

풍화암에 근입된 현장타설말뚝의 주면 하중전이 특성

Shear Load-transfer Characteristics of Drilled Shafts in Weathered Rocks

조성한¹⁾, Sung-Han Cho, 김수일²⁾, Soo-Il, Kim, 정상섬³⁾, Sang-Seom, Jeong

¹⁾ LG건설(주) 토질및기초팀 과장, Senior Engineer, LG Construction Co., Ltd.

²⁾ 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수, Prof., Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

³⁾ 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Prof., Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

SYNOPSIS : In this study the shear load-transfer curves of drilled shafts placed in granite- gneiss rocks were investigated based on small-scale tension load tests performed on nine instrumented piles. Special attention was given to the load-transfer at the interface between shafts and surrounding rocks. It is shown that the shear load-transfer curves can be categorized typically into two different types such as hyperbolic and elastic-perfectly plastic models. Based on the analysis, a single-modified hyperbolic type is proposed for shear load-transfer function of drilled shafts in rocks through the normalization of transfer curves and linear regression analysis.

KEYWORDS : 주면하중전이함수, 현장타설말뚝, 인발시험, 수정쌍곡선, 회귀분석

1. 서 론

말뚝의 주면을 통해 지반으로 전이되는 하중의 크기와 말뚝의 변위량과의 관계를 나타내는 주면하중전이함수는 지금까지 외국의 많은 연구자들에 의해 여러 가지 형태로 제안되었다. 이들은 주로 점성토 및 사질토 지반에 시공된 말뚝을 대상으로 현장재하시험을 통해 개발된 것이며, 이러한 경험적 하중전이함수는 지반조건 및 말뚝 시공조건과 상이한 조건을 갖는 해석대상에 대하여는 적용이 곤란하다.

특히 국내의 경우 현장타설말뚝은 기반암층에 지지되는 경우가 대부분이므로, 이의 해석을 위해서는 암반을 대상으로 개발된 하중전이함수가 필요하다. 암반에 시공된 현장타설말뚝을 대상으로 국외에서 개발된 하중전이함수가 소수 있기는 하나, 시험대상 암반의 종류가 주로 이암, 혈암 및 사암 등으로서 국내에 주로 분포하는 화강암 또는 편마암과는 역학적 성질이 매우 다르므로 이러한 하중전이함수 역시 국내의 현장타설말뚝에 대한 적용성이 낮다고 할 수 있다.

이와 같은 배경에서 본 연구에서는 국내에 주로 분포하는 화강편마암 층에 지지된 소규모 현장타설말뚝에 대한 인발시험을 실시하여 주면의 하중전이곡선을 구하였다. 또한, 말뚝의 직경 및 지반조건에 따른 하중전이곡선의 변화를 규명하기 위하여 유한요소해석 프로그램을 이용한 매개변수연구를 수행하였으며, 인발시험 및 매개변수연구 결과를 토대로 국내의 화강편마암질 풍화암에 근입된 실제규모의 현장타설말뚝에 적용 가능한 경험적 주면하중전이함수를 개발, 제안하였다.

2. 말뚝의 주면하중전이함수

수직하중을 받는 말뚝기초의 하중-변위 거동을 해석하기 위해서는 말뚝주면에서의 전단저항력과 말뚝 변위와의 관계를 나타내는 주면하중전이함수($f-w$ curves)의 파악이 필수적이다. 이에 지금까지 제안된 대표적인 주면하중전이함수들을 살펴보면 다음과 같다.

2.1 Vijayvergiya의 제안식

Vijayvergiya(1977)는 점성토와 사질토에 모두 적용 가능한 하중전이함수를 다음과 같이 제안하였다.

$$f(z) = f_{\max}(z) \left(2\sqrt{\frac{w(z)}{w_{\max}(z)}} - \frac{w(z)}{w_{\max}(z)} \right) \quad (1)$$

여기서, $f(z)$ 는 주변에 발생하는 전단응력, $f_{\max}(z)$ 는 최대 단위주면마찰력, $w(z)$ 는 말뚝의 수직변위, $w_{\max}(z)$ 는 $f_{\max}(z)$ 를 발생시키는 말뚝의 변위이다.

2.2 Castelli의 제안식

Castelli 등(1992)은 쌍곡선 함수식을 이용하여 말뚝과 주변 지반간의 비선형거동을 고려한 하중전이함수를 다음과 같이 제안하였다.

$$f(z) = w(z) / \left\{ \frac{1}{KI_L} + \frac{w(z)}{f_{\max}(z)} \right\} \quad (2)$$

여기서, KI_L 은 주변하중전이함수의 초기 접선기울기로서 식 (3)으로부터 산정된다.

$$KI_L = G_s / \{r_o \cdot \ln(R/r_o)\} \quad (3)$$

여기서, r_o 는 말뚝의 반경, R 은 전단변형이 무시할 수 있을 만큼 작아지는 방사방향의 거리로서 $R = 2.5L(1 - \nu_s)$ 와 같이 표현되며, L 은 말뚝의 길이, ν_s 는 지반의 포아송비, G_s 는 지반의 초기전단 탄성계수이다.

