

압밀해석을 통한 부마찰이 작용하는 단독말뚝의 거동분석

A Study of the Influence of Negative Skin Friction on Single Piles from Consolidation Analyses

이 철 주[†]

Lee, Cheolju

ABSTRACT : A series of two-dimensional (2D) finite element analyses have been performed to study the behaviour of single piles in consolidating ground. The analysis was conducted based on coupled analyses by considering changes of pore water pressure in the clay. In the analyses the soil slippage at the pile and the soil interface has been included. The method widely used in practice somewhat overestimates dragload by about 25% compared to the rigorous numerical analysis since partial mobilization of skin friction near neutral plane and reductions in the vertical soil stress is not incorporated. When soil slip develops at most of the pile length at the pile-soil interface during consolidation, further increases in dragload is not significant. Application of coating on the pile surface can reduce dragload and pile settlement substantially, but under an axial load on the pile head very large pile settlement can be developed unless pile tip is located to a stiff bearing layer.

Keywords : Negative skin friction, Numerical analysis, Consolidation, Single piles

요 지 : 본 연구에서는 2차원 유한요소해석을 통하여 부마찰(negative skin friction) 이 작용하는 단독말뚝의 거동을 분석하였다. 압밀의 진행에 따른 부마찰의 변화를 검토하기 위하여 압밀해석을 실시하였으며, 말뚝과 주변지반 사이에서의 항복(yielding, slip)을 고려하였다. 일반적으로 널리 사용되는 -방법에 의해 부마찰력을 산정하는 경우 중립면 부근에서의 전단강도의 부분발현 및 지중응력의 감소를 반영할 수 없기 때문에 정밀유한요소 해석에 비하여 부마찰력이 25% 정도 과하게 평가된다. 압밀이 진행 중일 때 말뚝과 지반사이 대부분의 구간에서 항복이 발생하는 경우 더 이상의 부마찰력의 증가는 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 부마찰이 발생하는 말뚝에 코팅을 실시하는 경우 부마찰력의 크기 및 말뚝의 침하를 효과적으로 감소시킬 수 있으나, 말뚝두부에 상재하중이 작용할 때 말뚝의 선단이 충분히 견고한 지지층에 설치되어 있지 않은 경우 말뚝의 마찰저항력이 매우 작아서 말뚝에 큰 침하가 발생할 우려가 있는 것으로 나타났다.

주요어 : 부마찰, 수치해석, 압밀, 단독말뚝

1. 서 론

성토에 의해 유발된 점토층의 압밀진행이나 지하수위 저하 등 지중의 유효응력증가로 인하여 침하가 진행중인 지반에 근입된 말뚝에 발생하는 부마찰(negative skin friction, NSF)은 연약지반에 시공된 말뚝에서 흔히 발생하는 문제 가운데 하나이다. 그동안 부마찰이 작용하는 말뚝의 거동과 관련하여 다수의 실내모형 실험 및 현장계측이 실시되어 왔으며, 다양한 방식의 해석적인 기법이나 수치해석을 통하여 말뚝의 거동을 연구하여 왔다(Indraratna 등 1992; Thomas 1998; Lee 2001; Shen & Teh 2002; Leung 등 2004; Comodromos & Bareka 2005; Ng 등 2008). 이철주 & 이진형(2004)이 수치해석을 통하여 실시한 단독말뚝의 거동에 대한 연구에 의하면 부마찰의 발생은 말뚝과 주변지반

의 경계면에서 발생하는 전단응력전이(shear stress transfer)가 결정적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한 Lee (2001)는 부마찰에 의한 말뚝의 거동을 올바르게 분석하기 위해서는 말뚝과 주변 지반 사이의 경계면에서 발생하는 소성항복(plastic soil yielding, slip)을 고려해야 한다고 보고하였다. 그동안 실시된 대부분의 수치해석 및 이론연구에서는 해석상의 편의를 위하여 압밀이 종료된 상태를 배수조건으로 가정하여 최종 부마찰의 영향에 대한 검토만을 실시하였다(Lee 2001; 이철주 & 이진형 2004; Comodromos & Bareka 2005). 그러나 이는 부마찰의 발생이 압밀과 연관되어 있다는 점을 고려할 때 모순된 면을 보이고 있다. 기존의 일부 실험적 연구에서 압밀의 진행에 따른 부마찰의 발생경향에 대한 개략적인 검토가 실시되긴 했지만(Indraratna 등 1992; Thomas 1998; Leung 등 2004; Ng 등 2008), 아직까

[†] 정희원, 강원대학교 토목공학과 조교수(E-mail : cj32@kangwon.ac.kr)

지 압밀의 진행에 따른 부마찰의 발생경향은 명확하게 규명되지 못했다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 압밀을 고려한 2차원 유한요소 해석을 실시하여 압밀의 진행에 따른 단독말뚝의 거동에 대한 검토를 실시하였다.

