

얕은기초의 하중지지거동에 관한 수치해석

이승현¹, 이수형^{2*}

¹선문대학교 토목공학과, ²한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부

Numerical Analysis of Load Bearing Behavior of Shallow Foundations

Seung-Hyun Lee¹, Su-Hyung Lee^{2*}

¹Department of Civil Engineering, Sunmoon University

²Korea Railroad Research Institute, Metropolitan Transportation Research Center

요 약 얕은기초의 하중지지거동을 살펴보기 위해 3종류의 얕은기초를 가정하여 유한요소해석을 수행하였다. 띠기초에 대한 해석을 통해 구한 파괴시의 기초하부지반의 파괴양상은 팽창각이 없는 경우 국부전단파괴양상을 보였으며 팽창각이 있는 경우에는 전반전단파괴양상을 보였다. 팽창각에 따른 극한하중에 있어서는 팽창각이 있는 경우의 극한하중이 팽창각이 없는 경우에 비해 1.5배 큰 값을 보였다. 원형기초와 정사각형 기초에 대한 해석결과에 따르면 팽창각의 존재여부와 관계없이 파괴시 기초 인접지반면에 상향의 변위가 발생하여 전반전단파괴양상을 보였다. 극한하중에 있어서는 팽창각이 있는 경우가 없는 경우에 비해 약 10% 정도 증가하였다. 세 종류의 얕은기초에 대하여 해석을 통해 얻은 하중-침하곡선을 살펴볼 때 팽창각이 클수록 하중지지능력이 큼을 알 수 있었다.

Abstract Finite element analyses were performed to find out the load bearing behavior of three kinds of shallow foundations. The analysis results for strip footing showed that local shear failure mode could be observed for a zero dilatancy angle and general shear failure mode could be seen for non-zero dilatancy angles. The ultimate bearing loads for non-zero dilatancy angles were approximately 1.5 times higher than that of a zero dilatancy angle. General shear failure mode was observed for circular footing and square footing regardless of the dilatancy angle. The ultimate bearing loads for a non-zero dilatancy angle were slightly greater than that for a zero dilatancy angle. A comparison of the load-settlement curves for three kinds of footing showed that the load bearing capacities for non-zero dilatancy angle were greater than those for a zero-dilatancy angle.

Key Words : Finite element analysis, Load bearing behavior, Failure mode, Dilatancy angle, Ultimate bearing load

1. 서론

기초를 지지하는 흙은 전단파괴나 허용값을 초과한 침하가 발생하지 않도록 설계할 필요가 있다. 기초하부 지반에 전단파괴가 발생하는 경우에는 상부구조물에 과도한 변형이 발생하며 경우에 따라서는 붕괴가 발생하기도 한다. 따라서 기초지반의 전단파괴를 방지하기 위한 기초지지력산정에 관하여 많은 연구[1-5]가 진행되어 왔는데 현대의 이론적인 지지력 예측법은 Prandtl의 연구[6]에 근거하고 있다. Prandtl은 상당히 두꺼운 금속체가

집중하중에 저항하는 능력을 연구하였다. 사질토지반의 경우 기초의 파괴양상은 흙의 상대밀도와 근입깊이에 따라 전반전단파괴(general shear failure), 국부전단파괴(local shear failure) 그리고 관입전단파괴(punching shear failure)로 나눌 수 있다[7]. 현재 얕은기초에 대하여 허용지지력과 침하량을 각각 따로 평가하여 설계를 하고 있으나 지지력과 침하는 기초의 하중-변위 거동결 과로부터 얻어지므로 하중-변위거동을 합리적으로 평가 함으로써 신뢰성 있는 기초설계가 가능하다 할 수 있을 것이다. 이와 관련해 수치해석법은 기초의 하중-변위거

*Corresponding Author : Su-Hyung Lee(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5399 email: geonlee@krii.re.kr

Received July 10, 2014

Revised (1st August 25, 2014, 2nd September 25, 2014)

Accepted October 10, 2014

동을 파악할 적절한 방법이라 할 수 있으나 연구결과가 많지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 기초 형식에 의한 하중지지거동을 수치해석법을 이용하여 평가함으로써 지지력과 침하거동 등을 파악하고자 하였는데 특히, 흙의 팽창각(dilatancy angle)에 따른 하중지지 거동을 살펴보고자 하였다.

