

## 중간토에 지지된 직접기초의 설계 및 현장품질관리기법 개발

### Development of Design and Field Quality Control Techniques of Shallow Foundation Resting on Intermediate Geomaterials

변영기<sup>1)</sup>, Young-Gi Byun, 박영호<sup>2)</sup>, Youngho Park, 정훈준<sup>3)</sup>, Hoon-jun Jeong, 이우진<sup>4)</sup>, Woojin Lee

<sup>1)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Koera Univ.

<sup>2)</sup> 한국도로공사 도로교통연구원, 수석연구원, Research Director, Expressway & Transportation Research Institute, Korea Expressway Corporation

<sup>3)</sup> (주)지이엔씨 대표이사, President, GE&C Co. Ltd.

<sup>4)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학부 교수, Professor, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Koera Univ.

**SYNOPSIS** : To suggest a modified shallow foundation design method which can be considered the scale effect of foundation on IGM(intermediate geomaterial) soil layer, the weathered soil layer that is uniformly formed up to 8m(2B) with over 50 N-value is selected and 3 times field loading tests are performed on several sized square-shaped shallow foundations with 30, 75, 150, 240 and 400cm in width respectively. Because the soil modulus of elasticity( $E_s$ ) calculated by soil investigation and 1st field test(PBT) results showed an underestimated tendency, a modified correlation is required for the reasonable estimation of  $E_s$  on the weathered soil. Also, the N-value was increased with an increasing in depth. However, the N-values around the test foundations showed the different values even though the foundations on the same level because the test site was arranged by excavation. Therefore, the more detail soil investigations are required for the each test foundations respectively. Since  $E_s$  based on elasticity theory is determined by the stress distribution shape of the foundation and elasticity modulus of the soil, the scale effect considered pressure-settlement curve can be clearly derived from the correlation on stress distribution shape and the variation of soil elasticity modulus with depth. Therefore, the modified correlation will be suggested to estimate a reasonable  $E_s$  on the weathered soil, and the scale effect considered shallow foundation design method is also developed based on the elastic theory and field tests in this research.

**Keywords** : shallow foundation design method, scale effect, IGM, stress distribution shape

## 1. 서 론

일반적으로 구조물에 적용되는 직접기초는 주로 양호한 중간토(암편이 없는 고압착된 풍화토, 박영호, 2008) 이상의 지반에 지지된다. 그러나 국내에서는 중간토에 대한 공학적 분류 기준이 없고, 중간토에 지지된 직접기초에 대한 설계 및 해석 방법이 없어 중간토를 토사로 간주하여 실무에 적용해 과대 설계를 초래하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 화강풍화토 지반이 지표하 2B(기초의 폭) 이상 균질하게 분포하는 곳을 선정하여 현장시험(지반조사 및 평판재하시험)을 실시하고 결과를 분석하여 중간토 지반에 대한 분류기준을 제시하고, 중간토에 지지된 직접기초의 크기효과가 고려된 설계기법을 개발하고자 한다.

중간토에 지지된 직접기초의 설계기법을 개발하기 위하여 우선 여러 가지 크기의 기초에 대한 재하시험을 수행하였으며, 본 논문에서는 탄성이론에 기초하여 재하시험 결과를 분석하고, 직접기초의 침하량 산정 방법을 제시하였다.

## 2. 현장시험

"고속국도 45호선 중부내륙고속도로(여주~양평간) 건설공사 구간에 대해 화강풍화토가 8m(2B)이상 균질하게 분포하는 곳을 선정하여 지반 조사 및 평판재하시험을 수행하였다. 총 7공의 시추조사 수행되었으며 시추 위치 및 현장 전경은 아래 그림과 같다.