2.3 O'Neill 등의 제안식

O'Neill과 Hassan(1994)은 쌍곡선 함수식을 이용하여 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주변하중전이함수를 다음과 같이 제안하였다.

$$f(z) = w(z) / \left\{ \frac{2.5D}{E_{\text{mass}}} + \frac{w(z)}{f_{\max}(z)} \right\} \quad (4)$$

여기서, D 는 말뚝의 직경이며, E_{mass} 는 암반체의 유효탄성계수이다.

2.4 Baquelin 등의 제안식

Baquelin 등(1982)은 공내재하시험과 유한요소해석을 통하여 식 (5)와 같은 완전탄성-완전소성의 주변하중전이함수식을 제안하였다.

$$f(z) = E_{SB} \cdot w(z) / \left[2r_o(1 + \nu_s) \left\{ 1 + \ln \left(\frac{L}{2r_o} \right) \right\} \right] \quad (5)$$

여기서, E_{SB} 는 공내재하시험에 의한 지반탄성계수이며, L 은 말뚝의 길이, r_o 는 말뚝의 반경이다.

3. 인발시험 결과 분석

3.1 인발시험 개요

본 연구에서는 말뚝 주면에서의 전단저항력과 말뚝 변위 사이의 관계를 규명하기 위하여, 총 9본의 소구경 현장타설말뚝을 시공한 후 이에 대한 인발시험을 실시하였다. 시험말뚝이 시공된 지반은 국내에 널리 분포하고 있는 화강편마암의 상부 풍화대로서, 표준관입시험에 의한 N치는 50/5 ~ 50/2 정도이며, 공내재하시험 결과 변형계수(PMT modulus)는 약 1500~4600 kg/cm²로 나타났다. 말뚝 및 시험장치의 설치 상세도는 그림 1과 같다.

그림 1에서 보는 바와 같이 말뚝의 직경은 165mm, 말뚝의 길이는 1.0m로 하였으며, 말뚝의 상단 및 하단에 스티로폼을 이용하여 인위적으로 공극을 설치함으로써 압축 및 인장저항을 제거하여 1m 구간에서의 주면저항력만이 발현되도록 하였다. 시험하중은 중공식 유압잭을 이용하여 재하하였으며, 피복된 P.C 강선을 사용하여 강선과 말뚝체 사이의 부착력이 발현되지 않게 함으로써 시험말뚝 하단에 상향의 압축력으로 작용되도록 하였다. 시험하중은 예상 극한인발력을 8 단계로 나누어 단계별로 재하하였으며, 각 하중 단계별로 5~15분간 재하하중을 유지하면서 1분 간격으로 말뚝하단의 변위를 측정하였다.

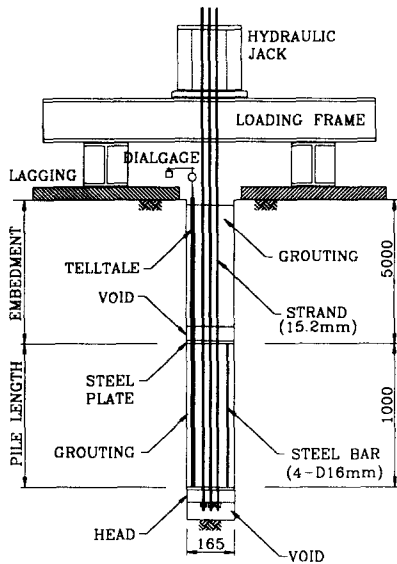


그림 1 인발시험 개요도

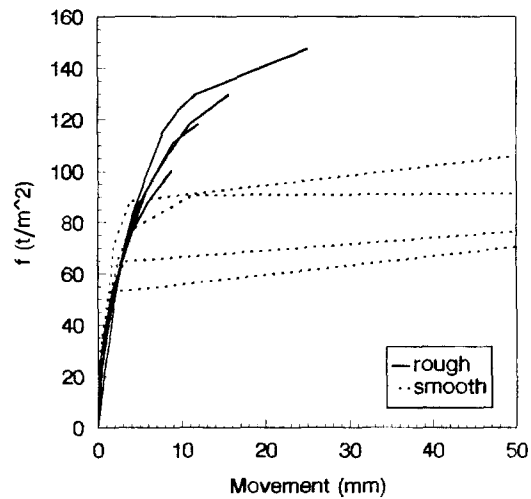


그림 2 말뚝의 주면저항력과 변위와의 관계

3.2 인발시험 결과

그림 2는 9본의 시험말뚝에 대한 인발시험 결과로부터 얻어진 말뚝의 단위주면저항력, f와 말뚝변위 사이의 관계곡선을 도시한 것이다. 여기서 말뚝의 단위주면저항력은, 말뚝의 전길이에 걸쳐 주면저항력이 균등하게 분포한다고 가정하여 말뚝하단에 작용하는 단계별 인발하중을 전체 주면적으로 나누어 산정하였다. 말뚝의 변위량은 인발시험시 telltale을 이용하여 시험말뚝의 하단으로부터 20cm 상부지점에서 측정된 값이며, 말뚝 자체의 탄성압축량은 무시하였다.