2. 수치해석

본 연구에서는 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS 6.5를 사용하여 부마찰이 작용하는 단독말뚝의 거동을 분석하였다(ABAQUS User's and Theory Manuals). 그림 1은 수치해석에서 사용된 해석 mesh의 형상이며, 단독말뚝의 거동을 분석하기 위하여 축대칭(axisymmetric) 조건하에서 해석을 실시하였다. 해석에서 가정된 지층은 말뚝이 근입되어 있는 점토층 20m와 그 하부 중간 정도 조밀한 모래층 10m로 구성되어 있으며, 말뚝의 심도는 점토층의 두께와 동일한 20m이고 그 직경은 0.6m이다. 말뚝과 주변지반 사이의 항복을 고려하기 위하여 경계요소(contact element)를 사용하였다. 또한 유한요소메쉬(mesh)의 경계조건으로 바닥에는 힌지, 측면에는 롤러 조건을 적용하였다. 한편 말뚝

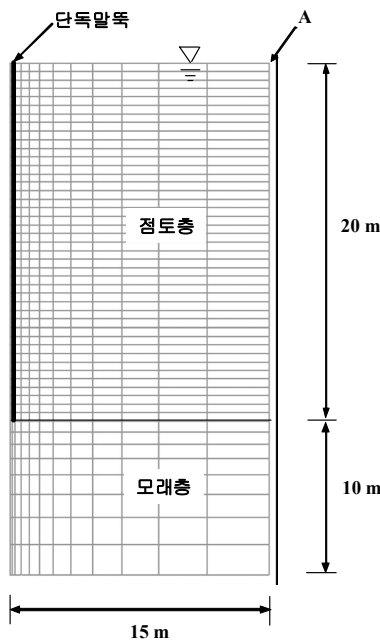


Fig. 1. 유한요소 해석에서 사용된 mesh

의 근입에 의해 유발되는 말뚝 주변지반의 응력이나 물성치 변화는 해석에서 고려하지 않았다. 본 연구에서는 성토에 의한 점토층의 압밀현상을 모사하기 위하여 ABAQUS 6.5에서 제공하는 공극수압의 변화를 고려할 수 있는 요소인 CAX4P(4-node bilinear displacement and pore pressure)를 사용하였다. 이때 경계요소를 사용하여 압밀현상을 모사하는 경우 경계요소 사이에 작용하는 응력성분이 유효 응력으로 인식되기 위해서는 말뚝에도 간극수압을 고려할 수 있는 요소를 사용해야 하며, 따라서 해석상의 편의를 위하여 말뚝요소도 점토요소와 동일한 투수계수 (K)를 가지는 것으로 가정하였다($K_{\text{말뚝}} = K_{\text{점토}} = 5e^{-5} \text{m/day}$). 한편 아래의 투수계수로는 1m/day를 가정하였다. 압밀해석에서 요구되는 점토 및 모래의 간극비는 각각 1.5, 0.5로 가정하였다. 또한 부마찰이 작용하지 않는 경우의 말뚝의 하중-침하관계를 분석하기 위하여 말뚝의 두부에 단계별 상재하중을 작용시키는 해석도 실시하였다(하중재하해석으로 칭함, 즉 말뚝에 부마찰이 작용하지 않음).

본 연구에서는 말뚝에 부마찰이 작용하는 경우에 대하여 미끄러짐을 고려하지 않은 탄-소성해석(no-slip 해석으로 칭함) 및 미끄러짐을 고려한 탄-소성 해석(slip 해석으로 칭함)을 수행하였다. No-slip 해석에서는 말뚝-지반 사이의 경계면이 견고하게 결합되어 있다고 가정하여 상대적인 변위의 발생을 허용하지 않았다. 한편, slip 해석에서는 항복발생시 말뚝과 지반의 경계면에서의 상대적인 변위 발생을 허용하였다. No-slip 및 slip 해석에서 말뚝에 대하여는 탄성모델을 적용하였고, 점토 및 모래층에 대하여는 비관련 흐름법칙(non-associated flow rule)을 따르는 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 표 1에는 해석시 가정한 말뚝 및 지반의 물성이 요약되어 있다. 점토층에 대해서는 연약점토 가정하여 5MPa의 탄성계수를, 모래층에 대해서는 중간정도의 조밀한 모래로 가정하여 50MPa의 탄성계수를 가정하였다. 한편 모든 해석에서 지하수위는 지표면에 위치하며, 전체지반에 대하여 정수압분포를 가정하였다. Slip 해석에 있어서 말뚝-지반 경계면의 거동은 ABAQUS 6.5에서 제공하는 slip 요소를 이용하여 모사하였다. Slip 요소는 두께를 가지고 있지 않으며 상대변위 발생시 전단 응력이 발생하게 된다. Lee(2001)에 의한 10여건의 기존의

표 1. 유한요소해석에 적용된 물성치

재료	Model	탄성계수 (kN/m ²)	점착력 (kPa)	ν'	ϕ_c (°)	ψ (°)	K_0	γ_t (kN/m ³)
말뚝	Isotropic elastic	25,000,000	.	0.25	.	.	0.01	25
점토층	Mohr Coulomb	5,000	3	0.3	20	0.1	0.65	18
모래층		50,000	0.1	0.3	35	10	0.5	20

Note; ν' = 포아송 비, ϕ_c = critical state friction angle, ψ = dilation angle, K_0 = 정지토압계수, γ_t = 단위중량

