

## 보강날개로 보강된 수중잠제 지지말뚝의 보강효과 분석

정상삼\* · 홍문현\*\* · 고준영\*\*\*

Jeong, Sangseom\*, Hong, Moonhyun\*\*, Ko, Junyoung\*\*\*

### The Reinforcing Effect of Blade Attached Pile to Support Submerged Breakwater

#### ABSTRACT

The use of pile reinforcement is considered as one of the most promising techniques for improving load carrying capacity of piles in offshore area. In this study, to consider the horizontal and uplift bearing capacity of submerged breakwater bearing pile, exclusive analysis on load-transfer behaviour of pile was conducted. First of all, check the reinforcing effect from the three-dimensional finite element method, and estimate load transfer curve (ground reaction force). Based on these results, the reinforcing effect was quantified by estimating the coefficients of horizontal and uplift reinforcement of reinforced piles. Load transfer function with consideration of the reinforcing effect was proposed from estimated coefficients. A comparison of the analysis using the proposed load transfer function with three-dimensional finite element analysis has resulted that the proposed load transfer function is displaying good accuracy of predicting behavior of the load transfer between the pile and soil reinforcement. Interpretation of the submerged structure by applying a load transfer function considering the reinforcing effect, has shown that the reinforced pile's shear, bending moment and displacement are less than that of non-reinforced piles, while the subgrade reaction modulus arises greater. Thus, it is expected to be relatively cost effective in terms of design.

**Key words** : 3D FEM, Submerged breakwater, Reinforced pile, Load transfer function, Coefficient of reinforcement

#### 초 록

본 연구에서는 보강날개로 보강된 수중잠제 지지말뚝의 보강효과를 분석하기 위하여 하중전이거동을 분석하였다. 먼저 3차원 유한요소해석을 통해 말뚝의 변위 및 하중전이곡선(지반반력) 결과로부터 보강효과를 확인하고, 하중전이곡선에서 극한저항력 비율로 보강말뚝의 수평 및 인발 하중에 대한 보강계수를 산정함으로써 보강효과를 정량화 하였다. 산정된 보강계수를 쌍곡선 하중전이함수의 극한저항력  $p_u$ 와  $t_{max}$ 에 곱해서 보정상수(fitting parameter)로 적용하여 보강효과를 고려한 하중전이함수를 제안하였다. 제안된 하중전이함수가 수치해석 결과를 잘 반영하고 있는지 확인하기 위해 3차원 유한요소해석을 비교하여 보강말뚝의 하중전이거동을 분석하였다. 제안된 하중전이함수를 하중전이법 해석에 적용하여, 실제 수중잠제를 해석한 결과 보강말뚝의 전단력, 휨 모멘트, 변위가 무보강말뚝보다 작게 발생하고, 지반반력은 더 크게 발생하여 비교적 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

**검색어** : 3차원 유한요소해석, 잠제, 보강말뚝, 하중전이함수, 보강계수

\* 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Yonsei University · [soj9081@yonsei.ac.kr](mailto:soj9081@yonsei.ac.kr))

\*\* 정희원 · 교신저자 · 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 (Corresponding Author · Yonsei University · [homh12@naver.com](mailto:homh12@naver.com))

\*\*\* 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (Yonsei University · [jyko1225@hotmail.com](mailto:jyko1225@hotmail.com))

Received April 18, 2015/ revised June 18, 2015/ accepted July 2, 2015

### 1. 서론

최근 기후변화로 인해 해수면이 상승하면서 연안침식이 발생하고 있다. RCP 4.5(8.5) 시나리오에 따르면, 해수면 상승은 21세기 후반기(2071~2100년)에 남해안과 서해안에서 53cm(65cm), 동해안에서 74cm(99cm) 각각 발생할 것으로 전망된다(Korea Meteorological Administration, 2012). 이로 인해 연안침식이 더욱 가속화 될 것으로 예상되어, 이를 방지하기 위해 연안 지역에 다양한 구조물들이 설치되고 있다. 연안침식 방지공법은 크게 연성공법과 경성공법으로 나뉘는데, 대표적인 연성공법으로는 지오투브, 모래그물망, 식재공법, 부방파제, 양빈 등이 있으며, 경성공법으로는 돌제, 이안제, 잠제 등이 있다. 본 연구의 대상 구조물인 수중잠제는 해안으로부터 바다 쪽으로 떨어져 있는, 해안과 거의 수평으로 설치되고 높이가 낮은 방파제이다. 수중 잠제는 Fig. 1과 같이 파력 에너지를 감소시켜 해안 자체의 방어를 용이하게 하고, 또한 파형 경사를 완만하게 하여 파도의 침식성을 완화시켜 연안침식을 방지한다. 하지만, 가파른 해수면 상승으로 파력이 증가되어 수중잠제에 작용하는 수평 및 인발하중의 증가가 예상되므로 수중잠제를 지지하는 말뚝기초의 지지력 상승이 필요하다. 말뚝기초의 지지력을 상승시키기 위한 방법으로는 선행 재하를 통해 지반을 개량하는 방법, 지반을 출토하여 매립토로 대체하는 방법, 토목섬유를 이용하여 지반을 보강하는 방법, 나선형 말뚝(helical pile)을 사용하는 방법 등이 있다(Kempfert et al., 2004; Prasad and Rao, 1996). 최근 국내에서는 말뚝의 지지력 상승을 위해 보강날개(blade)가 부착된 보강말뚝이 고안되었지만(Sim et al., 2011), 보강말뚝의 거동을 분석하기 위한 해석이 수행되지 않아 실제 수중잠제에 적용하기 어려운 실정이다. 본 연구의 대상인 보강말뚝은 Fig. 1과 같이 수중잠제를 지지하고, 상부에 보강날개(blade)가 설치되어 수평 및 인발하중에 저항한다. 본 연구에서는 Plaxis 3D 프로그램을 이용하여 3차원 유한요소해석을 통해 수평 저항력 및 인발 지지력이 보강된 말뚝의 하중전이가동을 분석하여 보강말뚝의 보강효과를 확인하고, 보강말뚝과 무보강말뚝의 하중전이곡선(지반반력)을 산정하여 보강효과를 정량화하였다. 또한 실제 수중잠제에 대한 적용성을 분석하였다.