그림 2에 도시한 바와 같이, 주면하중전이곡선은 그 형태에 있어서 전형적으로 말뚝의 변위가 증가함에 따라 단위주면저항력이 지속적으로 증가하는 쌍곡선함수 형태와 주면저항력이 변위와 함께 증가하다가 그 극한값에 이르러 급격한 소성변위를 일으키는 탄성-완전소성 형태의 두가지 부류로 나눌 수 있었으며, 9 개소의 인발시험 중 5 개소의 시험말뚝이 전자와 같은 거동을 보이며 나머지는 후자와 같은 거

동을 보임을 알 수 있었다. 이와 같은 거동 차이는 말뚝 표면의 거칠기에 기인하는 것으로 판단되며, 이에 대한 연구로 O'Neill과 Hassan(1994)은 표면거칠기가 암반에 근입된 현장타설말뚝의 거동에 큰 영향을 미치는 인자임을 밝힌 바 있다. 그들의 연구결과에 따르면 말뚝의 주면저항력은 재하 초기단계에서는 말뚝과 암반사이의 부착에 의해, 하중의 증가에 따라 부착이 파괴된 후에는 말뚝과 암반사이의 마찰에 의해 발생되며, 이러한 부착파괴 후의 마찰저항력은 말뚝표면의 거칠기에 큰 영향을 받으므로 이에 따라 주면하중전이거동은 본 연구의 시험결과와 유사한 거동 차이를 보이게 된다고 보고하고 있다.

또한, Hassan(1994)은 점판암에 근입된 현장타설말뚝에 대한 수치해석을 통하여 말뚝 표면의 거칠기에 따른 주면하중전이거동의 차이를 규명하였다. 이에 따르면, 말뚝 표면이 거친 경우 변위의 증가에 따라 주면저항력은 지속적으로 증가하며, 말뚝표면이 매끄러운 경우 주면저항력은 변위에 따라 증가하다가 그 극한값에 이르러 비교적 급격한 소성파괴를 일으키는 경향을 보인다. 한편, Townsend 등(1993)은 암반에 근입된 현장타설말뚝의 실물 재하시험 및 소규모 인발시험을 실시하여 그 거동특성을 비교, 분석한 바 있다. 그들의 연구 결과에서도, 소규모 말뚝의 경우 주면하중전이거동은 말뚝표면의 거칠기 및 시공방법에 상당히 민감한 것으로 보고되고 있다.

이상과 같은 O'Neill, Hassan 및 Townsend 등의 연구결과로부터, 그림 2에 나타난 하중전이 거동의 차이는 말뚝 표면의 거칠기 차이에 기인함을 알 수 있다. 비록 본 연구의 시험말뚝은 모두 동일한 방법으로 시공되었으나, 시공위치 별로 풍화암의 조직구성 및 풍화정도가 서로 상이하여 미소하나마 이로 인한 표면거칠기의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

3.3 하중전이곡선의 회귀분석

인발시험 결과 얻어진 하중전이곡선을 표면이 거친 경우와 매끄러운 경우의 두 부류로 구분하여 각각에 대한 회귀분석을 실시하였다. 그림 3은 표면이 거친 경우의 주면하중전이곡선을 대표적인 주면하중전이함수식에 의한 곡선과 함께 도시한 것이다. 시험결과는 쌍곡선 모델인 Castelli의 곡선 및 O'Neill과 Hassan의 곡선과 잘 일치하고 있으며, 탄성-완전소성 모델인 Vijayvergiya의 곡선이나 Baquelin의 이중직선과는 많은 차이를 보이고 있다. 여기서, 암반의 탄성계수는 공내재하시험으로부터 얻어진 변형계수의 평균치인 3000 kg/cm^2 로 적용하였으며, 포아송비는 일반적으로 암반에 적용가능한 0.3을 선정하였다. 따라서 표면이 거친 경우의 주면하중전이곡선은 식 (6)과 같은 쌍곡선 함수식을 이용하여 회귀분석이 가능함을 알 수 있다.

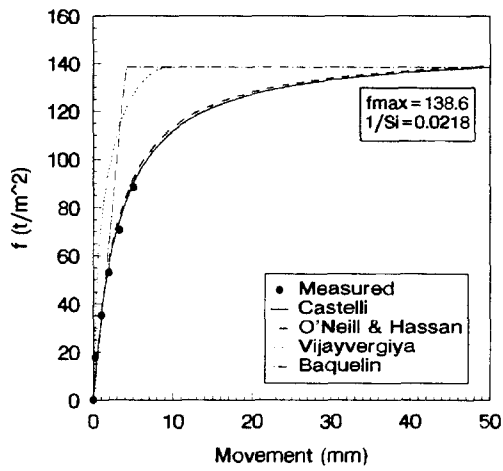
$$f = w / \left\{ \frac{1}{S_i} + \frac{w}{f_{\max}} \right\} \quad (6)$$

여기서, f 는 임의의 말뚝변위, w 에 상응하는 단위주면저항력이며, S_i 는 곡선의 초기 기울기, f_{\max} 는 극한 단위주면저항력 이다.

