

사각 피라미드 기초의 침하 안정성에 관한 연구

김성필¹, 김두환^{2*}, 송관권³, 이기선⁴, 김정훈⁵

A Study on the Stability of Subsidence for the Foundation of Rectangular Pyramid

Seong-Pil Kim¹, Doo-Hwan Kim^{2*}, Kwan-Kwon Song³, Ki-Sun Lee⁴, Jeong-Hoon Kim⁵

Abstract: In this study, the settlement of concrete rectangular pyramid foundation on soft ground is investigated based on a finite element analysis. considering the grounding load and the grounding area of square pyramid foundation, we compensate the insufficient design bearing capacity and investigated the effect of settlement by load. Based on this study, it is found that the rectangular pyramid foundation shows the smallest settlement of three different type of foundations. As a result of this study, it was resulted that the square pyramid foundations were more effective than the crushed stone foundations by 18%. These results show that the ground pressures of the square pyramid bases are divided into horizontal and vertical stresses, so it is analyzed that the horizontal stress builds up the rigid ground on the foundation of the structure and distributes the load widely to increase the resistance to the overhead load.

Keywords: Soft ground, Rectangular pyramid foundation, Bearing capacity, Consolidation settlement

1. 서 론

건물의 기초는 하중을 받게 되면 지반의 침하나 측방유동, 전단변형이 발생하게 된다(Korean Geotechnical Society, 2009). 이러한 구조물의 변형의 원인은 주로 지반의 불균질성과 지층구조 차이의 파악이 부족함에 따라 발생하는 경우가 대부분이다.

일반적으로 지반은 기반암의 생성원인과 풍화의 영향, 지하수의 존재 유무, 환경적 요소 등에 의해 많은 영향을 받는다. 그래서 동일한 지역이라 할지라도 위치에 따라 지반의 층 두께, 강도, 압축특성 등이 다르게 나타나는 경우가 대부분이다. 따라서 지반의 지지력 및 침하 특성을 파악하기 위해서는 충분한 지반조사를 실시하여 구조물이 설치될 영역의 지반 공학적 특성을 충분히 파악하여야 한다.

기존 팽이기초공법(Revision of Japan Maigoma Industrial Association, 1988)은 주로 횡방향 유동의 방지에 따른 침하의

억제와 지지력의 증대로 내하력 증진 효과를 기대할 수 있기 때문에 이 공법으로 시공된 몇몇의 구조물에서 상당한 양의 침하량 감소 및 지지력 증대의 효과가 나타난 것으로 보고된 바 있다(EST construction co., ltd, 2006).

사각 피라미드 기초는 팽이기초공법과 모양 및 형태는 다르나 메커니즘이 비슷하고 아직까지 국내에 소개된 바가 없고, 팽이기초의 경우에는 완제품을 제작하여 운반하며, 그 형상의 특성 상 시공 시 파손 및 정밀 시공의 어려움이 있으나 피라미드기초의 경우에는 PE로 폼을 제작하여 현장에서 타설을 실시하여 파손의 위험이 없고 시공 가능성 등의 측면을 고려하여 공법개량을 통해 지반의 침하량 감소 및 지지력 증대를 추구한 기초공법이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 사각 피라미드 기초의 구조 및 시공 방법, 수치해석 결과를 통한 사각 피라미드 기초의 역학적 거동 및 특성에 대해 살펴보고, 일반적으로 설계에 적용되는 기존의 침하량 산정에 대해 연구를 통해, 정확한 평가 자료를 제출함으로써 구조물 설계 시 기초 지지력 및 침하에 대한 안전성 증대의 효과를 기대하고자 하였다.

