

수직응력의 감소가 부마찰이 작용하는 말뚝의 거동에 미치는 영향

The Influence of Reduction of Vertical Stress on the Behaviour of Piles Subjected to Negative Skin Friction

이철주*

Lee, Cheol-Ju

Abstract

Vertical soil stress near a pile subjected to negative skin friction (NSF) may be reduced due to shear transfer at the pile-soil interface. A three-dimensional finite difference analysis has been performed to clarify the influence of vertical and horizontal stress reductions on the pile behaviour. In addition, a simple equation has been proposed to estimate vertical stress reduction of the soil near the pile. The vertical and horizontal stresses are reduced by substantial amount compared to corresponding stress components at the Greenfield condition. The horizontal extent of vertical stress reduction of the soil near the pile is rather limited to about up to 4-8 D, where D is the pile diameter. The findings from the current research indicate that widely used β -method may result in over-estimation of dragload (compressive force on piles due to NSF) and hence stress reduction needs to be incorporated in the original equation.

Keywords : *negative skin friction, numerical modelling and analysis, shear stress transfer, single pile*

요 지

부마찰이 작용하는 말뚝 주변지반의 수직 응력은 전단응력 전이 과정을 통해 감소하게 된다. 본 연구에서는 3차원 유한차분 해석을 실시하여 부마찰이 작용하는 단독말뚝 인근 지반의 수직응력 및 수평응력의 감소 및 그로 인한 말뚝의 거동변화에 대한 분석을 실시하였다. 또한 말뚝인근 지반의 수직응력 감소를 고려할 수 있는 간단한 식을 제안하였다. 말뚝에 부마찰이 작용하는 경우 Greenfield 조건에 비해 지반의 수직 및 수평응력이 상당히 크게 감소하는 것으로 나타났다. 수직응력이 감소되는 수평범위는 그리 넓지 않아서 최대 4-8 D 정도 인 것으로 분석되었다, 여기서 D는 말뚝의 직경이다. 본 연구를 통해 분석된 바에 의하면 부마찰력의 평가에 일반적으로 널리 이용되는 β -방법에 의해서는 부마찰력이 과다하게 평가될 수 있는 것으로 나타났으며, 따라서 원래의 공식에 수직응력의 감소를 반영할 필요가 있는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 부마찰, 수치해석, 전단응력 전이, 단독말뚝

1. 서 론

Zeevaert(1983)에 의하면 말뚝이 근입되어 있는 주변지반의 침하로 인하여 말뚝에 부마찰(negative skin friction)이 발생하는 경우 주변지반의 지중수직응력 일부가 말뚝으로 전이하여 지반의 수직응력이 감소하게 된다. 이러한 현상은 Jeong(1992)이 단독말뚝에 부마찰이 작용하는 경우에 대하여 ABAQUS 프로그램을 이용한 3차원 유한요소해석을 통해서 확인한 바 있다. Zeevaert(1982)는 부마찰이 작용하는 경우 지중에 인공적인 구조물이 없는 경우인 Greenfield(혹은 far field, 즉 지중에 말뚝이 없고 순수하게 흙만 존재하는 경우) 조건하의 수직응력과 비교하여 25% 감소한다고 가정 한 바 있다. 말뚝 인근지반의 수직응력이 감소하게 되면 필연적으로 말뚝에 작용하는 수평응력 또한 감소하게 되고 궁극적으

로는 말뚝에 작용하는 마찰응력, 즉 부마찰 응력(negative skin friction) 및 부마찰력(dragload) 역시 감소하게 될 것으로 볼 수 있다. 그러나 지금까지 이러한 현상이 실험적으로 규명된 바는 없으며, 위에서 언급한 기존의 연구 역시 기초적인 수준으로 전반적으로 볼 때 현재까지 말뚝 주변지반의 수직응력감소로 인한 부마찰력의 크기나 말뚝에 작용하는 응력분포 등에 대한 이해는 매우 부족한 실정이다.

일반적인 경우 말뚝에 작용하는 부마찰력(dragload)은 β -방법을 이용하여 말뚝에 작용하는 전단응력을 계산하여 평가하게 된다(Burland, 1973). [β -공식: $\tau = \beta \times \sigma'_v$, τ = 전단응력, σ'_v = 지중수직응력]. 그러나 β -방법에서는 이러한 수직 및 수평응력의 감소를 반영하지 못하기 때문에 부마찰력을 과하게 평가하게 된다는 문제점이 있다(Lee, 2001). 물론 부마찰력은 가능한 안전측에서 평가하는 것이 맞다고 할 수는

*정희원 · 강원대학교 토목공학과 조교수 (E-mail : cj32@kangwon.ac.kr)

있으나, 공학적인 측면에서 볼 때는 가능한 합리적으로 이를 평가하는 것이 보다 바람직할 것이다. 이에 본 연구에서는 3차원 유한차분해석을 통하여 부마찰이 작용하는 말뚝의 주변지반의 수직 및 수평응력의 변화 및 이에 대한 영향을 분석하고자 한다. 또한 말뚝과 주변지반에 작용하는 수직응력 성분의 평형을 고려하여 수직응력 감소의 크기 및 그 분포를 간단하게 평가할 수 있는 식을 제안하여 이를 수치해석에 의한 결과와 비교하였다.

