

## 무리말뚝을 구성하는 외말뚝의 연직방향 하중지지 거동분석

이승현<sup>1</sup>, 김병일<sup>2\*</sup>, 유완규<sup>2</sup>

<sup>1</sup>선문대학교 토목공학과, <sup>2</sup>명지대학교 토목환경공학과

### Analysis on Behavior of Vertically Loaded Single Pile included in Pile Group

Seung-Hyun Lee<sup>1</sup>, Byoung-II Kim<sup>2\*</sup> and Wan-Kyu Yoo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Civil Engineering, Sunmoon University

<sup>2</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

**요 약** 모래지반에 설치된 무리말뚝 중 두 개의 말뚝에 대하여 하중재하시험을 실시하고 그 결과를 하중전이법을 적용한 해석결과와 비교 분석하였다. 무리말뚝 설치 후 무리말뚝의 중앙부에 위치한 말뚝에 대한 해석결과에 따르면 하중지지능력이 재하시험결과보다 작게 나타났는데 주된 원인은 무리말뚝 설치로 인한 지반조밀화로 생각된다. 또한 API 방법과 Coyle and Sulaiman 방법을 적용하여 구한 하중-침하곡선으로부터 Davisson 방법을 통해 구한 말뚝의 극한지지력은 재하시험에 의한 극한지지력 값의 각각 77%와 90%였다. 무리말뚝 설치로 인한 지반 조밀화의 영향을 비교적 덜 받은 가장자리 말뚝에 대한 재하시험결과와 해석결과를 비교할 때 Davisson 방법을 통해 구한 말뚝의 극한지지력은 API 방법과 Coyle and Sulaiman 방법에 의한 경우 재하시험결과에 의한 값에 비해 각각 1.1배와 1.3배의 값을 보였다.

**Abstract** Static pile load tests were conducted on the two piles which comprised group pile installed in sand and the test results were compared with those obtained from load transfer method. Predicted load bearing capacity of the pile which locates center portion of the group pile was less than that from the load test and the reason is thought to be the densification of the soil due to the installation of the group pile. Predicted pile capacity of the API method, Coyle and Sulaiman method were 77%, 90% of the bearing capacity obtained from the load test, respectively. Comparing ultimate bearing capacities of the pile locating at the edge of the group pile, those predicted by the API method, Coyle and Sulaiman method were 1.1 times, 1.3 times of the bearing capacity obtained from the pile load test, respectively.

**Key Words** : Load test, Load transfer method, API method, Coyle and Sulaiman method

### 1. 서론

축방향 하중을 받는 말뚝의 하중-침하곡선을 얻기 위해 주로 두 가지 해석적 방법이 사용된다. 하나의 방법은 탄성론에 의한 것으로 Mindlin[1]의 탄성해에 근거하며 말뚝 변위는 말뚝주면과 말뚝선단에서의 하중전이를 중첩하여 구하게 된다. 탄성해법의 단점은 복잡다단한 실제 지반을 단 두 개의 탄성정수 즉 탄성계수와 포아송비로 묘사함으로써 너무 단순화시킨다는 것이다. 말뚝의 하중-

침하량곡선을 얻는 다른 한가지 방법은 통상 t-z method로 알려진 하중전이법(load transfer method)이다. t-z 방법에서는 Winkler 개념을 적용하고 있는데 특정 말뚝주면과 말뚝선단에서의 하중전이는 다른 곳에서의 말뚝변위와 무관하다는 가정이다. 이러한 가정에도 불구하고 t-z 방법에서는 변위와 전단력 사이의 비선형성을 갖는 복잡한 지층에서도 적용할 수 있으므로 여전히 실용적이고 강력한 방법이라 할 수 있다. 본 연구에서는 무리말뚝을 구성하는 두 개의 외말뚝에 대하여 재하시험을 수행하고

