들이 소개되었으나 기초저면의 조도가 지반의 하중-침하 특성 및 극한지지력에 미치는 영향에 대한 연구는 국내외적으로 미비한 편이다.

기초의 극한지지력 및 침하량 산정에서 대부분의 연구 및 설계는 대부분 하부기초 구조물의 재질이 콘크리트를 사용하고 있으므로 기초면이 완전히 거칠은 면으로 가정하여 극한지지력을 산정함으로써 Plandtl이 제안한 파괴면의 형태를 기준으로 하고 있다.

그러나 Hencky(1923)가 완전히 미끄러운 기초면에 대하여 파괴메카니즘은 기초재하판을 중심으로 두개의 대칭된 활동면의 형성을 제안하였다⁶⁾.

이와같은 Hencky(1923)의 활동면 형성에 대하여 Hill(1950)은 같은 활동면의 형성을 제안하였다⁷⁾.

한편, Meyerhof(1955)는 비점착성 사질토 지반에서 기초에 관한 거동에 대하여 미끄러운 기초저면이 거칠은 면을 지닌 기초저면을 사용한 경우의 극한지지력 보다 급격히 적음을 발표하였다¹³⁾.

그러나 De Beer와 Vesic(1958)등이 실험을 통하여 Hencky, Hill등이 제안한 것과 같은 파괴면을 재현시키고자 하였으나 실패하였고, 그것은 변형적합조건(Strain Compatibility Condition)에 위배되는 것에 기인하기 때문인 것으로 판단하였다³⁾. 또한 기초저면의 조도가 극한지지력에 미치는 영향은 미비한 것으로 발표하였다.

그러나, Kimura(1985)등이 극한지지력에 관한 원심모형실험의 연구결과에서 기초저면이 미끄러운 경우 Hill(1950)등이 제안한 두개의 쉐기파괴면이 형성됨을 보여 주었으며, 기초저면의 조도가 극한지지력에 기초

폭 및 상대밀도와 병행하여 큰 영향을 주고 있다는 실험결과를 보여주었다¹⁴⁾.

따라서 본 연구에서는 이와같은 기존의 상반된 연구결과를 검증하는 한편, 사질토 지반에서의 대상기초 저면의 조도가 하중-침하 곡선의 특성 및 극한지지력, 파괴메카니즘에 미치는 영향을 연구하기 위하여 모형기초 저면의 조도, 기초폭, 지반의 상대밀도등을 변화시키는 매개변수적 실험을 실시하였으며, 기존의 한계평형이론에 의한 극한지지력 산정 방법과 실험결과를 비교검토하였다.

2. 모형기초재하시험

사질토 지반위의 대상기초의 조도변화에 따른 기초의 거동을 연구하기 위하여 실시한 모형기초재하시험에서 사용한 기초지반은 주문진 표준사로써 통일분류법(USCS)에 의한 분류결과는 SP에 해당하는 입도분포의 균등한 중립모래로써 기본적인 물리적 특성은 Table 2.1에 보인 바와 같다.

Table 2.1 Basic Properties of Ju Mun Jin Standard Sand

Grain Size Distribution	$D_{10} = 0.21 \text{ mm}$ $C_u = 1.19$ $C_c = 1.01$
Maximum Dry Density	1.682 g/cm ³
Minimum Dry Density	1.384 g/cm ³
Maximum Void Ratio	0.879
Minimum Void Ratio	0.546
Specific Gravity	2.6

한편, 주문진 표준사의 응력-변형 거동 및 전단저항력을 구하기 위하여 압밀배수(CD)의 삼축압축시험을 실시하였다.

시료의 성형은 모형재하시험에서와 같이 동일하게 강사법으로 초기간극비를 유지시키고 구속응력을 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0kg

/min으로 변화시키었으며 2%/min의 전단변형속도를 가하여 실험을 수행하였다. 상대밀도 45%, 65%에 대하여 응력-변형률 관계 및 축변형률-체적변형률 관계를 Fig. 2.1, Fig. 2.2에 나타내었다.

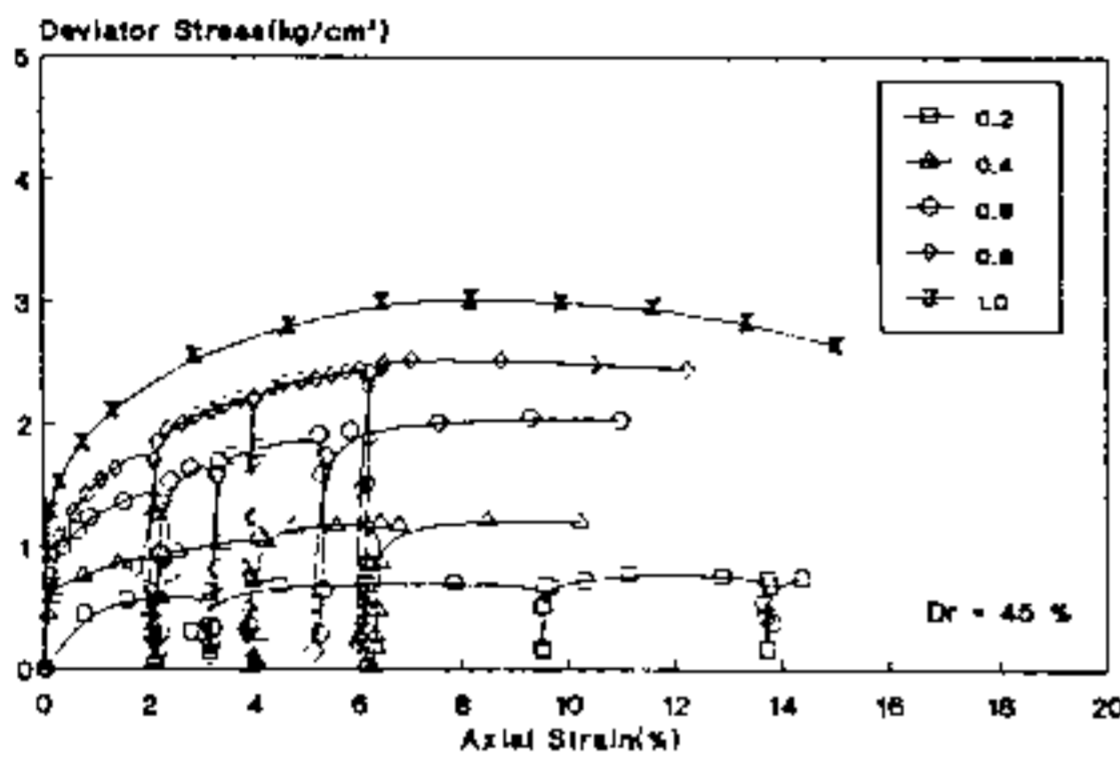


Fig. 2.1 Conventional Triaxial Compression Test Results with Relative Density 45%

