

풍화지반에 근입된 마이크로파일의 하중전이곡선 추정을 위한 경험식 개발

Development of an Empirical Equation for Estimating Load Transfer Curve for Micropile in Weathered Soils

노 강 구¹ Roh, Kang-Koo

박 성 완² Park, Seong-Wan

조 국 환³ Cho, Kook-Hwan

Abstract

Micropiles have been used for underpinning or rehabilitation of existing foundations, and direct structural support system as well. However, relatively few studies have been done on the load-transfer mechanism of micropile systems in Korea. In addition to that, only the limited information is available for estimating the side friction values on micropiles installed in weathered soils. In this study, a full-scale test on an instrumented micropile is performed in order to establish the load-transfer curves based on a hyperbolic function. Then, an empirically derived equation that correlates the load-transfer curve of micropiles with the N values from field standard penetration tests is proposed. The results from all procedures are presented in this paper. Finally, back analysis using a finite difference method and the published field data are adopted for examination of a developed skin friction equation of micropile in weathered soils respectively.

요 지

최근 사용이 증가 추세에 있음에도 불구하고 마이크로파일의 하중전이곡선에 관한 연구는 매우 미미한 실정이다. 이에 본 연구에서는 국내지반 및 시공조건이 반영된 실물크기의 시험말뚝에 대한 현장시험을 실시하여 마이크로파일의 주변하중전이곡선을 산정하는 경험식을 제안하였다. 말뚝재하시험 결과로부터 깊이별 하중전이곡선을 구하고, 이를 쌍곡선 함수형태로 전환 시킨 후, 하중전이함수와 지반의 표준관입시험 저항치(N)와의 관계를 정립하였다. 이러한 일련의 과정을 거친 결과를 토대로 유한차분법과 문헌자료를 활용하여 개발된 하중전이함수로부터 풍화토에서 마이크로파일의 주변마찰력을 추정할 수 있음을 평가하였다.

Keywords : Field test, Load transfer, Micropile, Skin friction, Weathered soils

1. 서 론

도심지 내 공사에 대한 각종 환경규제가 심해지고 그에 따른 민원발생이 우려되면서 저소음과 저진동을 위하여 마이크로파일 사용이 증가하고 있는 실정이다. 또

한 최근 내진설계의 강화로 기존 구조물의 성능 향상 목적으로 마이크로파일 적용사례도 증가하는 추세이나 국내현장 적용을 위한 체계적인 연구는 매우 부족한 실정이다.

마이크로파일은 150~300mm 직경의 현장타설용 말

1 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 공학석사 (Member, Master of Engr., Dept. of Civil & Environment Engr., Dankook Univ.)

2 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil & Environment Engr., Dankook Univ., spark@dankook.ac.kr, 교신저자)

3 정회원, 서울산업대학교 구조공학과 전임강사 (Member, Full-time Lecturer, Dept. of Structural Engr., Seoul National Univ. of Technology)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

뚝으로 정의되며, 대부분의 하중이 선단 지지력이 아닌 주변 마찰력에 의해 지지되는 것으로 알려져 있어 기초 설계 시 말뚝의 극한주면마찰력 산정에 있어 신중을 기해야 한다. 이러한 마이크로파일은 일반적으로 구조물 기초시스템으로 사용되지만 연약지반에 위치한 구조물의 침하 억제용으로 사용되기도 하며 억지말뚝 형태로 시공되어 사면안정 목적으로 사용되는 등 다양한 목적으로 활용되고 있다(FHWA, 2000).

국내에서도 마이크로파일에 대한 시험 및 적용은 상당수 이루어지고 있음에도 그에 상응한 하중전이 관련 자료는 전무한 실정이다. 또한 문헌에서 많이 참고하고 있는 미국 FHWA(2000)와 일본 토질공학회 자료(1980)들도 국내에 활용하기에는 제한적이며 현장타설말뚝이나 어스 앵커 적용시의 주면마찰력이라 적지 않은 문제가 있다(노강구, 2006). 이에 본 논문에서는 모래지반에 대한 실험 크기의 고성능 마이크로파일에 대한 하중재하시험 결과로부터 산정한 하중전이곡선과 지반조사 자료와의 상관관계를 토대로 추정 경험식을 제안하였다. 또한 제안된 경험식의 현장 적용성을 평가하기 위하여 유한차분법에 의한 역해석과 문헌자료를 통한 비교검증을 실시하였다.