2. 수치해석 과정

본 연구에서는 3차원 유한차분해석 프로그램인 Flac-3D를 이용하여 연약점토에 근입된 단독말뚝에 부마찰이 작용할 때의 거동을 분석하였다. Fig. 1은 해석에서 사용된 해석 그리드의 모양을 보여주고 있다. 해석에서 가정한 지층은 상부의 점토 및 그 하부의 선단층으로 구성되어 있다(점토층: 20m, 선단층: 10m). 해석에서 가정한 말뚝은 직경 0.5m의 콘크리트말뚝이며, 그 길이는 20m 이다. 한편 말뚝은 점토층 전체에 시공되어 있으며 그 선단은 점토와 선단층의 경계면에 위치하는 것으로 가정하였다. 수치해석에서는 점토 및 선단층에 대해서는 Mohr-Coulomb 모델을, 말뚝에 대해서는 탄성모델을 적용시켰다. 모든 해석은 배수조건으로 가정하여 실시하였다. 즉 본 연구결과는 상재하중에 의한 과잉공극수압이 모두 소산된 압밀 최종단계의 말뚝의 거동을 분석하였

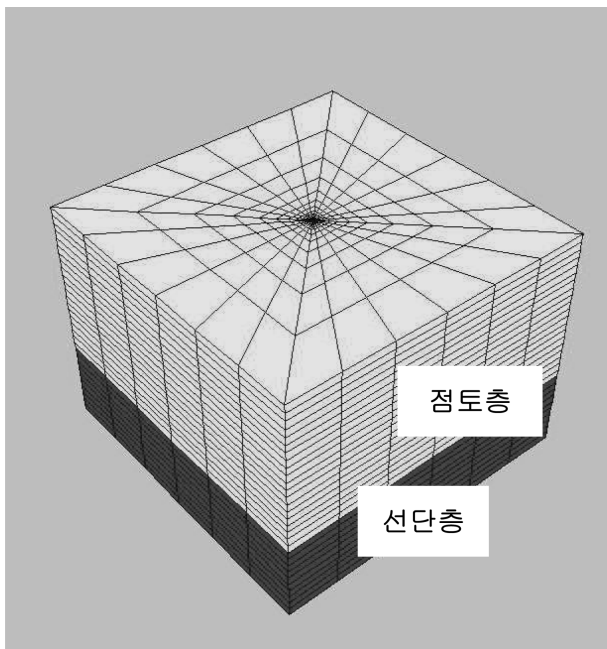


Fig. 1. 유한차분 해석에서 사용된 그리드

다. 이는 말뚝에 발생하는 작용하는 부마찰의 영향이 최대인 경우에 해당된다고 할 수 있다. 유한차분 그리드의 경계조건으로 바닥에는 힌지, 측면에는 롤러 조건을 적용하였다. 한편 말뚝의 근입에 의해 유발되는 말뚝 주변지반의 응력이나 물성치 변화는 해석에서 고려하지 않았다. 초기 수렴이 종료된 후 말뚝을 제외한 지표면 전체에(점토층의 표면) 단계별 상재하중을 작용시켜 지반침하를 유도하여 말뚝에 부마찰을 발생시켰다(최대상재하중 $q: 100\text{kPa}$).

표 1에는 해석시 가정한 말뚝 및 지반의 물성이 요약되어 있다. 이는 Lee(2001) 및 Comodromos & Bareka(2005) 등이 기존에 실시한 부마찰 관련 수치해석연구에서 가정한 값과 유사하다. 본 연구에서는 Flac-3D의 interface 요소를 이용하여 말뚝과 경계면 사이의 상호거동을 모델링하여 항복 발생시 말뚝과 지반의 경계면에서의 상대적인 변위 발생을 허용하였다. FLAC-3D의 interface 요소는 말뚝과 지반사이의 경계면에 동일한 좌표를 가지는 두 개의 node를 지정하여 말뚝과 지반사이에서의 상대변위 발생을 허용할 수 있다. Interface 요소의 모델링을 위해서는 전단(K_s , shear stiffness), 수직강성(K_n , normal stiffness), 경계면에서의 점착력(cohesion), 마찰각(friction angle) 및 팽창각(dilation angle) 등이 요구된다. Flac-3D의 매뉴얼에 의하면 불연속면 사이에 연약점토 충전물이 있는 경우 10-100MPa/m 범위의 K_s 및 K_n 값을 적용할 것을 제안하고 있다(Itasca Consulting Group 2006). 이에 본 연구에서는 이를 참조로 하여 다양한 매개변수연구(parametric study)를 실시하여 K_s 및 K_n 의 영향을 검토하였으며, 최종적으로 K_s 에 대해서는 50MPa/m, K_n 에 대해서는 100MPa/m의 값을 적용하였다. 한편 경계면에서의 점착력은 0kPa로 가정하였으며, 경계면에서의 마찰각은 부마찰이 작용하는 경우 마찰계수가 일반적으로 0.35 정도임을 고려하여 20도로 가정하였다, 마찰계수 $= \tan(\delta')$, δ' 는 경계면에서의 마찰각이다. 따라서 β 값은 정지토압계수 K_0 및 마찰계수를 이용하여 $[K_0 \times \tan(\delta')]$ 0.20으로 평가할 수 있다. 이는 β -공식에서 일반적인 점토의 β 값의 범위인 0.2-0.25 사이에 존재하는 합리적인 값이라 할 수 있다(Lee, 2001).