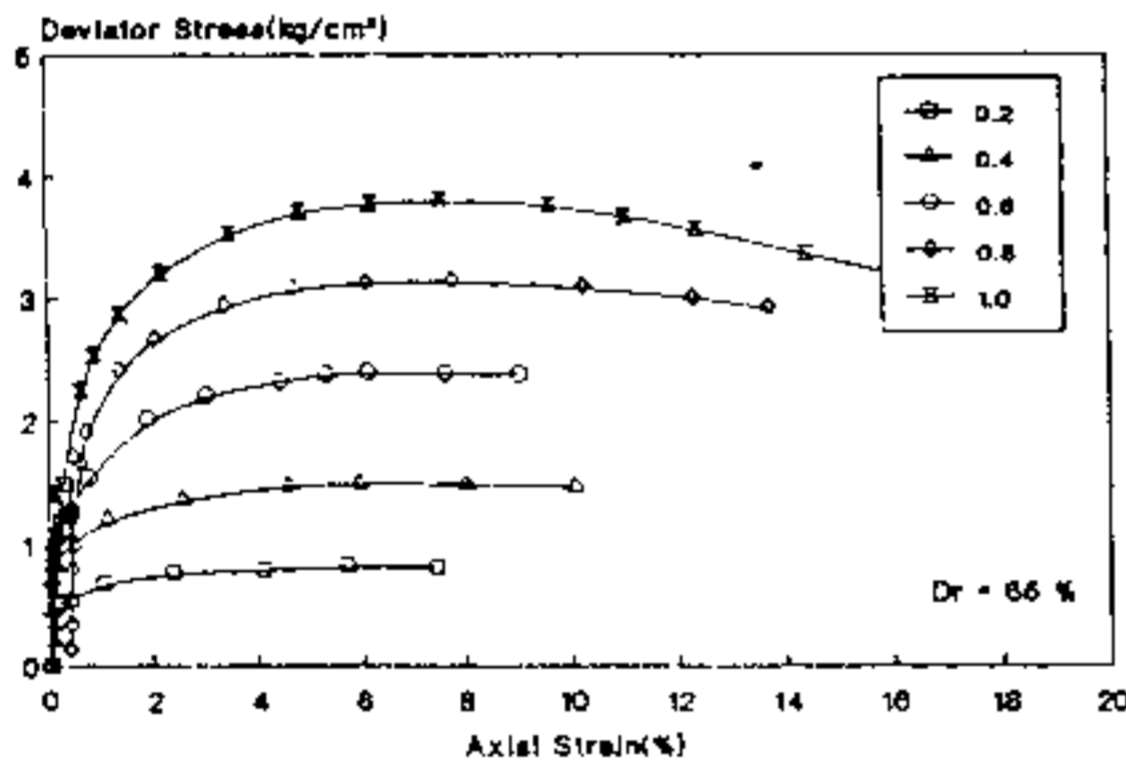


Fig. 2.2 Conventional Triaxial Compression Test Results with Relative Density 65%

그림에 나타낸 바와같이 상대밀도가 45%, 65%인 경우 축방향 변형률이 증가하는 동안 축차응력은 지속적으로 증가하는 변형률 경화현상을 나타내었으며 파괴시의 축차응력은 지속적으로 증가하는 변형률 경화현상을 나타내었으며 파괴시의 축차응력에 이르는 연직변형률은 구속응력이 0.2~1.0kg/cm²로 증가하는 동안 상대밀도 45, 65%에 대하

여 각각 1~5%, 2~6%로 나타나 일반적으로 사질토의 전단시험시 나타나는 경우와 마찬가지로 구속응력 및 상대밀도가 증가할 수록 파괴에 이르는 변형은 커지는 것으로 나타났다. 삼축압축시험 결과를 선형적 Mohr-Coulomb파괴기준에 준하여 전단강도 정수를 산정한 결과 점착력은 없는 것으로 나타났고, 내부마찰각은 각각의 상대밀도에 대하여 35.56°, 40.43°로 나타났다. 한편, 2차원 평면변형 조건하에 대상의 모형기초 재하시험을 실시하기 위하여 Fig. 2.3에 보인 바와같이 모형토조를 제작하였다.

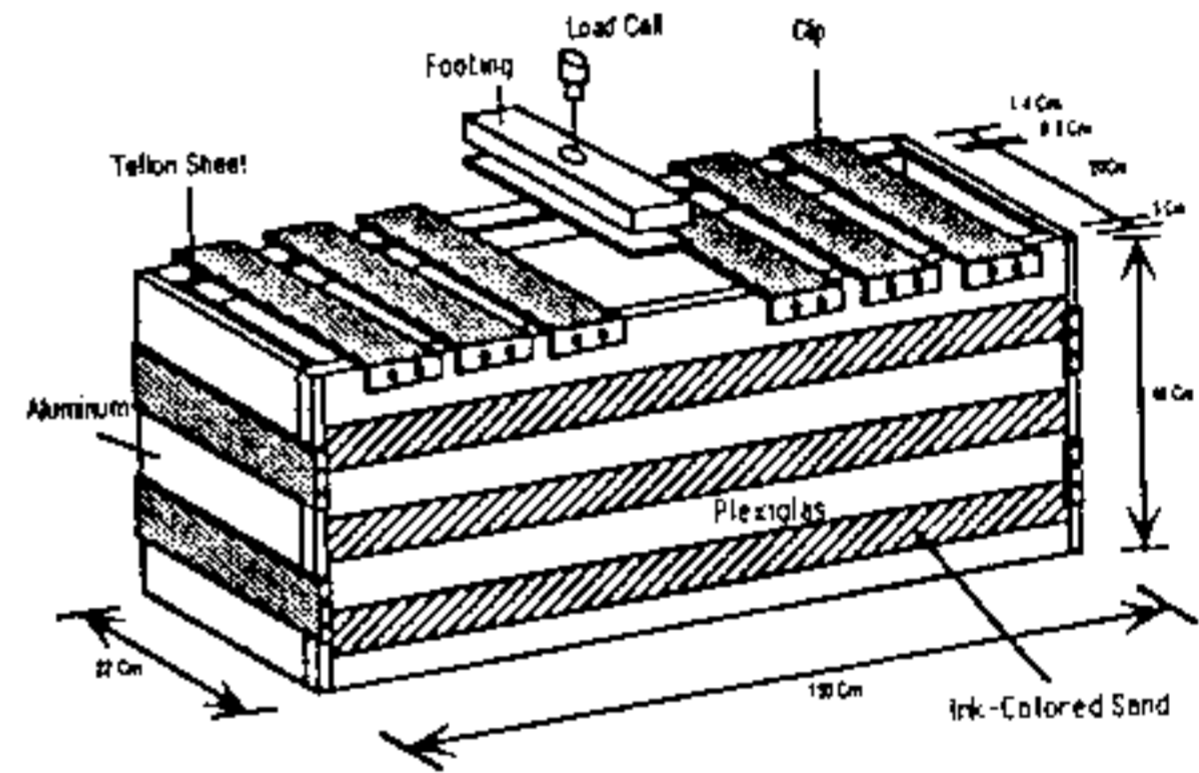


Fig. 2.3 A Schematic of the Model Footing Testing Device

토조의 측면 및 저면은 1.4cm두께의 고강도 알루미늄을 사용하고 토조의 장방향 측면의 변형을 억제하기 위하여 상단에 크립을 설치하여 모형기초 재하에 따른 변형을 최소화하는 한편 하중재하시 후과 토조벽면과의 마찰에 의한 전단력 발생을 최소화 시키기 위하여 벽면에 테프론(Teflon Sheet)을 설치하였다. 한편, 기초하중 재하에 따른 지반의 파괴메카니즘을 관찰하기 위하여 토조의 전면은 3cm두께의 투명한 Plexiglas를 사용하였다.