\*Corresponding Author : Byoung-II Kim

Tel: +82-10-2722-6415 email: bikim@mju.ac.kr

접수일 12년 07월 16일

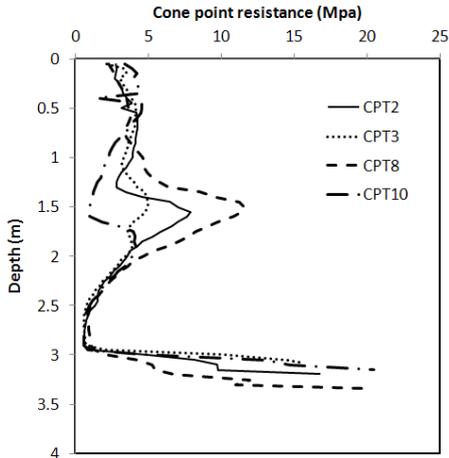
수정일 12년 07월 27일

게재확정일 12년 10월 11일

그 결과를 하중전이법을 적용한 해석결과와 상호비교함으로써 연직하중을 받는 외말뚝의 축방향 하중지지거동을 파악하고자 하였다.

## 2. 시험지반

말뚝재하시험을 수행하기 위해 원지반을 굴착한 다음 균질한 모래를 채워 조성하였는데 그 크기는 길이 10m, 폭8m, 높이 3m이다. 시험말뚝의 선단은 N값이 50 이상인 풍화암층에 근입시키도록 하였다. 시험지반인 모래의 200번체 통과량은 극히 소량이며 통일분류에 의하면 입도분포가 균등한 모래(SP)로 분류된다. 시험지반 조성시에는 백호(back hoe)를 이용하여 50cm 두께로 모래를 채우고 백호 버킷(bucket)으로 다졌는데 지반조성 후 측정된 모래의 단위중량은 16.2kN/m<sup>3</sup>이었다. 이때 모래의 상대밀도는 22%로서 느슨한 상태이다. 시험지반 조성 후 시험지반에 대하여 콘관입시험을 총 13군데에 걸쳐 수행하였는데 무리말뚝 근처에서 실시한 콘관입시험결과만을 나타내면 그림 1과 같다.

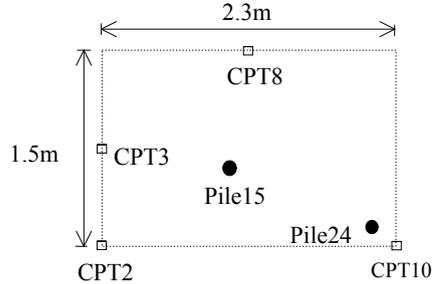


[그림 1] 콘선단저항 분포  
[Fig. 1] Distribution of Cone Point Resistance

## 3. 시험말뚝

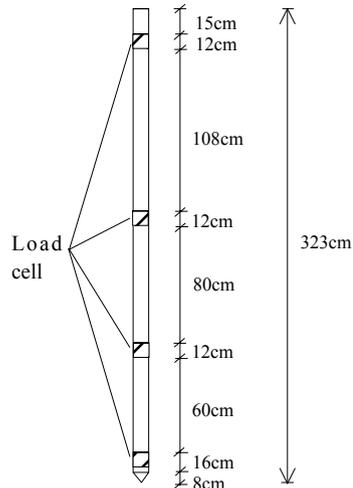
시험지반에 대한 콘관입시험이 종료된 후 4행 6열로 총 24개의 말뚝을 설치하였다. 시험말뚝은 강관으로서 바깥지름은 92.5mm이고 두께는 6mm이며, 길이는 3.23m이다. 말뚝 중심간 간격은 370mm로서 말뚝지름의 4배에

해당한다. 무리말뚝에 대한 재하시험 전에 외말뚝에 대한 재하시험을 계획하였는데 그림 2에 외말뚝 재하시험을 실시한 말뚝번호 및 근처의 콘관입시험번호가 나타나 있다.



[그림 2] 시험말뚝과 CPT 수행위치  
[Fig. 2] Locations of Test Pile and CPT

그림 2에서 점선은 무리말뚝 재하시험을 위한 말뚝캡을 나타낸다. 그림 2에는 편의상 외말뚝에 대해 재하시험을 수행한 말뚝 2개만 나타내었고 근처의 콘관입시험위치도 나타나 있다. 그림 2에 나타난 15번 말뚝에 대하여 하중전이 특성을 파악하기 위해 말뚝길이에 따라 그림 3과 같이 4개의 하중계(load cell)를 설치하였다.



