

사질지반에서 탄성론에 의한 침하량 산정 적용성에 관한 연구

A Study on the Applicability of Settlement Evaluation for Sandy Layer by Elastic Theory

김원철* · 안창윤**

Kim, Won-Cheul · Ahn, Chang-Yoon

Abstract

N-value by the SPT is one of the key parameter for settlement evaluation. However, if the ground is firm, the usual N-value is not blow count of 30cm depth penetration. In such case, if N-value is more than 50 with 30cm penetration, the N-value 50 is applied for settlement analysis. Therefore, in this study, the modified method of N-value estimation is suggested and compared the settlement by Elastic Theory, and the measured field data by Plate Load Test. As the result of this study, it is shown that the settlement by Elastic Theory with the modified N-value is more accurate than settlement by usual N-value. The application of Elastic Theory for pure sand is also evaluated in this paper.

Keywords : SPT, N-value, Settlement, Elastic Theory, Modified N-value, Plate Load Test

요 지

사질지반에서 제안식에 의한 침하량 예측시 사용되는 주된 입력 물성치는 표준관입시험에 의한 N치이다. N치는 침하량의 예측치에 가장 큰 영향을 미치는 요소이기 때문에 침하량 예측시 적절한 N치의 산정이 이루어질 때 예측 침하량의 정확성이 확보된다. 그러나, N치가 50/30이상인 지반의 경우 N치는 30cm 관입시 타격수를 기록하는 것이 아니라 50회 타격시 룯드의 관입량을 기록하고 있다. 이러한 경우 침하량 예측시 N치를 50으로 사용할 경우 그 결과의 신뢰성이 결여된다. 이에 본 연구에서는 지반의 N치가 50/30이상인 경우 N치의 보정과 보정 N치를 이용한 Elastic Theory 예측치와 평판재하시험에 의한 실측치를 비교·검토하였다. 그 결과 보정 N치를 사용한 경우 보정하지 않은 N치를 사용한 경우에 비해 실측치에 대해 높은 정확성을 보였다. 또한, 순수 사질토에 대한 Elastic Theory의 적용성을 검토하였다

주요어 : 표준관입시험, N치, 침하량, Elastic Theory, 보정 N치, 평판재하시험

* 정희원 · 한양대학교 토목공학과 겸임교수

** 정희원 · 한양대학교 토목공학과 석사과정

1. 서론

사질지반상의 직접기초에 있어서 일반적으로 기초의 지지력보다는 허용침하량이 기초의 설계에 있어 중요 변수가 된다. 그러나 기존 제안식에 의한 침하량 산정시 적용되는 토질 물성치에 대한 불확실성 때문에 이 산정된 침하량의 신뢰성이 문제가 되고 있다(김 2003). 특히, 사질지반에 있어서는 N치가 침하량 산정시 가장 큰 영향을 미치는 토질의 특성치이나 제안식들에 적용하는 토질 특성치인 N치의 경우, N치가 지반의 특성을 정확히 반영해 주지 못하는 경우가 많기 때문에 산정된 침하량에 신뢰성이 결여되는 문제가 생긴다. 지반의 N치가 50/30이상인 경우 지반의 N치는 룯드의 30cm 관입시 타격수를 기록하는 것이 아니라 50회 타격시 룯드의 관입량을 기록하고 있다. 이와 같이 N치가 큰 조밀한 사질지반에서 N치를 50으로 사용할 경우 N치가 지반의 특성을 정확히 반영하지 못함으로써 실측치와 큰 차이를 갖는 침하량이 산정될 수 있으므로 N치 50/30이상인 지반에 있어서 N치의 합리적인 평가가 이루어져야 산정된 침하량 예측치의 신뢰성이 확보될 수 있다.

본 연구에서는 N치 50/30이상의 지반에서 N치의 평가 방법을 제시하고 보정된 N치를 적용한 Elastic Theory에 의해 산정된 침하량과 현장 평판재하시험 결과와 사질의 모형 지반에서 이루어진 실내 평판재하시험과 Elastic Theory의 침하량을 비교·검토함으로써 조밀한 사질지반에서의 N치 평가에 대한 방법과 사질지반에서 Elastic Theory의 적용성을 고찰하였다.

2. 현장 평판재하시험 실측 사례

2.1 현장 지반조건 및 현황

본 연구에서 사용된 현장 평판재하시험의 결과는 부산광역시 진구 ○○동 ○○○○칸타빌 멤버스 신축공사와 성남-장호원간 ○○교의 시험 결과이다. 표 1~2은 두 현장의 지반조건을 나타내었다.

표 1. 부산광역시 진구 ○○동 지반조건

구 분	표토층	점토층	모래층	풍화토층	풍화암층	연암층
구 성	자갈, 모래	유기질 점토	점토질 모래, 잔자갈	실트질 모래	모래 및 세편	안산암
층후(m)	0.8~4.3	0.5~3.3	1.6~3.5	1.2~8.3	20.4~42.5	2.0~3.0
N치	3/30~50/3	3/30~10/30	11/30~17/30	9/30~50/11	50/10~50/1	-
상대밀도	매우느슨 ~ 매우조밀	-	보통조밀	느슨 ~ 매우조밀	매우조밀	-
연경도	-	연약~견고	-	-	-	-
풍화도	-	-	-	-	완전풍화	심한풍화