2. 말뚝재하시험

2.1 지반조사

말뚝의 지지력을 확인하기 위한 말뚝재하시험 방법으로는 정재하시험, 동재하시험, 정·동재하시험, 오스터버그셀시험 등 여러 시험법들이 있으나 현재까지는 정재하시험의 신뢰도가 가장 높은 것으로 알려져 있다. 하중전이함수는 하중전이 함수법(Coyle & Reese, 1966)에 의한 말뚝의 침하거동 해석에 있어서 필수적인 요소가 되며, 여러 연구자들에 의해 다양한 종류의 함수 형태로 제안되었다. 그러나 하중전이함수는 지반조건과 시공조건에 큰 영향을 받음으로 실제 현장실험을 통해 개발되는 것이 보통이다. 따라서 국내 지반 및 시공조건을 반영한 마이크로파일의 경험적 하중전이함수 개발을 위해 실험 크기의 마이크로파일 시험말뚝에 대하여 정재하 시험을 수행하였다.

시험 말뚝은 서울의 O지역 신설 교대기초 구간에 시공되었으며 시추조사를 통하여 그림 1과 같은 주상도를 얻었다. 콘크리트 캡 하부를 기준으로 모래 섞인 실트,

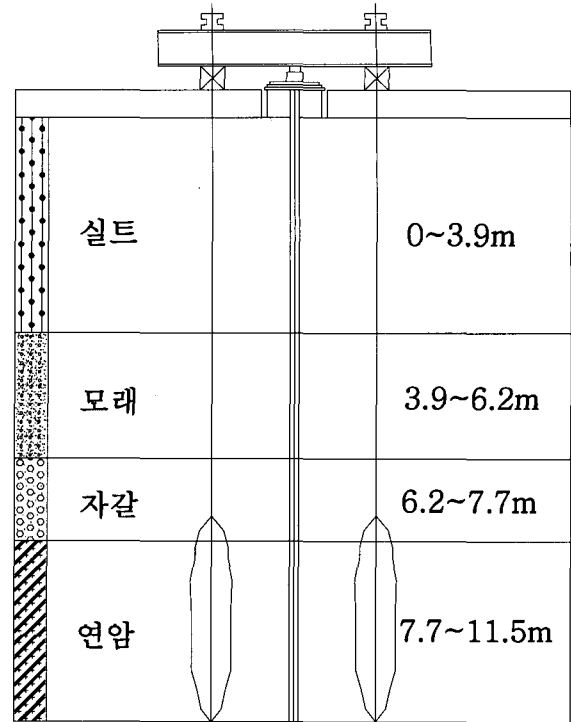


그림 1. 지반의 구성 및 재하시험 개념도

실트 섞인 모래, 실트 섞인 자갈모래, 연암 순으로 층을 이루고 있다. 표준관입시험에 의한 N치는 (-)7.7m 구간까지의 토사부가 13/30~36/30으로 보통 조밀한 상태로 나타났고, (-)7.7m 구간이하 연암층의 RQD 평균값은 18로 파쇄 정도가 매우 심한 것으로 조사되었다. 그리고 채취된 암석시료에 대하여 일축압축시험을 실시한 결과 암석의 일축압축강도, $q_u = 14.23MPa$ 로 나타났다. 지하수위는 콘크리트 캡 하부를 기준으로 (-)1.2m에 위치했으며 시험 전 후의 지하수위 변동은 없었다.

2.2 시험말뚝 시공 및 계측기 설치

마이크로파일은 치환(대체)말뚝의 일종으로 선행굴착(pre-drilling)을 실시하는데 대략의 시공순서는 다음과 같다. 먼저 토사부는 C6 유압식 장비를 이용하여 수세식 천공을 하였고, 암반층은 공압식 해머를 이용하여 소정의 깊이까지 천공하였다. 천공 후 말뚝의 전체 길이에 대하여 강관 케이싱을 설치하였으며, 그라우트 주입시에도 케이싱(casing)을 인발하지 않고 말뚝의 구조체로 사용하였다. 다음 단계로 D32mm 보강철근 4EA와 그라우트 주입호스, 철근 센트럴라이저(centralizer)로 구성된 케이지(cage)를 강관 안으로 삽입하였다. 마지막으로 그라우트 주입은 두 차례에 걸쳐 실시하였는데 1차 그라

우팅은 주입호스를 통해 중력식으로 강관 내부에 실시했고, 2차 그라우팅은 강관 외부와 천공홀 사이의 간극을 메우는 정도로 0.1MPa ~ 0.3MPa의 가압을 실시하였다. 시공된 마이크로파일은 미국의 FHWA(2000) 분류 기준으로 Type A 형태로 중력에 의존한 그라우팅으로 시공되었다. 또한 말뚝 두부는 지면에서 70cm 상부에 위치하도록 하여 콘크리트 캡(1m×1m×0.9m)안으로 포함시켰으며, 압축력 작용 시 말뚝의 편칭 전단을 막기 위해 두부에 강재판을 설치하였다. 그림 2는 마이크로파일의 단면을 보여주고 있다.