실내 및 현장시험 결과 분석에 의하면 일반적으로 상대변위가 2-10mm일 때 경계면에서 항복(yielding)이 발생하며, 이때 최대 마찰력이 발생하는 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 5mm의 상대변위 발생시 최대마찰력이 발생하는 것으로 가정하였다. 경계면에서의 거동은 한계 상대변위(limiting shear displacement) 및 마찰계수(interface friction coefficient), μ 의 영향을 받는다. 여기서, μ 는 $\tan(\delta')$ 이고, δ' 는 말뚝과 지반 사이의 마찰각이다. 최대 상대변위가 발생하는 경우, $p' \times \mu$ 로 정의되는 최대 마찰응력이 발생한다. 여기서, p' 는 말뚝에 작용하는 유효 수평응력이다. Lee(2001)에 의해 분석된 바에 의하면 보통 연약점토의 β -값은 0.15-0.25 등이며, 정규압밀점토의 정지토압계수 K_0 는 0.5-0.7이다. 따라서 마찰계수는 아래 식 (1)에 의해 0.2-0.5 범위의 값을 가지게 된다

$$\mu = \tan(\delta') = \beta/K_0 \quad (1)$$

이때 β 는 말뚝의 마찰력을 산정하는 β -방법에서 이용하는 계수이다(Burland 1973). 이러한 값은 점토와 강관 말뚝 사이의 마찰계수에 대한 이전의 연구에서 발표된 값들과도 유사하다(Lee 2001). 따라서, 본 연구에서는 마찰계수의 값으로 0.35를 적용하였다. 이때 본 연구에서 가정한 점토의 정지토압 계수는 0.65이므로 β -값은 0.2275로 산정되는데, 이는 일반적인 점토의 β -값의 범위인 0.2-0.25 사이에 존재하는 합리적인 값이라 할 수 있다(Lee 2001).

부마찰의 발생은 점토의 표면에 100kPa의 상재하중을 작용시켜 지반의 침하를 유발시켜 발생시켰다. 본 해석은 전체 3단계로 실시되었는데 초기수렴단계(initial geostatic), 하중재하 단계(1일) 및 압밀단계 (4,000일)로 구성되어 있다. 압밀해석 결과와의 비교를 위하여 압밀해석과 동일한 해석조건하에서 배수해석을 실시하여 압밀해석의 정당성을 검증하였다. 말뚝에 작용하는 부마찰력의 크기는 해석이 종료된 후 심도가 같은 말뚝 요소의 각 integration points에서의 평균수직응력에 말뚝의 단면적을 곱하여 산정하였다.

3. No-slip 및 slip 해석

그림 2는 no-slip 해석과 slip 해석을 통해 산정한 말뚝의 최종 부마찰력의 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L)에 대하여 보여주고 있다. 여기서 Z는 말뚝 임의지점의 위치, L은 말뚝의 길이(20m)이다. 그림 2에 나타나 있듯이 두 가지 해석 모두 중립면(neutral plane)의 위치는 $Z/L = 0.865$ 로 동일하게 산정되었다. 이러한 값은 마찰말뚝과 선단지 지 말뚝의 중간 정도의 값에 해당된다고 할 수 있다(Lee

2001)(마찰말뚝: $Z/L = 0.6-0.7$, 선단지말뚝: $Z/L = 0.9-1.0$). No-slip 해석에서 산정된 최대 부마찰력은 slip 해석 결과의 최대부마찰력에 비해 약 1.93배 크게 산정되었다(No-slip 해석: 최대 1,707.6kN, Slip 해석: 최대 883.0 kN). 이런 결과는 말뚝과 주변지반 사이에서 한계전단변위(limiting shear displacement, 본 연구에서는 5mm로 가정)를 초과하는 큰 변위가 발생하면 항복이 발생하게 되는데, no-slip 해석에서는 이를 제대로 반영하지 못하여 전단응력이 과다하게 산정되기 때문인 것으로 보고된 바 있다(이철주 & 이진형 2004).

한편 수치해석 결과와의 비교를 위하여 부마찰력의 평가에 일반적으로 널리 사용되는 β -방법을 이용하여 산정한 부마찰력의 심도별 분포도 그림 2에 포함시켰다. 부마찰력을 평가하기 위하여 중립면을 수치해석 결과와 동일하게 $Z/L=0.865$ 로 가정하고, 2장에서 언급한 것처럼 $\beta=0.2275$ 으로 가정하면 1,275.0kN의 최대 부마찰력을 산정할 수 있다. 한편, 중립면의 위치를 $Z/L=0.9$ 및 1.0으로 가정하는 경우는 각각 1,327.6kN, 1,543.8kN의 최대 부마찰력이 산정된다. 이는 no-slip 해석에서 산정한 최대 부마찰력의 약 77.7-90.4%의 값이며, slip 해석에 의한 결과에 비해서는 약 150.6-174.8%에 해당되는 값이다. Lee(2001)에 의하면 일반적인 경우 말뚝에 부마찰이 작용할 때 중립면의 위치는 $Z/L = 0.8-0.9$ 범위의 값을 가지게 되며, 따라서 β -방법을 통해서 부마찰력을 산정할 때 말뚝 전체길이에 대하여 이를 산정하면 지나치게 과하게 평가 될 수 있을 것이다.

