

현장 계측 사례를 통한 단독 말뚝의 주면마찰계수(α , β 계수) 역산정

Back-calculation of Skin Friction Coefficient (α , β) on a Single Pile by Long-Term Field Monitoring

고 준 영¹ Ko, Jun-Young

김 영 호² Kim, Young-Ho

최 용 규³ Choi, Yong-Kyu

정 상 섭⁴ Jeong, Sang-Seom

Abstract

A fundamental study of the pile-soil systems subjected to negative skin friction in soft soil was conducted using the long-term field measurements. The emphasis was on the identification of the magnitude and distribution of skin frictions (α and β coefficients) in bitumen coated and uncoated piles. A skin friction coefficient of instrumented piles is back-calculated by varying degrees of consolidation (U) of surrounding soils. It is shown that the bitumen coated pile is capable of reducing the negative skin friction up to almost 50 to 90 percents. Through comparisons with the existing friction coefficient values (α and β coefficients), the calculated coefficients are within the appropriate range, and thus we can suggest basic materials to estimate the realistic pile behavior in the short-term and long-term analysis.

요 지

본 연구에서는 부주면마찰력이 발생하는 3개 지역 중 16본 말뚝의 현장 계측 자료들을 바탕으로 국내 지반 특성에 맞는 주면마찰계수(α , β 계수)의 분포범위를 압밀도(U)와 역칭재(S.L) 도포 유무에 따라 역산정하였다. 역칭재 도포 말뚝의 부주면마찰력 저감효과는 50~90% 정도인 것으로 나타났으며, 기존 설계에 사용되던 제안 값과의 비교를 통해, 본 연구에서 산정된 α 와 β 계수가 적정 범위에 있으며, 그 결과 국내지반조건을 반영한 말뚝의 장, 단기 주면마찰력을 예측할 수 있는 기본자료를 제시하였다.

Keywords : α and β coefficient, Bitumen coating, Degree of consolidation, Long-term and short-term analysis, Negative skin friction

1. 서 론

최근 산업화에 따른 도시로의 인구집중과 용지면적의 부족으로 인해 사회 시설물의 고밀도화가 요구되고 있으며, 이에 따라 상대적으로 건설이 용이한 매립 잔적지 및 해안 지역에 대한 관심이 높아지고 있다. 하지

만, 매립 잔적 지역의 지질학적 특성상 연약층이 두텁고 지하수위가 높아, 대규모 구조물 시공 시 추가 성토나 지하수위의 변화에 따른 압밀 침하 및 부주면마찰력의 발생 가능성이 크기 때문에 이러한 사항을 복합적으로 고려한 하부기초의 설계가 필요하다.

말뚝에 하향력으로 작용하는 부주면마찰력은 말뚝

1 정희원, 연세대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

2 정희원, 연세대학교 토목공학과 박사후 연구원 (Member, Post-doctoral Fellow, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

3 정희원, 경성대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyung Sung Univ.)

4 정희원, 연세대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., soj9081@yonsei.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

자체에 수직 압축응력과 침하를 증가시키게 되어 상부 구조물에 과대한 손상을 주고 말뚝의 지지력 감소 뿐 아니라 경우에 따라서는 작용하중이 극한지지력을 초과하여 구조적 파괴를 발생시키기도 한다(Hanna와 Sharif, 2006; Gayarre 등, 2010). 그러므로 부주면마찰력의 정확한 산정은 말뚝의 설계, 시공 및 해석 시 안전을 확보가 관건이라 할 수 있다. 또한, 이러한 부주면마찰력을 감소시키기 위해 주로 말뚝 주면에 역청재(S.L., slip layer)를 도포하는데, 역청재의 종류 및 두께, 지반 특성에 따라 저감의 정도는 다르나 일반적으로 50~90% 정도의 부주면마찰력 감소효과를 발휘하는 것으로 많은 연구자들에 의해 보고되고 있다(Bjerrum 등, 1969; Briaud, 1983, 1989, 1992, 1997; Felenius, 1975, 1979; 정상섭 1993; 정상섭 등, 1996).

현재 국내에서는 구조물기초 설계기준(한국지반공학회, 2009)등에 부주면마찰력을 고려한 말뚝의 허용지지력 공식이 존재하나 그 적용성에 있어서 명확한 기준이 없는 것이 현실이다. 따라서 부주면마찰력이 고려된 말뚝기초의 설계를 위해서는 먼저 침하량 해석이 수행된 후에 말뚝의 침하량과 상부구조의 허용침하량이 산정되어야 한다(Jeong et al., 2004; Jeong and Kim, 1998). 부주면마찰력의 크기를 결정하는 방법에는 크게 현장 시험결과 활용법 및 경험적 방법(계수법) 그리고 유한

요소 해석법이 있다. 그러나 현재까지 이러한 부주면마찰력 산정법과 압밀 등의 연약지반 특성을 적절히 고려한 연구는 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 현장 계측 사례들을 바탕으로 연약지반상의 역청재(S.L.) 도포에 따른 부주면마찰력 감소효과 및 국내 지반 특성에 맞는 압밀도를 고려한 주면마찰력 산정 계수를 제안하고자 한다.

2. 이론적 배경

연약 점성토층에 시공된 말뚝에 하중이 재하되지 않는 경우 말뚝의 축력은 말뚝에 작용하는 단위 면적당 발생하는 주면마찰력의 누적 값이 된다. 하지만 그림 1과 같이 말뚝에 하중이 재하되는 경우 말뚝의 축력은 재하 하중과 단위 면적당 작용하는 주면마찰력의 합으로 산정할 수 있다. 부주면마찰력 발생시, 말뚝 주면에 발생하는 축력의 분포는 깊이에 따라 증가하여 중립점에서는 축력이 서서히 감소한다. 축력의 증감상태, 최대 축력의 발생 깊이, 말뚝 선단부의 잔류 축력 등은 중립점 위치에 영향을 미치는 인자로, 말뚝의 단면, 지지층 유무 그리고 중간토층의 물성이나 침하량 등에 따라 변화하여 부주면마찰력 발생 양상이 달라지게 된다. 이러한 말뚝