표 2. 성남-장호원간 ○○교 지반조건

구 분	매립토	풍화토 1	풍화토 2	풍화암	연암
구 성	실트질 모래	모래섞인 실트질 점토	실트질 모래	흑은모 편마암 모래	흑은모 편마암
심도(m)	0.0~1.3	1.3~5.5	3.5~5.5	5.5~7.0	7.0~10
N치	4/30~23/30	34/30~50/23	50/12	50/6	-
상대밀도	느슨~중간조밀	견고	매우조밀	-	-
풍화도	-	-	-	완전~심함	보통~심함

2.2 평판 크기 및 시험위치

부산광역시 진구 ○○동의 재하판은 두께 70mm이상, 크기는 1.4m, 0.4m, 0.3m의 정사각형 평판 세가지가 사용되었다. 재하장치는 시험위치 주변에 어스앵커 6공(12.7mm×6EA)을 설치한 반력재하방법이 사용되었으며 소형평판의 경우는 백호우(010)가 사용되었다. 평판재하시험은 설계 기초 저면에서 시행하기 위하여 G.L.(-)11.3~G.L.(-)20.7m 까지 굴착하여 시행되었다. 시험심도에서의 지반은 풍화암층이었다.

성남-장호원간 ○○교에서 사용된 재하판의 직경은 0.4m, 0.3m 두가지이며, 시험 심도 G.L.(-)2m에서 평판 재하시험이 시행되었다. 시험심도에서의 지반은 풍화토층이었다.

3. 실내 평판재하시험 실측 사례

3.1 모형 지반조건

실내 평판재하시험의 실측치는 김(한양대, 2002)의 논문 자료를 참조하였다.

김(2002)은 지반의 전단파괴 범위를 고려하여 가로 2m, 세로 2m, 높이 1m(내공규격 1.7×1.7×0.85m)의 모형토조를 제작하였다. 모형 지반 형성에는 순수모래, 순수점토, 모래:점토 혼합토(75:25, 50:50, 25:75)가 사용되었는데, 본 연구에서는 순수모래로 형성된 모형 지반에서의 평판시험 결과만을 사용하였다.

모형 지반 형성시에는 다짐층수를 3층, 4층, 5층의 3가지 다짐상태로 모형 지반을 형성하였고, 지반의 최종 높이는 60cm가 되도록 하였다.

모형 지반에 사용된 모래는 세척된 해사로 No.200체 통과율이 매우 적고, 입경은 매우 균등한 상태로 통일분류법에 의해 SP로 분류되었다. 모래의 입도분포곡선 및 물리적·공학적 특성은 그림 1과 표 3과 같다.

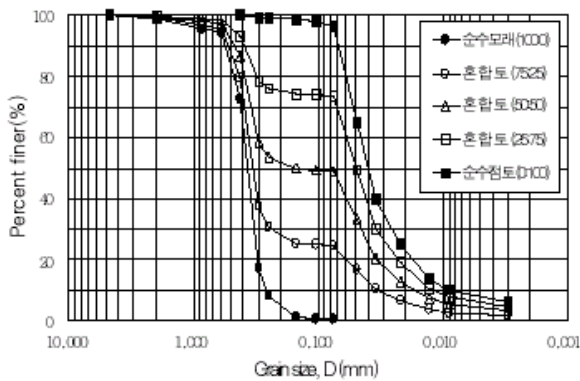


그림 1. 모래의 입도분포곡선

표 3. 모형지반의 물리적·공학적 특성

구분	γ_{dmax} (t/m ³)	w_{opt} (%)	c (t/m ²)	ϕ (°)	G_s
모래	1.586	18.0	0	34.9	2.65

3.2 평판 크기 및 재하방법

모형 지반에는 0.1m, 0.15m, 0.2m의 정사각형 평판이 제작 사용되었고, 반력장치는 H-beam과 철판을 사용하여 하중지지대를 제작하였다. 하중재하는 20ton 용량의 유압잭으로 재하속도를 일정하게 유지하는 방법으로 재하하였다.

4. 분석 및 고찰

4.1 현장 평판재하시험

4.1.1 현장 지반의 N치 수정

부산광역시 진구 ○○동의 경우 시험대상 지반이 사질의 풍화암으로 측정된 SPT결과가 50/9~50/1의 N치를 갖는다. 그리고 성남-장호원간 ○○교의 경우 시험대상 지반이 실트질 모래(SM)의 풍화토 지반으로 34/30~50/12의 N치를 갖는다.

이와 같이 지반의 N치가 50/30이상인 경우 그 값을 그대로 사용하여 기존 제안식으로 침하량을 산정할 경우 이때의 N치는 실제 지반의 특성을 반영했다고 볼 수 없으므로 산정된 침하량 값에 있어 신뢰성이 결여된다.

이에 본 연구에서는 N치가 50/30이상인 경우 다음과 같은 가정을 바탕으로 N치를 보정하였다.

- ① N치 50/30이상인 지반은 침하거동에 있어 탄성 거동에 가까운 거동을 한다.
- ② 얇은기초에서 침하의 90%이상은 지표하 2B내에서 발생한다(Schmertmann, 1970).
- ③ N치 50/30이상인 탄성거동 지반에서 침하량 산정시 Elastic Theory를 사용한다.
- ④ Elastic Theory로 침하량을 산정하는 탄성거동 지반에서 N치의 보정은 linear interpolation을 사용할 수 있다.