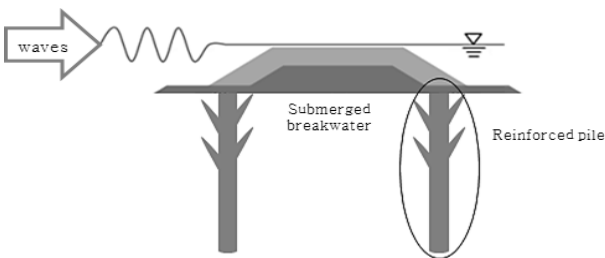


Fig. 1. Concept of Submerged Breakwater and Reinforced Pile

### 2. 이론적 배경

#### 2.1 하중전이함수(지반반력)

말뚝의 해석 방법에는 경험적인 방법(Brinch Hansen, 1961; Broms, 1964), 하중전이법(Matlock, 1970; Reese and Wright, 1977; O'Neill and Gazioglu, 1984; Jeong et al., 2004; Kim et al., 2011), 유한요소법(Brown and Shie, 1991; Jeremic and Yang, 2002) 등이 있다. 하중전이법과 유한요소법이 지반의 비선형성과 연속성을 고려할 수 있기 때문에 말뚝기초 해석기법으로 적절하다고 보고되고 있다(Kim et al., 2013). 본 연구에서는 비교적 간편한 하중전이법에 적용할 수 있도록 하중전이함수를 이용하여 보강효과를 분석하였다. 하중전이법에서는 Fig. 2와 같이 지반을 탄소성 스프링으로 이상화하며, 각 스프링의 응력-변형 거동특성은 하중전이함수(지반반력)에 의해 규정된다(Coyle and Reese, 1966). 말뚝의 하중전이함수에는 수평하중전이함수(p-y curve), 주면하중전이함수(t-z curve), 선단하중전이함수(q-w curve)가 있다. 지반의 응력-변형 거동특성을 규정하기 위하여 지반반력의 비선형적 특성을 쌍곡선 함수로 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다(Kondner, 1963). Goh, The and Wong(1997)은 유한요소해석을 이용하여 수평하중전이함수를 쌍곡선 함수로 나타내었으며, 주면하중전이함수 또한 쌍곡선 함수로 제안되어 말뚝과 지반 사이의 비선형성을 고려하여 제안되었다(Castelli, 1992).

$$f = \frac{w_t}{\frac{1}{k} + \frac{w_t}{f_{max}}} \tag{1}$$

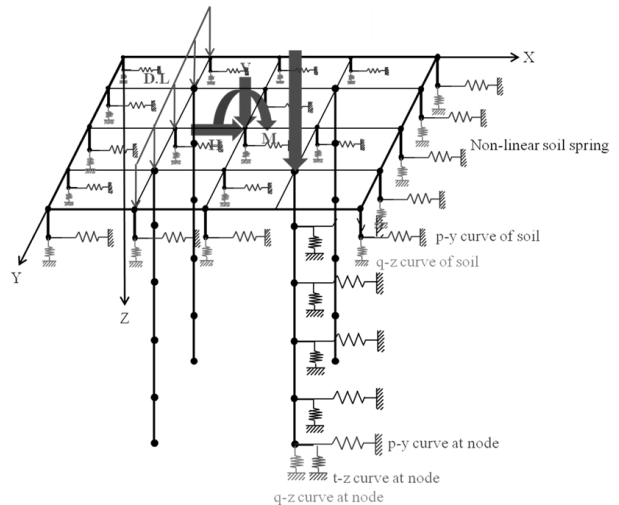


Fig. 2. Concept of Load-Transfer Method (Jeong and Cho, 2014)

여기서,  $f$ 는 지반의 저항력,  $w_t$ 는 말뚝-지반 사이의 상대변위,  $k$ 는 초기기울기,  $f_{max}$ 는 지반의 극한저항력이다.

3차원 유한요소해석 결과를 이용하여, 주변하중전이함수는 말뚝요소와 지반 사이의 마찰력(friction force)의 합과 변위관계로부터 산정할 수 있다. 수평하중이 작용하는 말뚝 주변 지반의 수평방향 응력은 수평하중이 작용하는 방향에 따라 분포가 다르기 때문에 말뚝 주변부 지반 응력을 적분하는 방법으로 수평하중전이함수를 산정하였다(Fan and Long, 2005). 수평하중이 x-방향으로 작용할 때, 말뚝의 단위길이당 수평지반저항력은 말뚝 주변지반에 작용하는 응력의 x-방향 성분들을 통하여 산정할 수 있다(Kim and Jeong, 2011). 입의의 심도에서의 각 발생응력은 다음 Eq. (2)와 같이 구할 수 있다.

$$T_x = \sigma'_{xx} n_x + \sigma'_{xy} n_y + \sigma'_{xz} n_z \quad (2)$$

여기서,  $T_x$ 는 x-방향 응력이고,  $n_x, n_y, n_z$ 는 각 방향의 단위벡터를 나타낸다.

Eq. (2)에서 구한 x-방향 응력 값을 바탕으로, 단위길이 당 수평지반저항력은 말뚝단면의 둘레를 감싸는 절점들을 이은 점근원을 따라 다음 Eq. (3)과 같이 적분하여 산정한다(Kim and Jeong, 2011).

$$p_x = \int_L T_x dL \quad (3)$$

여기서,  $L$ 은 말뚝단면의 둘레를 감싸는 절점들을 이은 점근원의 원주이다.

주어진 깊이에서 위와 같은 방법으로 산정한 값과 동일 심도에서의 수평변위( $y$ )를 바탕으로 심도별 수평하중전이함수를 산정할 수 있다.

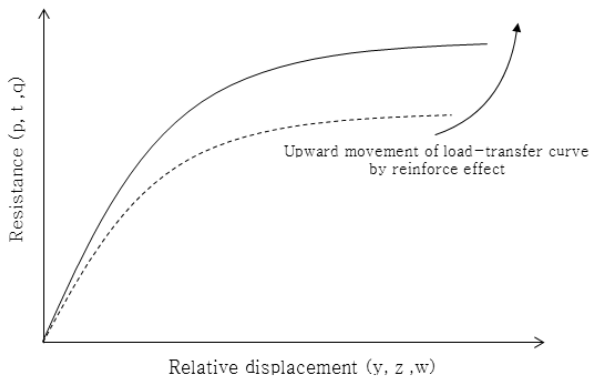


Fig. 3. Reinforce Effect on Load-Transfer Curve

앞서 설명한 바와 같이 하중전이함수는 말뚝과 지반 사이의 상호작용을 고려하여 지반의 응력-변형 거동특성을 정의하며, 본 연구의 대상인 보강말뚝은 보강날개(blade)를 통해 말뚝으로부터 지반으로의 하중전이를 증가시켜 말뚝기초의 지지력을 증가시키도록 고안되었다. Fig. 3은 보강효과로 인하여 지반의 극한저항력이 증가하고, 이에 따라 하중전이함수가 상향으로 이동하는 것을 나타내는 개념도이다. 3차원 유한요소해석을 통해 보강말뚝의 실제 형상과 동일하게 해석한 결과로부터 얻은 하중전이함수를 적용하면, 매 해석시마다 3차원 유한요소해석 수행하지 않고도 보강효과를 고려한 해석이 가능하다.