2. 해석개요

기초의 하중지지거동 해석을 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ZSOIL을 사용하였다[8]. 해석대상지반은 Mohr-Coulomb모형을 적용하였는데 흙의 점착력은 15kPa 이고 내부마찰각은 25°이다. 해석대상지반의 탄성계수와 포아송비는 각각 30000kPa 과 0.3이다. 해석에서 가정한 얕은기초는 탄성체로 가정하였는데 탄성계수와 포아송비는 각각 30,000,000kPa 과 0.2이다. 해석에서 고려한 기초형식은 띠기초와 원형기초 그리고 정사각형 기초인데 띠기초의 경우 평면변형률해석(plane strain analysis)을 수행하게 되고 원형기초의 경우 대칭해석(symmetrical analysis)을 수행하게 되며 정사각형기초의 경우 3차원해석을 수행하게 된다. 기초는 표면기초(surface footing)로 가정하였는데 기초 바닥면은 흙과 기초바닥 사이에 상대변위가 없는 거친 바닥(rough base)으로 가정하였고 기초의 폭은 2m로 하였다. 사질토의 전단거동특성은 팽창각(α)에 영향을 받게 되는데 매우 조밀한 모래의 경우 실험실 시험결과에 따르면 팽창각은 흙의 침투전단저항각(ϕ')의 1/3 정도의 값을 보인다. 느슨한 모래의 경우 팽창각은 5° 이하의 값을 보이고 정규압밀점토의 경우 팽창각은 0°이다[9]. Bolton은 다짐이 잘된 조립토에 대하여 식 (1) 및 식 (2)와 같은 팽창각 예측식을 제안하였다.

$$\alpha = 3.75I_R \quad (\text{삼축상태}) \quad (1)$$

$$\alpha = 6.25I_R \quad (\text{평면변형률 상태}) \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에서 상대 팽창지수(relative dilatancy index), I_R 은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$I_R = 5D_r - 1 \quad (0 < I_R < 4) \quad (3)$$

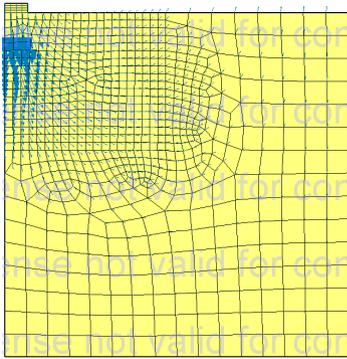
식 (3)에서 D_r 은 흙의 상대밀도를 의미한다. 점성토의 팽창각은 압밀정도에 영향을 받게 되는데 정규압밀점토와 약간 압밀된 점토인 경우 팽창각은 0°이며 과압밀된 점토인 경우와 과압밀 정도가 심한 경우의 팽창각은 각각 $\phi'/6$ 과 $\phi'/3$ 이다. 본 연구에서는 띠기초해석시 팽창각이 없는 경우와 팽창각이 5°인 경우 그리고 팽창각이 흙의 내부마찰각의 1/3인 8.3°인 경우를 고려하였다. 그리고 원형기초와 정사각형기초에 대한 해석시에는 팽창각이 0°와 5°인 경우를 고려하였다.

3. 해석결과 및 분석

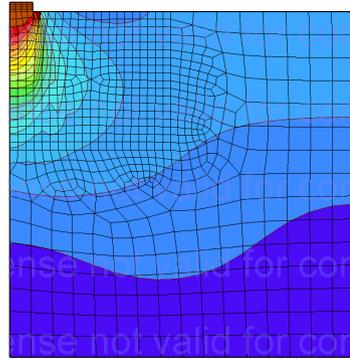
띠기초에 대한 해석에 있어 고려한 유한요소망과 파괴시의 변위벡터를 팽창각에 따라 나타내면 Fig. 1과 같다. 띠기초의 폭은 2m로 가정하였으므로 해석시에는 1m의 폭을 고려하였는데 변위에 대한 경계조건으로는 전체 해석영역의 좌우측은 수평방향으로 변위를 구속시켰으며 아래측은 수평 및 연직방향으로 변위를 구속시켰다.