3. 수직응력 감소

앞서 언급한 바와 같이 부마찰이 작용하는 말뚝 인근지반의 수직응력은 전단응력의 전이과정을 통해서 감소하게 된다. 이를 산정하기 위하여 말뚝에 작용하는 부마찰력과 인근지반의 수직응력 성분에 대하여 힘의 수직평형 조건을 고려하여 지반의 수직응력 감소 $\Delta\sigma(z, r)$ 를 Fig. 2 처럼 나타낼 수 있다. 임의의 심도 Z에서 말뚝에 작용하는 부마찰력은

표 1. 유한차분해석에 적용된 물성치

재료	Model	탄성계수 (MN/m ²)	점착력 (kPa)	ν'	ϕ'_c (°)	ψ (°)	K_0	γ_t (kN/m ³)
말뚝	Isotropic elastic	30,000	.	0.2	.	.	.	25
점토층	Mohr Coulomb	5	3	0.35	25	0.1	0.55	20
선단층		100	0.1	0.35	35	10	0.50	20

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

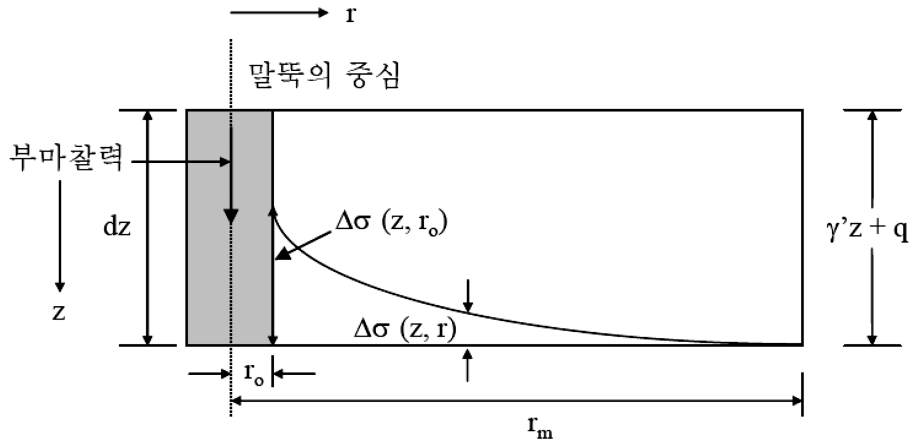


Fig. 2. 말뚝과 인근 흙 사이 수직응력의 평형관계

말뚝인근 지반의 수직응력의 감소분을 모두 합한 것으로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{임의의 지점 } Z \text{에서 부마찰력} = 2\pi \int_{r_0}^{r_m} \Delta\sigma(z, r) r dr \quad (1)$$

여기서 r_0 는 말뚝의 반경, r_m 은 수직응력의 감소가 발생하는 영역의 말뚝중심에서의 거리(수직응력 감소영역), $\sigma(z, r)$ 은 임의의 지점 (z, r) 에서의 수직응력의 감소, γ' 는 흙의 단위 중량, q 는 지표면에 작용하는 상재하중이다. 수직응력의 감소 $\Delta\sigma(z, r)$ 를 산정하기 위하여 Fig. 2에 나타나 있듯이 $\Delta\sigma(z, r)$ 이 말뚝표면으로부터 포물선의 형태(parabola)를 가지며 감소한다고 가정할 수 있다. 이는 지반공학은 물론 여러 공학분야에서 널리 적용되는 편리한 방법이다(예: Zeevaert(1983), Nunez(1989)). 따라서 임의의 지점 Z 에서의 dz 두께의 흙요소에 대하여 전체 수직응력의 감소를 흙 요소의 전체 단면적을 고려하여 이를 하중으로 표현할 수 있다. 먼저 r_0 에서 r_m 사이에서의 평균수직응력감소는 포물선의 성질을 이용하면 $\Delta\sigma(z, r_0)/3$ 이다, 여기서 $\Delta\sigma(z, r_0)$ 은 말뚝과 접하고 있는 부분의 흙의 수직응력 감소이다(즉 $r = r_0$ 인 경우). 간편식을 도출하기 위하여 평균수직응력감소를 식 (1)에 대입하여 적분을 실시하면 그 값은 $\pi\Delta\sigma(z, r_0)(r_m^2 - r_0^2)/3$ 으로 표현되며 이는 심도 Z 에서 수직응력의 감소에 의해 말뚝에 발생하는 부마찰력이다.

한편 말뚝 바로 옆 흙 요소에서 말뚝에 작용하는 전단응력 성분 및 수직응력의 감소분을 고려하여 다음과 같은 식을 도출할 수 있다.

$$2\pi r_0 \beta (\gamma'Z - \Delta\sigma(z, r_0) + q) dz = \pi \Delta\sigma(z, r_0) (r_m^2 - r_0^2) / 3 \quad (2)$$

식 (2)를 적분하여 정리하면 $\Delta\sigma(z, r_0)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\sigma(z, r_0) = 2\pi r_0 \beta (\gamma'Z^2 / 2) + qz / (2\pi r_0 \beta z + \pi(r_m^2 - r_0^2) / 3) \quad (3)$$

이때 얻어진 $\Delta\sigma(z, r_0)$ 로 부터 포물선의 공식을 이용하여 임의의 r 에서 $\Delta\sigma(z, r)$ 의 식을 구하면 아래와 같다.

$$\Delta\sigma(z, r) = \Delta\sigma(z, r_0) - \Delta\sigma(z, r_0) \sqrt{(r - r_0) / (r_m - r_0)} \quad (4)$$