말뚝 두부에서 재하된 시험하중의 깊이에 따른 축하중 분포를 획득하기 위하여 진동현식 변형률계(vibrating wire type strain gauge)를 사용하였다. 설치 위치는 마이크로파일의 강관 내부에 부착을 하여야 하나 구경이 작은 관계로 설치가 용이하지 못하여 보강용 철근에 깊이 별로 부착을 하여 측정하였다. 이 때 철근에서의 변형률은 전체 단면에 걸쳐 동일하다고 가정함으로써 말뚝의 임의의 깊이에서의 전이하중을 산정하였다.

2.3 재하시험

재하시험은 KSF-2445 표준재하방법을 준용하여 실시하였으며 981kN의 시험하중을 8단계로 나누어 적용하였다. 또한 하중재하를 위한 반력수단으로 말뚝 주위 4개 지점에 미리 설치한 그라운드 앵커를 사용하였으며 그림 1의 단면도에 나타나 있다.

그림 3은 재하시험 결과를 나타낸 하중-침하 곡선이며 최종 시험하중(981kN)까지 마이크로파일이나 혹은 지반에서 파괴는 일어나지 않았다. 그러나 Davisson(1972)의 방법으로 제한하중을 설정하면 824kN임을 알 수 있다

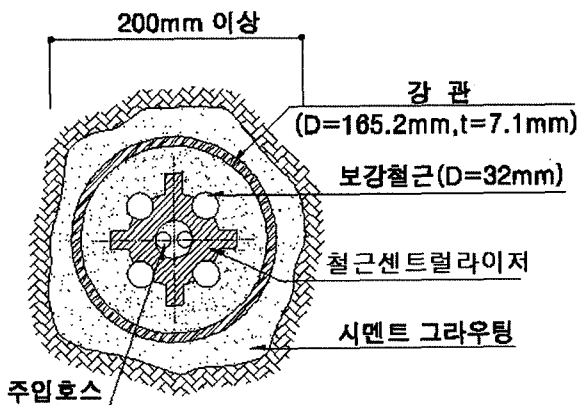


그림 2. 마이크로파일 단면

며, 안전율 2를 적용하여 허용하중을 412kN으로 추정하였다(한국지반공학회, 2003).

그림 4는 압축하중을 받는 마이크로파일의 깊이에 따른 축하중 분포를 나타낸 것으로 두부에 재하되는 하중이 증가함에 따라 마이크로파일 주변에서의 마찰저항력의 발현으로 인하여 선단부위에서 측정된 하중은 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 특히, 축하중 분포에서 재하 하중의 대부분을 7.5m 이하의 암반층에서 분담하는 것으로 나타났다. 최종 하중단계인 981kN 재하 시 변형률계에 측정된 데이터가 이전과 달리 하중-침하 곡선의 기울기가 증가하는 경향을 보여 해석에서 제외하였다.