2. 사각 피라미드 기초의 기본 이론

2.1 공법의 개요

사각 피라미드 기초는 시공이 간편하면서도 지반의 측방

¹정회원, ㈜한승엔지니어링 대표이사, 서울과학기술대학교 강의교수

²정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 교수·공학박사, 교신저자

³정회원, ㈜진온이엔시 대표이사, 서울과학기술대학교 강의교수

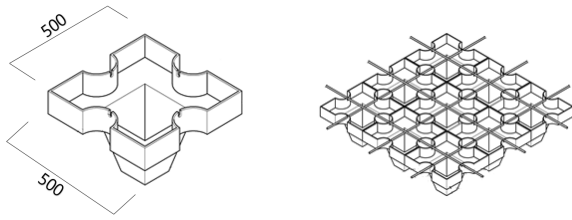
⁴정회원, ㈜평화엔지니어링 교량기술부 과장

⁵정회원, (주)에스텍건설그룹 기술연구소 차장

*Corresponding author: kdh6504@seoultech.ac.kr

Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science & Technology

•본 논문에 대한 토의를 2018년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.



(a) Square pyramid shape (b) Square pyramid mounting section

Fig. 1 Square pyramid foundation installation drawing

Table 1 Shape factor of pyramid foundation

Shape Factor of Foundation	Continuous	Square	Rectangle	Circle
α	1.0	1.3	$1.0+0.3Bk/Lk$	1.3
β	1.0	0.6	$1.0-0.4Bk/Lk$	0.3

변형 억제와 지반의 지지력 증대는 물론이고 구조물의 전체 침하와 부등 침하를 억제할 수 있는 특징을 갖고 있다. 따라서 시공 장소의 협소와 대형장비의 시설에 구애받지 않고 시공이 가능하며, 건설 공해가 없고 흡진 및 방진 효과가 있다. 토목 또는 건축구조물의 기초에 본 사각 피라미드 기초공법의 적용이 가능하나, 그 중 구조물의 하중이 크지 않은 중소 규모의 구조물에 적용이 보다 적합하다.

현재까지는 연약 지반상에 구조물 축조할 때 지반의 지지력이 부족한 경우 상재 하중의 크기에 관계없이 말뚝기초를 사용하는 등 과잉설계의 소지가 있다(Kim, 2009). 그러나 상재하중이 그다지 크지 않은 구조물의 기초로 본 공법을 적용하게 되면 경제적이며 시공성이 우수하고 간편하다.

본 공법 구조물의 기초는 연약지반의 표면처리용 강성매트 기초공법이며 형상은 Fig. 1과 같다. 적용 가능한 범위는 성토 및 노반의 기초, 수리 구조물의 기초, 암거, 맨홀의 기초, 교량(교대 및 교각)기초, 철탑의 기초, 옹벽(안벽)의 기초, 건물(주택)의 기초, 가설 구조물의 기초에 적용될 수 있다.

2.2 피라미드기초의 허용지지력 검토

피라미드 기초 적용시 기초지반의 허용지지력은 Terzaghi 식(Terzaghi and Peck, 1967)을 변형한 식(1)로 구할 수 있다.

$$qka = \frac{1}{F} K_1 K_2 \{ \alpha CN_c + \beta \gamma_1 B_k N_r / 2 + P_0 N_q \} \quad (1)$$

식 (1)에서, α , β 는 기초의 형상계수로 Table 1(C.g Engineering & Consulting Co., Ltd, 2009)과 같고, P_0 는 상재하중, γ_1 , γ_2 는 흙의 단위체적 중량, C 는 점착력, BK , LK 는 편심하

Table 2 Bearing capacity factor of pyramid foundation

θ ($^\circ$)	N'_c	N'_q	N'_r
0	5.0	1.0	0.10
5	6.3	1.6	0.17
10	8.0	2.5	0.53
15	11.5	4.0	1.40
20	15.0	6.3	3.00
25	20.0	11.0	6.50
30	30.0	18.0	15.00
35	46.0	32.0	35.00
40	73.0	63.0	86.00
45	130.0	130.0	220.00

Table 3 Allowable bearing capacity increase factor

Ground Conditions	Cohesive Soil	Sandy Soil
Diameter of Pyramid Foundation(mm)	500x500	
Strip Foundation	1.0	1.0
Rectangle Foundation	If the area is larger than $6.25m^2$	1.0

중을 고려한 피라미드기초의 유효재하 단면, 장변(m), B , L 은 상부기초의 유효재하 단면, 장변(m)이다. 지반토질의 지지력 계수인 N_c , N_r , N_q 는 Table 2(C.g Engineering&Consulting Co., Ltd, 2009)와 같이 산정 할 수 있다.