한편, 강성대상기초(Rigid Strip Footing)를 모사하기 위하여 토조와 같은 폭을 갖

는 고강도 알루미늄을 사용하여 모형기초를 제작하는 한편, 기초폭이 기초저면의 조도 변화에 따라 하중침하의 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 기초폭을 4, 7, 10, 12, 15cm의 크기로 변화시켜 시험을 수행하였다. 기초저면의 조도를 미끄러운 경우와 거친 경우로 하기 위하여 기초저면에 비닐, 사포, 모래 및 처리하지 않은 기초판 저면 자체 즉, 알루미늄등 4가지 경우에 대하여 시험을 실시하였다. 특히 비닐을 부착하는 경우는 비닐을 고기비닐처럼 절개 조합하는 동시에 기초저면과 비닐사이 에 그리스를 발라서 마찰력을 최소화 함으로써 미끄러운 기초저면을 실험실에서 재현하였고, 모래를 기초저면에 부착한 경우는 기초저면에 본드를 바른 후, 상대밀도에 맞는 낙하위치에서 강사법으로 시료를 공중낙하시켜 모래를 부착하였다. 또한 사포를 부착한 실험에서는 No. 80의 사포를 기초저면에 부착하여 시험을 수행하였다.

기초판에 하중재하를 위하여 삼축압축시험기의 재하장치를 이용하였고, 재하속도는 삼축압축시험, 직접전단시험에서 사용한 재하속도 (2mm/min)를 사용하여 모든시험에서 일관성 있는 재하속도를 유지하는 한편, 기초판의 연직변위 측정을 위하여 두개의 변위 측정기를 기초재하판의 앞, 뒤에 설치하여 사용함으로써 편심 작용 여부를 확인 하였다.

기초지반은 주문진 표준사를 사용함으로써 사질토 지반을 실내실험실에서 모사하였고 기초지반의 형성은 Fig. 2.4에 나타낸 시료낙하기 밑면에 롤러(Roller)를 부착하여 토조위에 장치한후, 토조의 좌에서 우로 이동시키면서 강사법(Raining Method)으로 지반을 구성함으로써 깊이에 따라 균질한 지반을 형성하였다.

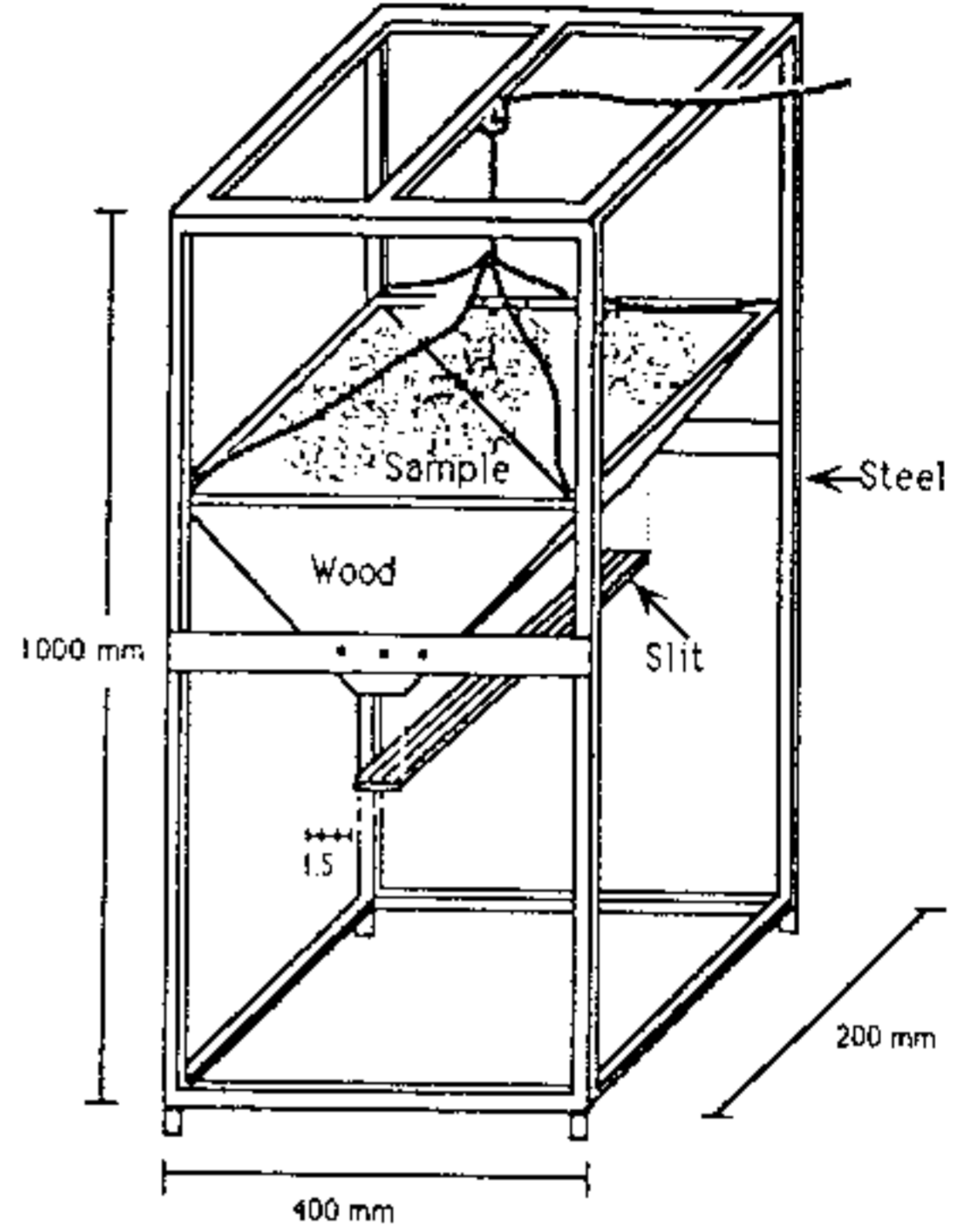


Fig. 2.4 Device Used for Air Pluviation of Sand

한편, 모래의 낙하고에 따른 상대밀도 변화를 측정하고 그 결과를 바탕으로 상대밀도를 45%와 65%로 변화하여 시험을 수행함으로써 지반의 상대밀도 변화에 따른 침하특성을 알아보았고, 모형토조의 좌, 우측의 상, 중, 하에 시료 캔을 설치하여 강사법으로 지반을 구성한 후 캔 속의 모래의 건조밀도를 측정함으로써 시험시 사용된 상대밀도를 확인하였다.

기초저면의 조도변화에 따른 활동선의 형성 및 파괴메카니즘을 확인하기 위하여 시료를 염색하여 일정한 층별로 강사시켜 기초재하를 실시함으로써 그에 따른 불연속면의 연결에 의하여 파괴형태를 관찰하였다.

3. 실험결과분석

3-1. 하중-침하 특성

기초저면의 조도를 비닐(VN), 알루미늄

(AL), 사포 (SP), 모래 (SD) 등을 부착하고 상대밀도를 45%, 65%의 경우에 대하여 기초 폭을 4, 7, 10, 12, 15cm로 변화시켜 시험을 실시한 결과를 Fig. 3.1, Fig. 3.2에 나타내었다.