## 2.2 보강말뚝

본 연구의 대상인 보강말뚝은 보강날개(blade)가 말뚝 관입 시에 말뚝의 외주면에 밀착되도록 접혀지고, 인발 또는 압축 시에는 펼쳐져 말뚝의 지지력을 증가시키도록 결합된 형태로 고안되었다(Sim et al., 2011). 보강날개는 측방으로 펼쳐져 말뚝에 작용하는 인발 저항력이나 연직방향 지지력, 횡방향 지지력을 증가시킬 수 있다. 관입 시에는 고압 워터펌프를 이용하여 관입함으로써 말뚝의 관입과 보강날개를 펼치는 작업이 신속하고 쉽게 이루어질 수 있으며, 보강말뚝의 형상은 Fig. 4와 같다(Sim et al., 2011).

## 3. 3차원 유한요소해석

### 3.1 모델링 및 해석조건

본 연구에서는 보강단수, 지반조건 및 하중조건에 따른 보강말뚝의 거동을 분석하기 위해 3차원 유한요소해석을 이용한 매개변수 연구를 수행하였다. 해석에는 Plaxis 3D 프로그램을 사용하였으며,

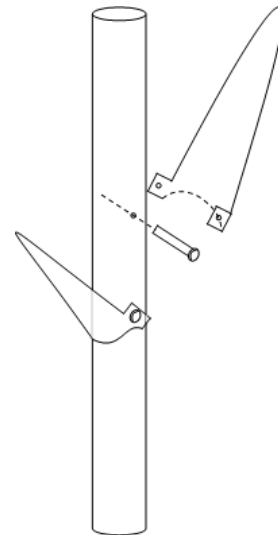


Fig. 4. Shape of Reinforced Pile(Sim et al., 2011)

Table 1. Parameters for Numerical Analysis

Parameters	Category
The number of reinforce	no-reinforced, 2 reinforced, 4 reinforced
Ground condition	loose sand, dense sand
Load condition	lateral load : 0 ~ 200kN (loose sand) 0 ~ 300kN (dense sand) pullout load : 0 ~ 400kN (loose sand) 0 ~ 600kN (dense sand)

Table 2. Range of Soil Properties in Coastal Area

Soil	$\gamma_t$ ( $kN/m^3$ )	$\nu$	$E$ ( $kPa$ )	$\phi$ ( $^\circ$ )	$c$ ( $kPa$ )
Loose sand	16.5 ~ 17.5	0.3	6,000 ~ 20,000	22.0 ~ 33.0	0
Dense sand	20	0.3	50,000 ~ 100,000	35.0 ~ 37.5	0

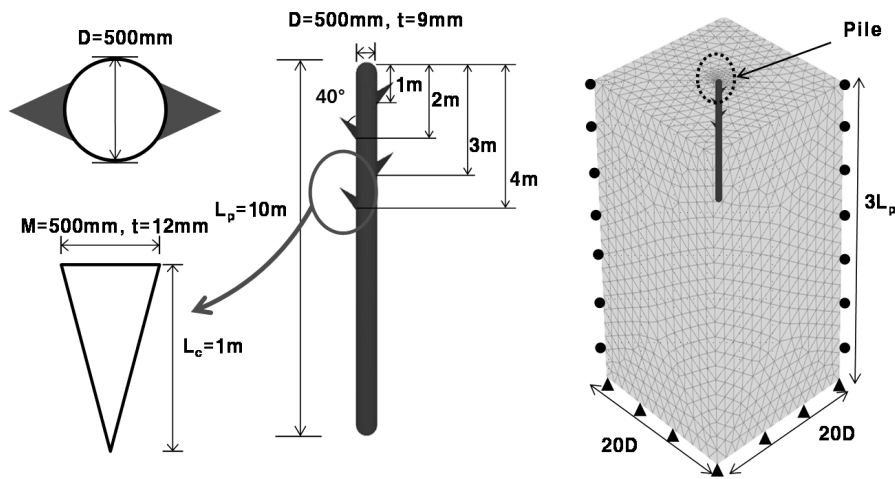


Fig. 5. Reinforced Pile Modeling

Table 1은 본 해석에서 고려한 매개변수와 그 값을 나타낸 것이다. 말뚝기초의 거동은 지반조건에 따라 다소 차이는 있으나, 지표면 이하 5D 이내에서 대부분의 변위가 발생하며, 특히 수평하중이 작용하는 경우 지표면 아래 1~3D 정도 깊이에서 최대 휨모멘트가 발생한다(Kim et al., 2014). 따라서 말뚝 상단에 보강날개를 설치하여 수평 및 인발지지력의 증가가 극대화 될 수 있도록 하였다. 해석대상 지반조건은 연안지역의 단일 사질토층(Loose Sand, Dense sand)으로 가정하고 Mohr Coulomb 모델을 적용하여 해석을 수행하였으며, 지반 물성은 문헌을 참고하여 Table 2와 같이 연안지역 사질토 지반의 물성 범위를 추정된 것을 바탕으로 대표적인 loose sand와 dense sand의 물성을 사용하였다(Kim et al., 2014; Ulker, 2012; Verhaeghe et al., 2014; Bowels, 1996; Das, 2008). 말뚝은 Fig. 5와 같이 직경 500mm, 길이 10m의 강관말뚝으로, 보강날개는 길이 1m, 폭 500mm로 말뚝과 보강날개 모두 선형 탄성(Linear elastic) 모델을 적용하여 모델링 하였다.

말뚝과 지반 사이의 경계면(Interface)에는 PLAXIS에서 제공하는 접촉요소(Contact element)를 사용하여 지반과 말뚝 사이의 미끄러짐(Slip behavior) 및 말뚝의 가력 반대방향에서 발생할 수 있는 인장력에 의한 지반-말뚝 분리현상(Gap behavior)을 모델링하였다. 지반과 접해있는 말뚝 요소의 절점은 Coulomb 마찰이론에 의해 미끄러지게 된다. Coulomb 마찰이론은 경계면 내에서 발생하는 미소변형 상태의 탄성거동과 영구변형상태의 소성거동으로 구분할 수 있다. 탄성거동 상태에서의 경계면 요소는 주변 지반 및 구조 요소와 동일하게 거동하지만, 탄성거동 상태를 넘어서는 변형이 발생하게 되면 소성거동 상태로 전이되어 경계면 요소의 미끄러짐 거동(Slip behavior)이 일어나게 된다. 이는 전단강도 등의 경계면 물성 감소로 구현할 수 있으며, 이러한 경계면 요소의 강도 감소는 말뚝 주변부 특성을 바탕으로 산정된 강도 감소계수( $R_{inter}$ )를 사용하여 다음과 같이 산정한다(Kim et al., 2013).