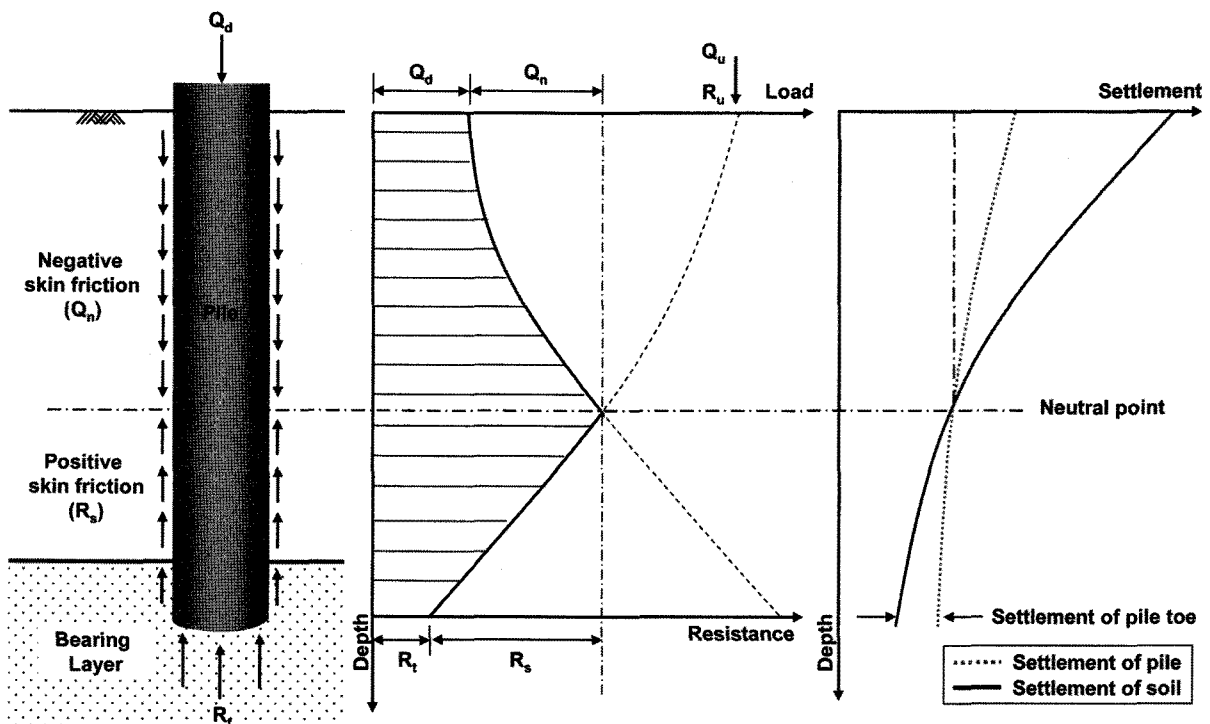


그림 1. 부주면마찰력의 Mechanism

에 작용하는 부주면마찰력의 크기와 거동을 예측하는 방법은 말뚝-지반의 상호작용을 바탕으로 한 복합적인 문제로, 많은 해석 방법들이 연구되어 왔다. 이들 방법은 크게 경험적인 방법과 탄소성 해석법, 하중전이 곡선법 그리고 유한요소 해석법으로 구분할 수 있다. 일반 설계에서 가장 널리 사용되는 방법인 경험 공식을 이용한 방법에는 비배수 전단강도를 이용한 단기안정 해석법인 전단강도법(α 계수법), 장기 안정 해석법인 유효응력법과(β 계수법) 두 방법을 혼합한 λ 계수법이 있다.

본 연구에서는 말뚝의 장단기 안정 해석을 위하여, 앞서 언급한 방법 중 α 계수법과 β 계수법을 바탕으로 현장계측 자료와의 비교를 통하여 적용가능한 주면마찰 계수 값을 고찰하고자 하였다.

α 계수법은 말뚝을 따라 분포하는 전단응력이 말뚝과 지반의 상대 변위에 직접적으로 영향을 미친다는 가정하에 제안된 방법으로(Terzaghi 와 Peck, 1967; Broms 등, 1969; Begeman, 1969), 주면마찰력을 비배수 전단강도(c_u)를 이용하여 산정한다. 이 방법은 비배수 전단강도를 구하지 못하는 사질토에는 적합치 않으며, 점토와 점토질 실트의 단기거동 해석에 이용한다. α 계수법을 이용한 부주면마찰력 산정과정은 다음과 같다.

$$Q_n = f_n A_s \quad (1)$$

$$f_n = \alpha c_u \quad (2)$$

여기서, Q_n 은 부주면마찰력이고, A_s 는 부주면마찰력이 작용하는 부분의 말뚝주면적이다. α 계수는 말뚝의 재질과 비배수전단강도(c_u)에 따라 달라진다.

β 계수법은 많은 연구자들(Zeevaert, 1959; Garlanger,

1974; Meyerhof, 1976; Bozozuk, 1981; Combarieu, 1895; Briaud; 1997)에 의해 여러 시험결과가 보고된 주면마찰력 산정법으로, 말뚝 시공 후 일정한 시간이 경과한 후에 하중이 말뚝에 작용하며 하중이 작용하는 시점에서는 말뚝 시공으로 발생한 과잉간극수압이 완전히 소산되었다고 가정하여, 말뚝 주면에 작용하는 단위면적당 부주면마찰력(f_n)을 이용하여 산정한다. 일반적으로 β 계수법은 α 계수법과 달리 사질토에도 적용이 가능하며, 장기 안정해석에 주로 사용된다. β 계수법을 이용한 산정과정은 다음과 같다.

$$f_n = \beta \sigma'_v \quad (3)$$

여기서, σ'_v 는 유효상재압 이고, β 는 지반의 상태에 따라 달라지는 경험계수로 각 제안자들의 제안 값을 표 1에 정리하였다.

3. 현장 말뚝 계측 사례 및 침하량 분석

본 연구에서는 국내현장지반에 적합한 부주면마찰력 산정법을 분석하기 위하여, 부산과 포항지역에서 실시된 현장 계측 자료를 이용하였다. 시험말뚝은 암말이 발생할 수 있는 압축성의 연약지반층을 통과하여 풍화토 이상의 암층에 근입되어있으며, 말뚝 주변부에 역청재(S.L.) 도포 유무에 따른 시공을 수행하였다.

3.1 부산지역 사례(2001)

부산지역 사례는 시간경과에 따른 암밀영향을 분석하기 위하여 연약지반 처리 전인 원지반 상태에서부터

표 1. 기존 제안된 β 값

β 값	지반조건	제안자
0.20~0.25	점토	Baligh 등(1981) Lambe와 Baligh(1978)
0.25~0.35	실트	
0.30~0.50	모래	
0.20	연약하거나 중간정도의 Norwegian 해상점토	Johannessen과 Bjerrum(1965)
0.18~0.23	연약하거나 중간정도의 Norwegian 해상점토	Bjerrum 등(1969)
0.25~0.26	실트질에 가까운 Norwegian 해상점토	
0.20~0.35	매우 연약한 실트질 점토	Endo 등(1969)
0.02~0.35	충적점토	일본토질공학회
0.20~0.30	점성토(연약~견고)	Combarieu(1985)
0.35~1.00	사질토(느슨~매우조밀)	
0.02	점성토 지반에 근입된 역청재 도포 말뚝	

예정 압밀침하 완료 후까지 약 1년간의 장기 지반 계측을 수행하였고, 압밀 완료 시점에서 말뚝의 정재하시험을 수행하였다. 시험말뚝은 총 8본으로 S.L 도포 말뚝과 미도포 말뚝으로 나누어 성토 시작 전에 항타 시공하였으며, 직경은 0.609m 이고, (두께:12mm) 길이는 50m이다. 말뚝의 심도별 축하중 분포를 계측하기 위하여 전기 저항식 변형률계를 180° 간격으로 0.5~1.0m 심도마다 용접하여 설치하였다.

지반조건은 상부 실트질 모래층(SM) 하부로 압축성이 강한 실트질 점성토(CL)과 점성토층(CH)이 약 10~12m 정도 분포하고 있는 연약지반 지형으로, 총 6공의 시추공을 통하여 지반 층서를 확인하였으며, SPT와 현장 베인시험 및 실내 물성시험을 통하여 지반정수를 산정하였다. 대상 지역의 시공된 말뚝 및 지층 구성도는 그림 2와 같다.

3.2 부산지역 사례(2006)

본 계측 사례는 2001년에 수행된 부산지역 시공현장의 지역 인근에서 수행되었으며, 약 7개월간에 걸친 장기 계측과 S.L. 도포에 따른 부주면마찰력 저감효과 및 말뚝의 거동을 분석하였다. 시험말뚝은 총 6본의 강관 말뚝으로 성토 시작 전에 항타 시공하였으며, 직경은 0.61m(두께 12mm)이고 길이는 약 57m이다. 부산지역 2001년 사례와 동일하게 말뚝의 축하중 분포를 확인하기 위하여 0.5~1.0m 간격으로 변형률계를 설치하였다.

지반조건은 상부 실트질 모래층(SM) 하부로 약 18m 이상의 두터운 점성토(CH, CL) 층이 분포하고 있는 연약지반 지형으로, 총 2공의 시추공을 통하여 지반 층서를 확인하였으며, 현장 및 실내 물성시험을 통하여 지반정수를 산정하였다. 대상 지역의 시공된 말뚝 및 지층 구성도는 그림 3과 같다.