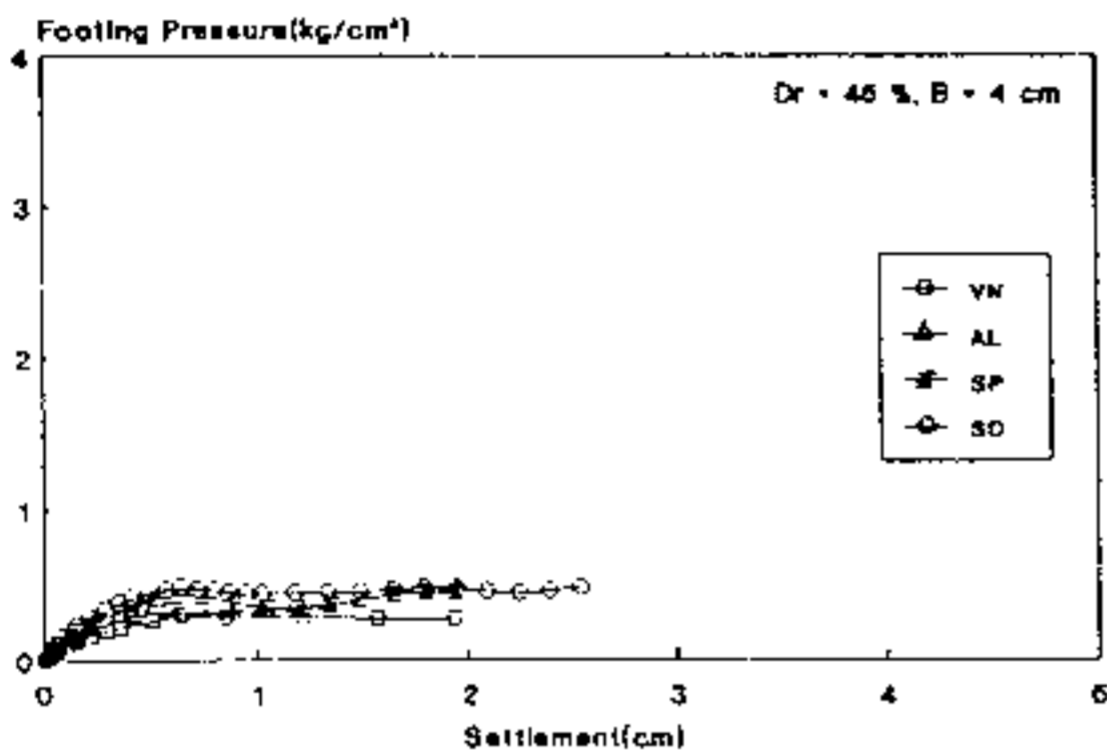


Fig. 3.1 Load-Settlement Curve in the Model Footing Test (B= 4cm, Dr= 45%)

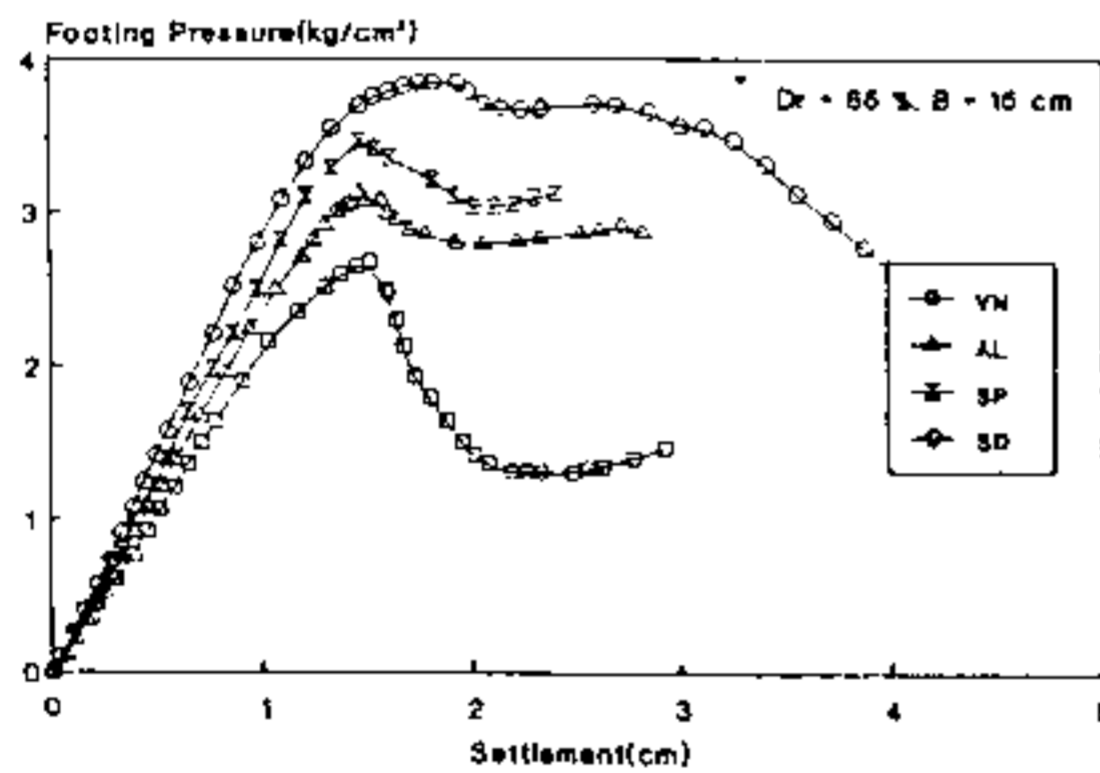


Fig. 3.2 Load-Settlement Curve in the Model Footing Test (B= 15cm, Dr= 65%)

하중-침하 곡선에 나타낸 바와 같이 상대 밀도가 45, 65%인 경우에 대하여 기초 폭이 증가할 수록 극한하중에 이르는 침하량이 각각 약 0.3~1.7cm, 0.5~2cm로 나타나 일반적인 경우와 마찬가지로 상대밀도와 기초 폭이 증가할 수록 극한하중에 이르는 침하량은

증가하는 것으로 나타났다. 상대밀도가 65%인 경우, 기초저면의 조도에 관계없이 조밀한 경우에 나타나는 선명한 극한응력점을 보인 후 변형연화 (Strain-Softening) 현상을 보였고, 상대밀도가 45%인 느슨한 상태에서는 기초저면이 알루미늄, 사포, 모래를 부착한 저침경우 극한응력점을 지나 변형경화 (Strain-Hardening)를 보인 반면, 비닐을 부착한 미끄러운 경우는 선명한 극한응력점을 나타내었다. 주어진 기초폭에 대하여 저면의 조도가 증가할 수록 상대밀도가 45%, 65%에서 극한지지력은 각각 5~30%, 5~40%로 증가하였으며 초기 접선탄성계수가 증가함을 관찰하였다.

한편, 하중-침하 곡선에서 극한하중을 지난 후 다소 하중이 증가하는 것을 나타내는 것은 Bruce²⁾ 및 Kimura¹⁰⁾ 등의 실험결과와 마찬가지로 하중재하시 기초의 연직변위가 일어남에 따라 지반은 초기간극비보다 더 조밀해지고, 기초의 근입깊이가 증가하는 이유에 기인한 것이다.

이와 같은 실험결과로 기초저면의 조도가 거칠어 질수록 주어진 재하하중에 대하여 탄성침하량이 감소함을 알 수 있어서 현장조건에서 기초저면을 거칠게하여 주면 주어진 허용침하량에 대한 허용설계 하중값이 증가될 수 있음을 나타낸다.

3-2. 극한지지력

전술한 바와 같이 기초저면의 조도가 거칠어 질수록 극한지지력은 증가하는 것으로 나타났다. 본절에서는 기초저면의 조도변화에 따라 기초폭 및 상대밀도가 극한지지력에 미치는 영향을 검토하였다.

Fig. 3.3은 상대밀도에 대한 영향을 검토하기 위하여 기초저면의 조도변화에 사용된 비닐, 알루미늄, 사포, 모래 등의 마찰계수를 변형된 직접전단시험으로부터 구한 후, $\tan \phi$ 로 나누어 무차원화 하였다.