Table 3. Properties of Soil, Pile, and Blade

Soil	Model	$\gamma_t (kN/m^3)$	$\nu$	$E (kPa)$	$\phi(^{\circ})$	$c(kPa)$
Loose sand	M. C.	17.0	0.3	15,000	25	0
Dense sand	M. C.	20	0.3	80,000	37	0
Pile	Linear elastic	78.5	0.2	210,000,000	-	-
Blade	Linear elastic	78.5	0.2	210,000,000	-	-

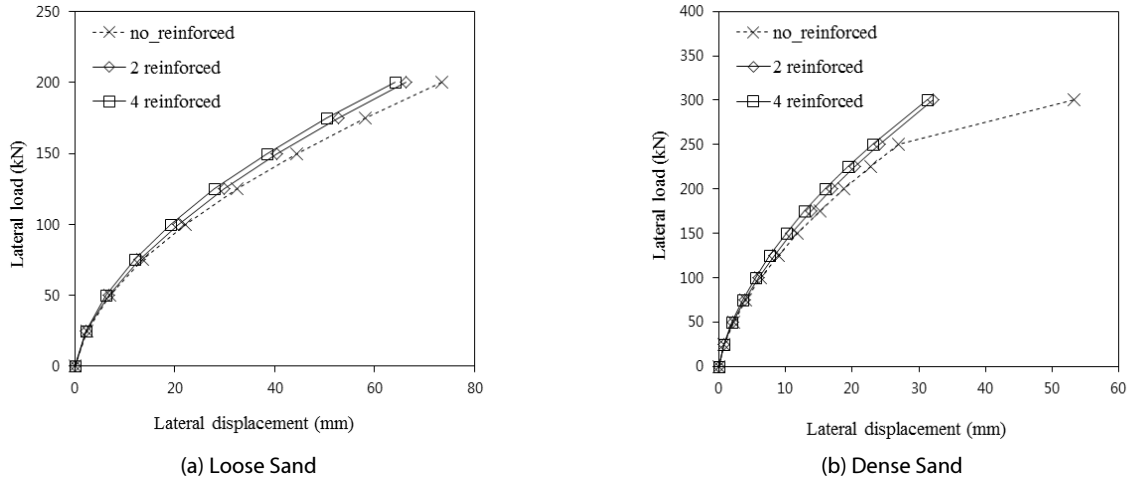


Fig. 6. Lateral Load-Displacement Curves

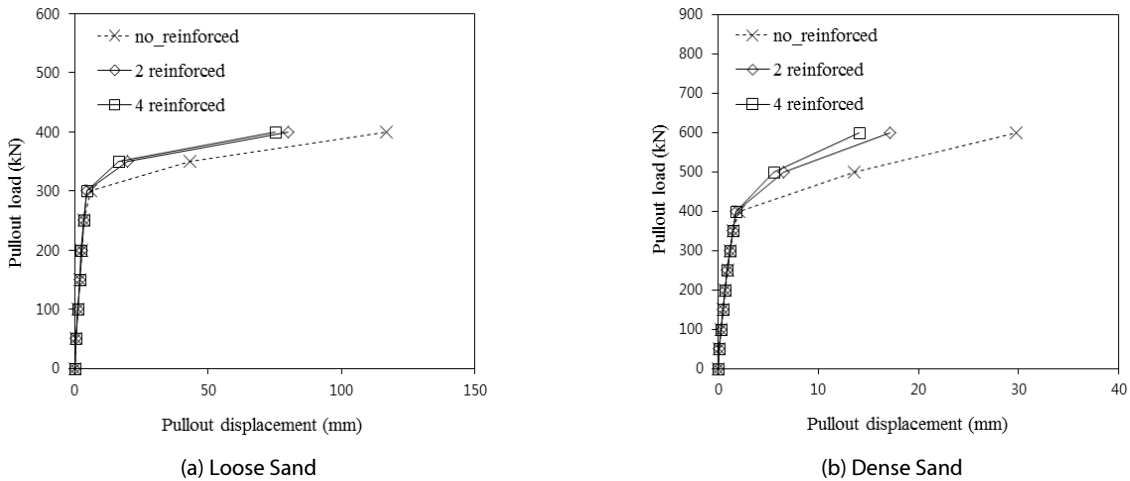


Fig. 7. Pullout Load-Displacement Curves

$$c_{inter} = R_{inter} c_{soil}, \quad \tan \phi_{inter} = R_{inter} \tan \phi_{soil} \quad (4)$$

여기서,  $c_{inter}$ 와  $\phi_{inter}$ 는 경계면의 점착력과 마찰각이고,  $c_{soil}$ 과  $\phi_{soil}$ 은 지반의 점착력과 마찰각이다.  $R_{inter}$ 는 경계면 감소계수(Interface reduction factor)로 완전한 rigid 상태에서는 1.0을, 반대의 경우에는 0을 사용한다. 본 연구에서는 PLAXIS에서 제공하는 일반적인

값(사실도 0.7)을 사용하였다. 매쉬의 전체적인 크기는 경계조건에 의해 말뚝이 영향을 받지 않는 영향거리를 고려하여  $20D \times 20D \times 3L_p$ 의 직육면체 경계를 사용하였다(Jeong et al., 2004). 경계조건은 하단의 경우 변위를 발생시키지 않도록 하였으며, 측면부는 깊이방향으로의 자유도를 부과하였다. 지반물성 및 말뚝과 보강날개의 물성 및 제원은 Table 3과 같다.

### 3.2 해석 결과 및 분석

#### 3.2.1 보강효과

3차원 유한요소 해석 결과 각 조건에 따른 보강효과를 확인할 수 있었으며, 그 결과는 Figs. 6 and 7과 같다. 인발 및 수평하중이 작용할 때 무보강말뚝보다 보강말뚝의 변위가 작게 나타났으며, 2단으로 보강한 경우보다 4단으로 보강한 경우 보강효과가 더 크게 나타난 것을 알 수 있다. 또한, 비교적 조밀한 Dense sand 조건에서 보강효과가 더 크게 나타났다. 이는 말뚝의 거동이 Loose sand 조건에서는 지반의 강도가 약하기 때문에 말뚝 자체의 강성에 영향을 크게 받는 반면, 지반의 강도가 비교적 큰 Dense sand 조건에서는 지반 강도의 영향을 크게 받기 때문인 것으로 판단된다. 보강 단수에 따른 보강효과 차이는 비교적 Dense sand 조건에서 크게 나타났지만, 그 크기는 두 지반조건에서 모두 적은 것으로 나타났다.

#### 3.2.2 하중전이분석을 통한 보강효과 정량화

보강효과를 정량화하기 위해 수평 및 인발하중이 작용하는 경우의 하중전이곡선을 산정하였다. Figs. 8~11은 깊이, 보강단수 및 지반조건에 따른 하중전이곡선 산정결과이다. 이 결과로부터 보강말뚝의 보강효과를 직접적으로 확인할 수 있으며, 보강효과를 정량화하기 위한 지표로 사용되었다. 보강효과는 깊이가 깊어질수록 작게 나타나 수평하중에 대해서는 2m 깊이, 인발하중에 대해서는 3m 깊이 이하에서는 보강효과가 거의 나타나지 않았다. 본 연구에서는 수평 및 인발하중에 대한 지지력 보강효과를 극대화시키기 위해 말뚝 상단을 보강한 경우에 대하여 분석하였기 때문에 이러한 경향이 명확하게 나타난 것으로 판단된다.