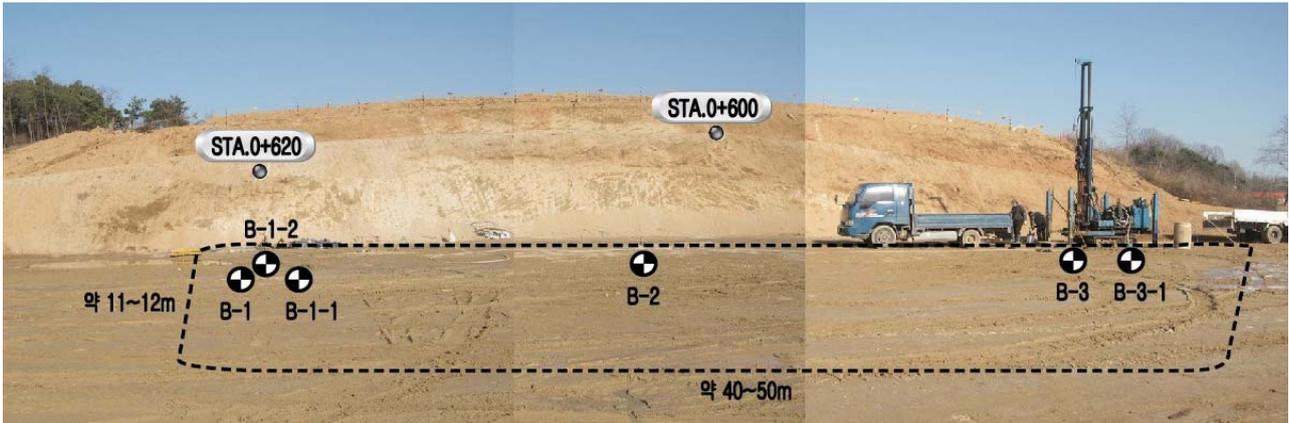


그림 1 현장전경

### 2.1 지반조사

시추조사와 병행하여 SPT, CPT, DMT, PMT 등 다양한 현장시험이 계획되었으나, CPT와 DMT는 지반이 매우 단단하여(반력부족) 시험이 불가능 하였으며, PMT 시추공벽 교란으로 인하여 유효한 시험 결과를 얻기 어려웠다.

SPT 시험 결과를 보았을 때 지반의 탄성계수는 심도에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며 그 결과는 아래와 같다.

표 1. 시추조사 결과

시추공번	굴진장(m)				
	풍화토	풍화암	연암	경암	계
B-1	8.1	1.9	-	5.0	15.0
B-1-1	8.0	-	-	-	8.0
B-1-2	8.5	-	1.0	-	9.5
B-2	8.8	0.7	6.5	-	16.0
B-3	6.8	1.5	1.2	-	9.5
B-3-1	7.5	3.0	1.8	1.7	14.0
계	47.7	7.1	10.5	6.7	72.0

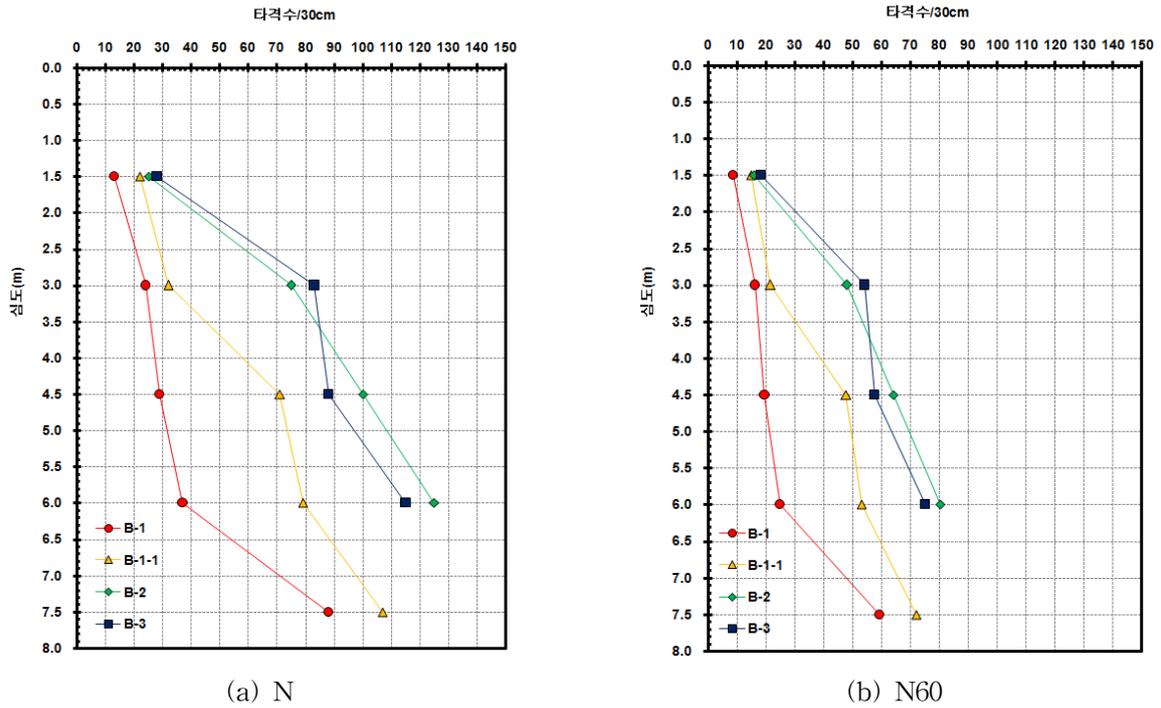


그림 2. SPT 결과 (30cm 관입 환산타격수, blows/30cm)