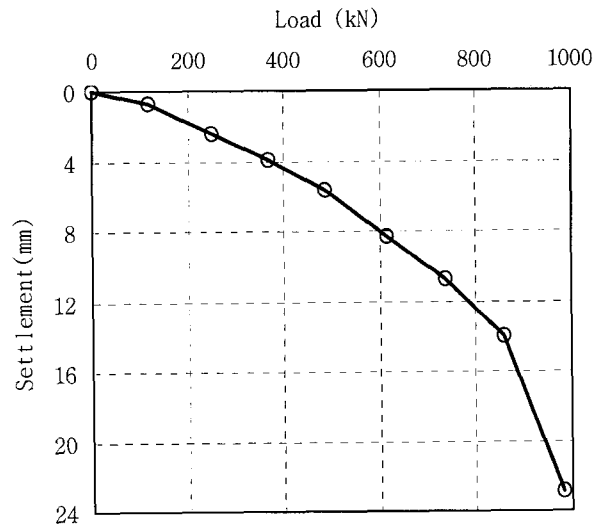


그림 3. 마이크로파일의 하중-침하곡선

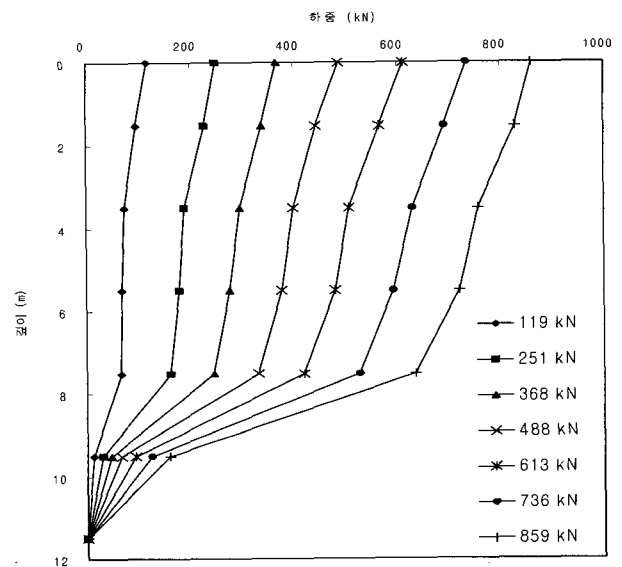


그림 4. 마이크로파일의 축하중 분포

그림 5는 임의 구간에서의 전이하중을 말뚝의 주면적으로 나누어 깊이에 따른 평균 단위주면마찰력을 구한 것으로 말뚝 두부에 재하 되는 하중의 크기가 증가할수록 마이크로파일의 주면과 지반사이의 경계면에서 발견되는 단위주면마찰력의 크기도 동시에 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 깊이에 따른 단위주면마찰력의 분포를 보면, 동일 지층인 경우에 한해 깊이가 증가할수록 단위주면마찰력의 크기가 약간 증가하는 경향을 보였다.

그러나 암반층의 경우 7.5~9.5m 구간에서 마이크로파일에 재하 되는 축하중의 대부분을 지지하고 있는 것으로 나타나 9.5~11.5m 구간으로 더 이상 하중이 전이되지 못한 것으로 추정되었다.

그림 6은 임의 깊이에서 말뚝의 변위와 단위주면마찰력과의 관계를 나타내는 주면하중전이곡선이다. 총 7개

구간에서의 주면하중전이곡선을 구했으며 깊이에 따라 곡선의 초기 기울기 값도 증가하는 경향을 보였다. 그러나 상부 실트층(0~1.5m 구간, 1.5~3.5m 구간)의 곡선들은 하부에 위치한 모래자갈층(3.5~5.5m 구간, 5.5~7.5m 구간)에서의 곡선들과 비교할 때 기울기가 더 크게 나타났다. 이러한 결과는 말뚝두부에 설치한 콘크리트 캡(1m×1m×0.9m)에 대한 지반반력의 효과 때문인 것으로 추정된다.

한편 말뚝과 지반 경계면에 해당하는 마이크로파일 주면 뿐 아니라 콘크리트 캡 하부 지반으로도 하중이 전이된 것으로 판단된다. 이러한 말뚝캡에 의한 지반반력효과를 무시하고 마이크로파일의 직경을 일률적으로 165.2mm로 놓고 주면마찰력을 계산하는 결과는 상부의 단위주면마찰력 값이 과다하게 산정될 수 있다.

3. 경험적 주면하중전이곡선의 개발

3.1 쌍곡선 함수식 형태로의 변환

현장시험이 극한상태까지 실시되지 못한 관계로 주면마찰력의 극한값을 찾을 수 없어 선형회귀 분석법을 이용하여 하중전이곡선을 쌍곡선 함수 형태로 정규화시켜 극한주면마찰력 값을 추정하였다. 말뚝과 지반사이의 상호관계를 나타내는 주면하중전이곡선은 여러 가지 비선형의 함수로 표현될 수 있는데 여기서는 두 가지 변수, 즉 곡선의 초기접선 기울기 값(k)과 극한주면마찰력 값(t_{max})에 의하여 곡선의 형태가 결정되는 쌍곡선 함수형태로 가정하여 나타내었다. 이 관계는 식 (1)과 같고, 이를 선형관계로 정리하면 식 (2)와 같다.

$$t = \frac{z}{\frac{1}{k} + \frac{z}{t_{max}}} \quad (1)$$

$$\frac{z}{t} = \frac{1}{k} + \frac{1}{t_{max}}z \quad (2)$$

여기서, k는 쌍곡선 함수의 초기접선 기울기, 그리고 t_{max} 는 극한주면마찰력.