Lee(2001)에 의하면 slip 해석을 통해서 부마찰력을 평가하는 경우 가장 합리적으로 이를 평가할 수 있다고 한

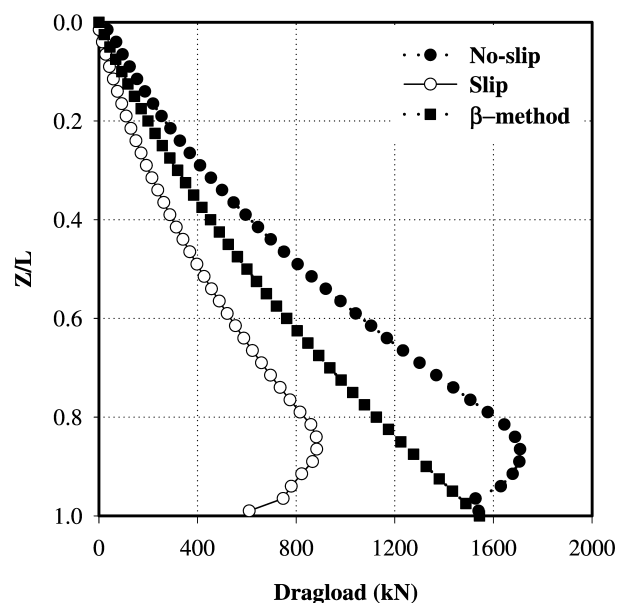


Fig. 2. Distribution of dragload with depth

다. 따라서 수치해석을 통한 부마찰력의 평가를 위해서는 반드시 말뚝과 지반사이의 항복을 고려해야 할 것이다. 또한 β -방법에 의해서도 개략적인 부마찰력의 크기를 추정할 수 있는 것으로 판단된다. β -방법에 의해서 산정한 부마찰력의 크기가 slip 해석 결과보다 크게 산출되는 이유는 Zeevaert(1983), Lee & Ng(2004) 및 Ng 등(2008)이 언급한 바와 같이 중립면 부근에서 전단강도의 일부만이 발생하는 현상과 말뚝 주변지반에서의 응력감소 부분을 고려하지 못했기 때문이라 할 수 있다. 향후 이 부분에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그러나 β -방법을 이용하여 부마찰력을 평가하는 경우 slip 해석보다는 더 큰 부마찰력을 산정하지만, no-slip 해석의 경우보다는 합리적인 결과를 도출할 수 있으므로 예비설계 단계에서 부마찰력의 개략평가지 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 압밀해석

4.1 부마찰력의 크기 변화

부마찰은 압밀과 관련 있는 현상이므로 압밀의 진행에 따른 말뚝의 거동을 파악하는 것은 매우 중요하다. 따라서 slip 해석을 통해 산정한 시간의 변화에 따른 최대 부마찰력의 크기를 그림 3에 나타내었다. 또한 부마찰력 크기변화의 경향을 말뚝두부의 침하 및 Greenfield 조건의 지표면 침하(그림 1의 A node 에서의 침하)와 비교하기 위하여 그림 3에 이를 포함시켰다. 그림 3에서는 임의 시간의 말뚝 및 지표면의 침하(S), 부마찰력의 크기(D)를 각각 최종

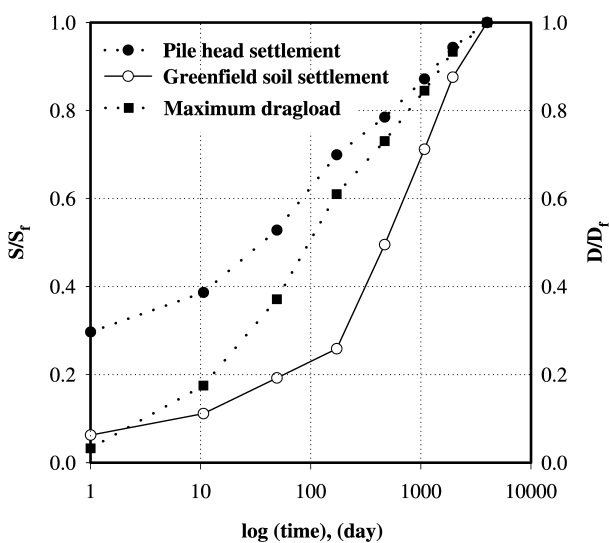


Fig. 3. Changes of pile and soil settlement and maximum dragload with time S: settlement, D: dragload (Max. Pile settlement: 56.1 mm, Max. Greenfield settlement: 294.3 mm, Max. dragload: 883.0 kN)

(4,000일 경과) 침하(S_f) 및 부마찰력(D_f)의 크기로 정규화시켰다(S/S_f: 말뚝 및 지표면의 침하비, D/D_f: 부마찰력의 비). 4,000일이 지난 후 점토층에서 발생하는 과잉공극수압은 모든 node에서 '0'이기 때문에 압밀이 종료되었다고 할 수 있으며, 배수해석을 통해서도 동일한 결과를 얻었다.

성토하중 100kPa이 작용된 직후(1일 경과) 즉 비배수 조건과 유사한 상태에서 부마찰력 및 Greenfield 조건의 지표침하는 최종 부마찰력 및 지표면 침하의 약 5% 내외로 미미한 수준이다. 그러나 말뚝두부의 침하는 최종침하의 약 30%로서 상당한 크기라고 할 수 있다. 부마찰이 작용하는 말뚝에서 발생한 대부분의 문제점이 말뚝의 침하와 관련이 있다는 점을 고려한다면(Lee 2001), 이는 말뚝의 설계시 반드시 고려해야 할 것으로 판단된다. 이후 말뚝두부의 침하 및 부마찰력의 크기는 시간에 대해 거의 선형적으로 증가하고 있는 경향을 보여주고 있음에 비해서, Greenfield 조건의 지표면 침하는 압밀도 25.9%(172일 경과)를 기준으로 근사적으로 bi-linear 의 두 개의 기울기를 가진 직선형태를 보이고 있다. 즉 172일 이후 지표면 침하의 증가는 말뚝 두부의 침하나 부마찰력의 증가보다 더 빠르다고 할 수 있다. 이는 말뚝과 주변지반에서 발생한 항복(slip)과 관련이 있는 것으로 추정된다. 즉 말뚝과 주변지반 사이에서 slip 이 발생하기 전에는 slip 발생여부에 따라 전단응력의 크기가 급변하게 되고, 또한 압밀의 진행에 따른 지중응력의 증가에 영향을 받게 된다. 그러나 말뚝과 주변지반 경계면에서 대부분의 구간에서 slip이 발생하는 경우, 부마찰 영향의 증가분은 slip의 발생여부보다는 주로 지중응력의 증가와 관련이 있기 때문이다. 최종적으로 발생한 말뚝두부의 침하는 56.1mm로 Greenfield 조건의 지표면 침하 294.3mm의 약 19.1%에 해당되는 매우 값이다.