표 2. 심도-N치 상관관계

공번	Z(m, 심도) - N치 관계식	비고
B-1	$N(z) = 3.5 \times Z + 4.5$	· 절토경계, 점토광물 혼재
B-1-1	$N(z) = 9.2 \times Z + 5.0$	· 점토광물 혼재
B-2	$N(z) = 12.2 \times Z + 10.0$	
B-3	$N(z) = 12.5 \times Z + 10.0$	· 절토 경계부 근처

## 2.2 평판재하시험

여러 가지 크기의 정방형 기초(□15, □20, □30, □75, □150, □240, □400; cm)에 대하여 재하시험을 실시하였으며, 재하시험 제원 및 현장배치도는 아래와 같다.

표 3. 재하시험 제원

재하관 제원	근입깊이 (m)	최대시험압력(tonf/m <sup>2</sup> )		반 력
		계획	수행	
0.30m×0.30m×0.03m steel plate	0	889	555.56	앵 커
0.75m×0.75m×0.04m steel plate	0	338	551.11	
1.50m×1.50m×0.04m steel plate	0	356	244.44	
2.40m×2.40m×0.05m steel plate	0	400	116.32	
4.00m×4.00m×1.50m 철근콘크리트	0	313	109.38	
0.20m×0.20m×0.03m steel plate	0	-	275.00	덤프 트럭
0.15m×0.15m×0.03m steel plate	0	-	586.67	

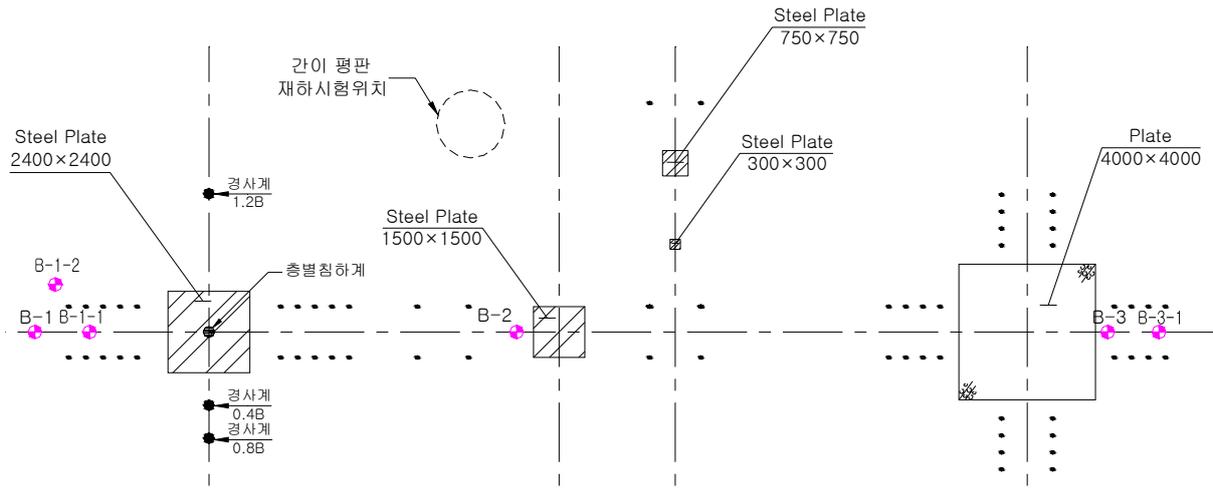


그림 3. 재하시험 배치도

Loading 및 Reloading에 대하여 압력-침하관계를 분석 하였으며, 그 결과는 아래 표와 같다. 압력-침하관계는 선형 거동을 보이고 있으며, 선형하중을 기준으로 기울기가 변화하는 것으로 나타났다. 선형상재하중은 약  $0.355 \sim 2.504 \text{ kgf/cm}^2$ 로 산정되었다. 최대 절토고가 8m 전후인 것을 고려한다면 선형상재중은 절토 하중인 것으로 판단되며,  $\square 30\text{cm}$  및  $\square 20\text{cm}$  재하판에서 상재하중이 크게 나타나야함에도 불구하고 작게 산정된 것은 시험전 미리 유압잭 등의 장비가 재하판에 설치되어 하중으로 작용했기 때문인 것으로 판단된다.