앞서 2절에서 설명한 바와 같이 보강효과로 인하여 하중전이곡선이 상승한다. Fig. 12는 산정된 하중전이곡선 결과와 같이 보강효과로 인한 하중전이곡선의 상승이 최대저항력의 증가로 나타나는

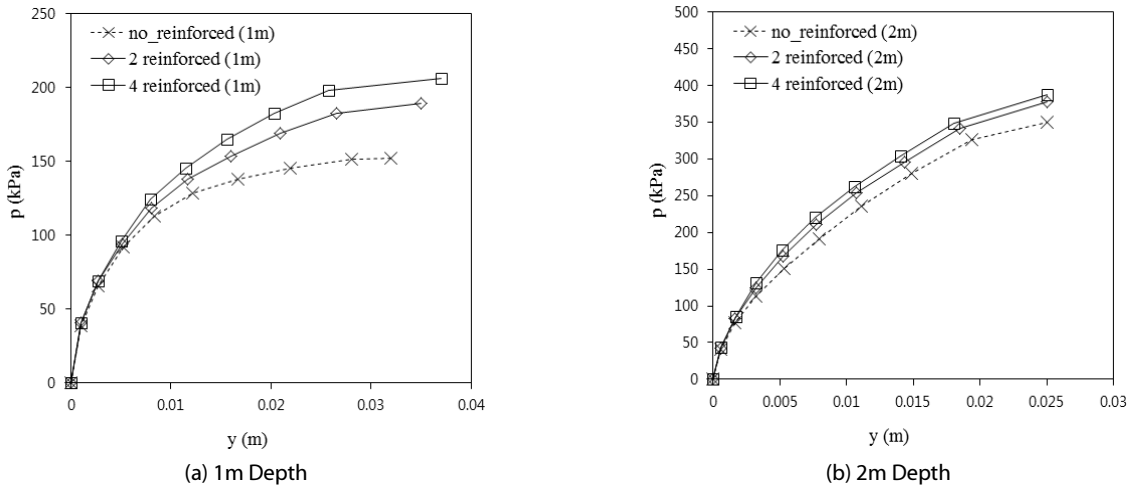


Fig. 8. p-y Curves in Loose Sand

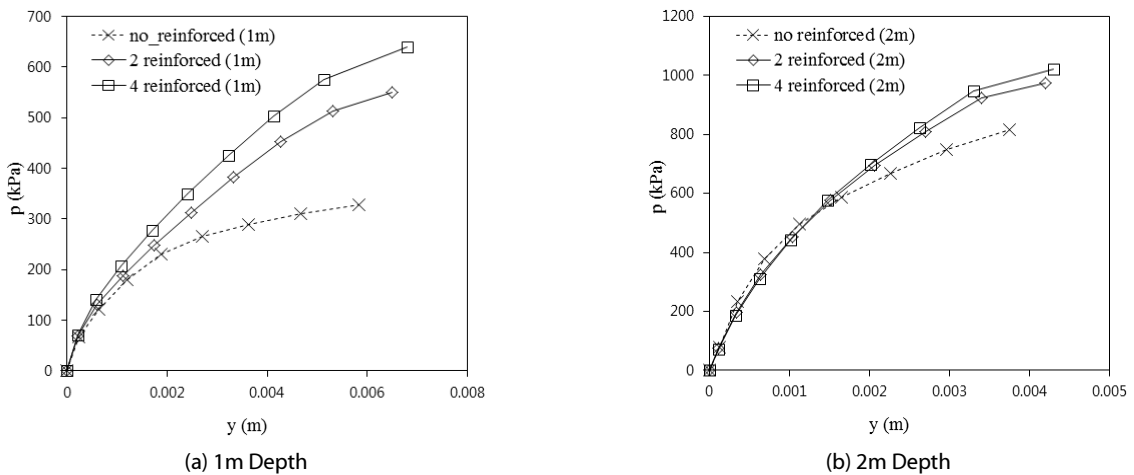


Fig. 9. p-y Curves in Dense Sand

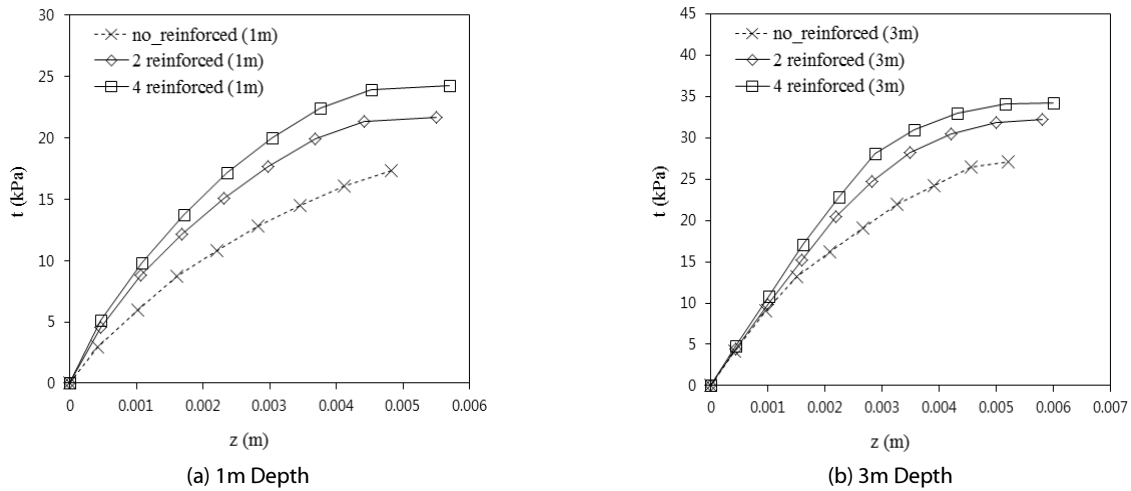


Fig. 10. t-z Curves(Pullout) in Loose Sand

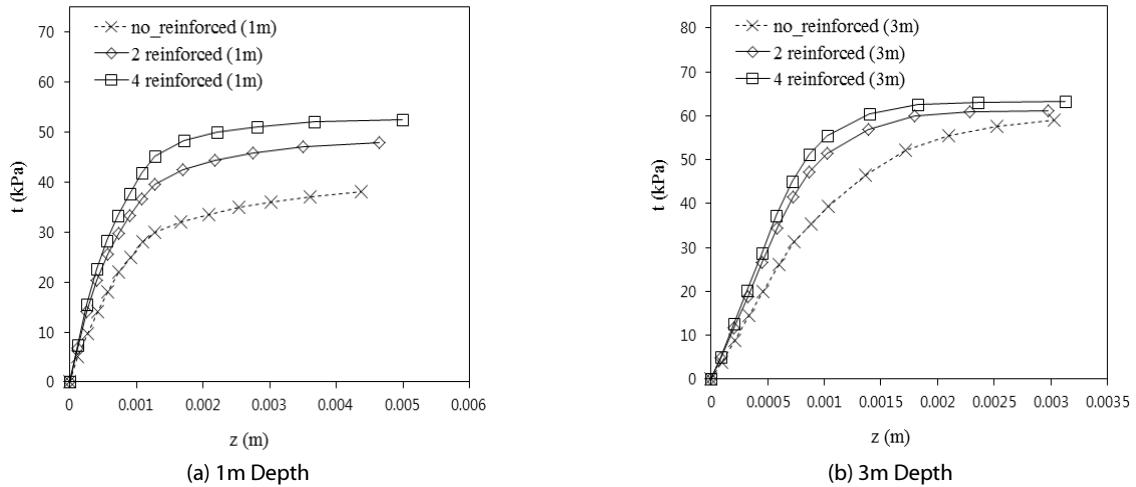


Fig. 11. t-z Curves(Pullout) in Dense Sand

것을 보여주는 개념도이다. Fig. 12와 같이 무보강말뚝, 2단 보강말뚝, 4단 보강말뚝의 최대저항력을 각각  $p_0, p_2, p_4$  혹은  $t_0, t_2, t_4$ 라고 하고, 보강계수를 Eq. (5)와 같이 무보강말뚝과 보강말뚝의 최대저항력 비로 정의하여 보강효과를 정량화 하였다. 이로부터 깊이, 보강단수 및 지반조건에 따른 보강계수를 산정한 결과는 Tables 4 and 5와 같다.

$$C_p = \frac{p_2 \text{ OR } p_4}{p_0}, \quad C_t = \frac{t_2 \text{ OR } t_4}{t_0} \quad (5)$$

여기서,  $C_p$ 는 수평보강계수  $C_t$ 는 인발보강계수이다. 지반의 극한저항력을 기준으로 보면, 수평하중이 작용하는 경우 Loose sand 조건에서 약 45%정도, Dense sand 조건에서 약

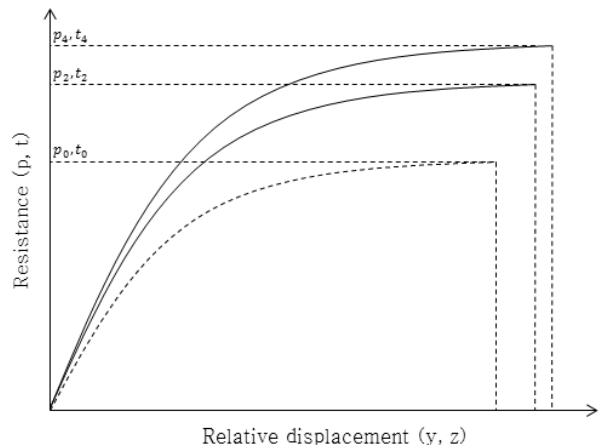