위의 가정에 의해 본 연구에서 사용된 두 현장의 시추주상도를 바탕으로 각 평판재하시험 대상 지반의 N치를 보정하면 다음 표 4~5와 같다.

표 4. 대상 지반별 보정 N치(부산광역시 진구 ○○동)

	101동	102동	105동	106동
N치	50/2	50/2	50/6~50/2	50/9~50/1
(적용 N치)	(50/2)	(50/2)	(50/4)	(50/7)
보정 N치	750/30	750/30	375/30	214/30

표 5. 대상 지반별 보정 N치(성남-장호원간 ○○교)

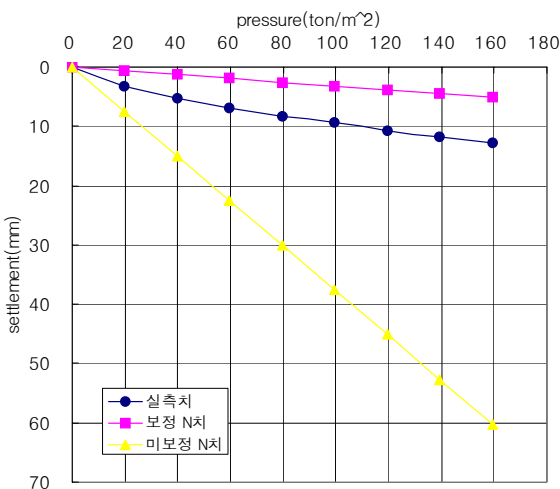
	PBT-1	PBT-2
N치	34/30~50/23	34/30~50/23
(적용 N치)	(34/30)	(34/30)
보정 N치	42/30	42/30

성남-장호원간 ○○교 지반의 경우 평판재하시험이 이루어진 풍화토 상부의 경우 34/30의 N치를 보이거나 시험 심도로부터 1m 이후부터는 50/30이상의 N치를 보이고 있어 N치의 보정이 필요한 것으로 판단하여 평판 직경의 2B 구간의 N치에 대하여 보정을 하였다.

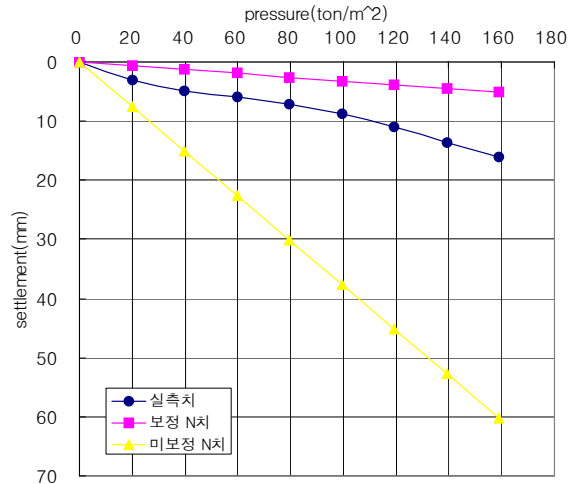
4.1.2 Elastic Theory에 의한 침하량

표 4~5의 N치와 보정 N치를 입력치로 하여 Elastic Theory로 두 현장조건에 대해 산정한 평판 크기별 침하량과 각각의 평판재하시험 실측치가 그림 2~5와 같다.

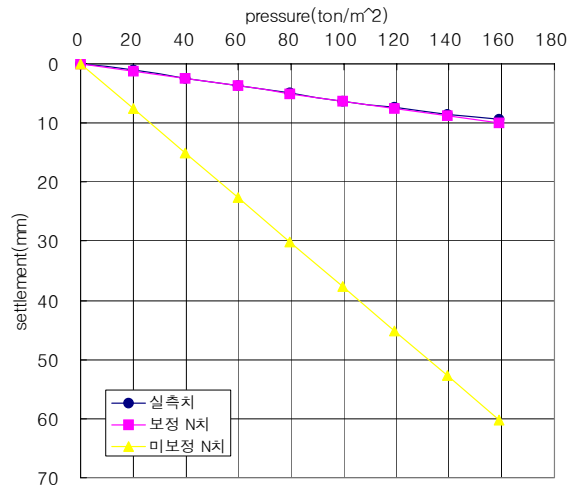
(1) 부산광역시 진구 ○○동(풍화암)