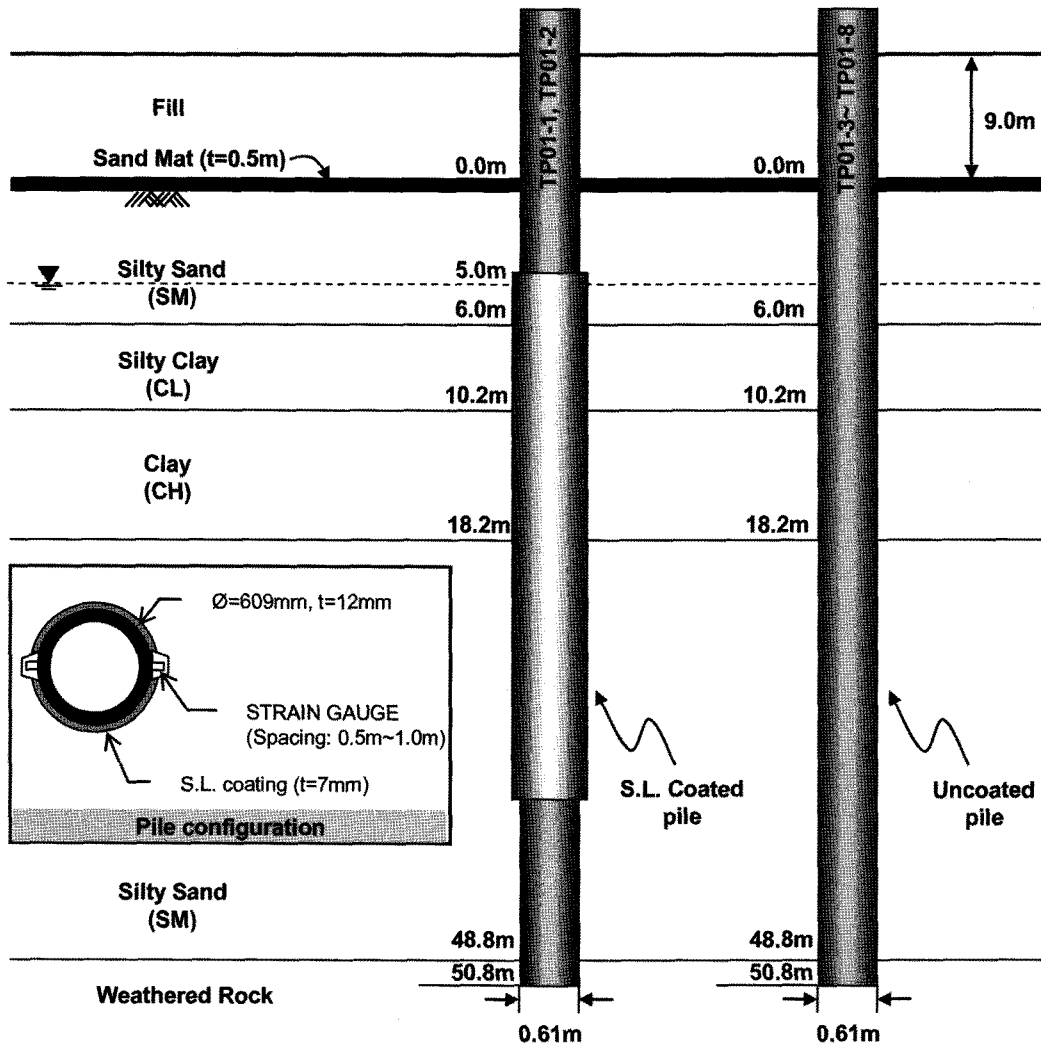


그림 2. 부산지역 재하시험(2001)에 사용된 말뚝 및 지층 구성

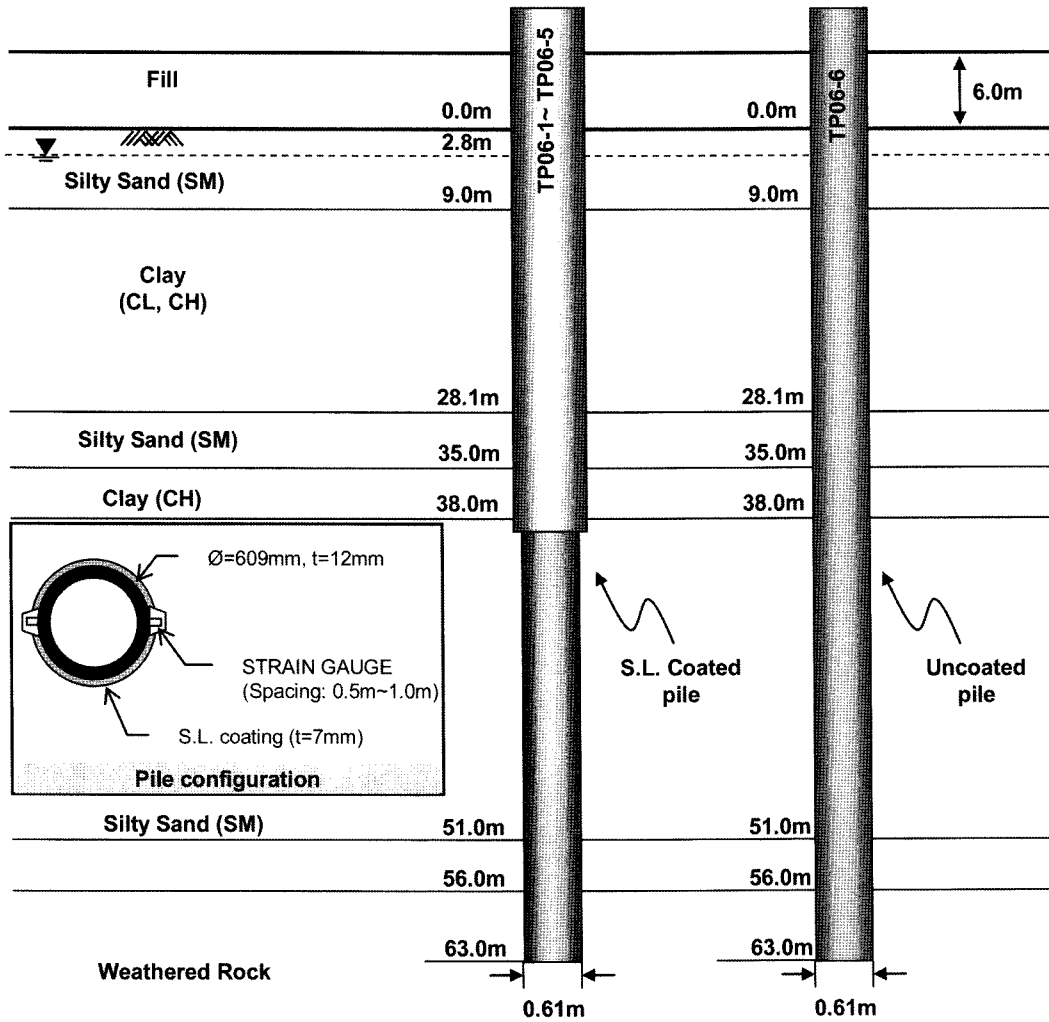


그림 3. 부산지역 재하시험(2006)에 사용된 말뚝 및 지층 구성

3.3 포항지역 사례(1998)

포항지역에서는 약 7개월간 연약지반 계측을 수행하였고, S.L. 도포 유무에 따른 직경 0.51m(두께:16mm)이고 길이가 63m인 2본의 시험 말뚝을 성토 전에 항타 시공하였다. 심도별 축하중 계측을 위한 축방향 변형률계는 2.0~5.0m 간격으로 설치하였다. 포항지역 또한, 앞선 계측 사례들과 동일하게 상부 실트질 모래층(SM) 하부로 약 26.3m 정도의 실트질 점성토(CH, CL) 층이 분포하고 있는 연약지반 지형으로, 총 17공의 시추공을 통하여 지반 층서를 확인하였으며, 현장 및 실내 물성시험을 통하여 지반정수를 산정하였다. 대상 지역의 시공된 말뚝 및 지층 구성도는 그림 4와 같다.

3.4 최종 압밀 침하량 및 압밀도 산정

계측 대상 구간은 여러 번의 단계성토에 의하여 소정

의 높이까지 성토가 진행되었으며 성토단계별 침하량을 측정하기 위하여 지표침하판 및 층별침하판이 설치되어 있다. 대상지역의 성토고에 대한 지표 침하량은 그림 5와 같다. 그림의 횡축은 성토 시작일을 기점으로 경과일 수이고, 종축은 각각 침하량과 성토고를 도시하였다.