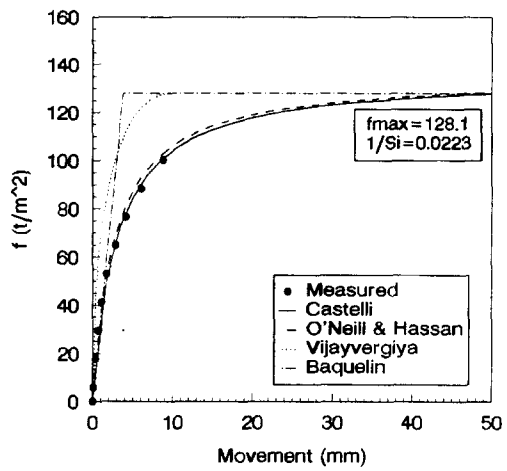
반면에 그림 4는 표면이 매끄러운 경우의 주면하중전이곡선을 대표적인 주면하중전이함수식에 의한 곡선들과 함께 도시한 것이다. 주면하중전이곡선은 탄성-완전소성 모델인 Vijayvergiya의 곡선과 비교적 잘 일치하며 Baquelin의 이중직선이나 O'Neill과 Hassan의 쌍곡선과는 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 그러나, Vijayvergiya의 하중전이함수식은 임계변위, w_{\max} 만의 함수로서 주면전이하중을 규정하고 있으므로 해석대상 지반의 물성변화를 적절히 고려하기가 용이하지 않음을 알 수 있다. 따라서, 표면이 매끄러운 경우의 하중전이곡선에 대한 회귀분석은 표면이 거친 경우와 마찬가지로 지반의 일반적인 물성값을 매개변수로 하는 쌍곡선 형태의 함수식으로 하되, 상관관계를 최적화하기 위해 곡선보정계수를 도입한 수정쌍곡선 함수식을 적용하였으며, 그 일반식은 다음의 식 (7)과 같다.

$$f = w / \left\{ \frac{1}{S_i} + \frac{w}{\alpha_1 f_{\max}} \right\} \quad (7)$$

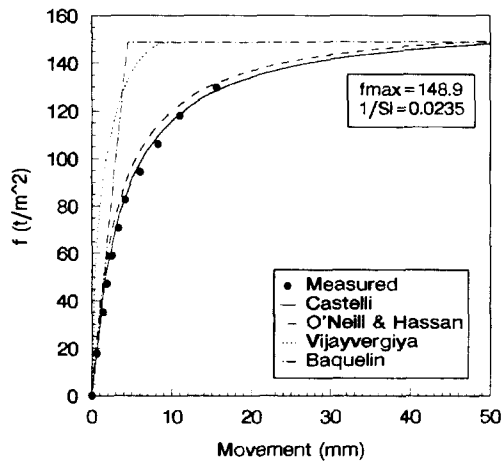
여기서, S_i 는 곡선의 초기기울기이며, α_1 은 곡선보정계수로서 1.0 이상의 값이다.