4.2 상대변위의 분포

그림 4는 압밀진행에 따른 말뚝과 주변 지반사이의 경계면에서의 상대변위(relative shear displacement)의 분포를 정규화된 말뚝의 침도(Z/L)에 대하여 보여주고 있다 [상대변위 = 말뚝인근 지반의 침하-말뚝의 침하], 여기서 Z는 임의지점의 위치, L은 말뚝의 길이(20m)이다. 본 연구에서는 상대변위가 5mm 이상인 경우 항복이 발생한다고 가정하였다. 상재하중이 작용되고 49일(압밀도: 19.2%)이 경과한 시점까지는 상대변위가 그리 크지 않아서, slip이 발생하는 구간이 말뚝의 상부를 제외하고는 매우 미미한 편이다(slip 발생구간: Z/L = 0.0 - 0.3). 그러나 172일(압밀도: 25.9%) 이후부터는 slip이 대부분의 구간에서 발생하고 있다(slip 발생구간: Z/L = 0.0-0.675). 172일 이후로는 중립면 부근을

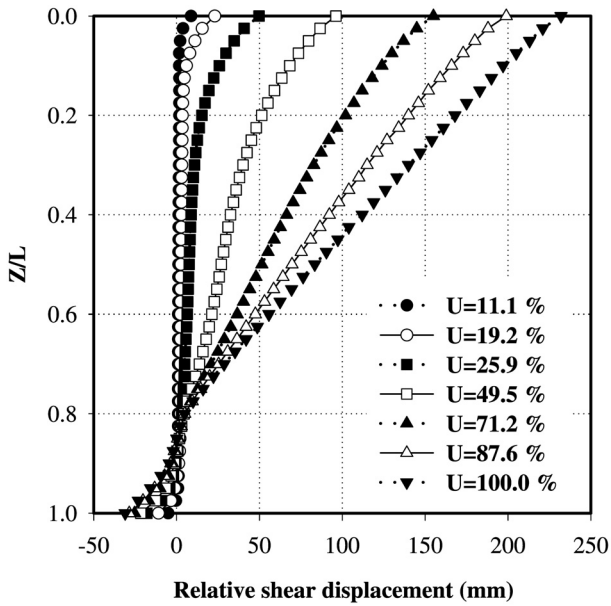


Fig. 4. Distribution of relative shear displacement with time

제외하고는 slip 발생구간이 약간 더 확장되는 정도이다(최종 $Z/L = 0.0-0.775$). 따라서 172일 이후로는 앞서 언급한 바와 같이 시간에 대한 전단응력 및 부마찰력의 증가비율이 다소 완화된 것으로 예상된다. 이는 4.1에서 언급한 부마찰력의 증가 경향과 일치한다고 볼 수 있다.

4.3 전단응력 및 부마찰력의 분포

그림 5는 말뚝과 주변지반 사이의 경계면에서 발생하는 전단응력(interface shear stress)의 압밀의 진행에 따른 분포를 보여주고 있다. 전단변위의 발생 패턴과 유사하게 전단응력 역시 지속적으로 증가하고 있다. 하중재하 후 49일(압밀도: 19.2%) 경과시점까지는 상대변위가 크지 않아서 대부분의 구간에서 slip이 발생하지 않기 때문에 전단강도의 일부분이 발현되므로 작은 크기의 전단응력만이 발생하고 있다. 그러나 172일(압밀도: 25.9%) 경과 시점에서는 대부분의 구간에서 slip이 발생하여 전단강도가 100% 발현되므로 비교적 큰 전단응력이 발생하게 된다. 172일 이후의 전단응력 증가는 slip 발생유무와는 크게 관계없이 압밀의 진행에 따른 지중 유효응력 증가와만 관계가 있어 전단응력의 분포형태가 대체로 직선으로 유사하게 나타나고 있다.

그림 6에 나타난 부마찰력의 정규화된 심도에 대한 분포에 의하면 부마찰력은 172일(압밀도: 25.9%)까지는 비교적 급속도로 증가하고 있다. 특히 하중재하 11일 경과시점에서 발생한 최대부마찰력은 154.5kN으로 압밀종료 후 최대부마찰력인 883.0kN의 약 17.5%에 해당되는 큰 부마찰력이 발생하고 있다. 11일 경과시점까지는 아직 상대변위