현장 토질조건이 고려된 정확한 침하분석을 하기 위하여, 현장 계측관리를 통한 지표 침하판 및 층별 침하계의 data를 비교 분석 하였으며, 이를 바탕으로 예상되는 최종 침하량, 현재까지의 압밀도, 임의 시점에서의 압밀도 등을 추정하고자 하였다. 실제 계측된 값을 사용하는 침하분석 방법으로 쌍곡선법, Hoshino법 Asaoka법 등이 있으며, 본 연구에서는 각 방법의 신뢰도 분석 및 문헌연구(이승우 등, 1997; 유한규와 김종희, 2000; 김종렬 등, 2005)를 통하여, 이중 쌍곡선법을 사용하여 최종 침하량을 예측하고자 하였다. 쌍곡선법은 침하의 평균 속도가 쌍곡선 형태의 수학적 함수에 따라 감소한다는 가정 하에 초기의 실측침하량으로부터 장래의 침하

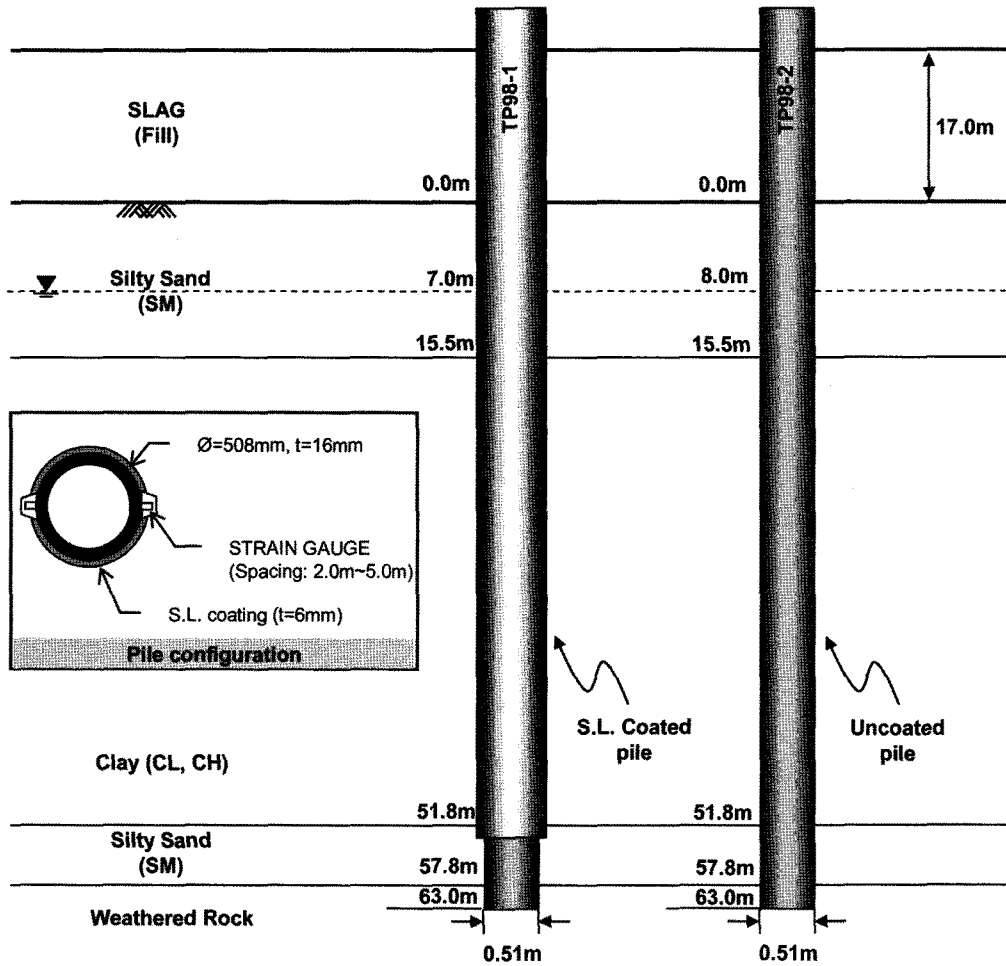


그림 4. 포항지역 재하시험(1998)에 사용된 말뚝 및 지층 구성

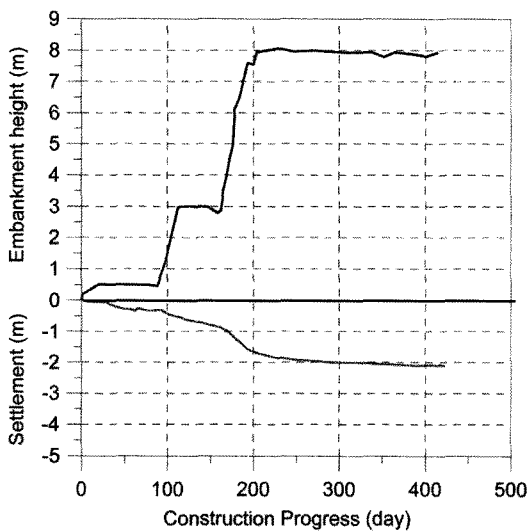


그림 5. 대상 지역의 경과시간에 따른 침하곡선(부산, 2001)

량을 예측하는 방법으로 기본식은 다음과 같다.

$$S_t = S_0 + \frac{t}{a+bt} \quad (4a)$$

$$S_f = S_0 + \frac{1}{b} \quad (4b)$$

여기서, S_0 는 성토종료 직후의 침하량이고, S_t 는 성토종료 경과시간 t 에서의 침하량이며, S_f 는 100% 압밀이 완료된 시점에서의 최종 침하량이다. a 와 b 는 실측침하량을 바탕으로 선형 회귀분석을 통해 구할 수 있는 계수이다. 계수 a 와 b 를 얻기 위하여 성토가 종료된 t_0 부터 t 시점까지의 실측침하량을 기준으로 y 축에 $(t-t_0)/(S_t-S_0)$ 를 취하고 x 축에는 시간경과 $(t-t_0)$ 를 도시하여 얻은 계측 침하량 값을 선형회귀분석 하였다. 그림 6은 시간-침하관계로부터 쌍곡선법에 의한 선형회귀분석을 수행한 결과이다.

부산지역 계측사례(2001)의 최종 성토 이후 예측된 침하량 결과를 살펴보면, 223.3cm로 성토종료 직후의 침하량 170.1cm보다 큰 값을 보이고 있다. 성토가 단계적으로 진행되고 있는 경우에는 종래의 성토에 의한 침하가 내포되어 있기 때문에, 예측에 있어서 부정확한 결과를

가져왔다. 하지만 최종 성토가 실시된 이후 방치가 되면 침하량이 점차 수렴하는 경향을 보인다. 따라서, 회귀분석을 수행함에 있어서 후반부의 직선부분을 주목함이 바람직할 것으로 판단되고, 실제로 쌍곡선법으로 분석

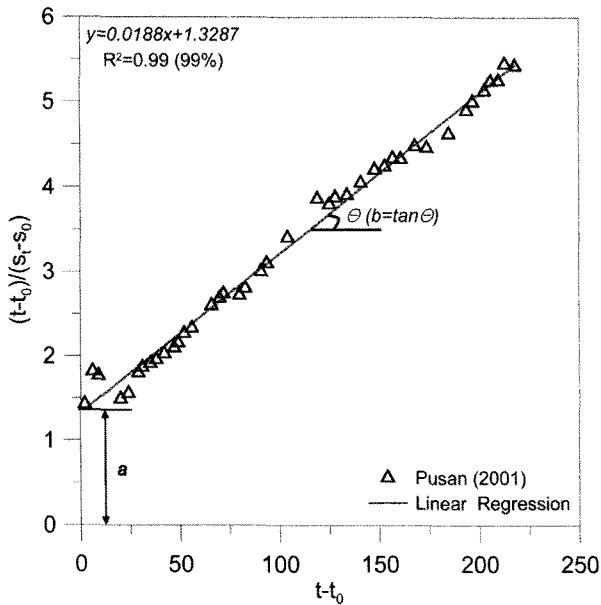


그림 6. 쌍곡선법을 이용한 선형회귀분석

표 2. 쌍곡선법에 의한 최종 침하량 예측결과

구분	초기 침하량(S_0)	계수 b	최종침하량(S_f)	신뢰도(R^2)
부산(2001)	170.1cm	0.0188	223.3cm	0.99
부산(2006)	147.6cm	0.0235	190.2cm	0.88
포항(1998)	250.8cm	0.0125	330.9cm	0.91

한 결과 신뢰도가 99% 정도로 나와 예측정도가 높은 것으로 판단된다. 같은 방법으로 나머지 2개 지역의 침하 예측 결과를 바탕으로 쌍곡선법 회귀분석을 수행하여 표 1과 같은 최종침하량 예측결과를 확인하였다. 또한, 압밀 진행에 따른 말뚝 주변부 특성 파악을 위하여, 산정되어진 최종 침하량 예측 값을 바탕으로, 다음과 같이 시간경과에 따른 특정 시기의 압밀도를 추정하였다.