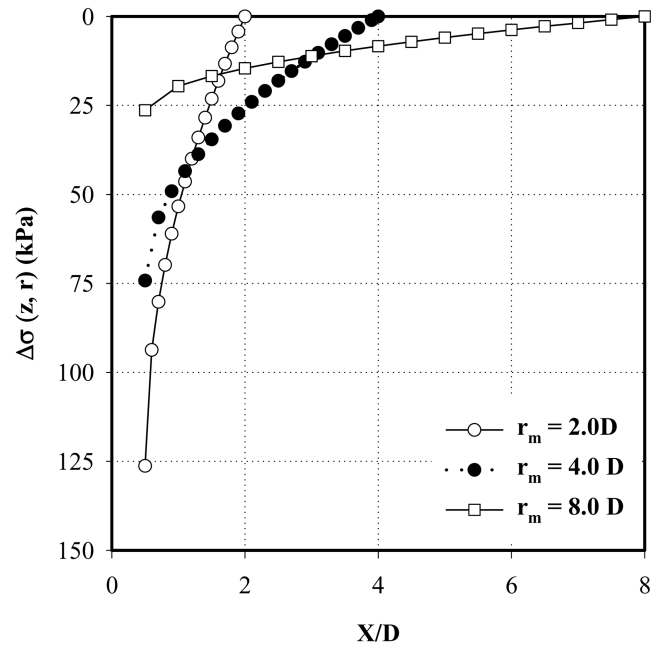


Fig. 3. Distribution of vertical stress reduction with distance from pile ($Z=10m$ or $Z/L=0.5$)

공식 (3)-(4)를 분석한 결과 수직응력의 감소에 영향을 미치는 여러 요소 가운데 수직응력이 감소하는 범위인 r_m 값이 수직응력의 감소에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. Randolph(1977)에 의하면 말뚝두부에 상재하중이 작용하는 경우 r_m 은 말뚝의 길이와 유사하다고 보고되었다. 그러나 이는 말뚝과 지반사이에 항복이 발생하지 않는 탄성조건을 만족시키는 경우이기 때문에 말뚝에 작용하는 하중으로 인한 영향이 비교적 큰 경우라고 할 수 있다. 한편 Lee(2001)에 의하면 단독말뚝에 부마찰이 작용하는 경우 그 영향범위는 보통 말뚝 직경의 5D 정도인 것으로 알려져 있다. 이는 말뚝-지반 사이에서 항복으로 인한 미끄러짐이 발생하여 그 영향범위가 감소하기 때문이다. 이에 본 연구에서는 r_m 의 값을 수치해석을 통해서 산정한 전단응력 및 부마찰력의 분포를 이용하여 평가하고자 한다.

Fig. 3은 식 (4)를 이용하여 2장의 수치해석에서 가정된 것과 동일한 조건 하에서 다양한 r_m 값에 대하여 산정한 $\Delta\sigma(z, r)$ 의 값의 분포를 보여주고 있다($Z=10m$), 여기서 X 는 말뚝 중심으로부터의 수평거리, D 는 말뚝의 직경이다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 r_m 이 작은 경우는 $\Delta\sigma(z, r_0)$ 의 값은 크게 되며, r_m 이 증가하면 반대로 $\Delta\sigma(z, r_0)$ 의 값은 감소하는 경향을 볼 수 있다. r_m 이 각각 2.0D, 4.0D 및 8.0D인 경우 $\Delta\sigma(z, r_0)$ 의 값은 126.3, 74.2, 26.4kPa로서 $Z=10m$ 인 경우 Greenfield 조건의 수직응력과 비교하여 36.9-86.8 %의 수직응력을 보여준다. 즉 부마찰이 작용하는 말뚝 옆 흙요소의 수직응력은 상당한 크기로 감소함을 할 수 있다. 그러나 현재로서는 합리적인 r_m 값에 대한 정보가 없으므로 4장에서는 수치해석을 통한 결과와의 비교를 통하여 최적의 r_m 값을 도출할 것이다.

4. 수치해석 및 공식을 이용한 수직응력 및 수평응력의 감소 분석

4.1 주변지반의 수직응력 분포

앞서 언급한 바와 같이 말뚝 주변지반이 침하하게 되는 경우 말뚝과 지반의 상대변위 발생으로 인한 하중전이가 발생하여 지반의 수직응력 일부가 말뚝으로 전이되어 수직응력이 감소하게 된다. Fig. 4는 수치해석을 통해 산정한 말뚝에서의 정규화된 거리 (X/D)가 증가함에 따른 흙의 수직응력의 분포를 정규화된 지반의 심도 (Z/L)에 대하여 보여주고 있다. 여기서 X 는 말뚝에서의 수평거리, D 는 말뚝의 직경, Z 는 지중의 심도, L 은 말뚝의 길이이다. 전반적으로 볼 때 수직응력의 감소는 말뚝의 인근에서 크고, 말뚝에서의 거리가 감소할수록 수직응력의 감소 정도도 점점 줄어드는 것을 알 수 있다. 이때 최외곽 지역인 $X/D=33.9$ 인 경우는 수직응력의 감소가 거의 없어 Greenfield 조건과 거의 유사한 값을 보여주고 있다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 수직응력의 감소는 보통 말뚝에서의 거리가 약 4-6D 정도인 구간에서 주로 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 Zeevaert(1983) 및 Jeong(1992)가 보고한 수직응력 감소 구간과 유사하거나 약간 작다고 할 수 있다. 그러나 이러한 경향은 Lee(2001)가 3차원 유한요소 해석을 통하여 분석한 부마찰이 작용하는 말