표 4. 압력-침하관계 분석

재하판 제원	초기 재압축구간	처너 압축구간	선형하중 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	압력-침하 곡선 $S$ (침하량):cm, $p$ (압력: $\text{kgf/cm}^2$ )
$\square 30\text{cm}$	$S = 0.206p$	$S = 0.2273p - 0.0482$	0.355	
$\square 75\text{cm}$	$S = 0.178p$	$S = 0.4577p - 0.3844$	1.994	
$\square 150\text{cm}$	$S = 0.5815p$	$S = 2.2534p - 2.0685$	1.251	
$\square 240\text{cm}$	$S = 1.1275p$	$S = 4.4941p - 6.9034$	2.504	
$\square 400\text{cm}$	$S = 0.8206p$	$S = 3.3897p - 3.5379$	1.378	
$\square 20\text{cm}$	-	$S = 0.2664p + 0.3811$	-	
$\square 15\text{cm}$	$S = 0.0561p$	$S = 0.2258p - 0.4133$	0.627	

## 2.3 현장시험 결과 분석

### 2.3.1 등가 탄성계수 및 등가 N치

압력-침하곡선의 기울기인 변형계수( $E_{B \times B}$ , 지반반력계수의 역수)를 이용하여 역산한 등가 탄성계수와, 등가 N치(이우진, 1998)를 이용하여 N치와 탄성계수의 상관관계를 도출하였으며, 이를 이용하여 재하판 별로 하중 침하곡선을 추정하고 실제 시험 값과 비교 분석하였다.

등가 탄성계수 및 등가 N치를 산정하기 위하여 Terzaghi et al.(1996)의 변형률 영향계수 분포를 이용하였으며, 산정하는 방법은 다음과 같다.

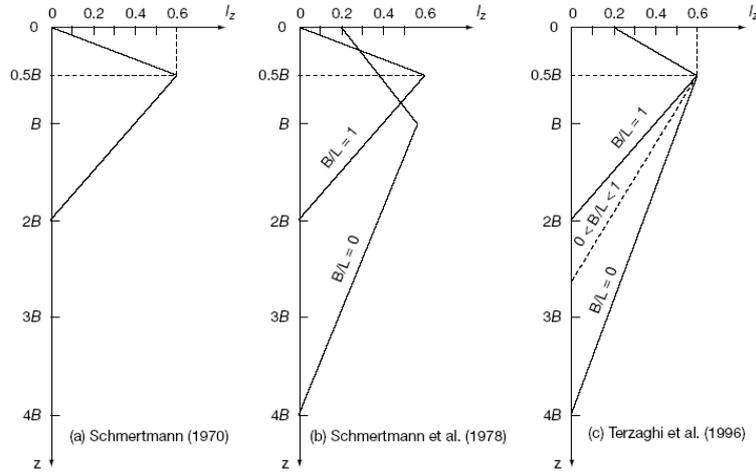


그림 4. z(심도) - Iz(영향계수) 상관관계

깊이에 따른 변형률 영향계수의 분포와 N치의 분포를 각각  $I_z$ ,  $N(z)$  이라고 할 때 폭이 B인 정사각형 직접기초의 침하량은 다음 식으로 산정할 수 있다.

$$S_{B \times B} = \int_0^{2B} \epsilon_z dz = q \int_0^{2B} \frac{I_z}{E_z} dz = q \int_0^{2B} \frac{I_z}{\alpha N(z)} dz \quad (1)$$

윗식으로 산정된 침하량과 동일한 침하량을 주는 상수값 N치를 등가 N치( $N_{eq}$ )라고 하면,

$$S_{B \times B} = q \int_0^{2B} \frac{I_z}{\alpha N(z)} dz = q \int_0^{2B} \frac{I_z}{\alpha N_{eq}} dz \quad (2)$$

따라서, 등가 N치는 다음 식으로 산정된다. 등가 탄성계수는 동일한 방법으로 산정할 수 있다.