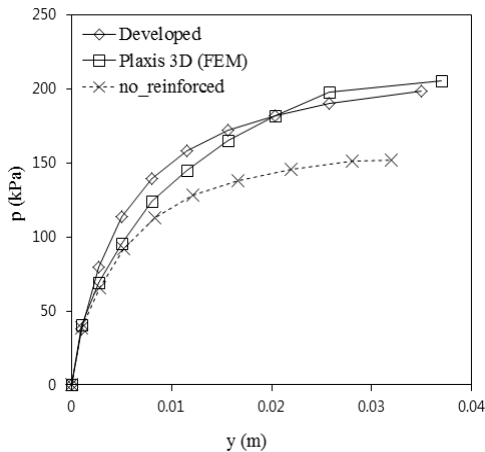
Fig. 12. Concept of Estimating Coefficient of Reinforcement

Table 4. Coefficients of Reinforcement – Loose Sand

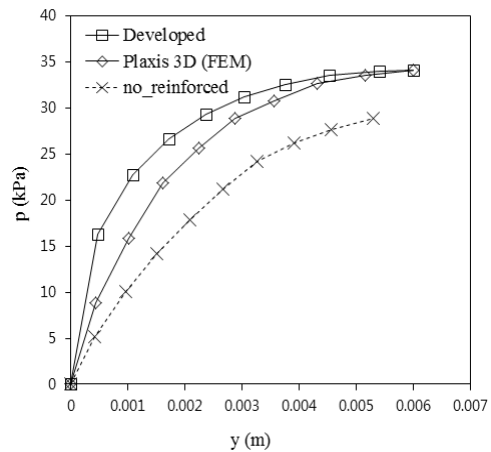
Loose sand	p-y (lateral)		t-z (pullout)	
	Depth	$C_p$	Depth	$C_t$
2 reinforced	1	1.32	1	1.27
	2	1.08	3	1.06
	3	-	5	-
4 reinforced	1	1.41	1	1.34
	2	1.11	3	1.18
	3	-	5	-

Table 5. Coefficients of Reinforcement – Dense Sand

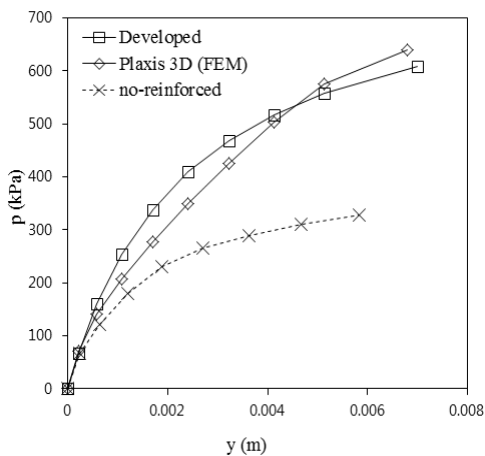
Dense sand	p-y (lateral)		t-z (pullout)	
	Depth	$C_p$	Depth	$C_t$
2 reinforced	1	1.67	1	1.44
	2	1.20	3	1.08
	3	-	5	-
4 reinforced	1	1.95	1	1.53
	2	1.25	3	1.20
	3	-	5	-



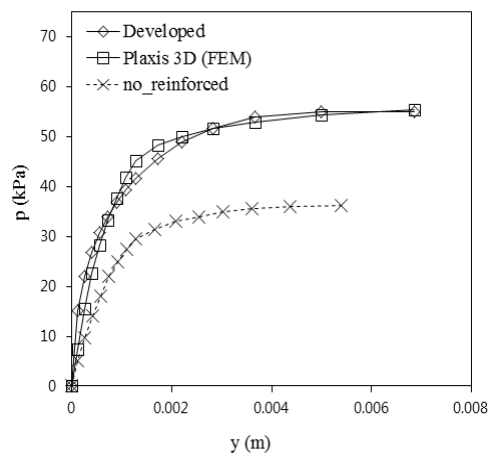
(a) p-y Curve, Loose Sand



(b) t-z Curve, Loose Sand



(c) p-y Curve, Dense Sand



(d) t-z Curve, Dense Sand

Fig. 13. Load-Transfer Curves

100%정도의 보강효과가 나타났으며, 인발하중이 작용하는 경우에는 Loose sand 조건에서 약 40%정도, Dense sand 조건에서 약 60%정도의 보강효과가 나타났다. 또한, 깊이가 깊어질수록 보강효과가 작게 나타났다.