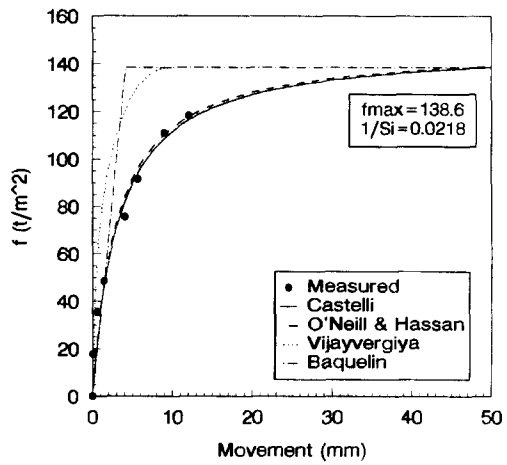
(a) 시험말뚝 1



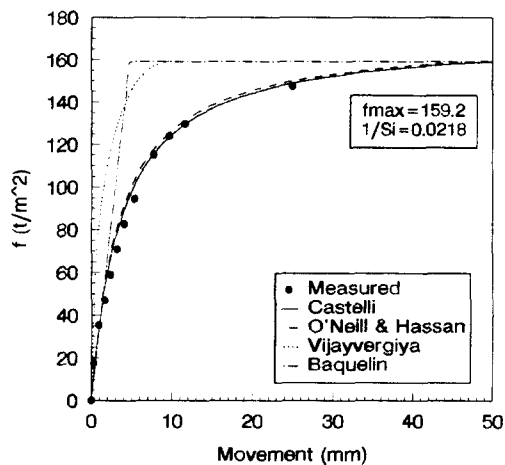
(b) 시험말뚝 2



(c) 시험말뚝 3

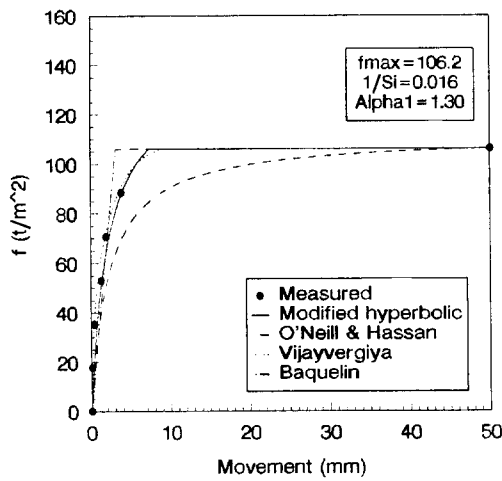


(d) 시험말뚝 4

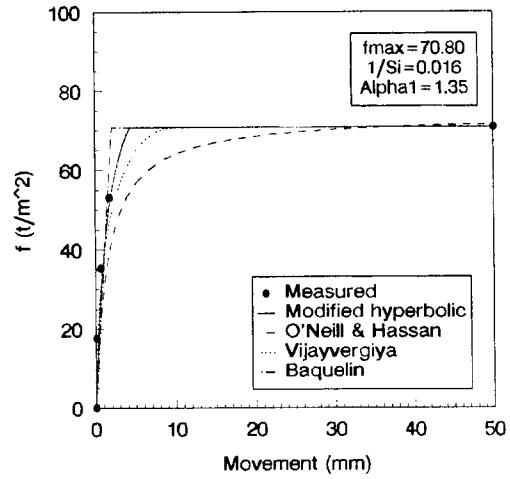


(e) 시험말뚝 5

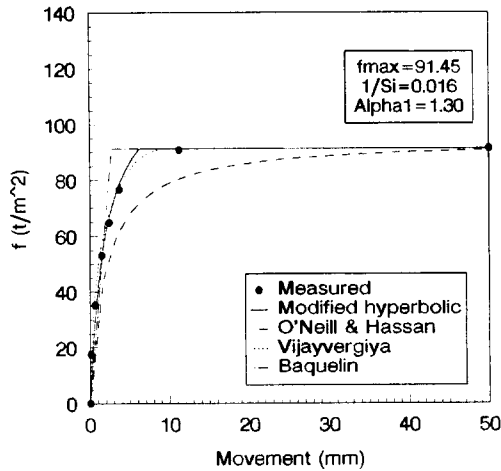
그림 3 표면이 거친 말뚝의 주변하중전이곡선



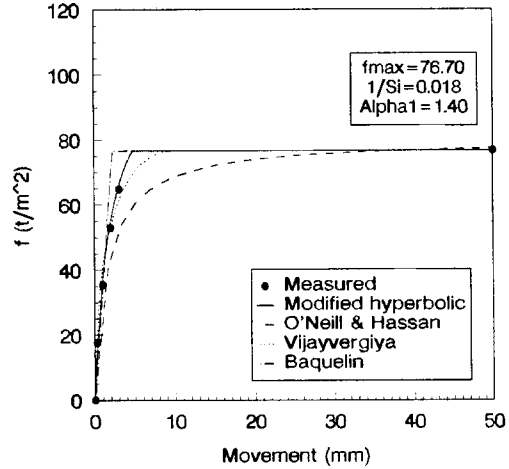
(a) 시험 말뚝 6



(b) 시험 말뚝 7



(c) 시험 말뚝 8



(d) 시험 말뚝 9

그림 4 표면이 매끄러운 말뚝의 주변하중전이곡선

식 (7)과 같은 수정쌍곡선 모델은 주변저항력, f 가 그 극한치인 f_{max} 에 도달하기까지는 $\alpha_1 \cdot f_{max}$ 에 점근하는 쌍곡선의 형태를 가지며, 극한치에 도달한 후에는 급격한 소성변위가 발생하는 형태이다. 이 모델은 쌍곡선 모델과 유사한 함수식으로 표현되나, 곡선형태에서는 탄성-완전소성 모델의 일종으로 볼 수 있다. 그림 4에서 보듯이 시험결과 얻어진 표면이 매끄러운 경우의 하중전이곡선은 수정쌍곡선과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 여기서, 수정쌍곡선의 초기기울기, S_i 는 Castelli 함수식에 의한 초기기울기 값을 적용하였다.

한편, 표면이 거친 말뚝의 주변하중전이함수로서 제안한 쌍곡선 함수식도 α_1 이 1.0 인 수정쌍곡선 함수식의 특별한 경우이므로 말뚝표면의 거칠기에 따라 차이를 보이는 두 가지 주변하중전이거동은 수정쌍곡선 함수식을 이용하여 단일화된 하나의 하중전이함수식으로 나타낼 수 있다.