식 (1)에서 k_1 , k_2 는 피라미드기초 적용시의 응력분산효과를 나타내는 계수로 다음 식 (2, 3)에서 구한다.

$$K_1(\text{연속}) = (BK + 2H \tan \omega) / (B) \quad (2)$$

$$K_1(\text{장방향}) = (BK + 2H \tan \omega) \cdot (LK + 2H \tan \omega) / (B \cdot L) \quad (3)$$

단, 기초 폭이 2.5 m(연속), 4.0 m(장방향)보다 작은 경우는 과다 설계 우려가 있으므로 K_1 (연속)은 1.20, K_1 (장방향)은 1.50 적용한다(C.g Engineering&Consulting Co., Ltd, 2009). 또한, K_2 의 경우에는 기초의 접지압 분포를 고려할 필요가 없는 경우에 허용지지력 증가계수로 팽이기초공법의 계수를 변형한 Table 3(C.g Engineering&Consulting Co., Ltd, 2009)과 같이 적용한다.

3. 사각 피라미드 기초의 기본 이론

3.1 수치해석 개요

본 연구에서 사용한 전산 프로그램 VisualFEA/GEO Ver5.02 (SYTec Enc. Co., Ltd, 2003)을 이용하여 지반 조건에 따른 압밀 침하 효과를 확인할 수 있도록 메쉬를 구성하였다.

지층은 상부로부터 매립층(퇴적토층), 실트질 점토, 실트질 모래, 풍화토, 풍화암층이고 지하수위는 GL-2.90 m에 위치하며 연약지반에 상부 GL-0.70 m 구간에서 사각 피라미드 기초 1.0 m×1.0 m(4×4열)을 설치하고 몸체부 사이에 쇠석을 설치하여 인터페이스 요소 조건을 고려 하였다.

수치모델의 경계는 직육면체(20 m×20 m×28 m)경계를 사

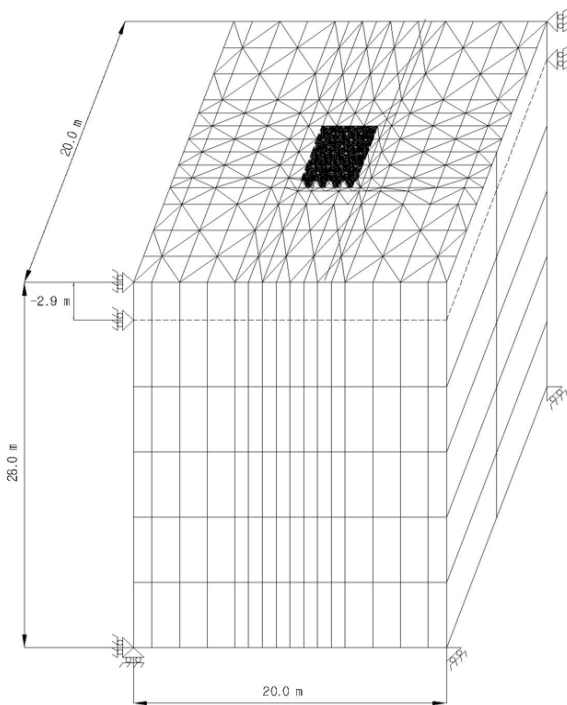


Fig. 2 Analysis modeling(geometry)

용하였으며 해석 모델의 경계는 변위가 발생하지 않는 충분한 범위에 대하여 Fig. 2와 같이 모델링 하였다.