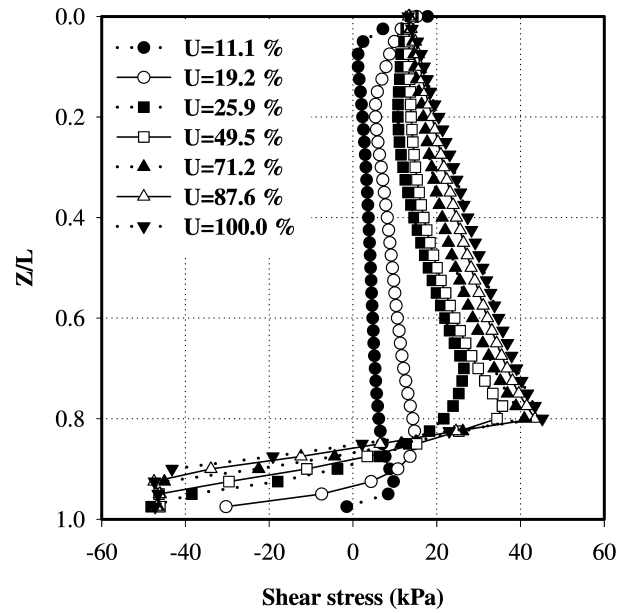


Fig. 5. Distribution of shear stress with time

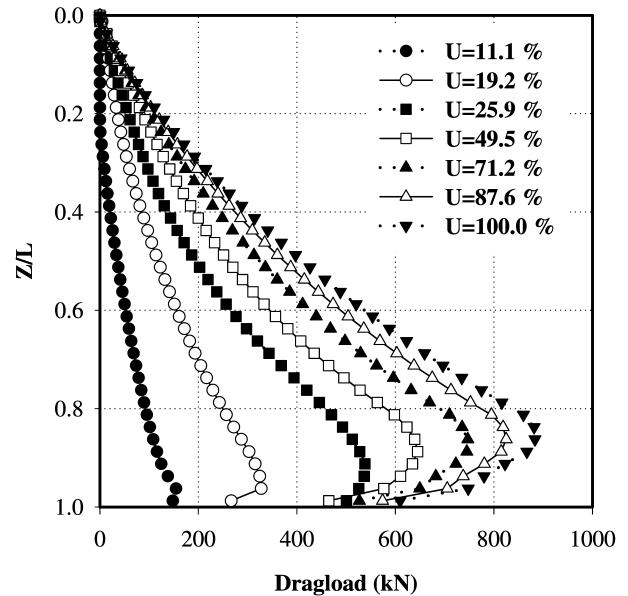


Fig. 6. Distribution of dragloads with time

가 크지도 않고, 대부분의 구간에서 slip이 발생하지도 않고 있다. 그러나 상대변위가 전구간 평균 약 2mm 정도로 전단강도의 40%는 발현될 수 있는 조건이다. 따라서 비교적 짧은 시간임에도 큰 부마찰력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 172일 경과시점의 경우 최대부마찰력의 약 60.9%에 해당하는 매우 큰 부마찰력이 발생하는 점도 주목할 필요가 있다. 그러나 172일 경과 이후로는 그 이후로는 증가비율이 감소되는 것으로 나타났다. 이는 말뚝 대부분의 구간에서 slip이 발생하여 압밀에 의한 지중응력 증가만이 부마찰력의 증가요인으로 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 한편 압밀의 진행에 따라 중립면의 위치가 약간 위로

이동하고 있는 경향을 보이고 있다. 이는 부마찰력이 증가하게 되면 하향의 부마찰력에 대응할 수 있는 상향의 '양'의 마찰저항력이 요구되기 때문에 중립면을 위로 상승시키기 때문이다(Lee 2001).

4.4 수평응력의 분포

Zeevaert(1983)에 의하면 말뚝에 부마찰이 작용하는 경우 주변지반 응력의 일부가 말뚝으로 전이되므로(hang-up) 말뚝 인근 흙의 수직응력이 감소하게 된다. 수직응력의 감소는 결국 말뚝에 작용하는 수평응력의 감소로 나타나게 될 것이다. 이에 본 연구에서는 contact element에 작용하는 수직응력, 즉 흙의 수평응력의 분포를 그림 7에 나타내었다. 이에 대한 비교를 위하여 K_0 조건에 해당하는 수평응력의 분포를 함께 그림에 포함시켰다. 그림에서 알 수 있듯이 K_0 조건의 수평응력에 비하여 말뚝에 작용하는 수평응력은 약 30kPa 정도 감소하는 분포를 보이고 있다. 그런데 말뚝의 중립면 부근($Z/L=0.865$)에서는 말뚝에 작용하는 응력이 다소 증가하여 거의 K_0 조건과 유사한 분포를 보이고 있다. 이는 중립면 부근에서는 전단응력의 크기가 작아서 말뚝으로 전이되는 흙의 응력이 매우 작기 때문인 것으로 판단된다. 전체심도에 대해 수평응력의 평균값을 고려할 때 contact element에 작용하는 수평응력은 K_0 조건의 약 80%에 해당한다. 부마찰이 작용하는 말뚝의 부마찰력을 평가할 때 수평응력의 변동을 검토할 수 있다면, β -방법에 의한 부마찰력 평가의 신뢰성이 보다 향상될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 β -방법에 의한 해석시 이를 고려하여 20%를 감한다면 보다 실제와 유사한 결과가 나

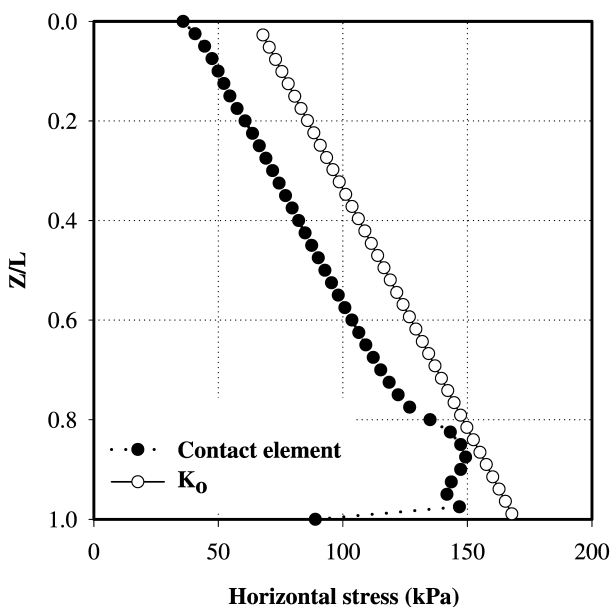


Fig. 7. Distribution of horizontal stress (kPa)