그림 7은 3.5m~5.5m 구간의 주면하중전이곡선을 식 (2)의 형태로 표현한 것이며 해석결과 비교적 높은 상관도(R^2)를 보였다. 나머지 5개 구간에 대한 선형회귀분석 결과 또한 0.73~0.94로 양호하게 나타났다. 그리고 식 (1)에서 표현된 1차 함수의 기울기($1/t_{max}$)와 절편($1/k$)을 취하여 식 (1)에 대입하면 그림 8과 같이 마이크로파일

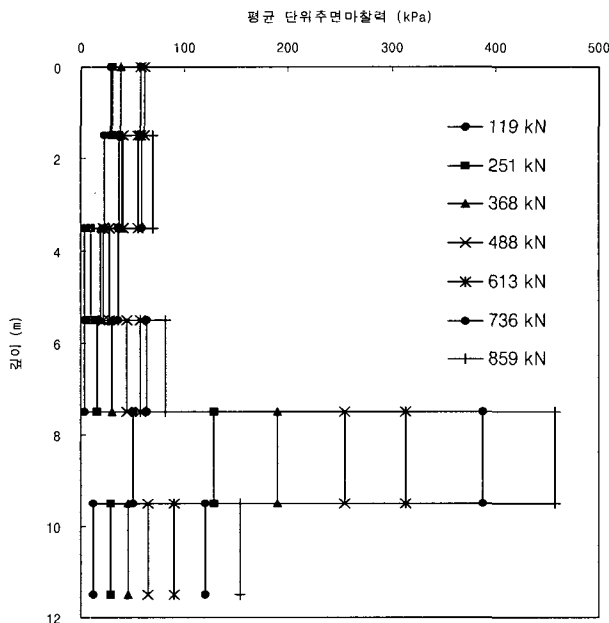


그림 5. 마이크로파일의 단위주면마찰력 분포

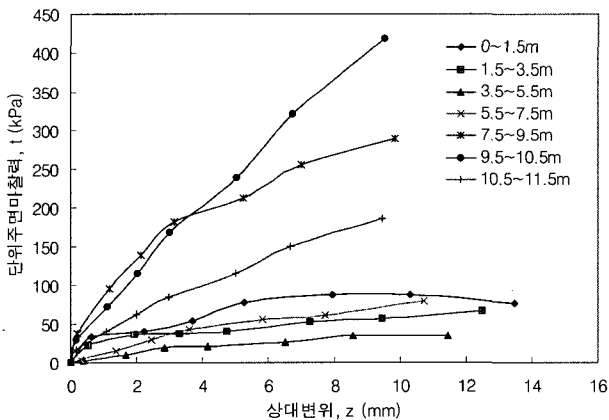


그림 6. 깊이별 마이크로파일의 주면하중전이곡선

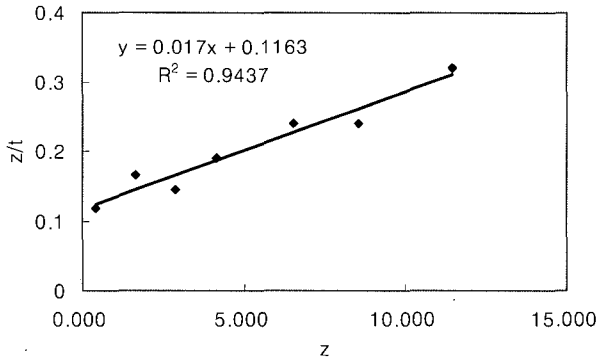


그림 7. 선형회귀분석(3.5~5.5m 구간)

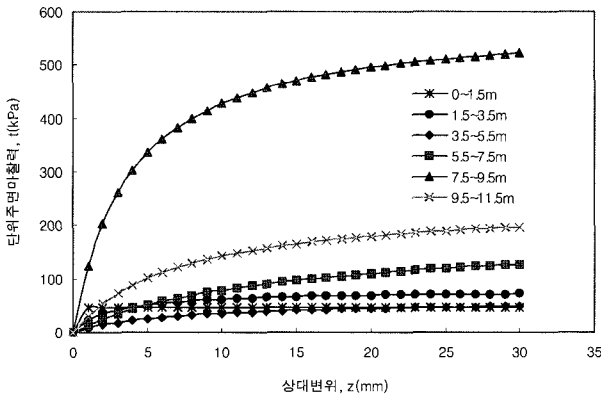


그림 8. 쌍곡선 함수 변환 주면하중전이곡선

의 주면하중전이곡선을 다시 쌍곡선 함수 형태로 나타낼 수 있다.

3.2 주면 하중전이곡선과 지반물성과의 상관관계

표 1은 그림 8에 나타낸 주면하중전이곡선의 초기접선 기울기(k)와 극한주면마찰력(t_{max})을 정리한 것이다. 모래 및 자갈층을 보면 지층의 깊이가 증가함에 따라 곡선의 기울기 값(k)이 커짐을 알 수 있다. 또한 극한주면마찰력 값(t_{max})은 일반적으로 깊이보다는 지층의 관입 저항에 따라 변화하는 것으로 알려져 있다. 따라서 지반 시추조사를 통하여 용이하게 획득할 수 있는 표준관입시험 저항치(N)와 극한주면마찰력 값과의 경험적인 상관관계를 알아보았다.