적용 하중은(150 kN/m²) 현장 조건을 바탕으로 최대한 동일한 수치해석을 실시하고, 해석 단계는 구조물의 시공단계에 따라 초기 원지반 상태를 반영하였으며, 사각 피라미드 기초 시공 및 하중재하와 압밀 해석 순으로 수행하였다.

해석 과정에 사용된 평면도 및 단면도는 Fig. 3에 나타내었다.

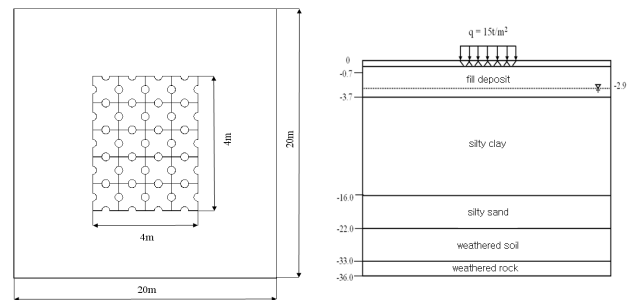
3.2 해석에 적용된 지반 물성

본 연구에서는 지반을 Mohr-Coulomb의 구성 법칙을 만족시키는 재료로 가정하였으며, 탄성계수 및 점착력, 내부 마찰각을 달리하여 점성토 및 사질토 등 기초가 적용되는 지반을 모사 및 해석하였다.

여러 기준에 따라서 최대 및 최소 범위의 대표적인 연약 점성토와 사질토의 물성 값을 Table 4(Kim, 2009)와 같이 산정하였다.

3.3 수치해석 결과

Figs. 4(a), (b)는 구조물의 자중으로만 침하된 탄성침하량과 하중을 적용하여 발생한 압밀침하량을 해석한 것이며 총 침하량은 4.53 cm가 발생 되었고, Fig. 4(c)는 하중에 의한 과



(a) Analysis floor plan

(b) Analysis cross section

Fig. 3 Analysis floor plan and analysis cross section

Table 4 Calculation of soil properties

Division	Unit weight (kN/m ³)	Modulus of elasticity (kPa)	Poisson's ratio	Cohesion (kPa)	Angle of internal friction(°)	Hydraulic Conductivity (m/day)
Pyramid foundation	23	2.01x10 ⁷	0.167	-	-	-
Spread foundation	23	2.01x10 ⁷	0.167	-	-	-
Filled crushed stone	19	5.0x10 ⁴	0.35	0	42	0.2
Fill deposit	19	1.5x10 ⁴	0.3	10	28	0.1
Silty clay	16	8.45x10 ³	0.3	40	0	0.0008
Silty sand	16	5.1x10 ³	0.3	5	28	0.004
Weathered Soil	20	7.0x10 ⁴	0.33	20	33	0.01
Weathered rock	22	3.8x10 ⁵	0.25	30	35	0.02