[그림 3] 하중계 설치  
[Fig. 3] Installation of Load Cells

그림 2에 나타난 24번 말뚝에 대해서는 말뚝머리부에만 하중계를 설치하였다. 말뚝의 설치는 압입하여 하였는데 총 24개의 말뚝설치가 종료된 후에 외말뚝에 대한 재하시험을 수행하였다. 하중 단계별 재하시험은 ASTM D1143-81[2]규정에 따라 단위 시간당 침하량이 0.25mm 이내일 때까지로 하였다.

### 4. 하중전이분석

Coyle and Reese[3]는 실내시험과 현장시험을 통해 하중전이곡선을 제안한 바 있는데 제안된 곡선은 점토지반에 설치된 강관 말뚝말뚝에 한정되어 있고 근입깊이도 30m를 넘지 않는다. 이후 사질토지반에 대한 하중전이곡선도 몇몇 연구자들에 의해 제안된 바 있는데 하중전이법을 이용한 하중전이분석을 위해 두 가지 방법을 적용해 보았다. API[4]에 의해 제안된 t-z 곡선은 식 (1)과 같다.

$$t = t_{max} \frac{z}{z_c} \quad (z \leq z_c) \tag{1}$$

$$t = t_{max} \quad (z > z_c)$$

식 (1)에서  $t_{max}$ 은 최대단위주면마찰력을 의미하고  $z$ 는 말뚝변위량을 의미한다.  $z_c$ 는 말뚝주면에서의 미끄러짐 발생시의 말뚝변위량을 나타내는데 여기서는 O'Neill et al.[5]이 제안한 식 (2)를 적용하였다.

$$z_c = \frac{t_{max} r_p}{G} \left[ 0.67 + \ln \frac{2\rho L(1-\nu)}{r_p} \right] \tag{2}$$

식 (2)에서  $r_p$ 는 말뚝반지름,  $\nu$ 는 지반의 포아송비 (=0.35),  $L$ 은 말뚝길이(=3.1m) 그리고  $G$ 는 t-z 곡선을 적용하는 깊이에서의 전단탄성계수를 의미한다. 콘선단저항력( $q_c$ )으로부터 전단탄성계수는 식 (3)을 통해 구할 수 있다[6].

$$G = \frac{3q_c}{2(1+\nu)} \tag{3}$$

식 (1)과 식 (2)에서의  $t_{max}$ 은 Meyerhof[7]와 Thorburn and MacVicar[8]가 제안한 식 (4)를 이용하여 구하였다.

$$t_{max} = 0.005q_c \tag{4}$$

[표 1] Q-z 관계  
[Table 1] Q-z Relationship

$z/D$	$Q/Q_{max}$
0.0020	0.25
0.1300	0.5
0.0420	0.75
0.0730	0.90
0.1000	1.00

API[4]에 의해 제안된 Q-z 곡선은 표 1과 같이 주어지며 표 1에서  $D$ 는 말뚝지름을 의미하고  $Q_{max}$ 은 최대선단저항력을 의미한다.

표 1에서  $Q_{max}$ 은 Schmertmann[9]이 제안한 방법에 따라 말뚝선단으로부터 하향으로  $4D$  또는  $0.7D$ 와 상향으로  $8D$ 까지의 콘선단저항값으로부터 구할 수 있다. Coyle and Sulaiman[10]은 모래지반에 타입된 강관말뚝에 있어 하중전이 특성을 조사하고 식 (5)와 같은 t-z 곡선을 제안한 바 있다.

$$t = K_s \left( \frac{z}{D} \right)^{0.15}, \quad \frac{z}{D} \leq 0.07 \tag{5}$$

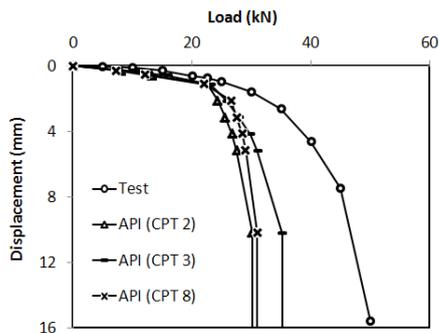
식 (5)에서  $K_s$ 는 수정계수(fitting factor)를 나타내는데 식 (6)을 이용하여 구할 수 있다.