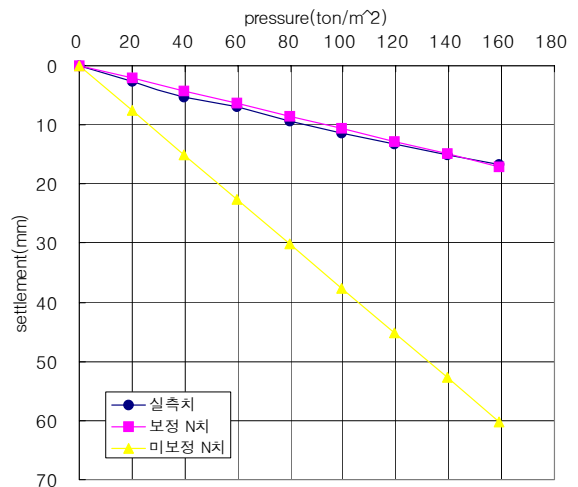
(a) 101동



(b) 102동

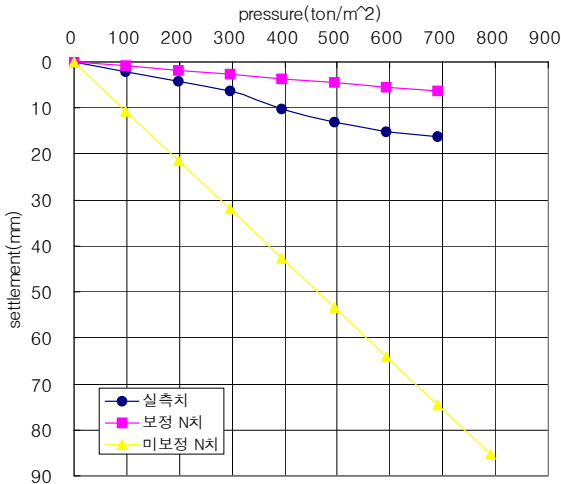


(c) 105동

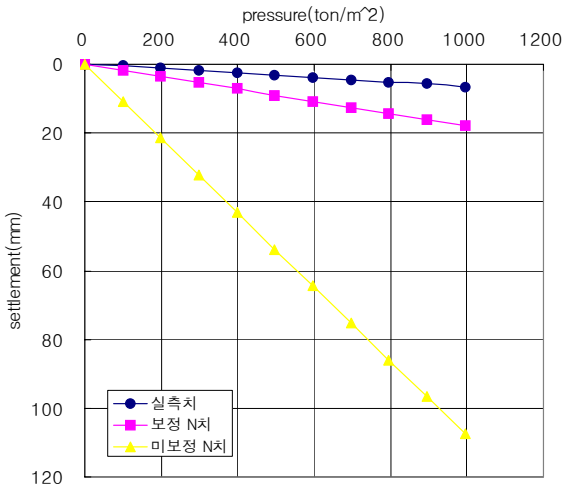


(d) 106동

그림 2. 실측치와 이론치 침하량 비교(평판 1.4×1.4m)



(a) 101-1동



(b) 105-1동

그림 3. 실측치와 이론치 침하량 비교(평판 0.4×0.4m)

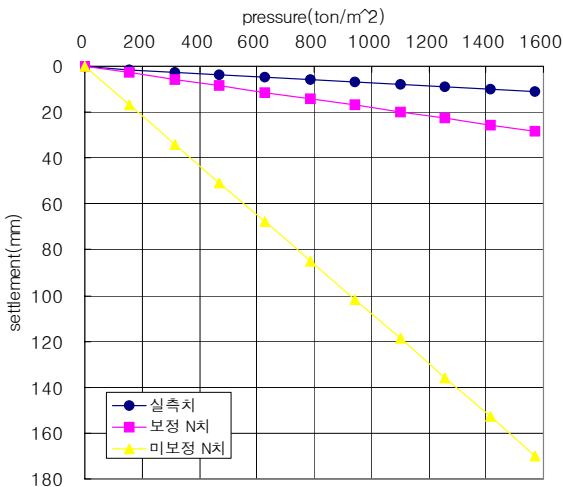
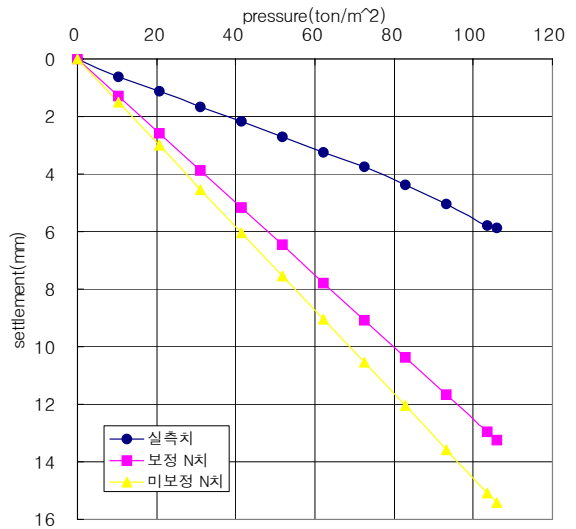
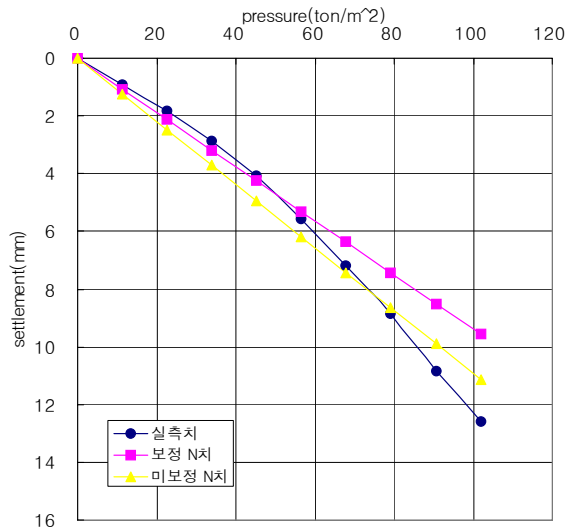


그림 4. 실측치와 이론치 침하량 비교(평판 0.3×0.3m, 105-2동)

(2) 성남-장호원간 ○○교(풍화토)



(a) PBT-2(평판 φ0.4m)



(b) PBT-1(평판 φ0.3m)

그림 5. 평판 크기별 실측치와 이론치 침하량 비교

두 현장의 현장 평판재하시험 실측치와 Elastic Theory로 산정한 이론치의 비교 그래프에서 풍화암에서의 결과가 풍화토에서보다 실측치와 이론치가 더 근접한 결과를 보이는 것은 50/9이상의 N치를 가지는 풍화암 지반이 풍화토 지반에 비하여 하중 재하시험보다 탄성에 가까운 거동을 보이기 때문으로 판단된다.