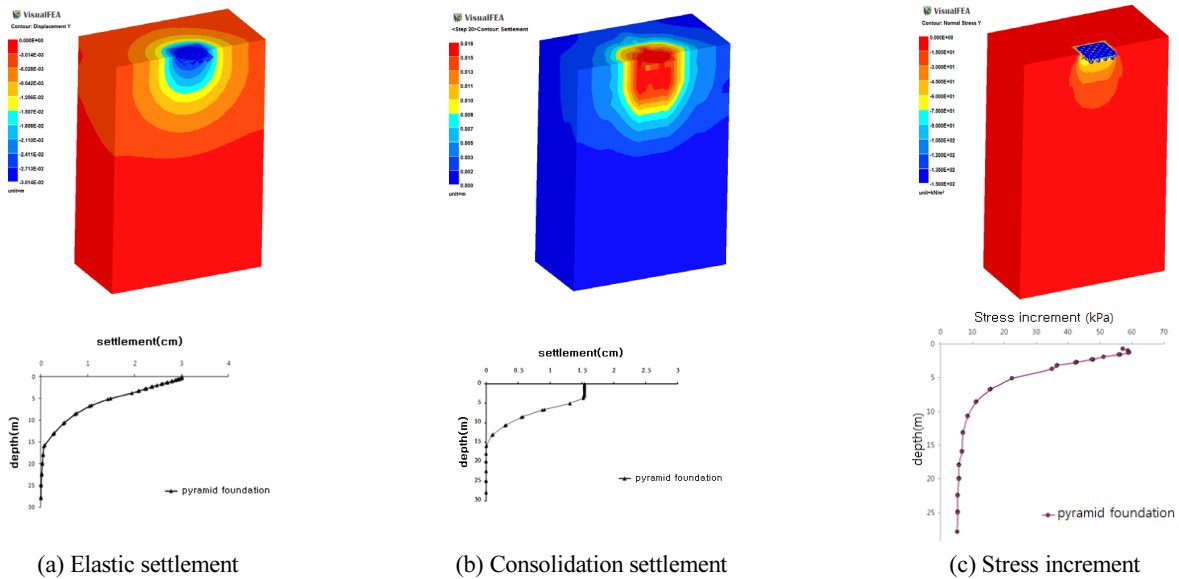


Fig. 4 Analysis result of square pyramid foundation

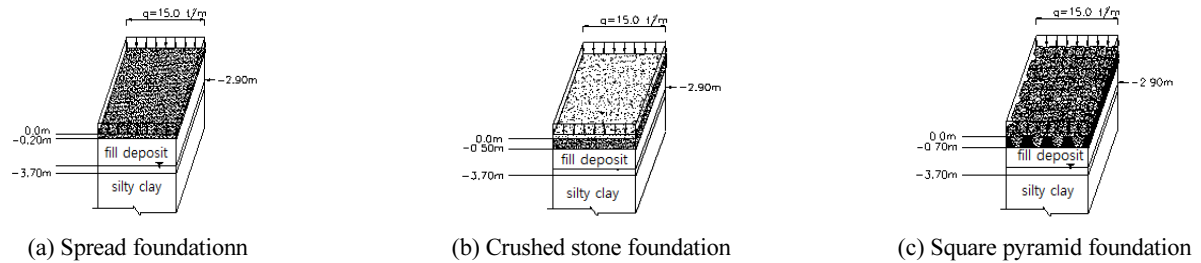


Fig. 5 Analysis modeling of foundation

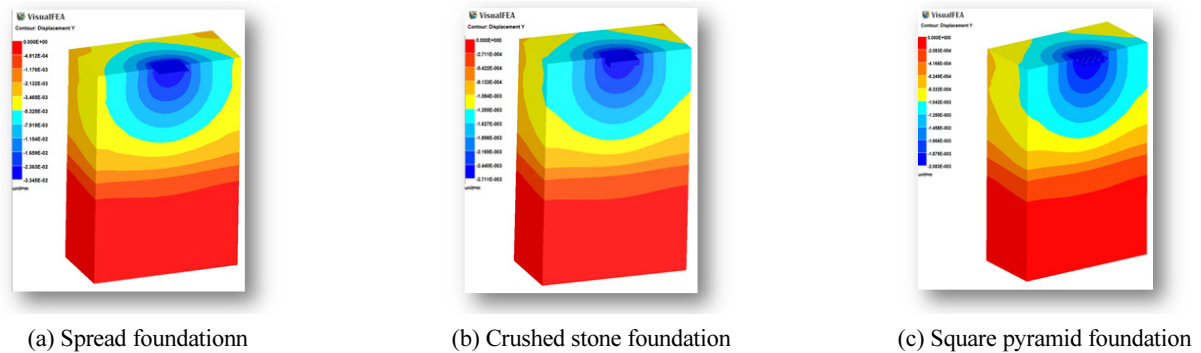


Fig. 6 result of Elastic Settlement

잉간극수압을 보인 것이다.