$$t_{max} = K_s (0.07)^{0.15} \tag{6}$$

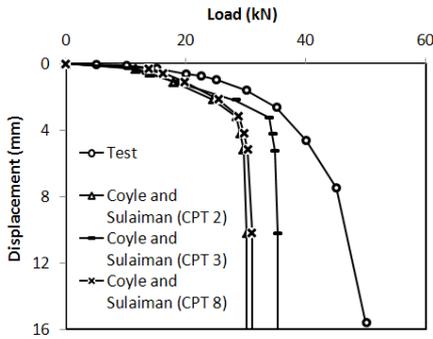
Vesic[11]은 모래지반에 설치된 말뚝에 대하여 식 (7)과 같은 Q-z 곡선을 제안하였다.

$$z = \frac{C_w Q}{(1 + D_r^2) D q_b} \tag{7}$$

식 (7)에서  $D_r$ 는 소수단위의 상대밀도를 나타내고  $q_b$ 는 극한단위선단지저항력을 나타내며,  $C_w$ 는 침하계수를 의미하는데 타입말뚝인 경우 0.0372이다. 하중전이법에 대한 자세한 해석방법은 문헌[12]을 참고할 수 있으며 본 연구에서는 해석방법을 직접 코딩하여 해석에 적용하였다. 그림 2에서의 15번 말뚝에 대하여 API 방법과 Coyle and Sulaiman 방법을 통해 예측한 하중-침하곡선을 시험을 통해 구한 하중-침하곡선과 함께 나타내면 그림 4와 같다.

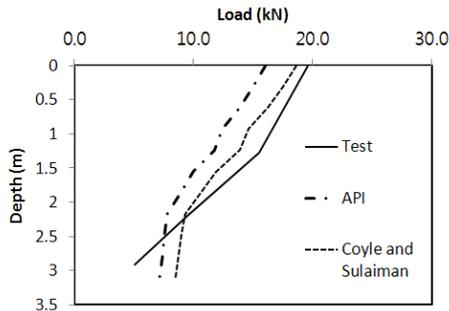


(a) API method vs Test result

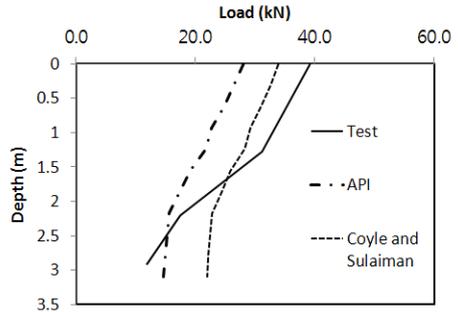


(b) Coyle and Sulaiman method vs Test result  
**[그림 4]** 하중-침하곡선의 비교 (15번 말뚝)  
**[Fig. 4.]** Comparison of Load-Settlement Curves (Pile #15)

그림 4를 통해 알 수 있듯이 두 가지 방법에 의해 예측된 하중-침하곡선은 시험에 의한 값보다 아래쪽에 그려진다. 이러한 주된 이유는 24개의 말뚝을 설치한 후에 재하시험을 하였기 때문에 말뚝설치로 인해 시험지반에 조밀해진 영향으로 생각된다. 15번 말뚝 주변의 콘관입시험위치를 고려해 볼 때 API 방법과 Coyle and Sulaiman 방법 모두 CPT 3의 자료로 예측한 결과가 시험결과에 가장 근접한 결과를 보여준다. 그림 2에 나타난 CPT 2, CPT 3 그리고 CPT 8의 콘관입시험자료로부터 극한선단저항력을 Schmertmann 방법을 써서 계산하면 각각 13.7 kN, 21.9 kN 그리고 10.3 kN이다. 그림 4에 나타난 하중-침하곡선으로부터 Davisson 방법[13]을 통해 말뚝의 극한지지력을 결정하면 CPT 3의 자료에 대하여 API 방법과 Coyle and Sulaiman 방법을 통한 극한지지력은 각각 29.5kN 및 34.5kN이며 시험결과에 의한 극한지지력은 38.4kN이다. 말뚝길이에 따른 축력분포를 살펴보기 위해 말뚝의 극한지지력 및 극한지지력의 1/2에 해당하는 말뚝머리하중에 대한 축력분포를 구해 보았는데 그림 5와 같다.