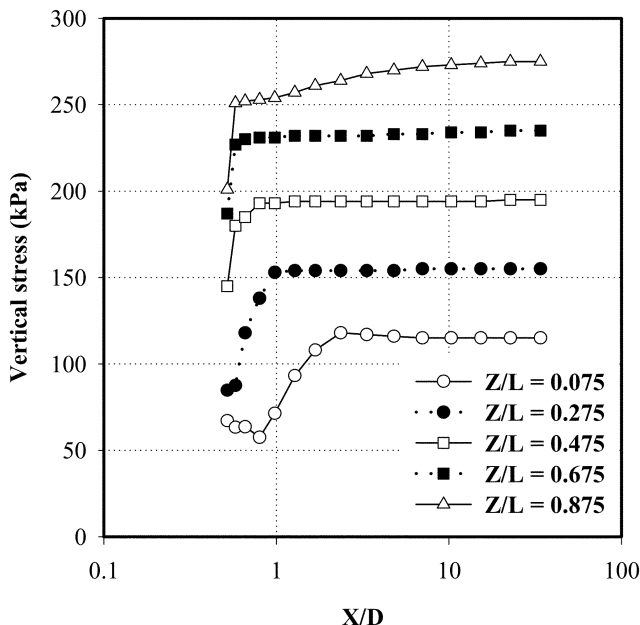


Fig. 4. Distribution of vertical stress with distance from pile

뚝의 경우 그 영향범위가 5.0D 이내 정도라고 보고한 부분과 매우 유사하다고 할 수 있다.

Fig. 5는 말뚝 바로 옆의 흙 요소($X/D=0.52$)에서의 수직응력의 분포 및 Greenfield 조건인 최외곽 지역($X/D=33.9$)의 수직응력의 분포를 보여주고 있다. 전체적으로 흙 요소의 수직응력이 매우 크게 감소되는데 Greenfield 조건에 비해 평균 50% 정도로 감소하고 있음을 보여주고 있다. 이는 Zeevaert(1983)이 가정한 값인 25% 보다는 2배 정도 크게 산정되었다. 흙의 수직응력은 지표면부터 상당한 크기로 감소되고 있는데 이는 Zeevaert(1983)가 제시한 점진적인 수직응력의 감소형태와는 다소의 차이를 보이고 있다. 한편 수직응력이 감소되는 정도는 말뚝의 중립면(neutral plane) 부근에서는 약간 감소되고 있다. 이는 중립면 부근에서의 전단응력 전이가 비교적 크지 않아서 수직응력이 감소되는 부분이 적기 때문인 것으로 판단된다.

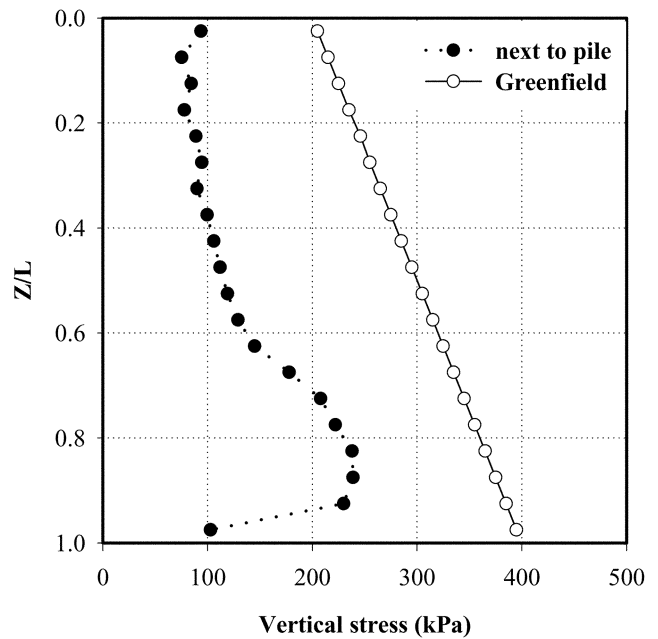


Fig. 5. Distribution of vertical stress with depth

4.2 주변지반의 수평응력 분포

4.1에서는 전단응력의 전이로 인한 지중 수직응력의 감소에 대하여 논하였다. Fig. 6은 말뚝에서의 정규화된 거리 (X/D)가 증가함에 따른 수평응력의 분포를 정규화된 지반의 심도 (Z/L)에 대하여 보여주고 있다. 전반적으로 볼 때 수평응력의 감소는 말뚝의 인근에서 크고, 말뚝에서의 거리가 감소할수록 수평응력의 감소 정도도 점점 줄어드는 것을 알 수 있다. 이때 최외곽 지역인 $X/D=33.9$ 인 경우는 수평응력의 감소가 거의 없어 Greenfield 조건과 거의 유사한 값을 보여주고 있다. 그러나 수직응력의 감소 정도에 비해서는 수평응력의 감소 정도가 적은 것을 알 수 있다. 한편 수직응력에 비해서 r_m 의 범위는 약간 감소되어 Z/L 의 값에 따라 1.0D-5.0D 정도의 값을 보이고 있다. Fig. 7에는 말뚝 바로 옆의 흙 요소에($X/D=0.52$) 작용하는 수평응력과 Greenfield 조건($X/D=33.9$)의 수평응력의 분포를 보여주고 있다. Greenfield 조건에 비해서 말뚝 바로 옆 흙 요소의 수평응력은 약 30% 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 수