$$\frac{\text{특정시기의 지표침하량}}{\text{예측된 최종 침하량}} \times 100 = \text{특정시기의 압밀도, } U (\%) \quad (5)$$

4. 유효응력법(β 계수법)에 의한 주면마찰력 분석

4.1 압밀 진행에 따른 말뚝의 하중 분포

본 절에서는 시간경과에 따른 말뚝의 심도별 축하중 분포를 바탕으로 압밀진행에 따른 부주면마찰력 발생 양상과 S.L. 도포효과를 확인하고자 하였다. 그림 7에서 9까지는 각 계측 지역별 대표적인 S.L. 도포 및 미도포 말뚝의 압밀 진행에 따른 축하중 분포도를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 계측 대상 구간에서 부주면

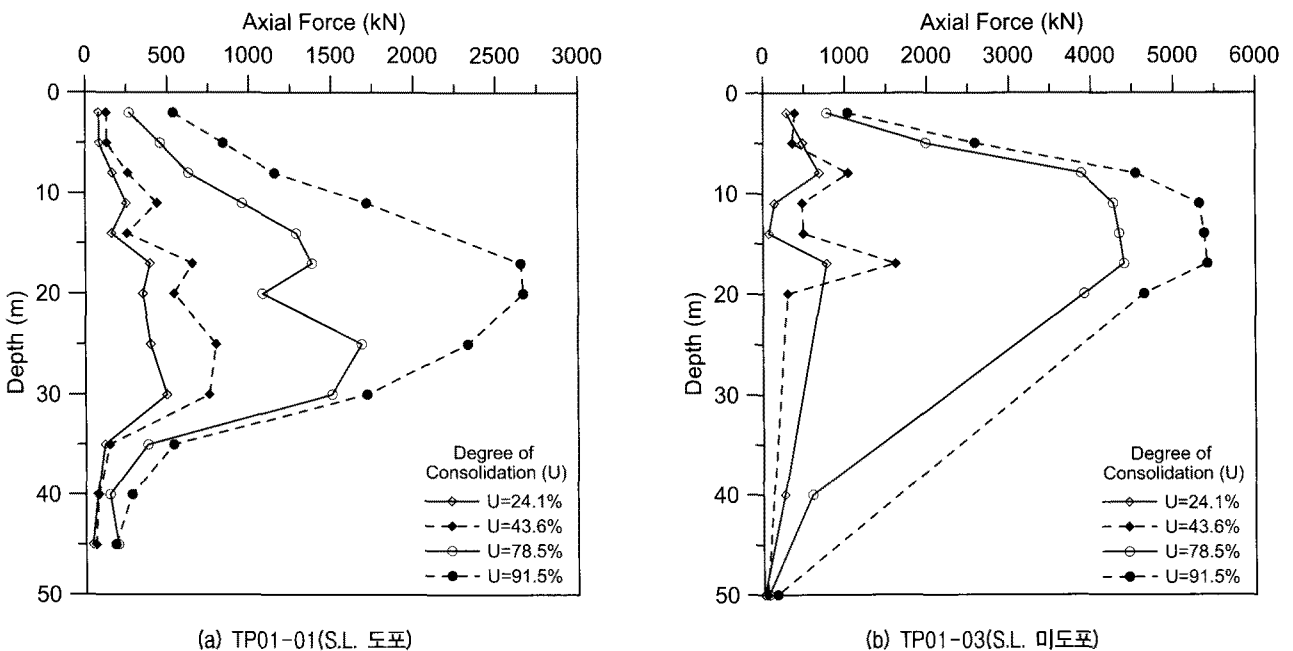
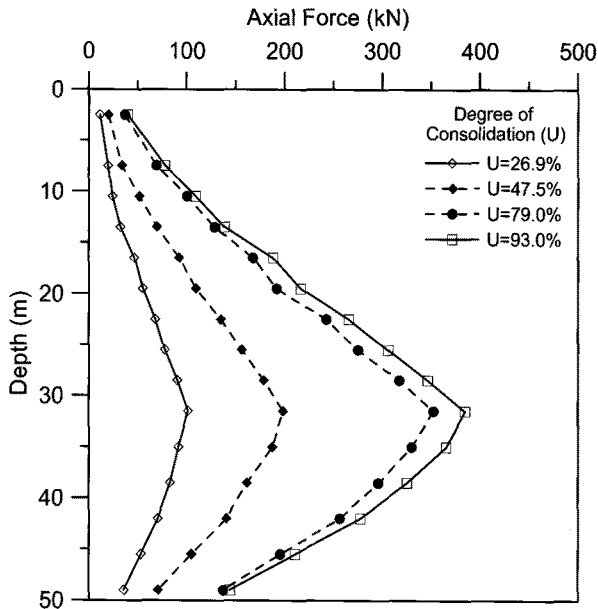
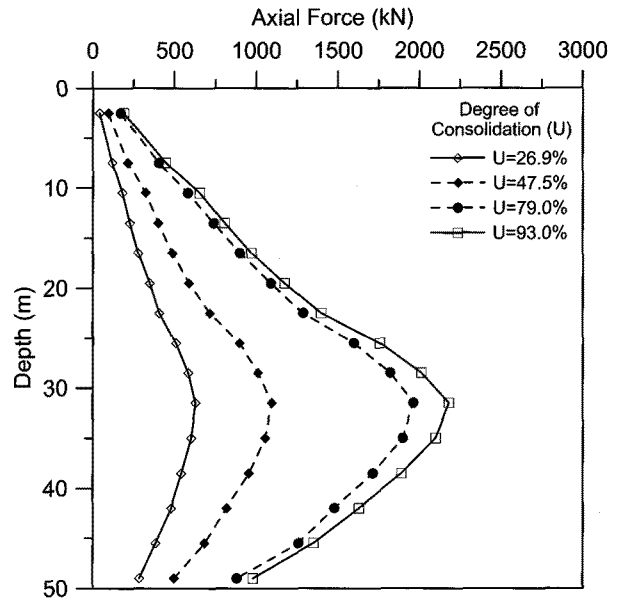


그림 7. 계측 사례별 압밀 진행에 따른 축하중 분포도 (부산, 2001)

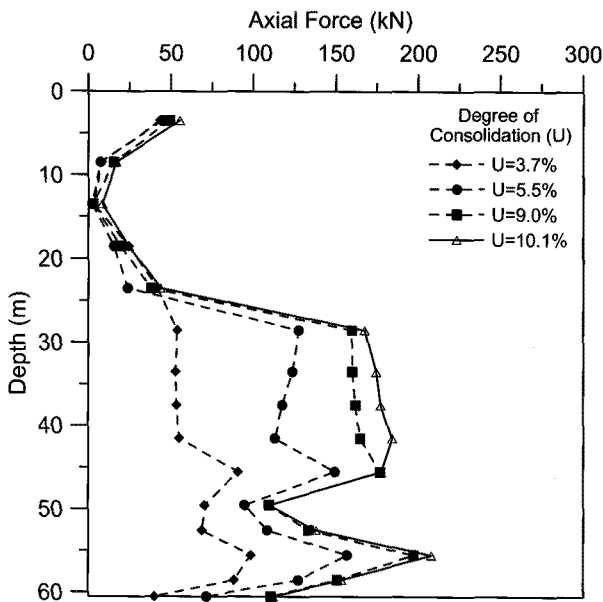


(a) TP06-01(S.L. 도포)

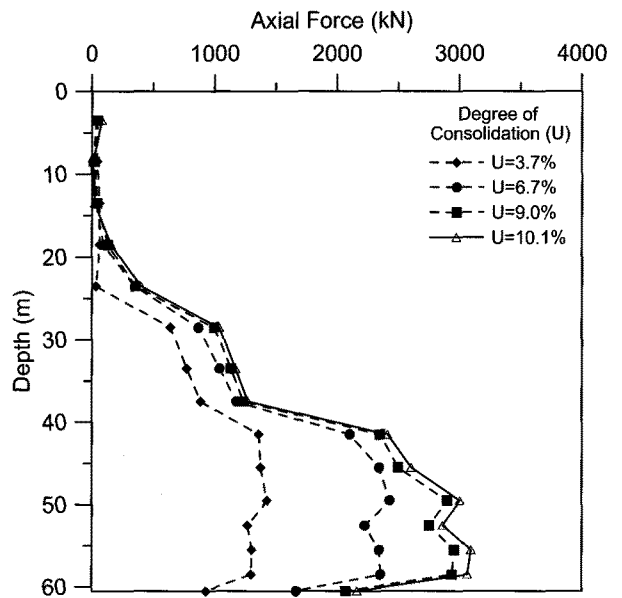


(b) TP06-06(S.L. 미도포)