$$N_{eq} = \frac{\int_0^{2B} I_z dz}{\int_0^{2B} \frac{I_z}{N(z)} dz} = N \simeq \frac{\sum I_z \Delta z}{\sum \frac{I_z}{N(z)} \Delta z} \quad (3)$$

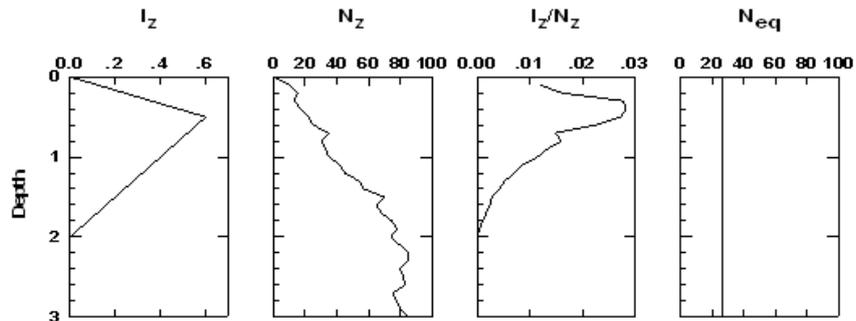


그림 5. 등가N치의 개념(이우진, 1998)

### 2.3.2 등가 N치 산정

당 현장시험에서의 등가 N치는 다음과 같다.

표 5. 등가 N치

재하판	N(z)	N <sub>eq</sub>
□30cm	N(z) = 12.3×Z + 40.0	42.8
□75cm	N(z) = 12.3×Z + 46.0	52.9
□150cm	N(z) = 12.2×Z + 10.0	21.6
□240cm	N(z) = 9.2×Z + 5.0	17.5
□400cm	N(z) = 12.5×Z + 4.0	37.9
□20cm	N(z) = 12.3×Z + 22.0	23.9
□15cm	N(z) = 12.3×Z + 21.0	22.4

### 2.3.3 등가 탄성계수 및 변형계수 산정

압력-침하곡선의 기울기인 변형계수( $E_{B \times B}$ , 지반반력계수의 역수)를 이용하여 역산한 등가 탄성계수와, 등가 N치를 이용하여 산정한 탄성계수를 비교 분석한 결과 정규압밀(OCR=1)인 경우  $E=2N(\text{kg}/\text{cm}^2)$ , 과압밀(OCR>1)인 경우  $E=8N(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 으로 나타났다.

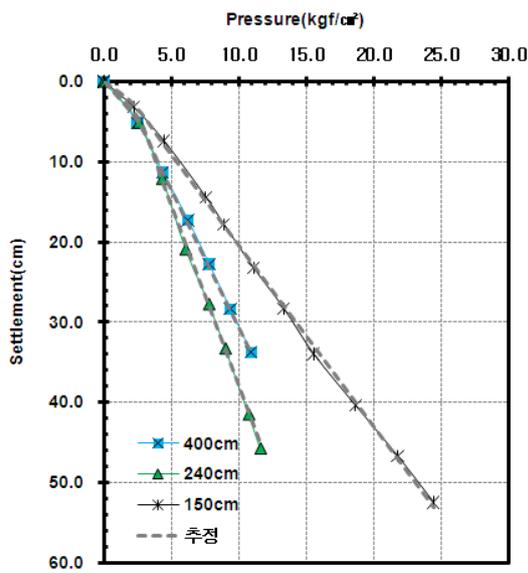
$$E_{eq} = 0.65 \frac{B}{E_{B \times B}} \quad (4)$$