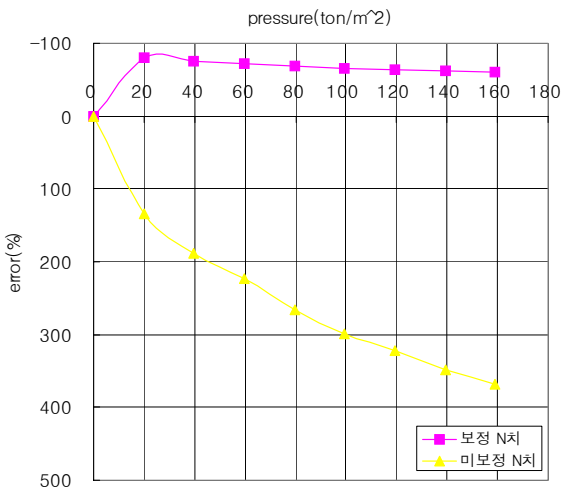
또한, 성남-장호원간 ○○교의 φ0.3m와 φ0.4m 평판의 결과를 보면 동일한 접지압에서 φ0.3m 평판이 더 큰

침하량을 보이고 있다. 이것은 시험상의 오류, 혹은 두 평판 중 보다 작은 $\phi 0.3m$ 평판이 시험시 Punching failure에 가까운 거동을 보인 때문으로 판단된다.

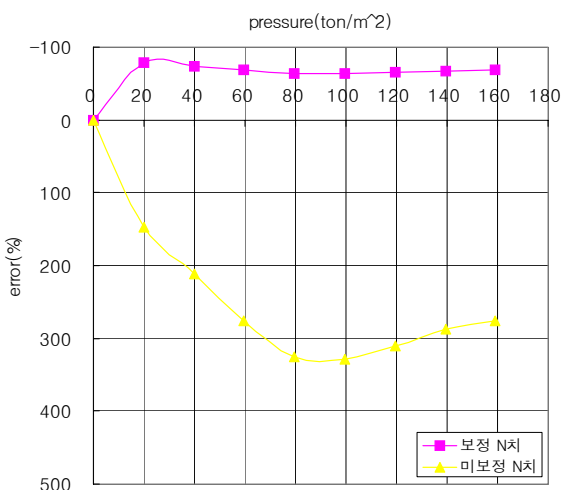
4.1.3 실측치에 대한 이론치의 error %

그림 2~5의 결과에서 보정 N치로 Elastic Theory에 의한 침하량을 산정시 효율성을 파악하기 위해 각각의 결과에 대한 error를 산정하였고 그림 6~9에 나타내었다.