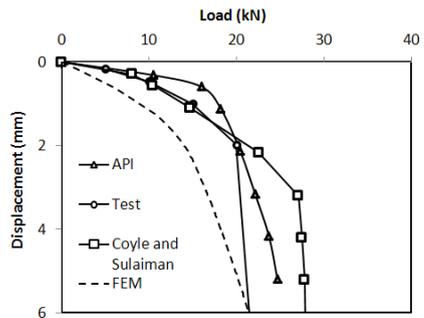
(a) Half of ultimate pile capacity



(b) Ultimate pile capacity

**[그림 5]** 말뚝 축력분포 (15번 말뚝)  
**[Fig. 5.]** Distribution of Pile Axial Force (Pile #15)

그림 5에 나타난 예측결과는 CPT 3의 자료를 이용하여 구한 것이다. 그림 5를 통해 알 수 있듯이 예측법에 의한 경우 약 2m 이하의 깊이에서는 주변마찰로 전이되는 하중이 크며, 2m 깊이보다 큰 깊이에서는 하중전이량이 작아짐을 알 수 있는데 이러한 경향은 그림 1에 나타난 콘선단저항값의 분포를 반영한 결과로 볼 수 있다. 재하시험결과 또한 콘선단저항의 분포를 반영한 결과를 보여줌을 알 수 있다. 전체적으로 볼 때 예측법에 의한 축력분포와 재하시험에 의한 축력분포에 있어 가장 큰 차이는 대략적으로 깊이 2m 이후에서 나타나는데 이러한 이유는 무리말뚝설치로 인해 말뚝 상부 근입깊이에 비해 선단부 근처의 지반이 더 조밀해진 결과 때문으로 생각된다. 그림 2에서 비교적 말뚝설치에 따른 지반의 조밀화 영향을 덜 받는 24번 말뚝에 대하여 예측 및 시험을 통해 구한 하중-침하곡선은 그림 6과 같다.



**[그림 6]** 하중-침하곡선의 비교 (24번 말뚝)  
**[Fig. 6.]** Comparison of Load-Settlement Curves (Pile #24)

그림 6에서 보는 것처럼 24번 말뚝의 재하시험결과에 따르면 말뚝머리에 작용하는 하중이 20kN보다 큰 경우 침하가 급격하게 증가한다. API 방법에 의한 결과에 따르면 하중-침하곡선의 초기강성은 시험결과에 의한 값보

다 크를 알 수 있고 항복하중은 작음을 알 수 있다. Coyle and Sulaiman 방법에 의한 결과에 따르면 하중-침하곡선의 초기강성은 시험결과와 거의 같고 항복하중은 시험결과보다 크를 알 수 있다. Davisson 방법을 통해 말뚝의 극한지지력을 결정하면 API 방법과 Coyle and Sulaiman 방법 각각 23.2kN 및 27.1kN이며, 시험결과에 의한 극한지지력은 20.5kN이다.