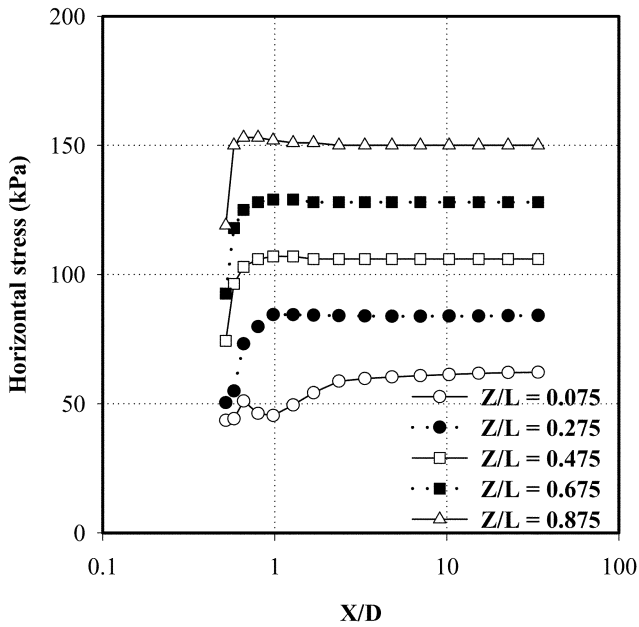


Fig. 6. Distribution of horizontal stress with distance from pile

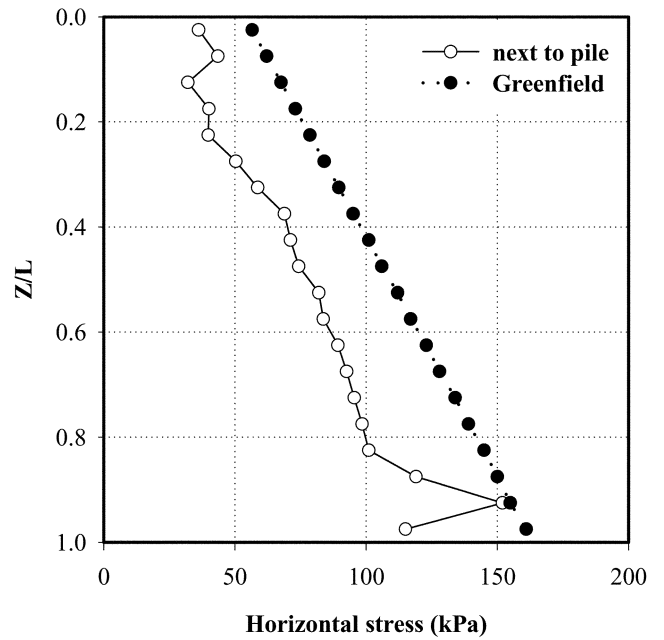


Fig. 7. Distribution of horizontal stress with depth

직응력의 감소가 Greenfield 조건에 비해서 50% 감소되는 것에 비해서는 약간 적은 편이라고 할 수 있다. 중립면 (neutral plane) 부근에서는 수평응력의 값이 Greenfield 조건과 거의 유사하게 나타났다. 이러한 경향은 중립면 부근에서는 전단응력이 거의 발생하지 않기 때문인 것으로 추정되며 앞서 설명한 수직응력의 분포와 유사하다고 할 수 있다.

4.3 간편공식을 이용한 수직응력의 감소 산정

Fig. 8은 3장에서 언급한 식 (3)을 이용하여 산정한 흙의 수직응력분포를 보여주고 있다. 식 (3)을 통하여 수직응력의 감소를 산정하기 위해서는 r_m 의 값을 결정해야 하는데 본 연구에서는 2D, 6D, 8D 및 16D인 조건에 대하여 수직응력의 감소를 고려하였다. 또한 수치해석을 통해 산정한 수직응력의 분포를 말뚝 가장 옆에 있는 흙 요소 및 Greenfield

조건의 흙 요소에 대하여 보여주고 있다. r_m 의 값이 작은 경우 수직응력의 감소 정도가 증가하며, r_m 의 값이 증가하면 수직응력의 감소 정도 역시 점점 줄어드는 경향을 보이고 있다. 즉 수직응력이 감소하는 구간의 범위는 말뚝 바로 옆 흙 요소의 수직응력의 크기에 매우 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. r_m 이 16D인 경우는 수직응력이 거의 감소하지 않기 때문에 Greenfield 조건의 경우와 유사한 정도의 수직응력분포를 보이고 있다. 전반적으로 보면 수치해석을 통해서 산정한 말뚝 바로 옆 흙 요소의 수직응력의 분포와는 다소의 차이를 보이고 있으나, r_m 의 값이 6D 및 8D인 경우 수치해석 결과에 비하여 상대적으로 유사한 크기의 수직응력의 분포를 보여주고 있다. 이는 앞서 언급한 4-6D와 약간 더 크지만 대체로 비슷하다고 볼 수 있다. 이러한 현상은 식 (3)을 유도하기 위하여 수직응력이 포물선의 형태로 감소