Fig. 4(c)는 지반의 응력 증분을 보인 것이며, 하중 분산 작용에 의하여 기초 하부의 응력 증분은 60 kPa로 하중 150 kPa의 40%인 것으로 해석 되었다.

이는 기초완료 후 채움 쇄석의 하중 분산 효과로 체적 변화가 없는 상태에서 발생하는 압밀 침하는 억제할 수 있는 것으로 기대할 수 있다.

4. 기초 형식에 따른 침하 비교 분석

4.1 하중에 의한 침하량 분석

본 연구에서는 Figs. 5(a), (b), (c)를 Fig. 2와 같이 직육면체 (20 m×20 m×28 m)로 모델링하여 각각의 기초 형식에 의한 탄성 침하량을 Figs. 6, 7과 같이 비교하였다.

Fig. 6(a) 기초의 탄성 침하량은 3.62 cm, Fig. 6(b) 기초의 탄성 침하량은 3.41 cm, Fig. 6(c) 기초의 탄성 침하량은 3.01 cm 로 침하량이 발생 하였다.

Fig. 6(a)를 기준(100%)할 때 탄성 침하량의 발생이 Fig. 6(b)는 92%이고, Fig. 6(c)는 83%로 해석 되었다. Fig. 7은 탄 성침하량을 비교한 결과그래프이다.

압밀 침하량은 Fig. 8(a)의 경우 2.69 cm, Fig. 8(b)의 경우 2.15 cm, Fig. 8(c)의 경우는 1.54 cm로 발생되었다.

Fig. 8(a)를 기준(100%)할 때 침하량의 발생이 Fig. 8(b)는 80%, Fig. 8(c)는 57%로 해석 되었다.

Fig. 9는 탄성침하량을 비교한 결과그래프이다.

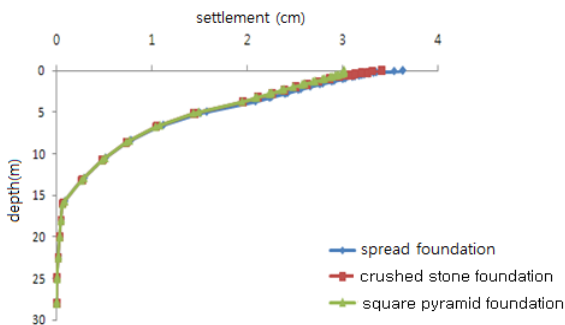
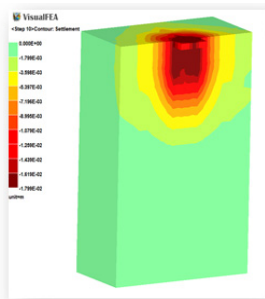
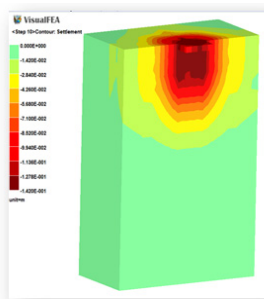


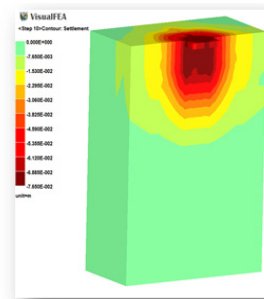
Fig. 7 Comparison graph of Elastic Settlement