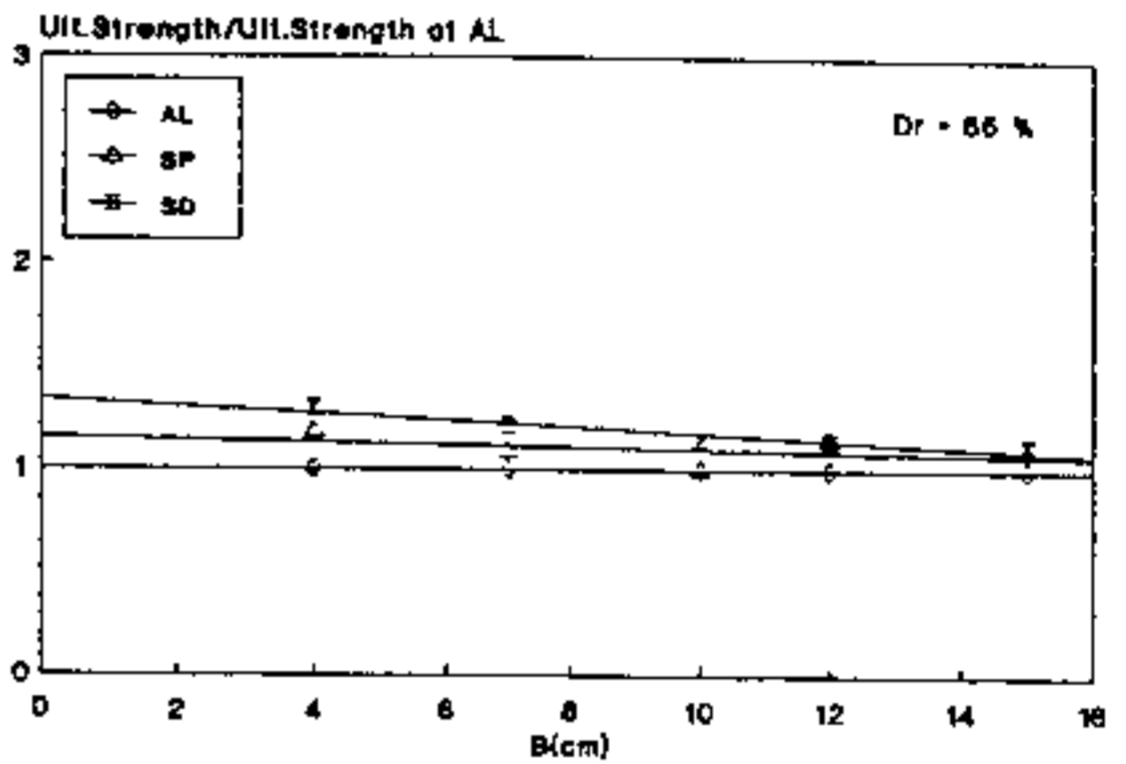
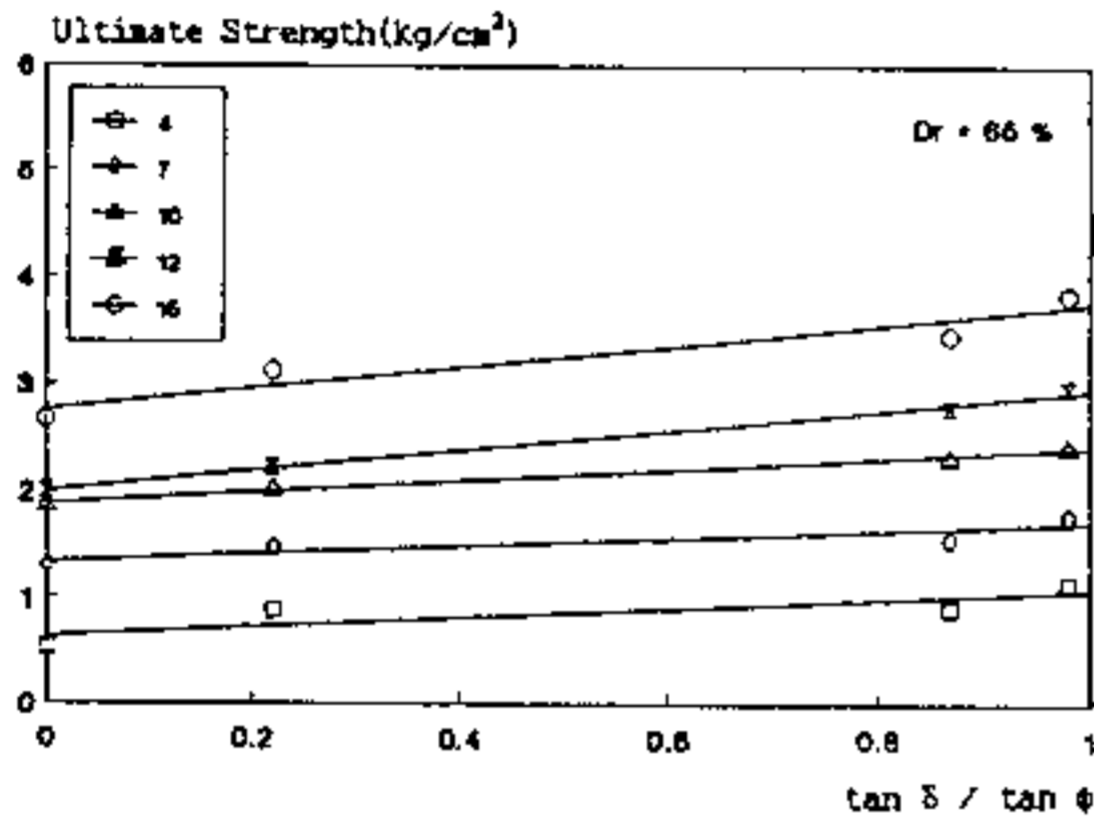
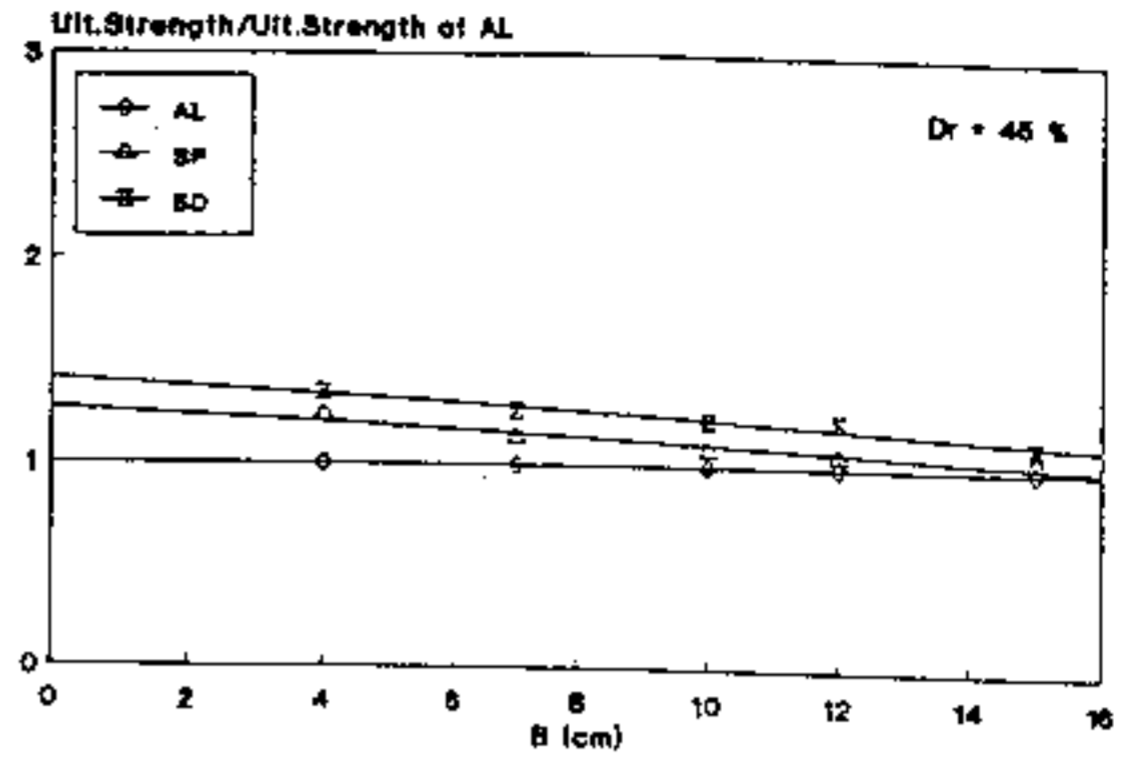
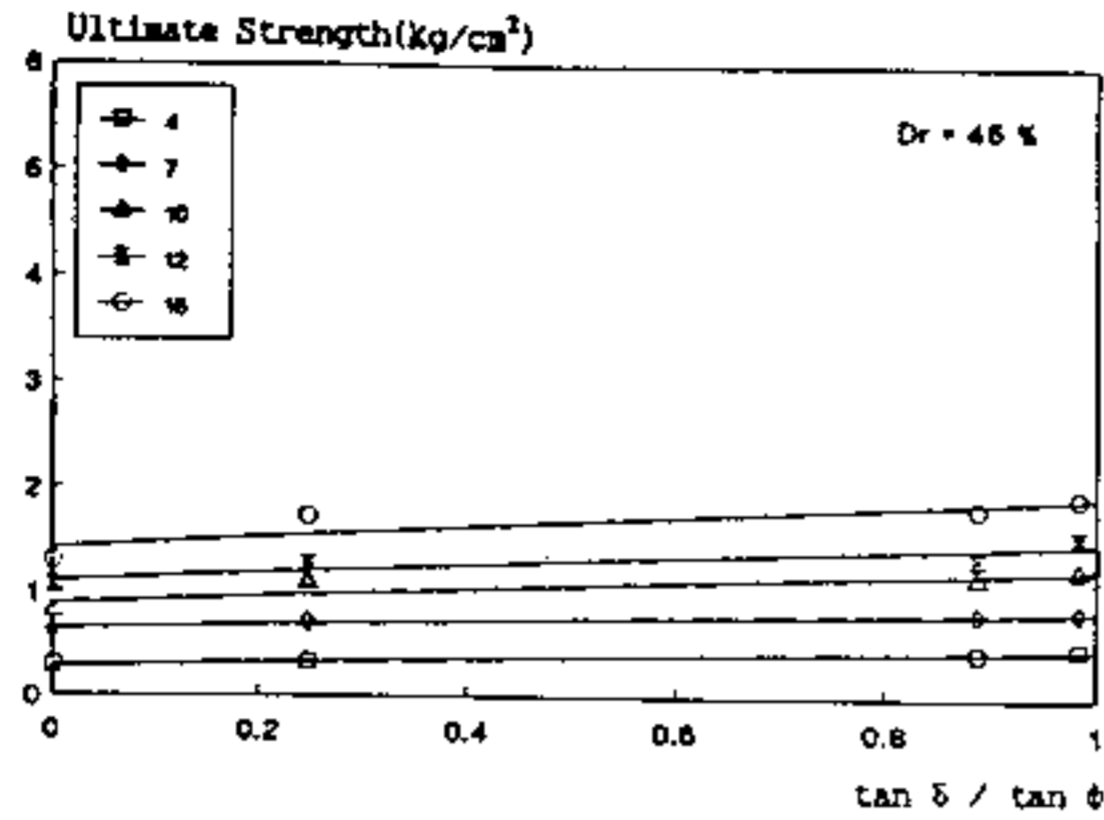