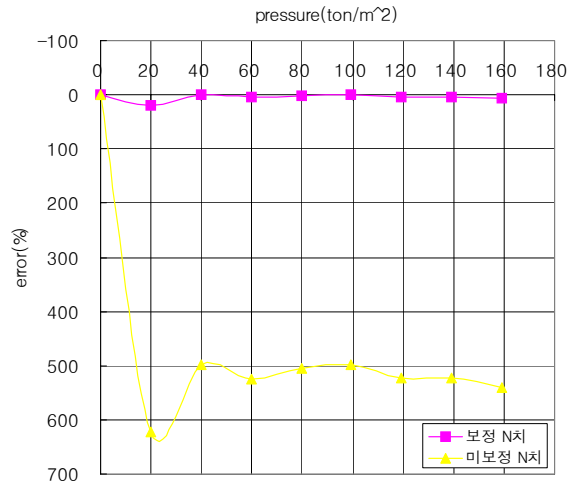
(1) 부산광역시 진구 ○○동



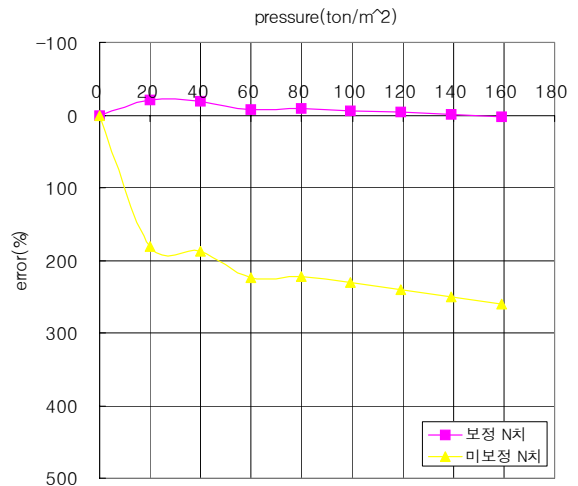
(a) 101동



(b) 102동

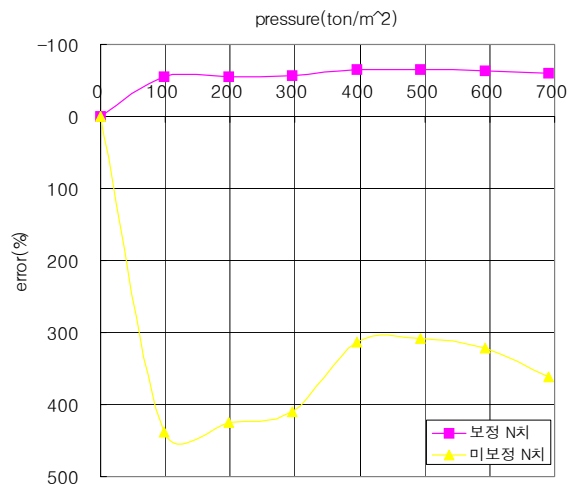


(c) 105동



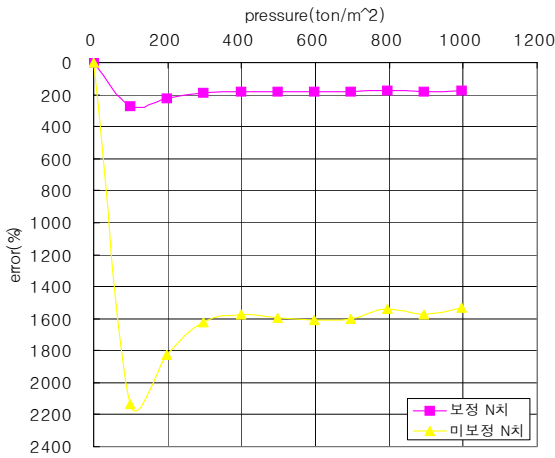
(d) 106동

그림 6. 실측치에 대한 이론치의 error % (평판 1.4×1.4m)



(a) 101-1동

그림 7. 실측치에 대한 이론치의 error % (평판 0.4×0.4m) (계속)



(b) 105-1동

그림 7. 실측치에 대한 이론치의 error %(평판 0.4×0.4m)

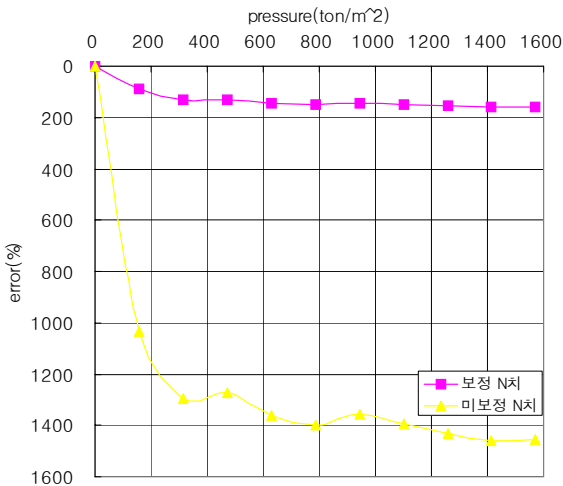


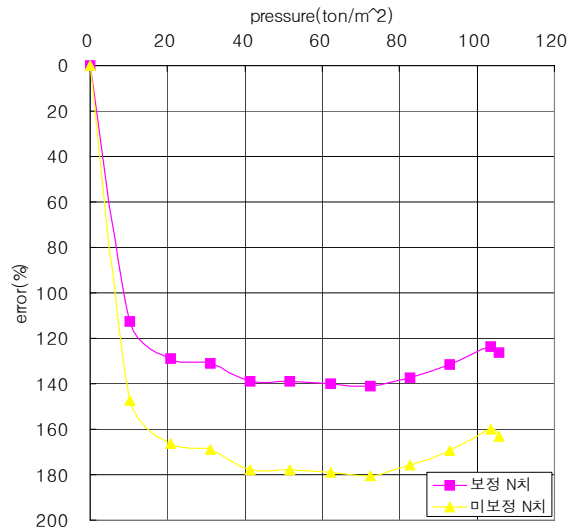
그림 8. 실측치에 대한 이론치의 error %
(평판 0.3×0.3m, 105-2동)

그림 6~8에서 보정 N치를 사용하여 산정된 침하량은 1.4×1.4m 평판에서 50t/m²이상, 0.4×0.4m와 0.3×0.3m 평판에서는 400t/m²이상에서 거의 일정한 error %를 나타낸다. 보정 N치에 의해 이론치가 실측치와 근접한 값을 가지기 때문에 하중 재하에 따른 error %가 거의 일정한 값을 가지게 되나 하중 재하 초기에는 그렇지 못한 것은 현장 평판재하시험을 위해 시험 심도까지 굴착했을 때 굴착에 의해 상재하중이 없어짐에 따른 시험 심도부근 지반의 팽창을 시험에서 반영하지 못한 때문으로 판단된다.

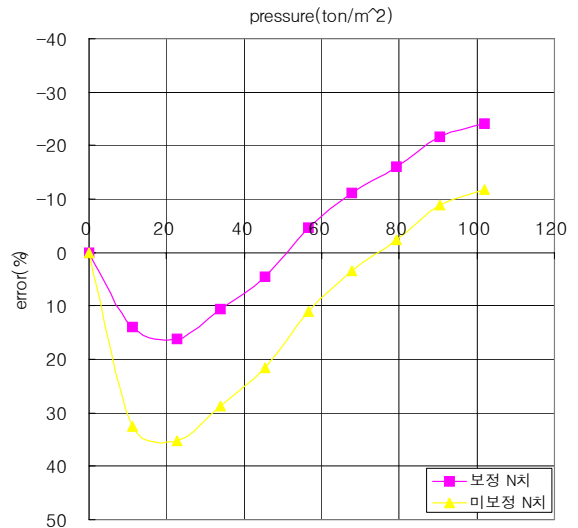
소형 평판이 더 큰 접지압에서 일정한 값을 갖는 것은 팽

창된 지반에 대해 소평 평판의 경우 대형 평판에 비해 하중 재하시 Punching failure에 가까운 거동을 보이기 쉽기 때문으로 판단된다.