그림 8. 계측 사례별 압밀 진행에 따른 축하중 분포도(부산, 2006)



(a) TP98-01(S.L. 도포)



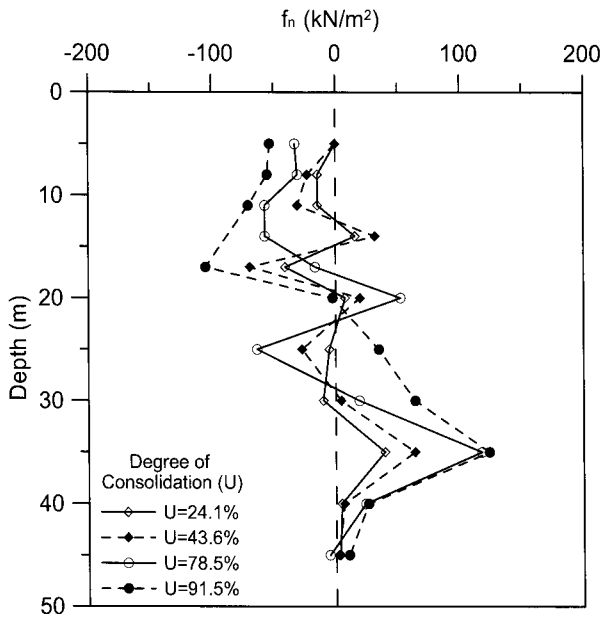
(b) TP98-02(S.L. 미도포)

그림 9. 계측 사례별 압밀 진행에 따른 축하중 분포도(포항, 1998)

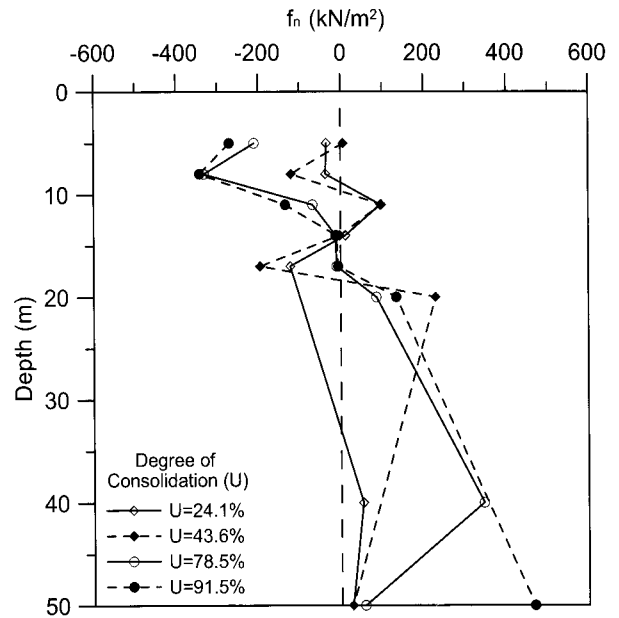
마찰력이 발생하고 있는 것을 확인할 수 있다. S.L. 도포를 하지 않은 무처리 말뚝의 경우, 축력은 성토재하 직후 급격히 증가한 뒤 그 증가세가 점차 감소하는 경향을 보였으며, 도포처리 된 말뚝은 성토재하 직후 발휘된 축력이 이후 크게 증가하지 않았다. 이러한 도포 처리에 따른 축력 감소량은 무처리 말뚝에 비해 최대 82% 정도로 나타났다.

4.2 압밀도에 따른 β 계수 분포범위 산정

그림 10에서 12는 압밀 진행에 따른 말뚝의 축하중 분포도를 바탕으로 장기계측에 따른 말뚝의 주변마찰력을 산정한 것이다. 앞서 축력 분포도에서 언급했던 것과 같이, 부주면마찰력의 발생은 압밀이 진행됨에 따라 현저하게 둔화되는 것으로 나타났으며, 역처재를 도포함에 따라 그 발생 정도 역시 현저하게 감소시킬 수 있

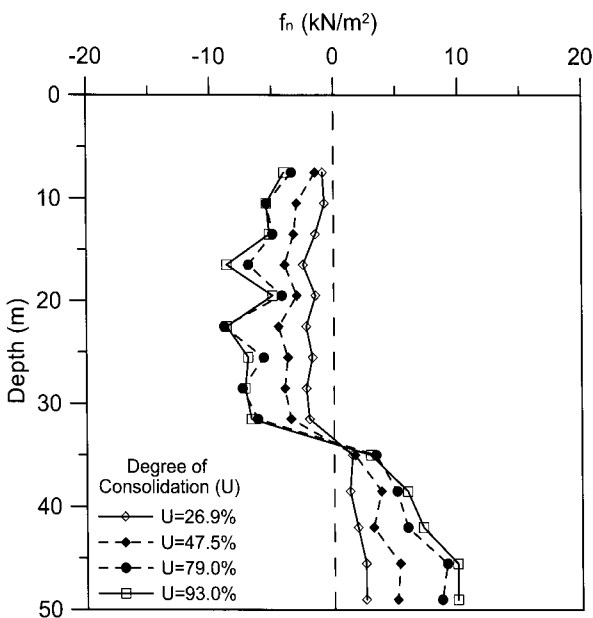


(a) TP01-01(S.L. 도포)

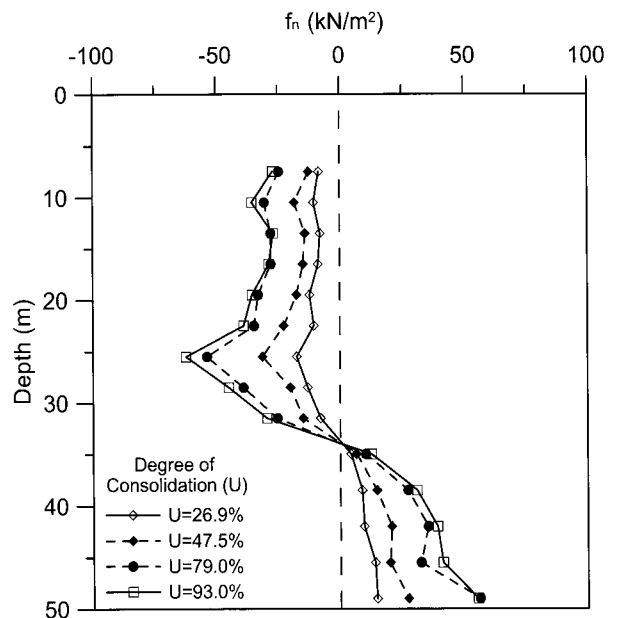


(b) TP01-03(S.L. 미도포)

그림 10. 계측 사례별 압밀 진행에 따른 주면마찰력 분포도(부산, 2001)



(a) TP06-01(S.L. 도포)



(b) TP06-06(S.L. 미도포)

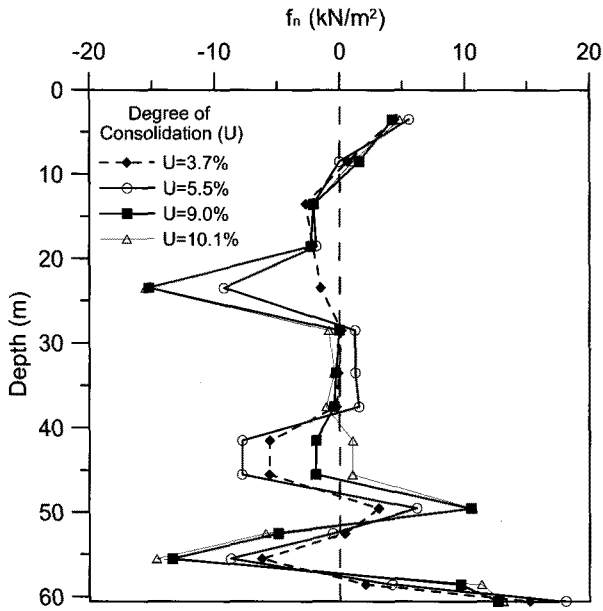
그림 11. 계측 사례별 압밀 진행에 따른 주면마찰력 분포도(부산, 2006)

는 것을 확인하였다.