4. 주변하중전이함수의 제안

4.1 매개변수연구

지금까지 제안된 여러 가지 주변하중전이함수들에 따르면 주변하중전이곡선의 초기기울기, S_i 는 지반의 탄성계수, E_s 및 말뚝의 직경, D 에 따라 변화하는 것으로 나타나고 있다. 본 연구에서 실시한 인발시험은 소규모의 현장타설말뚝을 대상으로 하였으므로, 시험 결과를 실제 규모의 현장타설말뚝에 확대 적용하기 위해서는 말뚝의 직경 및 지반조건의 변화에 따른 주변하중전이곡선의 초기기울기, S_i 의 변화 양상을 필히 규명하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 S_i 에 대한 매개변수연구를 수행하였다.

매개변수연구시 말뚝의 직경, D 는 165~1,500mm의 범위내에서 대표적으로 6 가지의 값을, 풍화암층의 탄성계수, E_s 는 10,000~200,000t/m²의 범위내에서 대표적으로 8 가지의 값을 선정한 후, 이들의 조합을 달리하여 총 15 가지의 해석 대상을 정하고 이에 대한 유한요소해석을 실시하였다. 유한요소해석은 전산프로그램 PLAXIS를 이용하였으며, 말뚝과 지반의 요소분할, 경계조건 및 해석구간 그리고 말뚝과 지반의 물성치는 각각 그림 5와 표 1에 수록한 바와 같이 적용하였다.

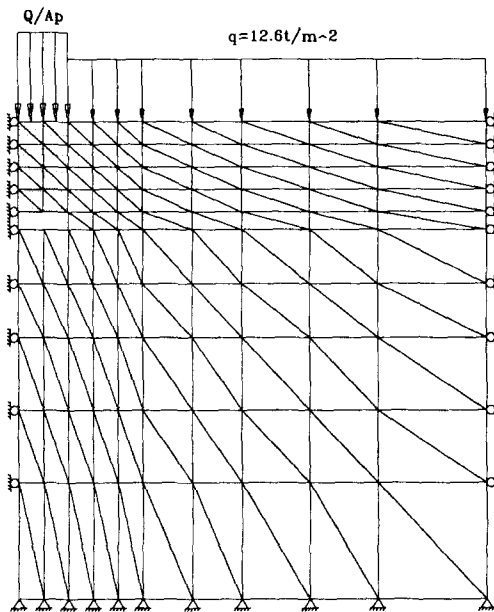


그림 5 요소분할 및 경계조건

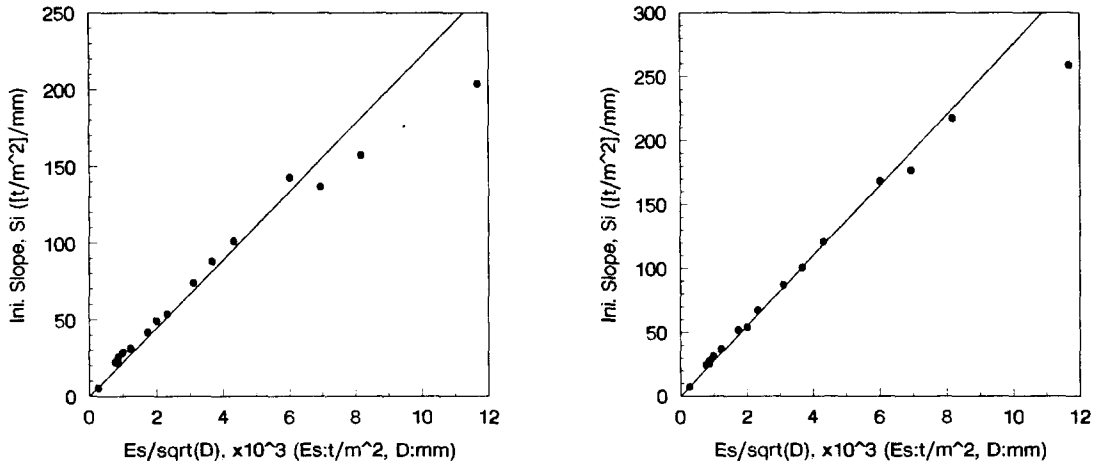
표 1 유한요소해석에 적용된 입력값

구 분		표면이 거친 경우	표면이 매끄러운 경우
지반의 물성치	ϕ' (°)	38	32
	c' (t/m ²)	30	60
	ψ (°)	2	0
	E_s (t/m ²)	10000, 30000, 60000, 90000, 120000, 150000, 180000, 200000	
	ν_s	0.30	
	γ (t/m ³)	2.10	
말뚝의 물성치	E_p (t/m ²)	3,500,000	
	ν_p	0.17	
	L (m)	1.0	
	D (mm)	165, 300, 600, 900, 1200, 1500	