(a) Spread foundation



(b) Crushed stone foundation



(c) Square pyramid foundation

Fig. 8 result of consolidation settlement

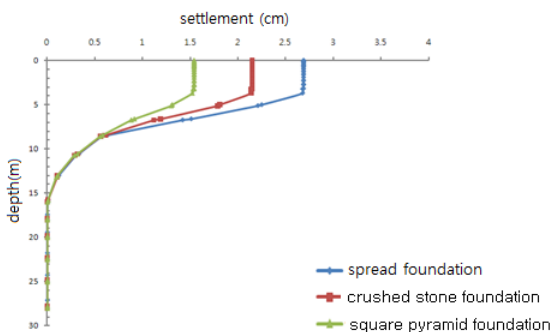


Fig. 9 Comparison graph of consolidation settlement

Fig. 10은 탄성 및 압밀 침하량을 합친 그래프로 피라미드 기초를 설치하였을 때, 탄성침하량은 3.01 cm 발생하였고, 압 밀 침하는 1.54 cm 발생 하였으며, 침하 시간에 따른 탄성침하 와 압밀의 총 침하량은 4.53 cm 정도 발생 하였다.

따라서 사각 피라미드 기초를 설치할 경우 압밀 침하에 대한 억제효과 있는 것으로 판단된다.

Fig. 11과 같이 직접기초보다 쇄석기초를 설치할 경우, 88% 가 검토되었으며 사각피라미드 기초를 설치할 경우에는 72% 정도 효과가 있는 것으로 나타났다.

4.2 수치 해석에 대한 비교 분석

본 연구에서는 Figs. 5(a), (b), (c)와 같이 기초 형태에 따라 적용된 해석 모델링으로 연약지반에 영향폭(4 m×4 m)의 영향을 고려한 총 침하량을 산정하고 각기 다른 형태의 기초조건에 따라 압밀 침하량을 3차원 유한 요소 해석을 통하여 비교 분석 하였다.

하중에 따른 침하 특성을 비교 분석한 결과 Fig. 11과 같이 사각 피라미드 기초의 발생 침하량은 직접기초의 28% 정도의 침하 억제 효과를 확인할 수 있었다.

또한 쇄석기초의 발생 침하량은 직접기초의 12% 정도의 효과를 확인할 수 있었다. 쇄석기초 발생량과 사각피라미드

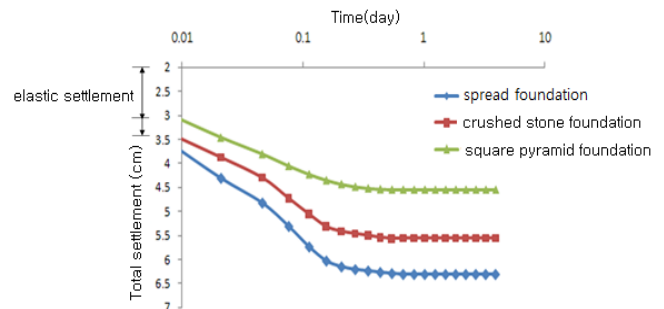


Fig. 10 Total settlement versus time curve for consolidation

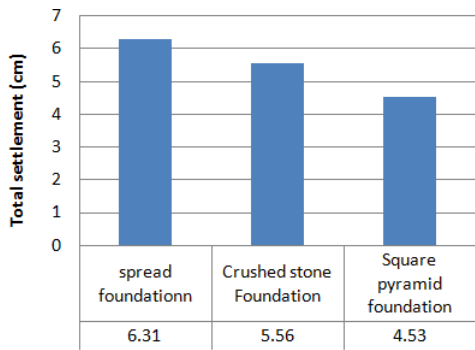


Fig. 11 Total settlement versus time curve for consolidation

기초의 발생 침하량의 비교 결과 쇄석기초보다 18% 정도 더 효과가 있는 것으로 검토 되었다.

수치해석 결과에 의하면, 사각 피라미드 기초가 압밀 침하량에 대하여 응력 분산의 효과가 있는 것을 알 수 있었다.

이는 재하폭에 따른 하중 분산 효과가 커져 탄성 침하량의 차이가 직접기초의 83%정도로 감소하는 것으로 볼 수 있으며 압밀 침하는 시간이 갈수록 점차 Fig. 10과 같이 72% 정도로 감소하는 것으로 확인 할 수 있었다.