Fig. 3.3 Effect of Base Base Roughness

Fig. 3.4 Effect of Footing Width

상대밀도가 45%인 경우 기초폭 4, 7, 10, 12, 15cm에 대하여 기울기가 각각 0.185, 0.1887, 0.343, 0.383, 0.511로 타나났고 상대밀도가 65인 경우 기울기가 0.443, 0.369, 0.533, 0.952, 0.989로 나타나 상대밀도가 증가할 수록 기울기가 급하게 나타났다. 따라서 기초저면의 조도가 극한지지력에 미치는 영향중 상대밀도가 증가할 수록 극한지지력에 미치는 영향이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 3.4는 기초폭의 변화에 따라 기초저면의 조도가 극한지지력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 파괴메카니즘이 같은 알루미늄, 사포, 모래의 극한지지력을 알루미늄의 극한지지력으로 나누어 무차원화 한후, 최소자승법으로 회귀분석하였다.

그림에 나타난 바와같이 기초폭이 4~15 cm로 증가함에 따라 극한지지력의 차이는 약 30~10%로 감소함을 알 수 있다.

따라서 기초저면의 조도가 극한지지력에 미치는 영향중 기초폭이 증가할 수록 극한지지력의 차이는 감소하는 것으로 나타났다.

한편, 한계평형이론에 의한 극한지지력 산정법과 실험으로부터 구한 극한지지력의 비교를 Fig. 3.5에 나타내었다. 상대밀도가 45%인 경우 실험결과가 한계평형이론에 의한 결과보다 크게 산정되었으나 65%의 경우 Terzaghi의 해는 실험결과와 근접하게 나타났다. 이러한 차이는 극한지지력을 결정하는 내부마찰각 ϕ 를 산정하는 실험의 한계성 및 실험이 평면변형조건으로 실시된 이유등에 기인된 것이다. ^{2) 15)}