말뚝의 직경, D 및 지반의 탄성계수, E_s 를 변화시켜가며 유한요소해석을 실시한 결과, 초기기울기, S_i 는 지반탄성계수에 선형적으로 비례하며, 말뚝의 직경에는 반비례하는 것으로 나타났다. 그림 6은 유한요소해석 결과 얻어진 초기기울기, S_i 와 E_s/\sqrt{D} 와의 관계를 나타낸 것이다. 그림 6에서 보는 바와 같이 대체로 S_i 는 E_s/\sqrt{D} 에 선형적으로 비례하며, 따라서 식 (7)의 초기기울기, S_i 는 다음의 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$S_i = C \cdot E_s / \sqrt{D} \quad (8)$$

여기서, E_s 와 D 는 각각 t/m^2 , mm의 단위이며, C 는 비례상수이다. 그러나, 지반의 탄성계수는 시험방법에 따라 편차가 클 뿐만 아니라 변형률의 수준에 따라서도 그 값이 크게 변하여 해석을 위한 적절한 입력값의 선정이 매우 까다로우므로, 본 연구에서는 하중전이곡선의 초기기울기를 보다 선정이 용이한 지반물성치의 함수로서 제안하고자 한다.



(a) 말뚝 표면이 거친 경우

(b) 말뚝 표면이 매끄러운 경우

그림 6 E_s/\sqrt{D} 에 따른 초기기울기의 변화

4.2 경험적 주면하중전이함수의 제안

Goodman(1980)은 극한단위주면저항력, f_{max} 와 암반의 일축압축강도, q_u 와의 사이에 직선적인 비례관계가 있음을 밝혔다. 또한, Deere(1968)는 암반의 종류별로 일축압축강도, q_u 와 탄성계수 E_s 와의 관계를 밝힌 바 있으며, 이에 따르면 암반의 종류에 관계없이 대체로 q_u 와 E_s 사이에는 직선적 비례관계가 있음을 알 수 있다. 이로부터 암반의 탄성계수와 극한단위주면저항력, f_{max} 사이에는 직선적 비례관계가 있다고 볼 수 있으며, 주면하중전이곡선의 초기기울기, S_i 는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_i = C \cdot \alpha_1 \cdot f_{max} / \sqrt{D} \quad (9)$$

여기서, C 는 무차원의 비례상수이며, α_1 은 곡선보정계수, D 는 말뚝의 직경이다.

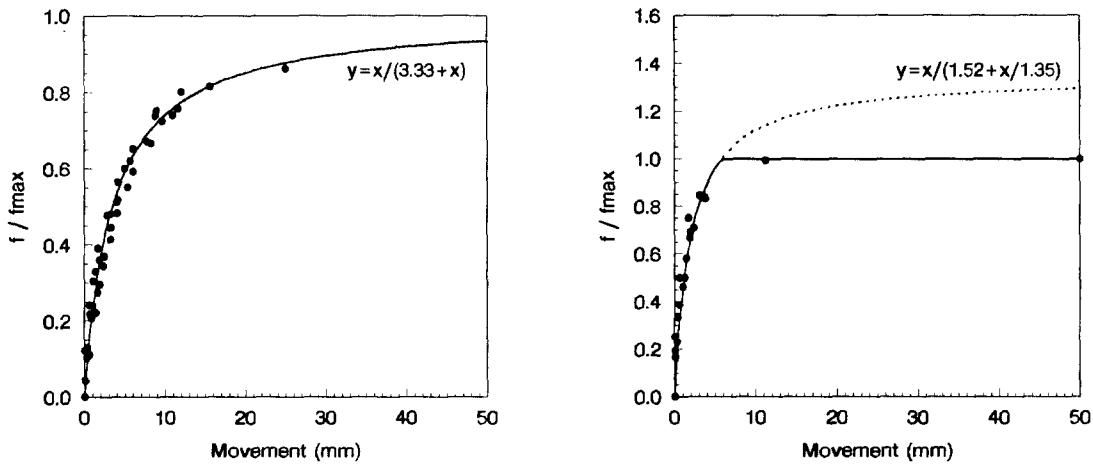
따라서, 경험적 주면하중전이함수의 일반식은 식 (7)과 식 (9)로부터 다음의 식 (10)과 같은 수정쌍곡선 함수식으로 나타낼 수 있으며, f_{max} 의 항으로 정규화한 후 우측항의 분모를 이항하여 정리하면 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$f = w / \left\{ \frac{\sqrt{D}}{C \cdot \alpha_1 \cdot f_{max}} + \frac{w}{\alpha_1 \cdot f_{max}} \right\} \quad (10)$$

$$\frac{w}{f/f_{max}} = \frac{\sqrt{D}}{C \cdot \alpha_1} + \frac{w}{\alpha_1} \quad (11)$$

이 식은 w 와 $w/(f/f_{\max})$ 를 각각 x , y 축으로 하는 변환좌표계 상에서 직선의 형태를 나타내며, 이 직선의 기울기는 $1/\alpha_1$, y 절편은 $\sqrt{D}/(C \cdot \alpha_1)$ 이 된다. 따라서, 인발시험 결과 얻어진 주면저항력, f 와 변위, w 의 값들을 변환좌표계 상에 나타낸 후 직선의 식으로 회귀분석 하면, 얻어진 직선식의 기울기 및 y 절편 값으로부터 C 와 α_1 의 값을 산정할 수 있다.