Fig. 1(a)에 나타나 있는 파괴시의 변위벡터를 통해 볼 때 팽창각이 없는 경우 기초 인접 지표면에 상향의 응기가 없으므로 기초 파괴유형은 대략 국부전단파괴로 볼 수 있다. Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)를 통해 알 수 있듯이 팽창각이 있는 경우 파괴시의 변위벡터는 전반전단파괴양상을 보여주고 있다. 또한 팽창각이 5°와 8.3°인 경우에 있어 파괴시의 변위벡터양상과 파괴영역에 있어 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 기초지반파괴시의 변위양상을 팽창각에 따라 변위맵(displacement map)을 통해 나타내면 Fig. 2와 같다.

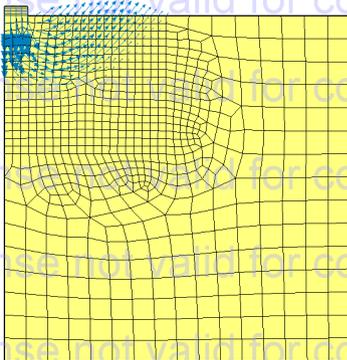
Fig. 2를 통해 알 수 있듯이 팽창각이 없는 경우 기초 하부지반의 변위발생영역이 팽창각이 있는 경우보다 훨씬 넓음을 알 수 있다. 팽창각이 있는 경우는 Fig. 2(b)와 Fig. 2(c)를 통해 알 수 있듯이 기초지반파괴시 파괴영역에 있어 췌기영역과 전이영역 및 수동영역이 뚜렷이 보임을 알 수 있다. Fig. 1과 Fig. 2의 결과분석을 통해 볼 때 사질토지반에 놓이는 띠기초에 대한 수치해석시에는 팽창각을 고려해야 합리적인 하중지지거동의 모사가 가능함을 알 수 있다. 띠기초에 대한 하중-침하곡선을 팽창각에 따라 나타내면 Fig. 3과 같고 해석을 통해 구한 극한하중(Q_u)을 나타내면 Table 1과 같다.



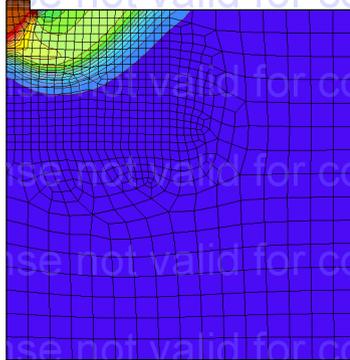
(a) $\alpha = 0^\circ$



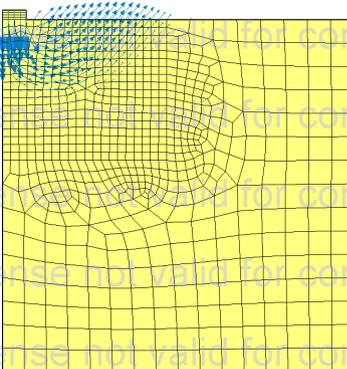
(a) $\alpha = 0^\circ$



(b) $\alpha = 5^\circ$



(b) $\alpha = 5^\circ$



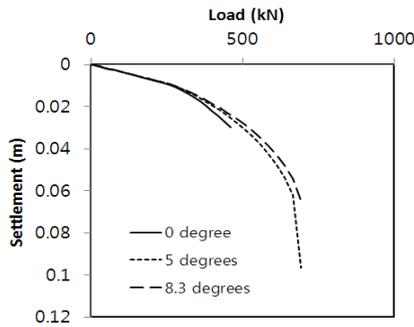
(c) $\alpha = 8.3^\circ$



(c) $\alpha = 8.3^\circ$

[Fig. 1] Displacement vector at failure with dilatancy angle(strip footing)

[Fig. 2] Displacement map at failure with dilatancy angle(strip footing)

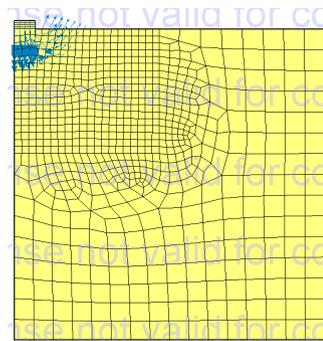


[Fig. 3] Load-settlement curve (strip footing)