또한 지중응력을 살펴보면, Fig. 4(c)와 같이 발생 응력이 기초 중앙부에 집중되어 분포되었다.

이와 같은 응력 분포는, 지반의 집중응력이 집중 되는 것을 방지함으로써 지반의 파괴를 억제 하고, 침하량이 감소하는 효과가 있는 것으로 판단되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 연약지반 기초 공법 적용되는 피라미드 기초에 대한 최적의 현장 적용시스템을 구축하고 기초의 침하 거동 특성을 연구하고 수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

1) 수치해석 결과를 통해 탄성침하와 압밀침하의 경우 직접 기초, 쇄석기초, 사각 피라미드 기초 순으로 감소되는 효과가 나타났다.

이는 개량된 기초의 특성상 접지면적의 효과로 상재 하중에 대한 저항 능력을 증대시키기 때문이라고 판단된다.

2) 기초면의 접지압이 수평 및 수직 응력으로 나누어지면서 수평응력이 서로 상쇄되는 효과와 채움 쇄석과 몸체부가

조합을 이루어 기초 아래 지반 주변의 측방변형을 구속하는 효과가 있음을 알 수 있었다.

3) 구조물의 기초에 강성지반을 형성하고 하중을 넓게 분포시켜서 연약 지반상에 전달되는 응력을 감소시킴으로써 침하량을 줄일 수 있고 상재 하중에 대한 저항 능력을 증대시키는 효과가 있는 것으로 판단 되었다.

4) 기대효과로서 지지력증대, 침하억제 및 부등침하를 방지하고 시공성이 간편하고 진동이 발생하지 않아 환경 피해 발생을 최소화할 수 있으며, 경제성은 기존 파일 공사대비 40~60% 공사비 절감을 기대 할 수 있다.

5) 따라서 본 해석결과 구속조건이 가능한 개량된 형상에 따라 기초는 직접기초보다 장기 침하에 대해서 큰 억제 효과가 있는 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비에 의해 수행되었습니다.

References

- C.g Engineering&Consulting Co., Ltd. (2009), Top-Base Foundation Method, C.g Engineering&Consulting Co., Ltd Technical research institute.
- EST construction co., ltd. (2006), Top-Base Foundation of Principle and Construction.
- Kim, J. Y. (2009), Load-Settlement Characteristics of Concrete Top-Base Foundation on Soft Ground, Yonsei University.
- Korean Geotechnical Society (2009), Structural Design Referenc.
- Revision of Japan Maigoma Industrial Association (1988), Design Data of Top Base Foundation Method.
- SYTec Enc. Co., Ltd. (2003), VisualFEA/GEO Ver5.02.
- Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967), Soil mechanics in Engineering Practice, Wiley, New York.

Received : 11/03/2017

Revised : 01/22/2018

Accepted : 01/24/2018

요 지 : 본 연구에서는 유한 요소 해석을 바탕으로 연약 지반의 콘크리트 직사각형 피라미드 기초의 접지 하중과 접지 면적을 고려하여 충분한 설계 능력을 보완하고 하중에 의한 침하의 영향을 연구하였다. 이 연구의 결과로, 사각 피라미드 기초가 일반 기초보다 18% 더 효과적이라는 결과가 나왔는데, 이는 압밀침하에 체적의 변화에 따라 밀접한 관계를 가지고 있으며 과잉간극수압이 소산 하는 시간에 비해 비교적 짧은 시간에 일어나는 하중의 변화로 발생한 것으로 해석되었다. 해석 시 지층의 경계조건에 따라 압밀층은 상단과 하단 중간에 이루어져 있고, 압밀이 진행 되는 시간에 비해 짧은 시간에 하중이 가해져 하중이 완전히 작용하기 전에는 압밀이 전혀 발생하지 않는 것으로 해석되었다.

핵심용어 : 연약지반, 직사각형 피라미드 기초, 지내력, 압밀침하