#### 4. 보강효과를 고려한 하중전이함수의 제안 및 분석

본 절에서는 산정된 보강계수를 이용하여 하중전이법으로 보강 말뚝을 해석하기 위한 하중전이함수를 제안하였다. 제안된 하중전이함수와 3차원 유한요소해석으로부터 산정된 하중전이곡선을 비



교하여, 제안된 하중전이함수가 수치해석 결과를 잘 반영하고 있는지를 분석하였다. 또한, 제안된 하중전이함수를 적용하여 해석한 결과와 3차원 유한요소해석 결과를 비교분석하여 보강말뚝의 하중전이거동을 분석하였으며, 제안된 하중전이함수를 적용한 하중전이법의 실제 수중잡제에 대한 적용성을 확인하였다.

#### 4.1 하중전이함수의 제안

앞서 산정된 하중전이곡선은 다양한 형태의 하중전이함수 중 쌍곡선 형상에 가깝다고 판단되고, 이를 분석한 결과, 보강말뚝과 무보강말뚝의 하중전이곡선의 초기기울기는 큰 차이가 없지만 최대저항력에서 차이를 보인다. 따라서 Eqs. (6) and (7)과 같이 쌍곡선 식의 극한저항력  $p_u$ 와  $t_{max}$ 에 보강계수  $C_p$ ,  $C_t$ 를 각각 곱하여 보강말뚝의 하중전이함수를 제안하였다.

$$p = \frac{y_t}{\frac{1}{k} + \frac{y_t}{C_p \cdot p_u}} \quad (6)$$

여기서,  $C_p$ 는 수평보강계수,  $y_t$ 는 말뚝-지반의 상대변위,  $k$ 는 초기 기울기,  $p_u$ 는 극한수평저항력이다.

$$t = \frac{z_t}{\frac{1}{k} + \frac{z_t}{C_t \cdot t_{max}}} \quad (7)$$

여기서,  $C_t$ 는 인발보강계수,  $z_t$ 는 말뚝-지반의 상대변위,  $k$ 는 초기 기울기,  $t_{max}$ 는 극한주면마찰력이다.

위와 같은 쌍곡선 식에서 보강계수는 하중전이함수를 변화시키는 보정상수(Fitting Parameter)로 작용한다. 보정상수가 1.0보다 크면, 하중전이함수의 극한저항력이 증가하여 쌍곡선이 상향으로 이동하게 되며, 이는 앞서 설명한 바와 같이 보강효과로 인한 하중전이함수의 상향이동을 의미한다.

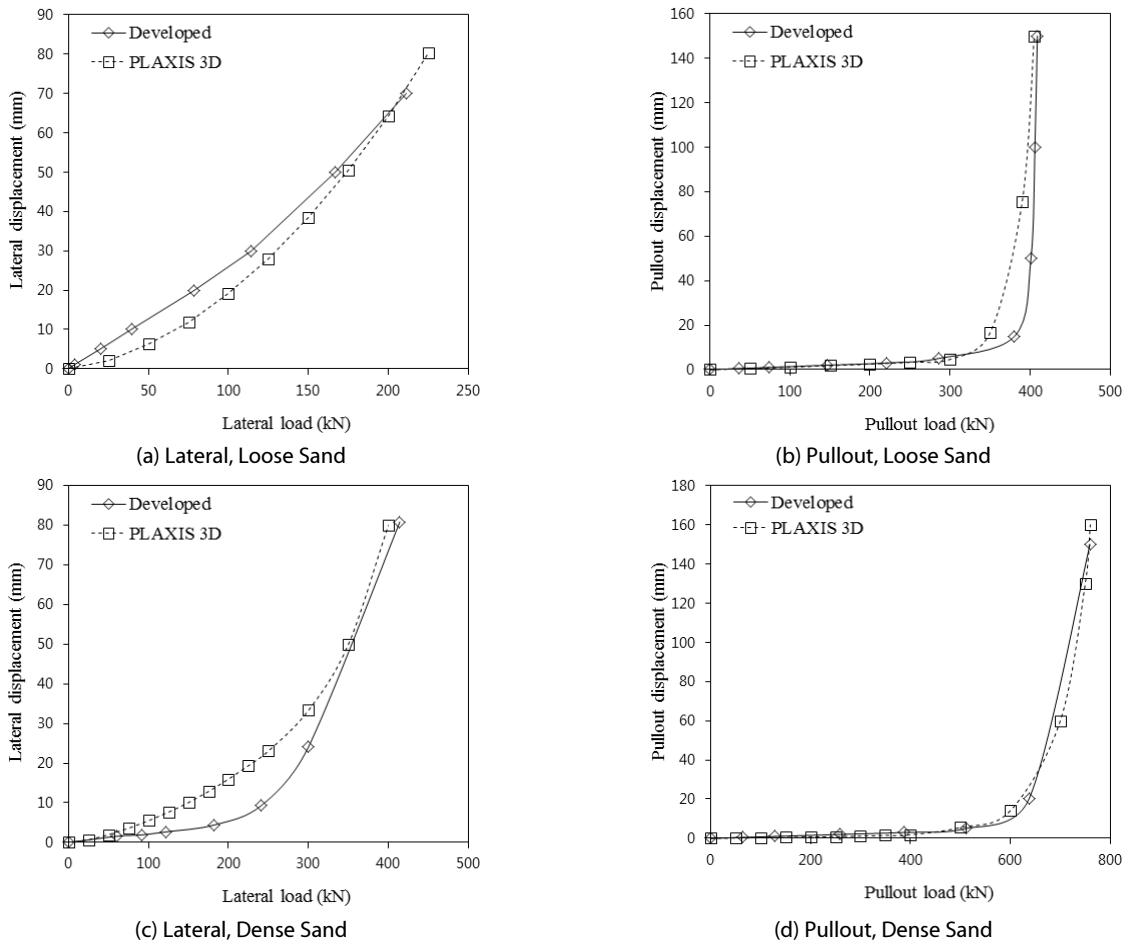


Fig. 14. Load-Displacement Curves

### 4.2 제안된 하중전이함수의 분석

보강계수를 적용하여 제안된 하중전이함수가 수치해석 결과를 잘 반영하였는지 확인하기 위해 3차원 유한요소해석으로부터 산정된 하중전이곡선과 비교분석하였다. Fig. 13은 1m 깊이에서 p-y곡선과 t-z곡선을 비교한 것이며, 최대저항력과 전체적인 경향성 비교했을 때, 제안된 함수와 3차원 유한요소해석 결과가 유사한 것으로 판단된다. 2m, 3m 깊이에서도 제안된 하중전이함수가 수치해석 결과를 잘 반영하는 것으로 확인되었다.