[Table 1] Ultimate bearing load corresponding to dilatancy angle (strip footing)

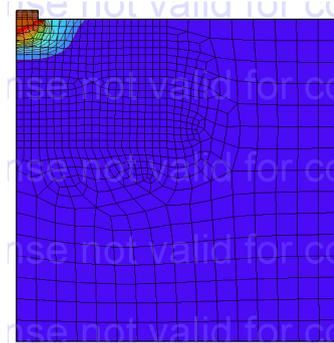
α (°)	0	5	8.3
Q_u (kN)	460	693	693

Fig. 3을 통해 알 수 있듯이 팽창각이 클수록 하중지지 능력이 크을 알 수 있는데 Table 1을 통해 알 수 있듯이 팽창각이 5° 와 8.3° 인 경우의 극한하중은 팽창각이 없는 경우에 비해 1.5배 큰 값을 보인다. Table 1에서 팽창각이 5° 와 8.3° 인 경우의 극한하중이 동일하게 계산된 결과는 수치해석시 극한하중 결정을 위해 각각의 경우에 적용한 하중증분량에 있어서의 차이를 반영한 결과로 보이지만 대체적으로 비슷한 결과를 보이는 것으로 생각된다. 반지름 1m인 원형기초에 대한 수치해석결과를 통해 구한 기초지반 파괴시의 변위벡터를 흙의 팽창각에 따라 나타내면 Fig. 4와 같은데 해석에서 고려한 팽창각은 0° 와 5° 이다. 기초지반 파괴시의 변위맵은 Fig. 5에서와 같다.

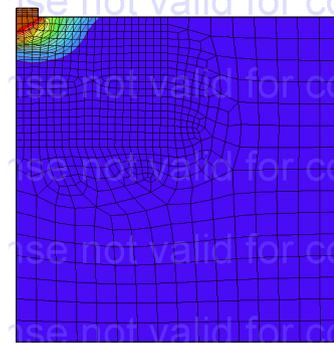


(b) $\alpha = 5^\circ$

[Fig. 4] Displacement vector at failure with dilatancy angle(circular footing)



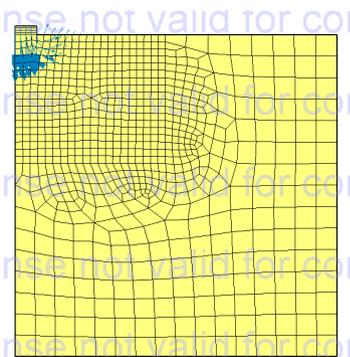
(a) $\alpha = 0^\circ$



(b) $\alpha = 5^\circ$

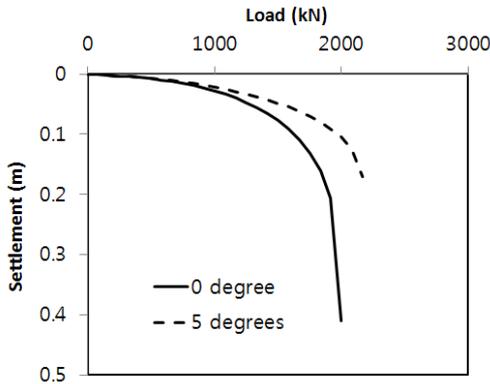
[Fig. 5] Displacement map at failure with dilatancy angle(circular footing)

Fig. 4를 통해 알 수 있듯이 원형기초 하부지반은 파괴시 국부적인 영역에 변위가 발생함을 알 수 있는데 팽창각이 5° 인 경우 기초 인접지반의 지표면에 발생하는 상향의 변위가 팽창각이 0° 인 경우에 비해 크을 알 수 있



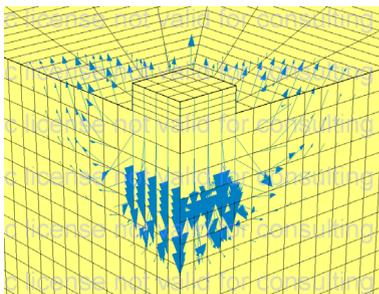
(a) $\alpha = 0^\circ$

다. Fig. 4는 팽창각에 관계없이 전반전단파괴가 발생함을 의미한다고 볼 수 있는데 이러한 내용은 Fig. 5를 통해서도 확인할 수 있다. 원형기초에 대한 하중-침하곡선을 팽창각을 고려하여 나타내면 Fig. 6과 같다.