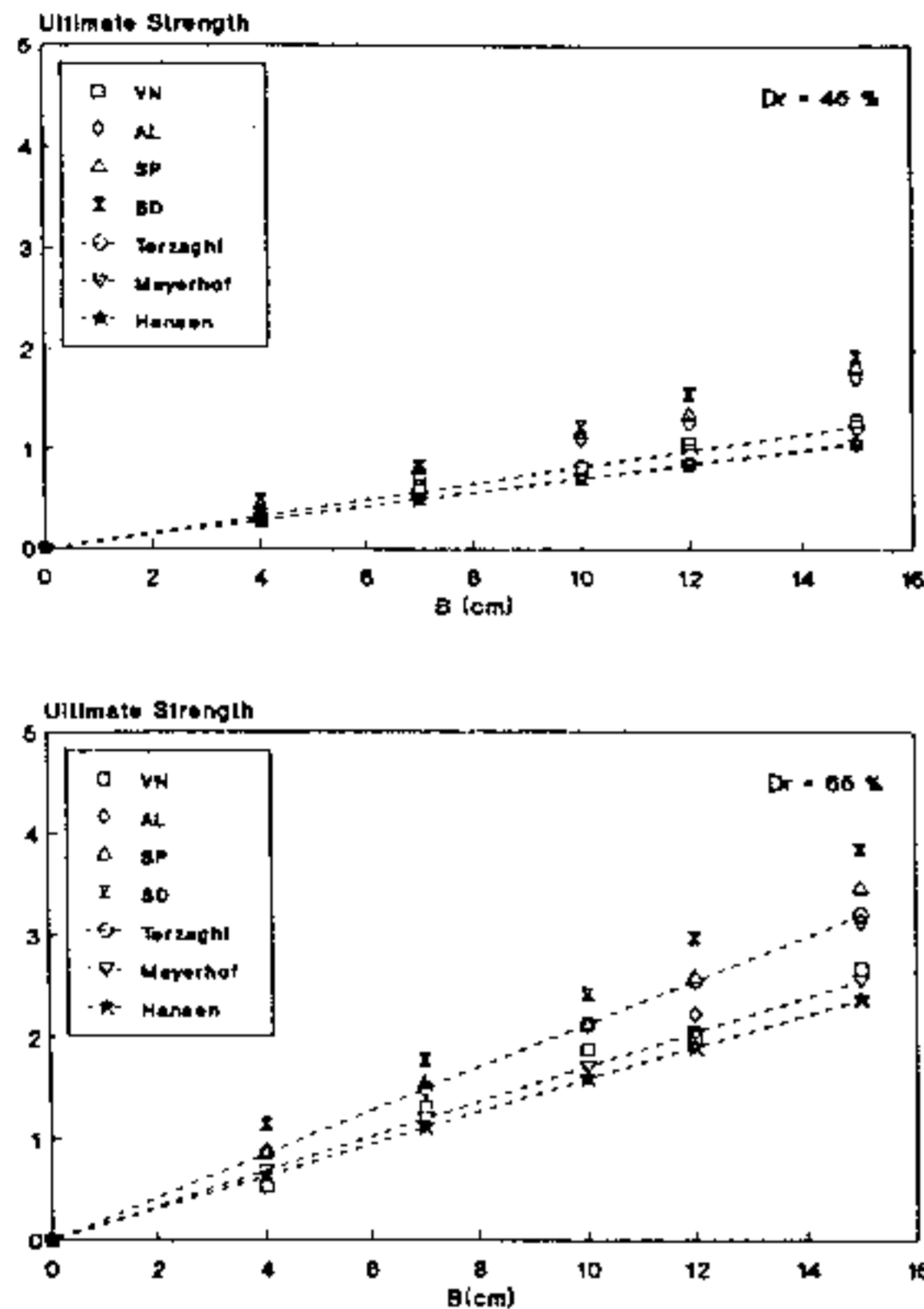


Fig. 3.5 The Comparison of the Measured Ultimate Capacity with Limit Equilibrium Theory

3-3. 파괴메카니즘

기초저면이 미끄러운 경우와 거친경우에 대하여 시험을 실시한후 얻어진 모형지반의 불연속면을 사진촬영하여 Fig. 3.6, Fig. 3.7에 나타내었다.

Fig. 3.6에 나타낸 바와같이 기초저면이 거친 경우를 모사한 모래를 부착한 경우 기초재하판 중심아래 Rankine의 주동영역 형태인 썰기형태의 파괴후, 흙 썰기의 아래방향 이동으로 인접한 흙을 측면으로 밀리게하여 썰기의 양측으로 수평력을 발생시켜 썰기를 중심으로 좌우로 대수나선 형태의 파괴로 발전되었다. 따라서 기초저면의 거친경우 Terzaghi가 제안한 파괴메카니즘을 따르는 것으로 나타났다.

한편, Fig. 3.7과 같이 기초저면이 미끄러운 경우를 모사한 비닐을 부착한 경우 기초재하판을 중심으로 두개의 대칭된 활동선이 형성되어 Hencky(1923), Hill(1950) 등이 제안한 파괴메카니즘과 같게 나타났다.

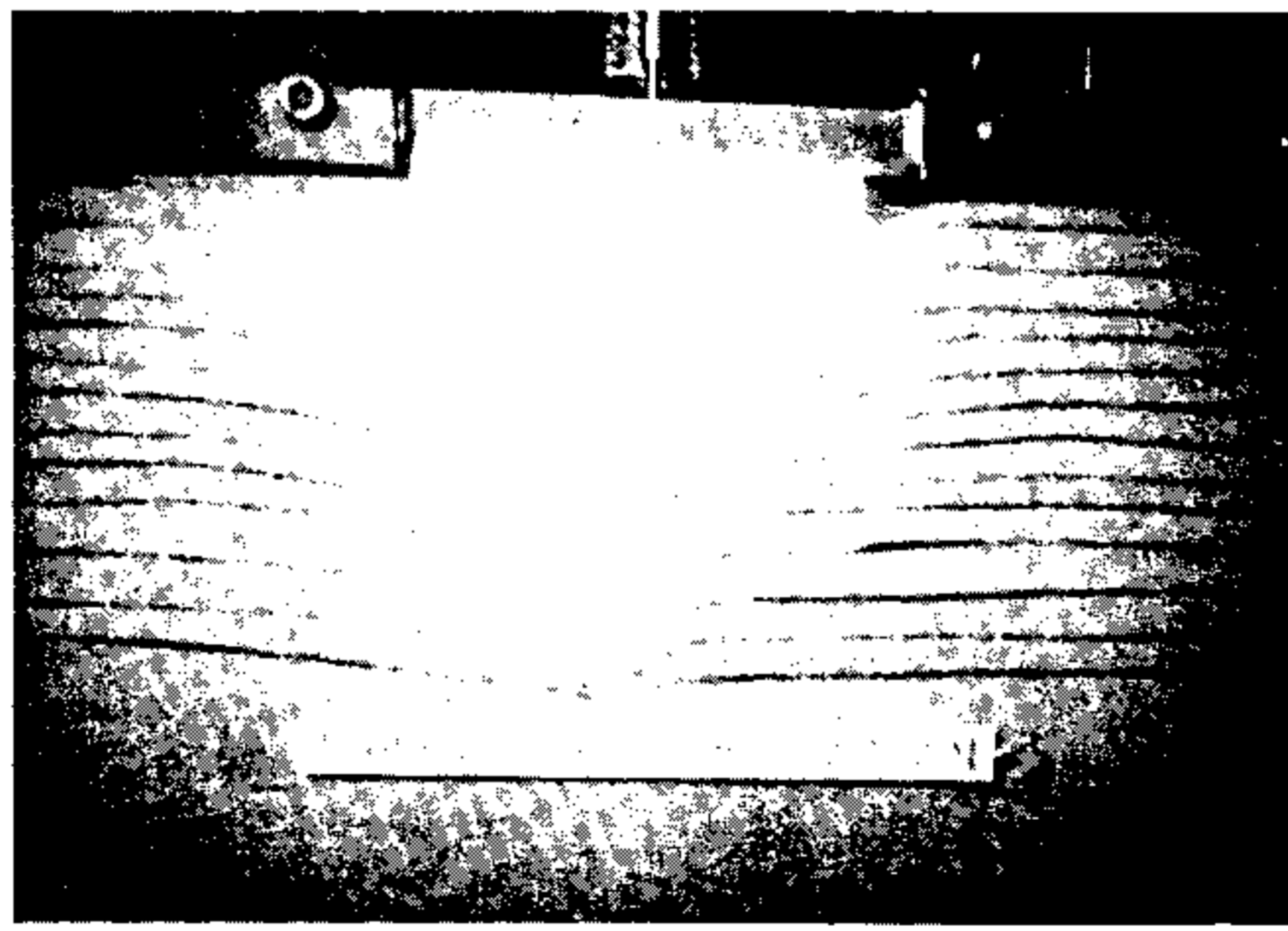


Fig. 3.6 Failure Mode (Rough Footing)