(2) 성남-장호원간 ○○교



(a) PBT-2(평판 φ0.4m)



(b) PBT-1(평판 φ0.3m)

그림 9. 실측치에 대한 이론치의 error %

풍화도에 대한 결과인 그림 9는 본 연구에서 제시된 N치의 보정방법이 N치가 50/30 부근의 값을 가지는 경우 그 정확성의 증가가 50/9이상의 N치를 가지는 풍화도에 비해 현저히 떨어짐을 나타낸다.

4.2 실내 평판재하시험

4.2.1 모형 지반의 N치 산정

김(2002)은 모형 지반에 대해 실내시험에 의해 지반 물성치를 산정하였으나, 표준관입시험은 시행하지 않았다. 때문에 Elastic Theory에 의한 침하량 산정시 필요한 입력치인 N치가 조사되어 있지 않다.

침하량 산정을 위한 N치는 N치와 내부마찰각(ϕ)의 관계중 일반적으로 가장 많이 사용하는 Dunham, Terzaghi-Peck, Ohsaki의 관계식으로부터 산정하였다.

모형 지반에 사용된 모래의 입도분포가 균등하므로 Dunham의 관계식중 균등한 모래에 대한 관계식을 사용하였고, 김(2002)의 논문상에 입경에 관한 언급이 없으므로 둥근모양, 모난모양 두가지 모두에 대해 산정하였다.

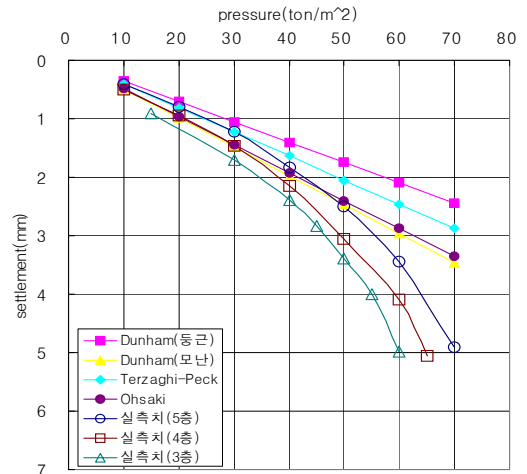
표 6은 모형 지반의 내부마찰각 $\phi = 34.9^\circ$ 로 N치를 역산한 것이다.

표 6. 모형 지반의 제안식 별 N치

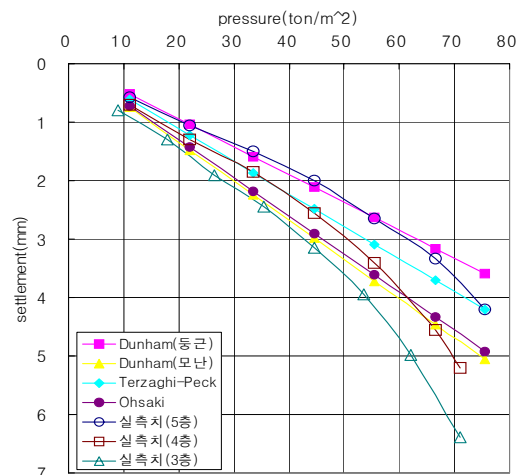
제안식		계산된 N치	적용 N치
Dunham	둥근입자	33.0	33
	모난입자	18.5	19
Terzaghi-Peck		26.3	26
Ohsaki		19.8	20

4.2.2 Elastic Theory에 의한 침하량

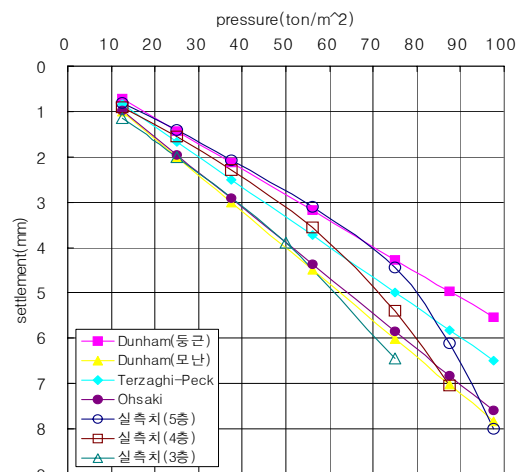
표 6에 산정된 제안식 별 N치로 Elastic Theory에 의한 침하량을 산정하였다. 산정된 이론치는 Dunham의 둥근입자일 때 최대값을 갖고 Dunham의 모난입자일 때 최소값을 갖는다. 이처럼 산정된 4가지의 N치로 구해지는 이론치를 예상 침하량 범위로 하여 실내 평판재하시험 실측치와 비교하여 Elastic Theory의 적용성을 검토하였다. 그림 10은 실측치와 이론치의 비교 그래프이다.