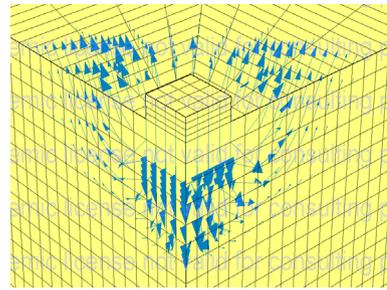


[Fig. 6] Load-settlement curve (circular footing)

Fig. 6을 통해 알 수 있듯이 팽창각이 있는 경우의 하중지능력이 팽창각이 없는 경우에 비해 큼을 알 수 있다. 팽창각이 0° 인 경우의 극한하중은 $2000kN$ 이고 팽창각이 5° 인 경우의 극한하중은 $2167kN$ 로서 팽창각이 5° 인 경우의 극한하중이 팽창각이 0° 인 경우의 극한하중에 비해 8%정도 증가한 결과를 보인다. 한 변의 길이가 2m인 정사각형기초의 해석시에는 전체 크기의 1/4을 고려하여 해석을 수행하였는데 수치해석결과를 통해 구한 기초지반 파괴시의 변위벡터를 흙의 팽창각에 따라 나타내면 Fig. 7과 같다. 원형기초에서와 마찬가지로 해석에서 고려한 팽창각은 0° 와 5° 이다. 기초지반 파괴시의 변위맵은 Fig. 8과 같다.

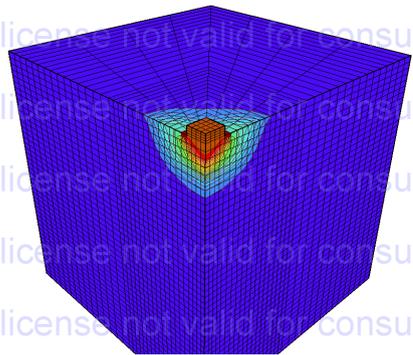


(a) $\alpha = 0^\circ$

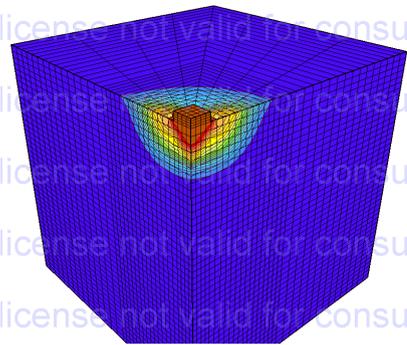


(b) $\alpha = 5^\circ$

[Fig. 7] Displacement vector at failure with dilatancy angle(square footing)



(a) $\alpha = 0^\circ$

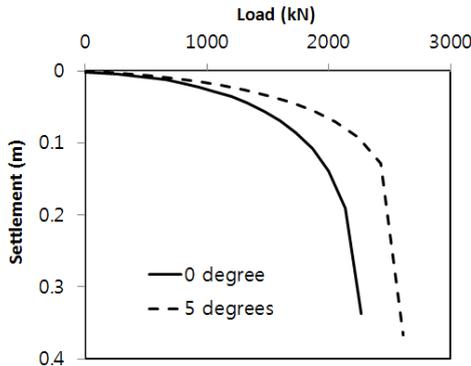


(b) $\alpha = 5^\circ$

[Fig. 8] Displacement map at failure with dilatancy angle(square footing)

Fig. 7을 통해 알 수 있듯이 팽창각의 존재여부에 관계없이 파괴시 기초 인접지반면에 상향의 변위가 발생하여 전반전단파괴양상을 보임을 알 수 있다. 팽창각이 있는

경우 지반면에 발생하는 상향변위가 팽창각이 없는 경우에 비해 크을 알 수 있다. Fig. 8을 통해 알 수 있듯이 기초지반 파괴시 국부적인 영역에 국한하여 파괴가 발생함을 알 수 있다. 정사각형기초에 대한 해석을 통해 구한 하중-침하곡선은 Fig. 9에서와 같다.