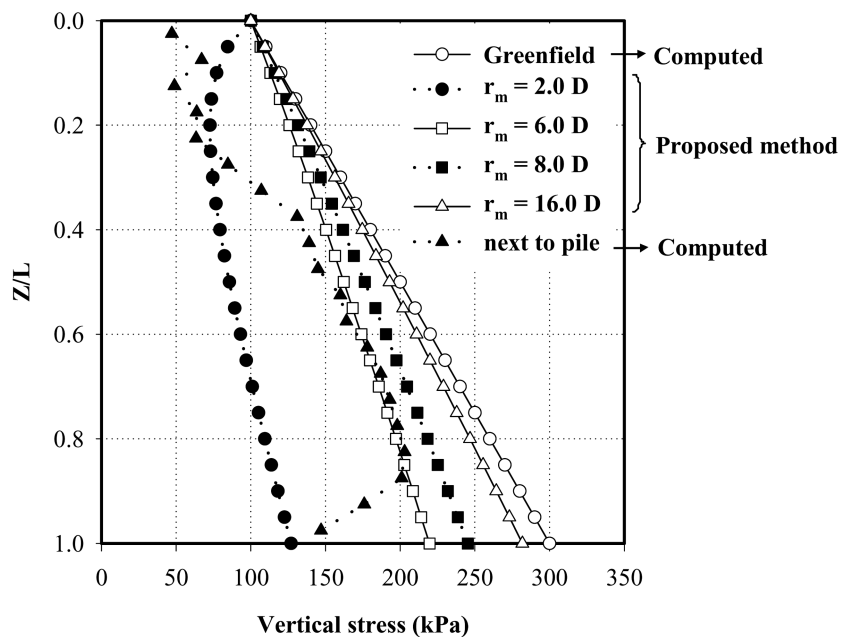


Fig. 8. Distribution of vertical stress with depth

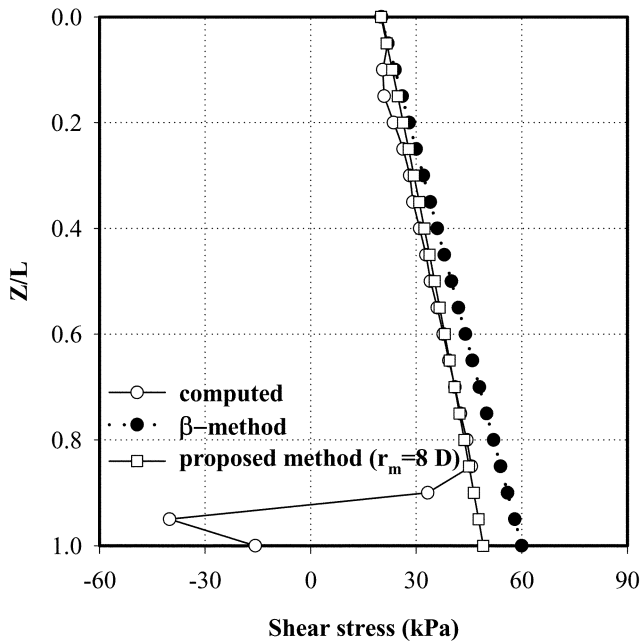


Fig. 9. Distribution of shear stress with depth

한다고 가정한 부분, r_m 이 지반의 심도와 무관하게 일정하다는 가정 등 많은 불확실한 부분에 기인한 것으로 보인다. 식 (3)에 나타나 있는 것처럼 수직응력의 감소는 여러 가지 다양한 요소들에 의해 영향을 받으므로 향후 심도 있는 연구를 통하여 r_m 의 값을 산정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4.4 전단응력 및 부마찰력의 분포

Fig. 9는 수치해석 및 β -방법에 의해서 산정된 말뚝 바로 옆 흙 요소에서의 전단응력의 분포를 보여주고 있다. 수치해석 결과에 의하면 중립면(neutral plane)은 $Z/L = 0.9$ 부근에 위치하고 있어서 본 연구에서 분석한 말뚝은 선단지지 말뚝의 경우와 유사하다고 볼 수 있다. 중립면 부근에서는 전단강도의 부분적인 발현으로 인하여 전단강도보다 훨씬 작은 마찰응력이 발생하고 있으며, 중립면 아래에서는 상향의 마찰저항력(positive shaft resistance)가 발현함을 알 수 있다. 한편 β -방법에 의한 전단응력의 값은 수치해석을 통해서 산정한 것보다 약간 더 큰 값이 분포하고 있다. 여기서 중립면 부근이나 그 아래에서는 부분발현 및 상향의 마찰저항으로 인한 차이라고 할 수 있겠으나, $Z/L=0-0.85$ 구간에서의 차이는 흙 요소의 수직응력 및 수평응력의 감소에 의한 것으로 판단된다. 한편 Fig. 9에는 식 (3)을 이용해서 산정한 전단응력의 분포도 포함되어 있다. 이를 위해서 r_m 의 값을 결정하기 위하여 수치해석에 의한 전단응력의 분포와 가장 유사한 경향을 보일 때의 r_m 의 값인 $8D$ 를 사용하였다. 이 경우 공식 (3)에 의한 전단응력의 분포는 $Z/L=0-0.85$ 구간에서 수치해석에 의한 값과 매우 유사한 분포를 보여주고 있어서 r_m 을 적절히 선택하기만 한다면 전단응력의 값을 잘 예측할 수 있음을 보여준다.