## 5. 결론

이 연구에서는 모래지반에 설치된 두 개의 말뚝에 대하여 하중재하시험을 실시하고 그 결과를 하중전이법을 적용한 해석결과와 비교하고자 하였다. 시험 및 해석결과의 비교분석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 무리말뚝 설치 후 무리말뚝의 중앙부에 위치한 말뚝에 대한 해석결과에 따르면 하중지지능력이 재하시험결과보다 작게 나타났는데 주된 원인은 무리말뚝 설치로 인한 지반조밀화로 생각된다. 또한 API 방법과 Coyle and Sulaiman 방법을 적용하여 얻은 하중-침하곡선으로부터 Davisson 방법을 통해 구한 말뚝의 극한지지력은 재하시험에 의한 극한지지력에 비해 각각 77% 및 90%인 것으로 나타났다.
- 2) 무리말뚝 중앙부에 위치한 말뚝에 대하여 재하시험과 해석결과로부터 얻은 깊이에 따른 말뚝 축력을 비교하면 대체적으로 콘관입시험에 의한 콘선단저항력의 분포를 반영하고 있다. 예측법에 의한 축력분포와 재하시험에 의한 축력분포에 있어 가장 큰 차이는 말뚝 선단근처에서 나타나는데 그러한 이유는 무리말뚝설치로 인해 말뚝 상부 근입깊이에 비해 선단부 근처의 지반이 더 조밀해진 결과 때문으로 생각된다.
- 3) 무리말뚝 설치로 인한 지반 조밀화의 영향을 비교적 덜 받은 가장자리 말뚝에 대한 재하시험과 해석결과를 비교할 때 Coyle and Sulaiman 방법에 의한 말뚝의 초기강성이 재하시험결과와 거의 같게 나타났다. Davisson 방법을 통해 구한 말뚝의 극한지지력은 API 방법과 Coyle and Sulaiman 방법에 의한 값들이 재하시험결과에 의한 값에 비해 각각 1.1배 및 1.3배였다.
- 4) 본 연구를 통해 얻은 결론을 바탕으로 향후 다양한 실험과 해석을 통해 무리말뚝을 구성하는 외말뚝의 하중전이 특성을 좀 더 명확히 이해할 수 있을 것으로 생각된다.

## References

- [1] R. D. Mindlin, "Force at a point in the interior of a semi-infinite solid". *Physics*, Vol. 7, No. 5, May, pp. 195-202, 1936.
- [2] American Society for Testing and Materials, "Standard Method of Testing Piles under Static Axial Compressive Load", ASTM D1143-81, Vol. 04.08, Philadelphia, pp. 179-189, 1989.
- [3] H. M. Coyle and L. C. Reese, "Load transfer for axially loaded piles in clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*", ASCE, Vol. 92, SM2, Paper No. 4702, March, pp. 1-26, 1966.
- [4] American Petroleum Institute, "API Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms", Report RP-2A, 1993.
- [5] M. W. O'Neill, R. A. Hawkins and L. J. Mahar, "Load transfer mechanism in piles and pile groups", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 108, No. GT12. December, pp. 1605-1623, 1982.
- [6] J. E. Bowles, "Foundation analysis and design", McGraw-Hill, Inc, 1988.
- [7] G. C. Meyerhof, "Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 82, SM1, pp. 1-19, 1956.
- [8] S. Thorburn and MacVicar, "Pile load tests to failure in the Clyde Alluvium", *Proc. Conference on Behavior of Piles*, ICE, pp. 1-8, 1971.
- [9] J. H. Schmertmann, "Guidelines for Cone Penetration Test", *Performance and Design*, Report No. FHWA-TS-78-209, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., pp. 145, 1978.
- [10] H. M. Coyle and I. H. Sulaiman, "Skin friction for steel piles in sand. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*", ASCE, Vol. 93, SM6, Paper No. 5590, November, pp. 261-278, 1967.
- [11] A. S. Vesic, "Tests on instrumented piles", *Ogeechee River Site. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 96, Paper No. SM2, March, pp. 561-584, 1970.
- [12] L. C. Reese, W. M. Isenhower and S. T. Wang, "Shallow and deep foundations", *John Wiley & Sons Inc.*, pp. 430-435, 2006.
- [13] M. T. Davisson, "High capacity piles. in *Innovations in Foundation Construction*", *Proceedings of a lecture series*, Illinois Section ASCE, Chicago, 1973.

**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 부교수

<관심분야>  
토질역학, 기초공학

---

**김 병 일**(Byoung-II Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>  
토질역학, 기초공학

---

**유 완 규**(Wan-Kyu Yoo)

[정회원]



- 2006년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2011년 8월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학박사)
- 2011년 9월 ~ 현재 : 명지대학교 BK21 토목 고등설계 교육원 박사 후 연구원

<관심분야>  
토질역학, 기초공학