그림 7은 인발시험 결과 얻어진 주면하중전이곡선을 f_{\max} 의 항으로 정규화하여 회귀분석곡선과 함께 도시한 것이다. 표면이 거친 경우의 하중전이곡선은 말뚝변위의 증가에 따라 f/f_{\max} 의 값이 1.0에 접근해 가는 쌍곡선의 형태를 나타내고 있다. 또한, 표면이 매끄러운 경우의 하중전이곡선은 f/f_{\max} 의 값이 1.0에 도달하기까지는 f/f_{\max} 의 값이 α_1 에 접근해 가는 쌍곡선의 형태를 나타내며, f/f_{\max} 의 값이 1.0에 도달한 후에는 급격한 소성변위가 발생하는 형태를 나타내고 있다.



(a) 말뚝 표면이 거친 경우

(b) 말뚝 표면이 매끄러운 경우

그림 7 정규화된 주면하중전이곡선

회귀분석 결과 얻어진 직선의 식은 각각 식 (12) 및 식 (13)과 같으며, 이로부터 구해진 비례상수, C 와 곡선보정계수, α_1 의 값은 표 2와 같다.

$$\frac{w}{f/f_{\max}} = 3.33 + w \tag{12}$$

$$\frac{w}{f/f_{\max}} = 1.52 + w/1.35 \tag{13}$$

표 2 비례상수와 곡선보정계수의 회귀분석 값

구 분	비례상수, C	곡선보정계수, α_1
말뚝 표면이 거친 경우	3.86	1.0
말뚝 표면이 매끄러운 경우	6.26	1.35

이상과 같이, 화강편마암질 풍화암에 근입된 현장타설말뚝의 주면하중전이함수식은 말뚝 표면의 거칠기에 따라 식 (10) 또는 식 (11)에 표 2의 상수값을 적용하여 결정할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내에 주로 분포하는 화강편마암의 풍화암층에 지지된 소규모 현장타설말뚝에 대한 인발시험을 실시하여 이를 토대로 현장타설말뚝의 경험적 주면하중전이함수를 개발, 제안하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 국내에 주로 분포하는 화강편마암질 풍화암에 근입된 현장타설말뚝의 주면하중전이곡선은 그 형태에 있어서 전형적으로 쌍곡선함수 형태와 탄성-완전소성 형태의 두가지 부류로 나눌 수 있었으며 이와 같은 거동 차이는 말뚝 표면의 거칠기에 기인하는 것으로 판단된다.
- 2) 말뚝의 직경 및 지반조건에 따른 주면하중전이곡선의 변화를 규명하기 위한 매개변수연구 결과, 주면하중전이함수의 초기기울기는 지반의 탄성계수, E_s 와 말뚝 직경, D 의 함수로서 E_s/\sqrt{D} 에 선형적으로 비례함을 알 수 있었다.
- 3) 인발시험 결과 얻어진 주면하중전이곡선에 대한 정규화 및 회귀분석을 통하여, 풍화암에 근입된 현장타설말뚝의 경험적 주면하중전이함수를 단일화된 수정쌍곡선 모델로써 제안하였다.

참 고 문 헌

- 1) Baquelin, F., Frand, R., and Jezequel, J. F.(1982): "Parameters for Friction Piles in Marine Soils" , *2nd International Conference in Numerical Methods for Offshore Piling*, Austin.
- 2) Castelli, F., Maugeri, M., and Motta, E.(1992): "Analisi Non Lineare del Cedimento di un Palo Singolo" , *Rivista Italiana di Geotechnica*, 26(2) , pp. 115-135.
- 3) Deere, D. V. (1968): "Geological Considerations" , *Rock Mechanics in Engineering Practice*, Ed. by K. G. Stagg and O. C. Zienkiewicz, Wiley, New York, pp. 1-20.
- 4) Goodman, R. E. (1980): *Introduction to Rock Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, pp. 317-325.
- 5) Hassan, K. M.(1994): Analysis and Design of Drilled Shafts Socketed into Soft Rock, *PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering*, University of Houston, p. 264
- 6) O'Neill, M. W. and Hassan, K. M.(1994): "Drilled Shafts : Effects of Construction on Performance and Design Criteria", *Proceedings of International Conference on Design and Construction of Deep Foundation*, Vol. 1, Orlando, pp. 137-187.
- 7) Townsend, F. C., Dunkelberger, C. E., and Bloomquist, D.(1993): "Drilled Shaft Friction Evaluation via Pullout Tests", *Geotechnical Special Publication No. 38, Design and Performance of Deep Foundations: Piles and Piers in Soil and Soft Rock*, Ed. by P. P. Nelson, T. D. Smith and E. C. Clukey, ASCE, pp. 64-75.
- 8) Vijayvergiya, V. N.(1977): "Load-Movement Characteristics of Piles" , *4th Annual Symposium of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division of ASCE*, Long Beach.