모래 및 자갈층 이외의 실트층이나 암반층의 자료를 보면 자료의 상호간 상관관계가 뚜렷하지 않아 해석대상에서 제외하였다. 실트층에 대해서는 앞서 언급했듯이 말뚝 두부에 설치한 콘크리트 캡의 지반반력 효과 때문에 곡선의 기울기 및 극한주면마찰력 값이 과대평가 된것으로 추정된다. 또한 암반층에서는 축하중 분포

표 1. 쌍곡선 함수의 초기접선 기울기 및 극한주면마찰력

구간	지층	k (kPa/m)	t_{max} (kPa)	N_{avg}
0~1.5m	실트	2500	46.3	12
1.5~3.5m	실트	30.3	77.5	14
3.5~5.5m	모래자갈	8.6	58.8	19
5.5~7.5m	모래자갈	13.8	181.8	29
7.5~9.5m	연암	156.3	588.2	-
9.5~11.5m	연암	34.2	243.9	-

주) N_{avg} : 구간에서의 평균 N값

도의 7.5~9.5m구간에서 대부분의 하중을 분담한 것으로 나타나 말뚝의 선단부 9.5~11.5m에서 주면마찰력이 발휘되지 못한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 모래 및 자갈층에 대한 해석만을 수행하였다.

지층의 깊이(Z)를 말뚝의 직경(D)으로 나눈 무차원 값(Z/D)과 쌍곡선 함수의 초기접선 기울기(k)와의 상관관계를 나타내면 다음과 같다.

$$k = \alpha \left(\frac{Z}{D} \right) = 0.334 \left(\frac{Z}{D} \right) \quad (3)$$

또한 표준관입시험 저항치(N)와 쌍곡선 함수의 극한주면마찰력 값(t_{max})의 상관관계는 다음의 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$t_{max} = \beta(N) = 4.69(N) \quad (4)$$

식 (3) 및 (4)는 모래 및 자갈층의 자료만을 활용하여 선형의 상관관계를 나타낸 것이며, 표준관입시험 저항치(N)의 범위 또한 15~35 사이인 경우로 제한한다.

3.3 역해석에 의한 비교

제안한 방법을 이용하여 본 현장 말뚝재하시험의 하중-침하 곡선을 예측해 보았다. 이 때 주면하중전이곡선을 입력변수로 하여 말뚝 두부에서의 하중-침하곡선을 계산하는 유한차분프로그램인 TZPILE(2005)을 이용하였다.

그림 9는 말뚝두부에 설치된 로드셀과 다이얼 게이지로부터 측정된 값(실선)과 제안한 방법을 이용하여 계산된 값(점선)을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 제안된 경험식으로 구한 하중-침하 곡선이 실제 측정된 곡선과 비교적 잘 일치하였다. 그러나 예측된 하중-침하곡선이 계측된 곡선보다 다소 과대평가된 경향이 있는데 이는 변형률 데이터가 7단계(859kN)까지만 획

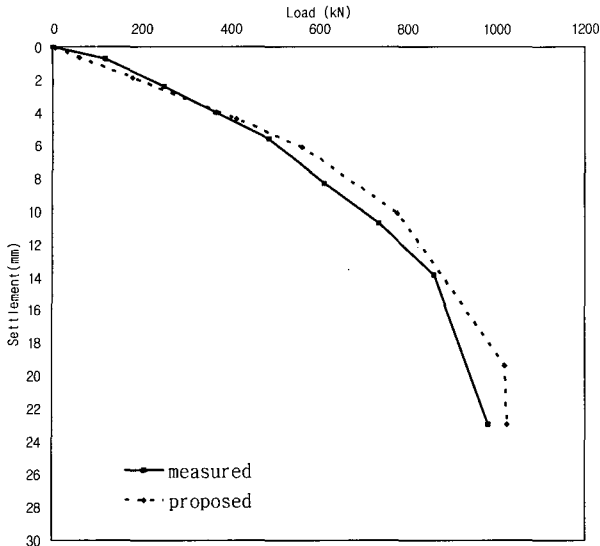


그림 9. 하중-침하 곡선의 비교

특되고 최종 하중단계(981kN)에서의 변형을 값이 누락됐기 때문인 것으로 판단된다.