[Fig. 9] Load-settlement curve (square footing)

Fig. 9를 통해 알 수 있듯이 팽창각이 있는 경우가 없는 경우에 비해 하중지지능력이 크을 알 수 있다. 팽창각이 0° 인 경우 극한하중은 2400kN 이고 팽창각이 5° 인 경우 극한하중은 2613kN으로서 팽창각이 5° 인 경우의 극한하중이 팽창각이 0° 인 경우의 극한하중에 비해 9%정도 증가한 결과를 보인다.

4. 결론

얕은기초의 하중지지거동을 살펴보기 위해 3종류의 기초를 가정하여 유한요소해석을 수행해 보았는데 각각의 얕은기초에 대하여 팽창각을 달리하여 해석을 하였다. 해석결과를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 띠기초에 대한 해석을 통해 구한 파괴시의 기초하부지반의 변위벡터와 변위맵을 통해 볼 때 팽창각이 없는 경우 국부전단파괴양상을 보였으며 팽창각이 있는 경우에는 전반전단파괴양상을 보였다. 이러한 결과는 팽창각이 흙의 전단거동에 미치는 체적팽창의 특성을 반영한 결과로 보인다. 팽창각에 따른 극한하중에 있어서는 팽창각이 있는 경우의 극한하중이 팽창각이 없는 경우에 비해 1.5배 큰 값을 보였다.

- 2) 원형기초와 정사각형 기초에 대한 해석결과에 따르면 팽창각의 존재여부와 관계없이 파괴시 기초 인접지반면에 상향의 변위가 발생하여 전반전단파괴양상을 보인다고 볼 수 있으며 팽창각이 있는 경우의 상향변위가 없는 경우에 비해 약간 컸다. 극한하중에 있어서는 팽창각이 있는 경우가 없는 경우에 비해 약 원형기초의 경우 8%, 정사각형기초의 경우 9% 증가하였다.
- 3) 세 종류의 얕은기초에 대하여 해석을 통해 얻은 하중-침하곡선을 살펴볼 때 팽창각이 클수록 하중지지능력이 크을 알 수 있었다.
- 4) 얕은기초에 대한 수치해석결과를 종합적으로 분석해 볼 때 얕은기초 설계에 있어서 수치해석기법을 적용함으로써 하중지지거동을 좀 더 합리적으로 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Terzaghi, K., Theoretical soil mechanics, John Wiley, New York, 1943.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470172766>
- [2] Skempton, A. W., "The Bearing Capacity of Calys", Proceedings, Building Research Congress, Vol. 1, pp. 180-189, London, 1951.
- [3] Meyerhof, G. G., "Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 16-26 (Reprinted in Meyerhof, 1982), 1963.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/t63-003>
- [4] Brinch Hansen, "A General Formula for Bearing Capacity", Bulletin No. 11, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, 1961.
- [5] DeBeer, E. E. and Ladanyi, B., "Experimental study of the bearing capacity of sand under circular foundations resting on the surface", Proceedings, 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 577-585. Paris, 1961.
- [6] Prandtl, L., "Über die Härte plastischer Körper (On the Hardness of Plastic Bodies)", Nachr. Kgl. Ges. Wiss. Göttingen, Math-Phys. Kl., pp. 74. (in German), 1920.
- [7] Vesic, A. S., "Analysis of ultimate loads of shallow foundations", ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. SMI, pp. 45-73, 1973.
- [8] Zimmermann, T., ZSOILPC Getting started, Elmepress

international, Lausanne, Switzerland, 2013.

- [9] Bolton, M. D., "The Strength and dilatancy of sands".
Geotechnique 1/36, pp. 65-78, 1986.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1986.36.1.65>

이 승 현(Seung-Hyun Lee)

[정회원]



- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

토질역학, 기초공학

이 수 형(Su-Hyung Lee)

[정회원]



- 1994년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1996년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학박사)
- 2003년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

지반공학, 철도공학