(a) 0.1×0.1m 평판



(b) 0.15×0.15m 평판



(c) 0.2×0.2m 평판

그림 10. 실내 평판재하시험 실측치와 이론치 비교

그림 10으로부터 실내 평판재하시험 실측가 평판 크기가 0.1m에서 0.2m로 증가함에 따라 내부마찰각(ϕ)으로 역산한 4가지 N치에 의한 침하량 예측 범위 내로 일치해 가는 경향을 보인다. 이중 0.1m 평판의 경우 침하량 예측 범위와 실측치가 크게 벗어났는데, 이것은 0.1m 소형 평판의 경우 크기가 작아서 하중 재하시 평판의 거동이 General failure보다 Punching failure에 가깝기 때문으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 얇은기초의 침하량 산정을 위해 기존에 제시된 이론식들 중 사질지반에서 Elastic Theory의 적용성을 판단하기 위하여 평판재하시험을 통해 실측된 data와 비교·분석을 하였고, N치가 50/30이상인 지반(풍화토, 풍화암)에서 Elastic Theory로 침하량 산정시 평판재하시험 실측치와의 error를 줄이기 위한 N치 보정 방법을 제시하였으며 그 결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

(1) 풍화암과 풍화토에 대해 보정 N치를 사용하여 침하량을 산정한 결과 1.4m 평판에서는 실측치에 비하여 과소평가 되거나 거의 일치하였으나, 0.3m와 0.4m 평판에서는 대체로 실측치에 비해 과대평가 되었다.

- (2) 보정 N치에 의한 침하량은 풍화암에서 시행된 1.4m 평판 재하시험 실측치와의 error %가 가장 작은 값을 나타내었다. 이것은 풍화암이 풍화토에 비해 하중 재하시 탄성거동에 가깝고, 0.4m이하 평판은 Punching failure를 동반하는 반면, 1.4m 평판은 General failure에 가까운 거동을 보이기 때문이다.
- (3) 풍화암에서 보정 전 N치의 침하량과 실측치의 최대 error는 260.4%~2136.5% 였으나, 보정 후 N치의 침하량과 실측치의 최대 error는 20.3%~272.7%로 본 연구의 N치 보정에 의해 error가 크게 감소하였다.
- (4) 풍화암에서의 error 산정결과 1.4m 평판에서는 50t/m² 이상, 0.4m와 0.3m 평판에서는 400t/m²이상에서 error가 일정한 값으로 수렴하였다.
- (5) 실내 평판재하시험 실측치는 평판 크기가 0.1m에서 0.2m로 증가함에 따라 4가지 N치에 의한 침하량 예측 범위에 일치해 가는 경향을 보였다. 0.2m이하 평판에서는 Punching failure를 동반하는 거동으로 예측치와 실측치가 큰 차이를 보였다.

(접수일자 : 2004년 8월 12일)

참 고 문 헌

1. 김도열(2002), 평판재하시험을 이용한 지지력 및 침하량 산정시 모래와 점토의 혼합비율에 따른 Scale Effect 연구, 한양대학교 대학원 박사학위논문.
2. 김원철(2003), 얇은기초의 극한지지력과 침하량에 대한 고찰, 2003 기초기술위원회 현장기술자를 위한 워크샵, 한국지반공학회, pp. 108~131.
3. 남현우(1999), 사질토 지반의 즉시침하량 산정방법 고찰, 한양대학교 산업대학원 석사학위논문.
4. 삼성물산 건설부분(2001.6) 성남-장호원간 도로개설(2공구) 건설공사 지반조사보고서.
5. 한국지반공학회(2002), 개정판 지반공학 시리즈 3 굴착 및 흙막이 공법, p. 57.
6. Bowles, J. E.(1987), Elastic foundation settlement on sand deposits, ASCE, Vol. 113, No. 8, August 1987, pp. 846~860.
7. Bowles, J. E.(1988), Foundation Analysis and Design, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, N. Y., pp. 183~194.
8. Briaud, J. L., and Jean jean, P.(1994), Load settlement curve method for spread footings on sand, '94 ASCE conference at Texas A&M university(FHWA), pp. 134~160.

9. Briaud, J. L., and Gibben, R.(1997), Large scale load test and data base of spread footings on sand, Rep. No. FHWA/RD-97-068, Federal Highway Administration, McLean, Va, pp. 124~140.
10. Mogan, J. R. and Gerrard, C. M.(1971), Equivalent linear model for predicting settlement of sand bases, ASCE, Vol. 97, No. SM12, pp. 1675~1699.
11. Montrasio, L. and Nova, R.(1997), Settlement of shallow foundations on sand : geometrical effect, Geotechnique 47. No. 1, pp. 49~60.
12. NAVFAC DM 7.1(1982), Soil Mechanics, Design Manual 7.1, Department of the Navy, Washington, DC., pp. 205~222.
13. Peck, R. B., Hansen, W. E., and Thornburn, T. H.(1974), Foundation Engineering, Second Edition, John Wiley and Sons, publisher, p. 457.
14. Schmertmann, J. H.(1970), Static Cone to Compute Static Settlement Over Sand, proceedings, American Society of Civil Engineers, 96, SM3, pp. 1011~1042.
15. Schmertmann, J. H., Hartmann, J. P. and Brown, P. R.(1978), Improved Strain Influence Factor Diagram, American Society of Civil Engineers, 104, GT8, pp. 1131~1135.
16. Terzaghi, K. and R. B. Peck(1948), Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley and Sons, New York, pp. 345~360.