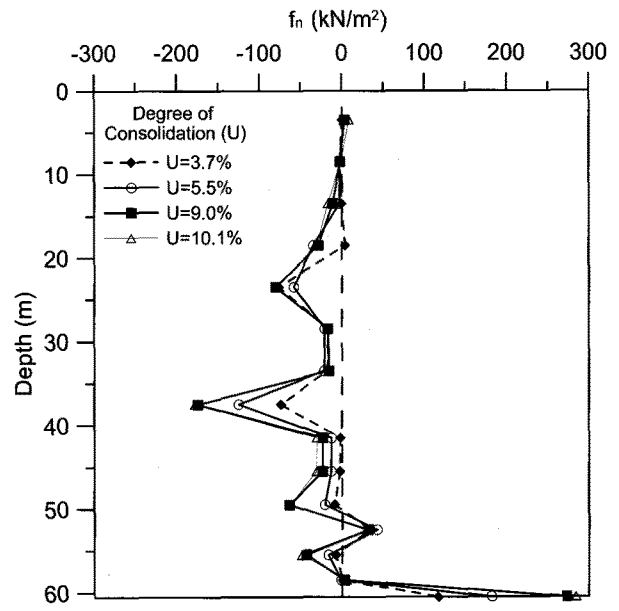
본 연구에서는 국내 지반에 적합한 주면마찰력 산정법을 제안하기 위해 유효응력법인 식 (3)을 바탕으로, 부주면마찰력 발생 영역에서 측정된 주면마찰력 값을 역산하여 β 계수를 지반 별로 산정하였다. 압밀도에 따라 산정된 지반별 β 계수의 분포는 그림 13과 같다.

그림에서 볼 수 있듯이, 장기 계측 사례를 바탕으로 산정된 β 계수 값은 압밀이 진행됨에 따라 증가하는 것

으로 나타났으며, 표 1에서 언급하였던 기존 제안 값들 (Baligh 등, 1981; Lambe 등, 1974; Johanssen과 Bjerrum, 1965; Bjerrum 등, 1969; Endo 등, 1969)과의 비교를 위하여 100% 압밀이 된 상태에서의 평균적인 β 값을 산정하고자 하였다. 실제로 쌍곡선 법을 통해 산정한 압밀 완료 시점에서의 측정치는 얻을 수 없기 때문에, 본 연구에서는 β 계수 분포도를 바탕으로 100% 압밀시점 (U=1)에서의 분포범위를 추정하여 비교 값으로 사용하

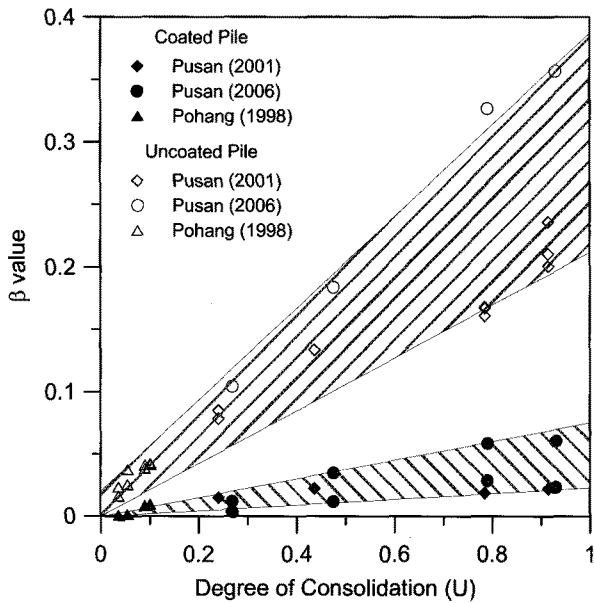


(a) TP98-01(S.L. 도포)

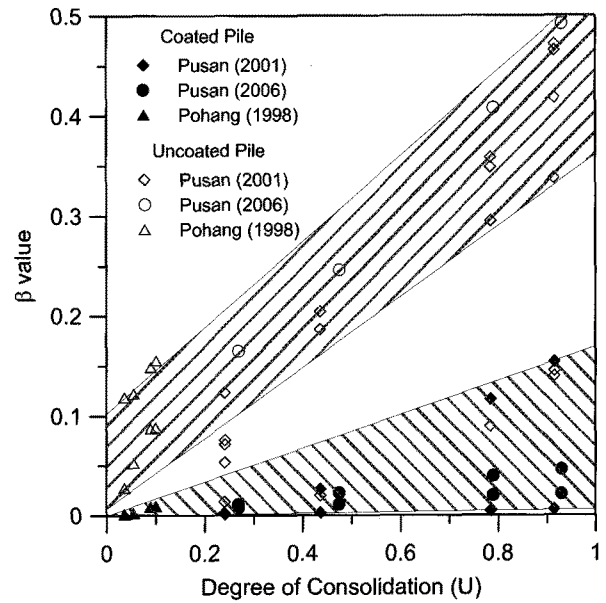


(b) TP98-02(S.L. 미도포)

그림 12. 계측 사례별 압밀 진행에 따른 주면마찰력 분포도(포항, 1998)



(a) 점성토



(b) 사질토

그림 13. 압밀진행에 따른 β 계수 분포

였다. 비교결과, 점성토의 경우, 무처리 말뚝의 산정된 β 값은 기존 제안 값 중 Endo(1969)와 가장 유사한 분포 범위(0.20~0.35)를 가지는 것으로 나타났으며, 사질토의 경우는 β 계수의 분포 범위가 0.35~0.55 정도로 예상되어, 기존 제안 값 중 Baligh 등(1981)의 제안 범위인 0.3~0.5에 가장 근접하는 것으로 나타났다. S.L. 도포 말뚝의 경우, 앞서 분석하였던 부주면마찰력 저감효과로 인해 β 값 역시 점성토와 사질토 모두에서 현저하게

감소하여 무처리 말뚝의 50% 미만의 범위를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

5. 전단강도법(α 계수법)에 의한 주면마찰력 분석

본 절에서는 말뚝의 단기거동 예측에 사용되는 전단강도법(α 계수법)을 사용하여 4장과 같은 방법으로 α 계수 값을 역산하여 기존 값들과의 비교 및 분석을 수행

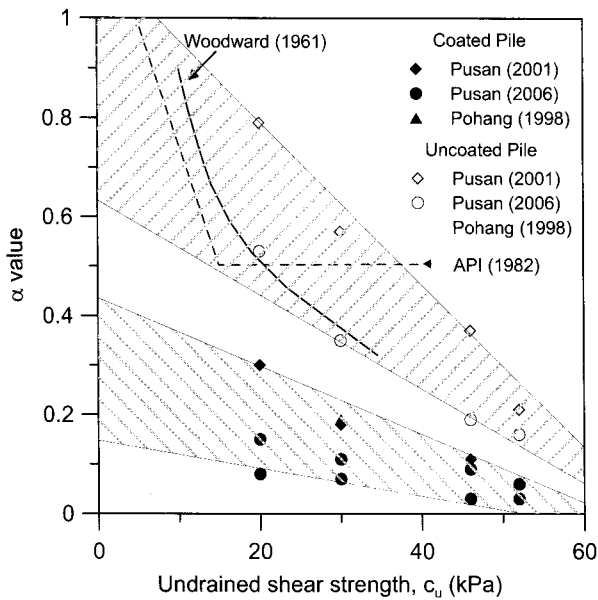


그림 14. 비배수전단강도(c_u)에 따른 α 계수 분포

하고자 하였다. 전단강도법과의 비교를 위해 사용된 주면마찰력 결과는 계속 초기, 즉 압밀이 거의 진행되지 않은 시점에서의 주면마찰력 계측 값을 비배수 상태로 가정하여 사용하였다. 비배수 전단강도에 따른 α 계수의 분포 및 기존 제안 값과의 비교 결과는 그림 14와 같다.