3.4 현장 자료를 통한 검증

마이크로파일의 주면마찰력은 시공 및 지반조건에 크게 좌우되기 때문에 현장하중재하시험 자료를 활용하여야 하나 국내에는 가용한 문헌자료가 매우 미미한 실정이다. 따라서 최근 발표된 공규표(2004)의 연구 결과를 활용하여 제안식을 평가하였으며 N치가 정확하게 제시되지 못한 관계로 쌍곡선 형태의 하중전이곡선의 적용성만을 검토하였다. 그림 10과 같이 3.0m~5.0m 구간의 주면하중전이곡선을 식 (2)의 형태로 표현하여 0.73의 상관도를 보이며 5.0m~9.0m 구간에서는 0.80 정도를 보였다.

또한 본 논문에서는 지반조사 및 하중전이 자료의 활용이 모두 가능한 2000년 이창수의 연구결과를 고찰하고, 제한한 경험식의 적용 가능성을 평가하는 것으로 비교검증을 실시하였다. 시험말뚝의 직경 및 길이는 각각 150mm, 9.7m로 본 현장의 제원과 비슷하였다.

그러나 풍화암 지층에 대한 주면의 하중전이곡선 예측은 본 연구내용의 범위를 벗어나므로 비교대상에서 제외하고, 풍화암류토층에서의 주면하중전이곡선만을 적용하였다. 표 2는 시험말뚝을 6개 구간으로 나누어 정리한 지반조건 및 해석변수들이다.

그림 11에서 14까지는 실측값과 본 연구에서 제안한 방법으로 추정되는 하중전이곡선을 비교한 것이다. 그

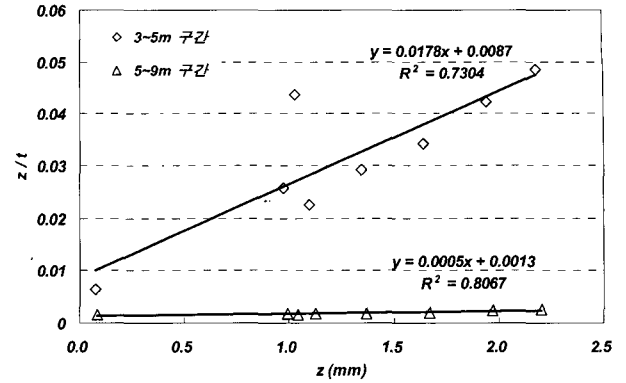


그림 10. 주면하중전이곡선의 비교

표 2. 쌍곡선 함수의 초기접선 기울기 및 극한주면마찰력(이창수, 2000)

구간	지층	k	t _{max}	N _{avg}
0~1.9m	풍화토	13.3	117	4
1.9~3.4m	풍화토	5.1	127	14
3.4~4.9m	풍화토	20.1	156	36
4.9~6.4m	풍화토	58.3	372	50 이상
6.4~7.9m	풍화암	118.5	372	50 이상
7.9~9.7m	풍화암	49.7	265	50 이상

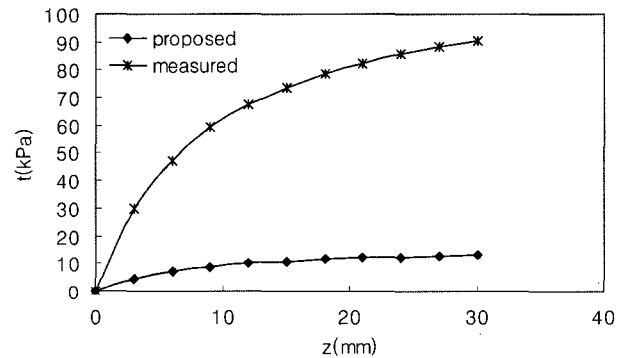


그림 11. 주면하중전이곡선의 비교(0~1.9m 구간)

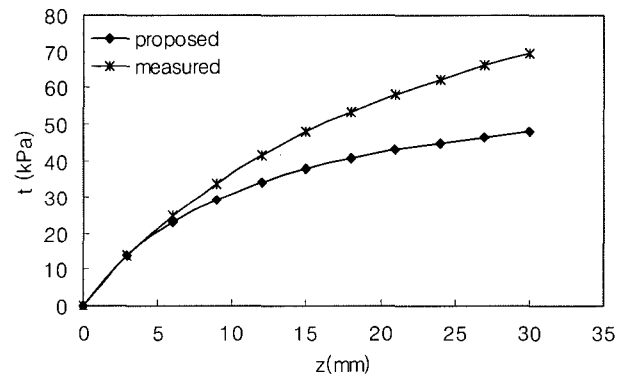


그림 12. 주면하중전이곡선의 비교(1.9~3.4m 구간)