올 수 있을 것이다. 3장에서 언급한 slip 해석에 의한 결과가 β -방법에 의한 방법에 비해 약 25% 작은 부마찰력을 산정한다. 따라서 이러한 감소에는 수평응력 감소분 20% 및 중립면에서 전단강도의 일부만이 발현되는 요인 5%의 두 가지 요소로 구성된다고 할 수 있다. 본 분석결과에 의하면 현행 사용되는 β -방법에 의한 부마찰력이 다소 안전측으로 평가되는 측면도 있겠으나, 보다 엄밀한 검토를 위해서는 β -방법에 의해서 산정한 부마찰력을 10-20% 정도 감하여 적용하는 것이 보다 합리적인 것으로 분석되었다.

4.5 하중침하 관계

부마찰이 작용하지 않는 조건에서 말뚝의 두부에 상재하중을 작용시키는 하중재하해석을 통하여 말뚝의 하중-침하 관계 및 설계지지력을 추정하였다(load test analysis, 그림 8 참조). 말뚝의 지지력 평가에 널리 이용되는 Davisson(1972) 방법을 이용하면 말뚝의 설계지지력을 약 1,000kN으로 산정할 수 있으며 이때 말뚝두부의 침하는 13.2mm이다. 이는 부마찰이 발생하는 경우(slip 해석)을 통해 산정된 최대 부마찰력인 960kN과 매우 유사한 값이다. 그러나 slip 해석의 경우 압밀종료 후 말뚝침하가 약 56.1mm 임을 고려한다면, 말뚝에 작용하는 최대압축력의 크기는 하중재하해석의 경우나 부마찰이 작용하는 경우(slip 해석)나 유사하지만 말뚝의 침하는 약 4.3배 증가함을 알 수 있다.

그림 8은 하중재하해석과의 비교를 위하여 부마찰력이 작용하는 말뚝에 압밀종료 후 말뚝두부에 상재하중을 작용시킨 경우의 하중-침하 관계를 보여주고 있다. 압밀종료

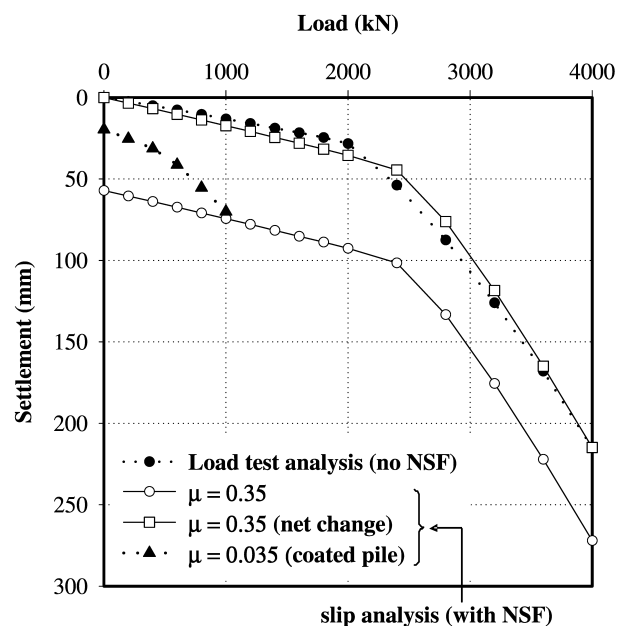


Fig. 8. Load-settlement relation

후 말뚝두부에 하중이 작용하는 경우 부마찰이 작용하지 않는 경우(load test analysis)의 하중-침하 관계와 비교적 유사한 결과를 보여주고 있다. 그러나 말뚝두부에 작용하는 상재하중에 의한 순침하(net change) 만을 검토한 결과 약 2,800kN의 상재하중까지는 하중재해석에 의한 결과가 부마찰이 작용하는 경우에 비해 더 큰 강성(stiffness)을 보여주고 있다. 이는 상재하중이 작은 경우는 아직까지 말뚝에 부마찰이 작용하여 지중수평응력의 일부가 감소되어 지지력이 감소하게 되는 것으로 볼 수 있다. 그러나 상재하중이 증가함에 따라 부마찰이 대부분 소멸되어 이때는 수평응력이 하중재해석의 경우와 유사해지게 되므로 해중재해석 결과와 비슷한 경향을 보이게 되는 것으로 판단된다.