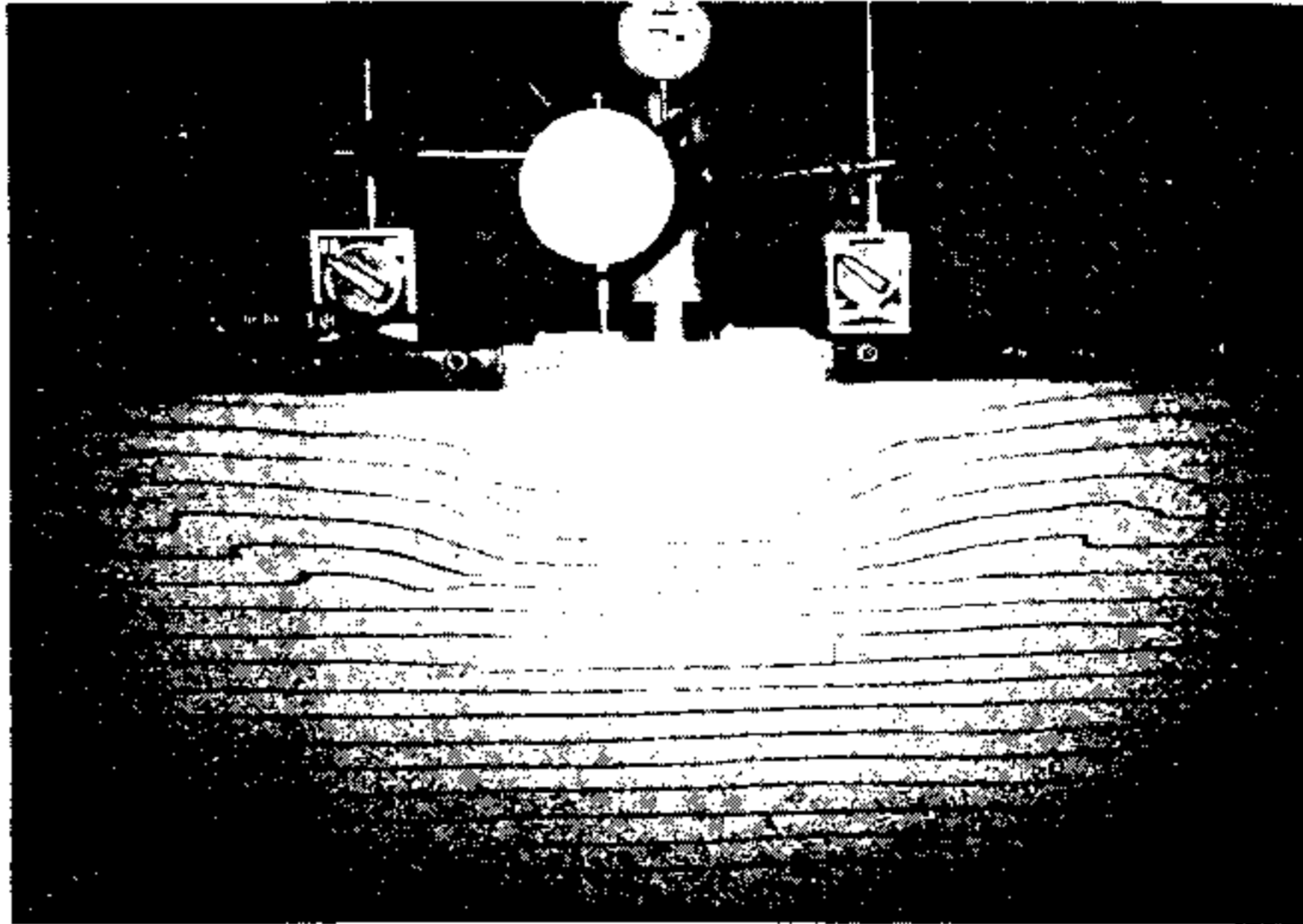


Fig. 3.7 Failure Mode (Smooth Footing)

4. 결 론

본 연구에서는 대상기초 저면의 조도, 기초폭, 상대밀도등을 변화시키는 매개변수적 실험을 실시하여, 기초저면의 조도에 따른 하중-침하 특성 및 극한지지력의 차이, 파괴 메카니즘등을 규명하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기초저면의 조도가 거칠어 질수록 극한 지지력은 증가하였으며, 하중-침하 곡선에서 초기 접선탄성계수의 기울기가 급하게 나타났다.
2. 기초폭이 증가할 수록 기초저면의 조도에 대한 극한지지력의 차이는 적게 나타났고, 상대밀도가 증가할 수록 기초저면의 조도가 극한지지력에 미치는 영향은 증가하는 것으로 나타났다.
3. 기초저면이 미끄러운 경우 기초재하판을 중심으로 두개의 대칭된 활동면이 형성되어 Hill(1950)이 제안한 파괴메카니즘을 따

르는 것으로 나타났고 기초저면이 거친 경우 기초재하판을 중심으로 썩기형태의 파괴후 기초의 좌, 우로 대수나선형태의 파괴가 발전됨을 보여 Terzaghi등이 제안한 파괴메카니즘을 따르는 것으로 판명되었다.

참 고 문 헌

1. Bransby, P. L. and Smith, I. A. A., "Side Friction in Model Retaining Wall Experiments", J. Geot. Engr. Div. ASCE, Vol. 101, No. GT7, pp. 615-632 (1975)
2. Bruce L. K., Abbas, A. and James A. C., "Strength Parameters for Bearing Capacity of Sand", J. Geot. Engr. Div. ASCE, Vol. 114, GT4, pp. 491-498 (1988)
3. De Beer, E. E., "Bearing Capacity

- and Settlement of Shallow Foundations on Sands", Proc. Symp. on Bearing Capacity and Settlement of Found., Duke University, Durham, N. C., 15-33 (1967)
4. Dov, L. and Guy, F. M., "Bearing Capacity of Shallow Foundations : Rigid versus Flexible Models", J. Geot. Engr. Div. ASCE, Vol. 116, No. GT11, pp. 1750-1756 (1990)
 5. Duncan, J. M. and Chang, C. Y., "Nonlinear Analysis of Stress-Strain in Soils", J. Soil Mech. Fdns. Div. ASCE, Vol. 96, No. SM5, pp. 1629-1653 (1970)
 6. Fang, H. Y., and Hans, F. W., "Foundation Engineering Handbook", Van Norstrand Reinhold Ltd., New York, pp. 125-126 (1975)
 7. Hansen, J. B., "A General Formula for Bearing Capacity", Ingenioren, 5, pp. 38-46 (1961)
 8. Hansen, J. B., "A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity", Bulletin No. 28, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Denmark, 5-11 (1970)
 9. Hill, R., "The Mathematical Theory of Plasticity", London : Oxford University Press (1950)
 10. Kimura, T., Kusakabe, O. and Saitoh, K., "Geotechnical Model Tests of Bearing Capacity Problems in a Centrifuge", GT 35, No. 1, pp. 33-45 (1985)
 11. Lambe, T. W. and R. V. Whitman., "Soil Mechanics", John Wiley and Sons, Inc. pp. 195-226 (1979)
 12. Meyerhof, G. G., "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations", Geotechnique 2, No. 4, pp. 301-332 (1951)
 13. Meyerhof, G. G., "Influence of Roughness of Base and Groundwater on the Bearing Capacity of Foundations", Geotechnique, London, England, 5(3), pp. 227-242 (1955)
 14. Meyerhof, G. G., "Soil-Structure Interaction and Foundations", Proc. 6th Panamerican Conf. on Soil Mech. and Found. Engr., Lima, Peru, 1, pp. 109-139 (1979).
 15. Ko, H. Y., and Davidson, L. W., "Bearing Capacity of Footings in Plane Strain", J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, 99(1), pp. 1-23 (1973)
 16. Terzaghi, K., "Theoretical Soil Mechanics", Chapman and Hall, pp. 118-143 (1956).
 17. 유남재, 김영길, 박병수, "기초저면의 조도가 극한지지력 및 파괴메카니즘에 미치는 영향", 1992대한토목학회 학술 발표논문