림 11과 같이 표준관입시험 저항치(N)가 낮은 범위와 그림 14과 같이 높은 범위에서는 많은 오차를 보여주고

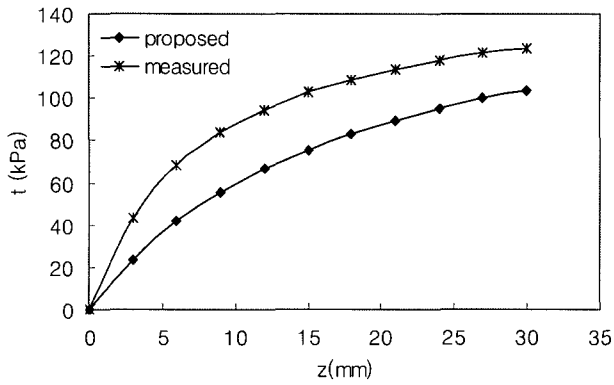


그림 13. 주면하중전이곡선의 비교(3.4~4.9m 구간)

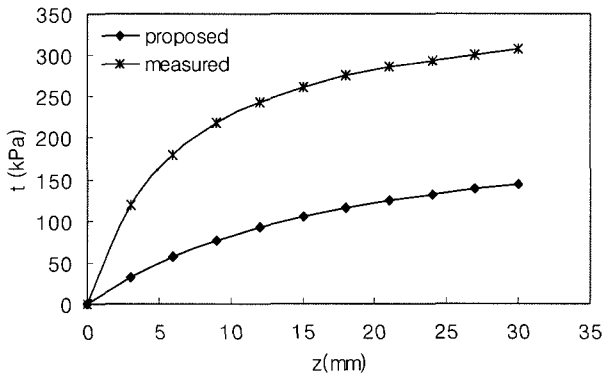


그림 14. 주면하중전이곡선의 비교(4.9~6.4m 구간)

있다. 반면 그림 12과 13과 같이 저항치(N)의 범위가 15~35 정도인 풍화지반에서는 상대변위별 주면마찰력의 크기를 적절하게 추정함을 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 실물크기의 마이크로파일에 대한 현장 하중재하시험을 실시하였으며 그 결과를 바탕으로 하여 마이크로파일의 경험적 주면하중전이곡선을 개발하였다. 그리고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 마이크로파일의 주면하중전이곡선을 쌍곡선 함수 형태로 변환후 선형회귀분석을 실시한 결과 비교적

높은 상관도를 나타냈으며, 이를 통하여 극한주면 마찰력 값의 추정이 가능함을 알 수 있었다.

- (2) 본 연구를 통해 개발된 경험식을 이용하여 표준관입 시험 저항치(N)의 범위가 15~35인 풍화지반에 적용한 결과, 주면하중전이곡선을 비교적 잘 예측하였다.
- (3) 본 연구에서 제안한 방법은 사용된 시험 데이터의 한계로 인하여 개발된 경험식의 적용이 매우 제한적임으로 추후 다양한 지반조건에서 실시되는 마이크로파일에 대한 하중재하시험 자료의 확보 및 보완 연구들이 요구된다.

감사의 글

본 논문은 서울시 지하철건설본부 산학협동연구의 일부로서, 연구를 가능케 한 서울시와 (주)대우건설 관계자 여러분께 감사드립니다. 아울러 본 논문의 내용은 서울시의 공식적인 내용이나 정책이 포함되어 있지 않음을 밝힙니다.

참고 문헌

1. 공규표 (2004), 소구경 말뚝의 재하시험에 의한 하중전이에 관한 연구, 석사학위논문, 부산대학교 산업대학원.
2. 노강구 (2006), 모래지반에서의 마이크로파일 하중전이곡선 개발에 관한 실험적 연구, 석사학위논문, 단국대학교.
3. 이창수 (2000), 축하중을 받는 소구경 말뚝의 하중전이특성, 석사학위논문, 단국대학교.
4. 일본토질공학회 (1980), 어스앵커공법, 박문기술부.
5. 한국산업규격 (2002), "KSF-2445, 축하중에 의한 말뚝침하 시험방법"
6. 한국지반공학회 (2003), 구조물 기초설계기준 해설.
7. Coyle, H. M. and Reese, L. C. (1966), "Load Transfer for Axially Loaded Piles in Clay", Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol.92, No.SM2, pp.1-26.
8. Federal Highway Administration (2000), Micropile Design and Construction Guidelines Implementation Manual, Report No. FHWA-SA-97-070, US Department of Transportation, Washington, D.C.
9. TZPILE (2005), Manual for Computer Program TZPILE, 2.0, Ensoft, Inc. Austin, Texas, U.S.

(접수일자 2006. 5. 24, 심사완료일 2007. 1. 11)