분석 결과, 무처리 말뚝의 α 계수 범위는 비배수 전단강도(c_u)가 10~35kPa의 분포를 나타낼 때, 0.3~0.9 정도로 Woodward(1961)가 제안한 α 계수 분포곡선과 일치하는 경향을 나타냈으나, 계측된 α 계수 값이 c_u 값 증가에 따라 지속적으로 감소하여, 일정 c_u 값 이상에서 수렴(c_u : 15kPa 이상, α 계수: 0.5)하는 API(1982) 분포 곡선과는 상이한 결과를 나타냈다. 역청재 도포에 따른 α 계수는 약 50~70% 정도로 감소하여 유효응력법을 통한 분석 결과와 동일한 저감효과를 나타냈다.

6. 결론

본 연구에서는 말뚝 장기 계측 사례들을 바탕으로 역청재(S.L.) 도포에 따른 부주면마찰력 감소효과 고찰 및 국내 지반 특성에 적합한 장, 단기 주면마찰력 산정 계수를 압밀도를 고려하여 비교, 분석하였다. 본 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 분석하였던 현장 계측 사례는 3개 지역 총 16본의 말뚝 계측 결과로 전 구간에서 부주면마

찰력이 발생하고 있음을 확인하였으며, 이를 바탕으로 장, 단기 거동 예측에 사용되는 유효응력법과 전단강도법의 주면마찰력 산정식을 바탕으로 α 와 β 계수를 역산하였다.

- (2) 역청재 도포 말뚝의 경우, 평균 50% 이상의 부주면마찰력 저감 효과를 가지는 것으로 확인되었으며, 이러한 저감효과는 설계에 사용되는 주면마찰력 산정 계수에도 영향을 주기 때문에 역청재 사용 시 적합한 α , β 계수 값의 산정이 필수적이다.
- (3) 장기거동 예측에 사용되는 β 계수의 분포 범위는 점성토의 경우, 기존 설계에서 사용되고 있는 제안 값 중 Endo(1969)의 결과 값과 가장 유사한 경향(0.2~0.35)을 나타냈으며, 사질토의 경우는 β 계수의 분포 범위가 0.35~0.55 정도로 예상되어, 기존 제안 값 중 Baligh 등(1981)의 제안 범위인 0.3~0.5에 가장 근접하는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구결과를 바탕으로, 연약지반에 시공되는 대심도 말뚝 설계 시, 신뢰성 있는 β 계수 산정이 중요하며, 압밀 진행에 따른 유효응력법 설계의 가능성을 확인 할 수 있었다.
- (4) 단기거동 예측에 사용되는 α 계수 분포 범위는 비배수 전단강도(c_u)가 10~35kPa의 분포를 나타낼 때, 0.3~0.9 정도로 Woodward (1961)가 제안한 α 계수 분포곡선과 일치하는 경향을 나타냈으며, 역청재 도포에 따른 α 계수는 약 50~70% 정도로 감소하여 장기거동 예측 시 감소효과와 동일한 부주면마찰력 저감효과를 나타내었다.

참고 문헌

1. 경성대학교 공학기술연구소 (2001), 부산광역시경기장 건립공사의 부마찰력 확인을 위한 현장시험 연구용역 보고서, 경성대학교.
2. 경성대학교 공학기술연구소 (2006), 국산 SL컴파운드의 부마찰력 저감효과 확인을 위한 현장시험 연구용역 보고서, 경성대학교.
3. 정상섬 (1993), 단독말뚝과 군말뚝의 Downdrag, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, Vol. 13(4), 259-268.
4. 정상섬, 이상원, 조성한 (1996), 역청재 도장말뚝의 하향력 해석, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, Vol. 16(III-5), 445-453.
5. 포스코 건설 연구소 (1998), 포항 LNG 발전소 Pile 재하시험 용역 보고서, 포스코 건설.
6. 한국지반공학회 (2009), 구조물 기초 설계기준해설.
7. API (1982), RP2A: Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms. Washington, DC: American Petroleum Institute.
8. Baligh, M.M., Figs, H., Vivatra, V. and Azzouz, A.M. (1981), Design of Bitumen coatings to reduce Downdrag on Piles, *Research*

- report R80-42, Geotechnical Order No.686, Department of Civil Engineering, M.I.T., 65.
9. Begeman, H.K.S. (1969), Negative Skin Friction on a Single Pile, *Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mechanics And Foundation Engineering*, Mexico City, Specialty Session 8.
 10. Bjerrum, L., Johannessen, I.J. and Eide, O. (1969), Reduction of negative skin friction on steel piles to rock. *Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, Vol.2, 27-34.
 11. Bozozuk, M. (1981), Bearing Capacity of Pile Preloaded by Downdrag, *Proc. 10th Int. Conf. on Soil Mechanics And Foundation Engineering*, Stockholm, Vol.2, 631-636.
 12. Broms, K.F., Amesz, A.W., and Rinck, J. (1969), The Negative Skin Friction Along the Shaft of a Foundation Pile, *Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mechanics And Foundation Engineering*, Mexico City, Specialty Session 8.
 13. Briaud, J.L., Tucker, L.M., Lytton, R.L. and Coyle, H.M. (1983), Behavior of Piles and Pile Groups in Cohesionless Soils, *Federal Highway Admin.*, Report No. FHWAIRD-83-38.
 14. Briaud, J.L., Al-Gurjia, Z., Quraishi, M., Bush, R. K. and Jeong, S. (1989), Downdrag on Bitumen Coated Piles, *Texas Transportation Institute*, Texas A&M University System, Preliminary Draft Report to National Cooperative Highway Research Program.
 15. Briaud, J.L. and Miran, J. (1992), The Cone Penetrometer Test, *U.S. Dept. of Trans.*, Pub. NO. FHWA-SA-91-043.
 16. Briaud, J.L. (1997), Bitumen selection for reduction of downdrag on piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.123 (12), 1127-1134.
 17. Briaud, J.L. and Tucker, L. (1997), Design and construction guidelines for downdrag on uncoated and bitumen-coated piles. *National Cooperative Highway Research Program Report 393*, Washington D.C.
 18. Combarieu, O. (1985), Frottement negative sur les pieus, *Rapport de recherche LPCN 136, Laboratoire Centrale des ponts Et Chaussées*, 151.
 19. Endo, M., Minou, A., Kawasaki, Shibata, T. (1969), Negative Skin Friction Acting on Steel Pipe Pile in Clay, *Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, Vol.2, 85-92.
 20. Fellenius, B.H. (1975), Reducing negative skin friction with bitumen slip layers, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.101(GT4), 412-414.
 21. Fellenius, B.H. (1979), Downdrag on bitumen-coated piles, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.105(GT10), 1262-1265.
 22. Garlanger, J.E. (1974), Measurements of Pile Downdrag Beneath a Bridge Abutment, *Transportation Research Record*, Vol.517, 61-69.
 23. Gayarre, F.L., Nicieza, C.G., Fernández, M.I.A., and Vigil, A.E.Á. (2010), Forensic analysis of a pile foundation failure, *Engineering Failure Analysis*, Vol.17, 486-497.
 24. Hanna, A.M. and Sharif, A. (2006), Drag force on single piles in clay subjected to surcharge loading. *International Journal of Geomechanics*, ASCE, Vol.6(2), 89-96.
 25. Jeong, S.S., Lee J.H., and Lee, C.J. (2004), Slip effect at the pile-soil interface on dragload. *Computers and Geotechnics*, Vol.31, 115-126.
 26. Jeong S. and Kim S. (1998), Interaction factors for pile groups due to downdrag, *Soils and Foundations*, Vol.38(2), 49-61.
 27. Johannessen, I.J. and Bjerrum, L. (1965), Measurements of the Compression of a Steel Pile to Rock due to Settlement of the Surrounding Clay, *Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, 261-264.
 28. Lambe, T.W., Garlanger, J.E. and Leifer, S.A. (1974), Prediction and Field Evaluation of Downdrag Forces on a Single Pile, *Research Report No. R74-27, Soil Publication No.339*, Massachusetts Institute of Technology.
 29. Meyerhof, G.G. (1976), Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, No. GT3, 197-228.
 30. Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967), Settlement of Point Bearing Pile Foundation: Settlement of Floating Pile Foundation, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 540-555.
 31. Woodward, R., and Boitano, J. (1961), Pile Loading Tests in Stiff Clays, *Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, Vol.2, 177.
 32. Zeevaert, L. (1959), Reduction of Point Bearing Capacity of Pile Because of Negative Skin Friction, *Proc. 1st Pan Am. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, 1145-1152.

(접수일자 2010. 8. 27, 심사완료일 2010. 10. 26)