일반적으로 말뚝에 작용하는 부마찰을 감소시키기 위해서는 말뚝 표면에 bitumen을 코팅하여 부마찰에 의한 영향을 최소화시킬 수 있다(Lee 2001). 본 연구에서는 코팅을 실시한 말뚝의 거동을 코팅을 실시하지 않은 말뚝과 비교하기 위하여 먼저 부마찰을 작용시키고, 부마찰이 종료된 후 말뚝의 두부에 상재하중을 작용시키는 해석을 실시하였다. 이때 Briaud & Tucker(1997)의 기존연구를 참조하여 코팅을 실시한 말뚝표면의 마찰계수 μ 를 당초에 가정한 0.35의 10%인 0.035로 적용하였다. 즉 코팅을 실시한 말뚝의 부마찰이 90% 감소하는 것으로 가정하였다. 코팅을 실시한 경우 말뚝에 발생하는 최대 부마찰력은 162.0kN 이고 부마찰에 의해 말뚝두부의 침하 19.6mm로 slip 해석에 의한 결과에 비해서 부마찰력 및 말뚝두부의 침하는 각각 약 83.0%, 65.1%가 감소되었다. 부마찰력의 크기 감소에 비해서 말뚝두부 침하의 감소는 상대적으로 작은 것으로 나타나 향후 이에 대한 심도있는 분석이 필요할 것으로 판단된다. 그러나 압밀 종료 후 말뚝두부에 상재하중이 작용하는 경우 말뚝의 하중-침하 관계를 검토한 결과 말뚝의 지지력은 현저히 감소됨을 알 수 있었다. 즉 말뚝의 표면에 코팅을 실시하는 경우 부마찰을 충분히 효과적으로 감소시켜 줄 수는 있으나, 부마찰력이 종료된 후 작용하는 하중에 의해서 매우 큰 말뚝의 침하가 발생한다. 따라서 연구에서 가정한 조건하에서 코팅을 실시한 말뚝의 사용이 현실적으로 불가할 것으로 판단된다. 즉 코팅을 실시하는 말뚝의 경우는 말뚝의 주면마찰저항은 거의 기대하기 어려워 사실상 선단지지말뚝과 유사하게 되므로 코팅을 실시하는 구간을 적절히 결정해야 하며(일반적으로 중립면의 상단부분), 우선적으로 선단지지층의 지지력이 충분히 커야 할 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 부마찰이 작용하는 단독말뚝의 거동을 압밀을 고려한 2차원 유한요소해석을 통하여 분석하였다. 단독말뚝의 거동과 관련하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- (1) β -방법에 의한 해석은 no-slip에 의한 부마찰력 평가보다는 양호한 결과를 도출할 수 있으며, 수평응력의 감소 및 중립면에서의 전단강도의 부분 발현을 고려할 때 β -방법으로 계산된 부마찰력을 10-20% 정도 감하여 적용하는 것이 보다 합리적인 것으로 분석되었다.
- (2) 말뚝에 작용하는 부마찰력의 대부분은 비교적 단기간에 발생한다. 이는 slip의 발생과 밀접한 관계가 있다. 압밀진행 시 말뚝 대부분의 구간에서 slip이 발생하게 되는 경우 압밀이 추가로 진행되더라도 부마찰력의 증가는 그렇게 크지 않은 것으로 분석되었다.
- (3) 코팅을 실시한 말뚝의 경우 부마찰을 효과적으로 감소시킬 수는 있으나, 말뚝두부에 상재하중 작용시 마찰저항을 거의 기대할 수 없기 때문에 반드시 충분한 지지력을 가지는 지지층까지 근입시켜 선단지지력을 확보해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호#08지역기술혁신 B01-01)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 이철주, 이진형 (2004), 단독 말뚝에 작용하는 부주면 마찰력의 영향 연구, *대한토목학회 논문집*, 24(6C), pp. 357~365.
2. ABAQUS. ABAQUS User's and Theory Manuals, Version 6.5, Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc. Rhode Island.
3. Briaud, J. L. and Tucker, L. (1997), Design and construction guidelines for downdrag on uncoated and bitumen-coated piles, *NCHRP Report 393*, Transportation Research Board, Washington, D. C. 198, pp. 57, pp. 58.
4. Burland, J.B. (1973), Shaft friction of piles in clay - A simple fundamental approach, *Ground Engineering*, 6(3), pp. 30~42.
5. Comodromos, E. M. and Bareka, S. V. (2005), Evaluation of negative skin friction effects in pile foundations using 3D nonlinear analysis, *Computers and Geotechnics*, 32, pp. 210~221.
6. Davisson, M. T. (1972), High capacity piles, *Proceedings and Lecture Series in Innovations in Foundation Construction*, ASCE, Illinois Section, pp. 82~112.

7. Indraratna, B., Balasubramaniam, A. S., Phamvan, P. and Wong, Y. K. (1992), Development of negative skin friction on driven piles in soft Bangkok clay, *Can. Geotech. J.* 29. pp. 393~404.
8. Lee, C. J. (2001), *The influence of negative skin friction on piles and in pile groups*. Ph.D thesis, Cambridge University.
9. Lee, C. J., and Ng, C. W. W. (2004), Development of downdrag on piles and in pile groups in consolidating soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130(9), pp. 905~914.
10. Leung, C. F., Liao, B. K., Chow, Y. K., Shen, R. F. and Kog, Y. C. (2004), Behavior of pile subject to negative skin friction and axial load, *Solis and Foundations*, 44(6), pp. 17~26.
11. Ng, W. W. C, Poulos, H. G., Chan, V. S. H., Lam, S. S. Y. and Chan G. C. Y. (2008), Effects of tip location and shielding on piles in consolidating ground, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 134(9), pp. 1245~1260.
12. Shen, W. Y. and Teh, C. I. (2002), A variational solution for downdrag force analysis of pile groups, *The international Journal of Geomechanics*, 2(1), pp. 75~91.
13. Thomas, J. (1998), *Performance of piles and pile groups in clay*, Ph.D thesis, University of Western Australia, Australia.
14. Zeevaert, L. (1983), *Foundation engineering for difficult subsoil conditions*, 2nd Edition, Van Nostrand Reinhold Company, pp. 358~360.

(접수일: 2008. 10. 20 심사일: 2008. 11. 4 심사완료일: 2008. 12. 31)