Fig. 10은 수치해석을 통해서 산정한 부마찰력의 분포와 β -방법을 이용해서 구한 부마찰력의 분포를 보여주고 있다. 전반적으로 볼 때 부마찰력은 수치해석을 통해서 산정한 값이 β -방법에 의한 결과보다 작게 계산되었다. 수치해석을 통한 최대 부마찰력은 913.7kN 으로 산정되었다. 한편 수치해

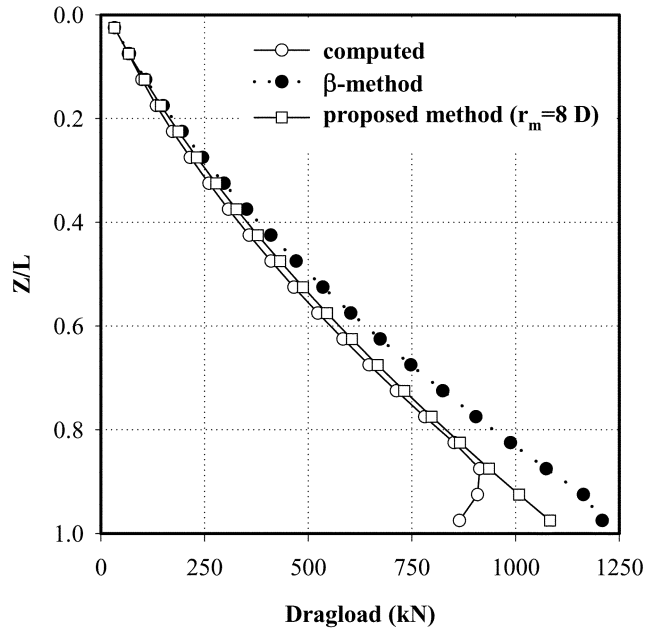


Fig. 10. Distribution of dragload with depth

석에서 최대부마찰력이 발생하는 위치에 대하여 β -방법으로 산정한 부마찰력은 1073.9kN 이다. 또한 앞서 언급한 식 (3)의 수직응력 감소를 이용하여 부마찰력을 산정하는 경우 936.3kN 의 부마찰력이 계산된다. 즉 수직응력의 감소를 적절히 고려할 수 있다면 β -방법에 비해서 보다 합리적인 부마찰력을 산정할 수 있을 것이다.

현재 일반적으로 사용되는 β -방법은 수직응력의 감소를 고려하지 못하기 때문에 부마찰력을 다소 과하게 평가할 수 밖에 없다. 물론 부마찰력을 안전측으로 평가하는 것이 합리적이므로 실무적인 차원에서는 문제가 없다고 할 수 있다. 그러나 응력감소부분 및 중립면(neutral plane) 부근에서 전단강도의 일부만 발현되는 문제 등을 종합적으로 고려하여, β -방법에 의한 부마찰력 평가시 이를 적절히 고려하면 보다 합리적으로 부마찰력을 산정할 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 지반침하로 인한 부마찰의 발생과 말뚝주변 지반의 수직응력 감소와의 상관관계에 대한 분석을 수치해석 및 간편공식을 이용하여 실시하였다. 이를 통해 다음과 결론을 도출하였다.

1. 말뚝이 시공된 주변지반에 침하가 발생하여 말뚝-지반사이의 상대변위로 인해 부마찰이 발생하는 경우 흙-말뚝 사이에서 발생한 전단응력 전이로 인해서 지반의 수직응력 일부가 감소하였다.
2. 본 연구에서 가정한 단독말뚝의 경우 수직응력이 감소하는 구간은 말뚝중심으로부터 약 $4-8D$ 인 것으로 나타났다, 이때 D 는 말뚝의 직경이다.
3. 수직응력의 감소에 비해서 수평응력이 감소되는 정도는 비교적 적은 것으로 나타났다. 수치해석 결과에 의하면 Greenfield 조건에 비해서 수직응력은 약 50%, 수평응력은 약 30% 감소하는 것으로 분석되었다.
4. 본 논문에서 제시한 간편공식을 이용하는 경우 수직응력

감소영역 r_m 을 적절히 결정할 수만 있다면 말뚝 옆 흙의 수직응력의 감소를 어느 정도 합리적으로 평가할 수 있고 따라서 부마찰력의 크기도 비교적 정확하게 평가할 수 있음을 보였다. 부마찰력의 평가에 일반적으로 널리 사용되는 β -방법을 이용하는 경우 이러한 수직응력의 감소를 반영할 수 있다면 보다 신뢰성이 높은 부마찰력 평가가 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- Burland, J.B. (1973) Shaft friction of piles in clay - A simple fundamental approach. *Ground Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 30-42.
- Comodromos, E M. and Bareka, S.V. (2005) Evaluation of negative skin friction effects in pile foundations using 3D nonlinear analysis. *Computers and Geotechnics*, Vol. 32, pp. 210-221.
- Itasca Consulting Group (2006). *Fast lagrangian analysis of continua (FLAC-3D), version 3.1, User's Manuals*, Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota.
- Jeong, S. (1992) *Nonlinear Three Dimensional Analysis of Down-drag on Pile Groups*. Ph.D thesis, Texas A & M University.
- Lee, C.J. (2001) *The Influence of Negative Skin Friction on Piles and in Pile Groups*. Ph.D thesis, Cambridge University.
- Nunez, I.L. (1989) *Centrifuge Model Tension Piles in Clay*. Ph.D. Thesis, Cambridge University.
- Randolph, M.F. (1977) *A Theoretical Study of the Performance of Piles*. Ph.D thesis, Cambridge University.
- Zeevaert, L. (1983) *Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions*, 2nd Edition, Van Nostrand Reinhold Company, pp. 358-360.
- (접수일: 2008.12.1/심사일: 2008.12.28/심사완료일: 2008.12.29)