표 6. 탄성계수 비교분석

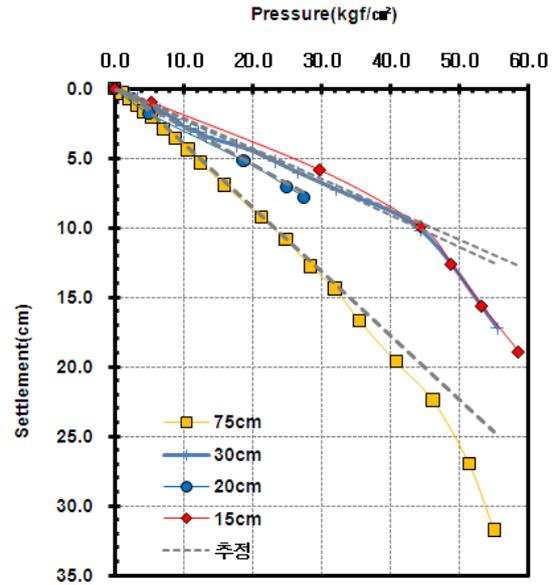
재하판	변형계수 ( $E_{B \times B}$ , $\text{cm}^3/\text{kgf}$ )		역산 등가 탄성계수 ( $E_{eq}$ , $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )		$N_{eq}$ 에 의한 등가 탄성계수 ( $E_{eq}$ , $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	
	OCR>1 (재압축)	OCR=1	OCR>1 (재압축)	OCR=1	OCR>1 (재압축)	OCR=1
□30cm	0.0563	0.2273	346.359	85.790	342.400	85.600
□75cm	0.1780	0.4577	272.956	106.511	423.200	105.800
□150cm	0.5815	2.2534	167.670	43.268	172.800	43.200
□240cm	1.1275	4.4941	138.359	34.712	140.000	35.000
□400cm	0.8206	3.3897	316.841	76.703	303.200	75.800
□20cm	-	0.2664	-	48.799	-	47.800
□15cm	0.0561	0.2258	173.797	43.180	179.200	44.800

### 2.3.4 N치를 이용한 침하량 추정

N치를 이용하여 탄성계수를 산정하고, 압력-침하곡선을 추정하여 실제 시험 값과 비교 분석하였다. N치가 심도에 따라 선형적으로 증가하는 것을 고려하고 선행상재하중 값을 고려하여 곡선을 추정하였을 때 실세시험 값과 비교적 잘 일치하였다.



(a) 150~400cm



(b) 15~75cm

그림 6. 압력-침하곡선 추정

### 3. 결론

중간토에 지지된 직접기초의 설계기법을 개발하기 위하여 화강풍화토가 균질하게 분포하는 지반에 대하여 지반조사 및 평판재하시험을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

(1) 화강풍화토가 균질하게 분포하는 지반의  $N$ 치는 심도에 따라 선형적으로 증가하였다.  $N(z)=N_0(\text{상수})+\beta z$ 로 나타낼수 있으며, 과압밀된 화강풍화토의 탄성계수는  $E=8N(\text{kgf/cm}^2)$ , 정규압밀된 화강풍화토의 탄성계수는  $E=2N(\text{kgf/cm}^2)$ 으로 산정되었다. 즉, 과압밀된 화강풍화토의 탄성계수가 정규압밀된 화강풍화토의 탄성계수 보다 약 4배 정도 크게 나타났다.

(2) 직접기초의 압력-침하 관계는 선형적으로 나타났으며, 선행상재하중을 기준으로 압력-침하 곡선의 기울기가 급격히 변화였다. 따라서, 직접기초의 침하량 산정시 선행상재하중의 결정은 매우 중요하다.

(3) Terzaghi et al.(1996)의 변형률 영향계수 분포를 준으로,  $N$ 치를 이용하여 압력에 대한 침하량을 추정하였는데, 실제 시험 결과와 유사하게 추정되었다.

### 참고문헌

1. 박영호(2005), 반일체식 직접기초 교대의 크기효과 산정을 위한 재하시험, 한국도로공사 도로교통연구원, 경기도
2. 박영호, 남문석, 김국한, 윤진근(2007), "평판재하시험을 이용한 풍화토에 지지된 얽은기초의 크기효과 연구", 대한토목학회, 2007년도 정기학술대회 논문집, pp.4354~4357
3. 이우진(1998), "얽은기초의 침하량 산정을 위한 등가  $N$ 치의 결정", 한국지반공학회, 1998년도 가을학술발표회
4. Braja M. Das and Nagaratnam Sivakugan(2007), "Settlements of shallow foundations on granular

soil - an overview"International Journal of Geotechnical Engineering, 1, 19-29

5. Mayne, P.W., and Poulos, H.G. (1999). "Approximate displacement influence factors for elastic shallow foundations."J. Geotech. and Geoenviron. Eng., ASCE, 125(6), pp.453-460.
6. Schmertmann, J.H. (1970). "Static cone to compute static settlement over sand." J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 96(3), 1011-1043.
7. Schmertmann, J.H., Hartman, J.P., and Brown, P.R. (1978). "Improved strain influence factor diagrams." J. Geotech. Eng. Div., ASCE, 104(8), 1131-1135.
8. Terzaghi, K., Peck, R.B., and Mesri, G. (1996). Soil mechanics in engineering practice, 3rd Edition, John Wiley & Sons Inc., New York.