또한, 제안된 하중전이함수를 적용하여 하중전이법으로 해석한 결과와 3차원 유한요소해석으로 보강말뚝을 해석한 결과를 비교분석하였다. Fig. 14는 하중-말뚝두부의 수평 및 인발변위 결과를 비교한 것으로 극한상태에 가까워질수록 유사한 경향을 보인다. 따라서 제안된 하중전이함수를 이용한 해석이 보강말뚝의 거동을 잘 예측하는 것으로 판단된다.

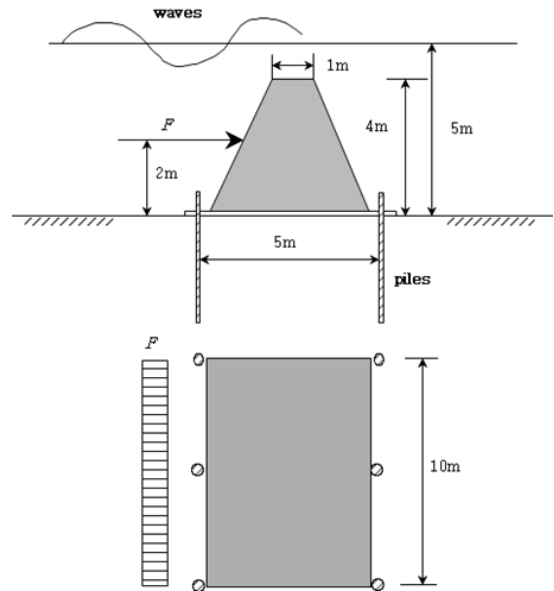


Fig. 15. Schematic Diagram of Submerged Breakwater

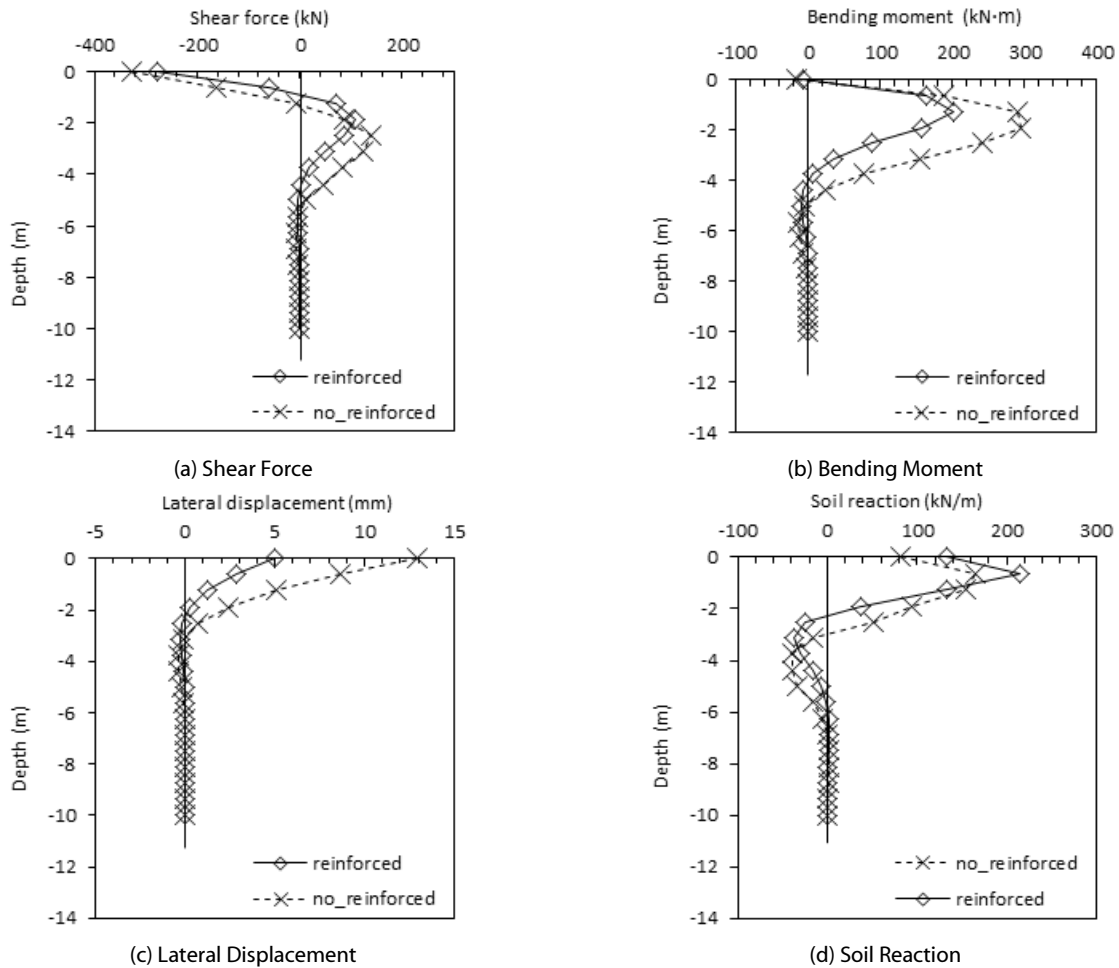


Fig. 16. Results of Applicability Analysis

### 4.3 적응성 분석

앞서 제안된 보강효과를 고려한 하중전이합수를 실제 수증잡제를 해석에 적용할 수 있도록 적응성을 분석하기 위해 Fig. 15와 같이 수증잡제를 모사하여 해석하였다. 지반조건과 말뚝의 제원은 Table 3과 같고, 파력은 Eq. (8)과 같이 쇄파력 공식을 적용하여 말뚝에 수평력이 작용하는 것으로 가정하여 해석하였다(Hiroi, 1920).

$$F = (1.5w_0H)h \quad (8)$$

여기서,  $F$ 는 파력,  $w_0$ 는 구조물의 폭,  $H$ 는 구조물의 높이,  $h$ 는 파고이다.

보강말뚝의 보강효과가 잘 반영되는지 확인하기 위하여 무보강 말뚝과 4단 보강말뚝을 비교하였으며, 말뚝의 전단력, 휨모멘트, 수평변위 및 지반반력 결과는 Figs. 16과 같다. 무보강말뚝에 비해 보강말뚝의 전단력과 휨 모멘트는 비교적 작게 발생하였으며, 말뚝 상부에 집중되는 것으로 나타났다. 이는 보강날개(Blade)가 부착된 말뚝 상단에 응력이 집중된 결과로 판단된다. 지반반력 또한 말뚝 상부에 집중되는 것으로 나타났지만, 보강말뚝의 경우 더 크게 발생하였다. 이는 보강효과로 인해 말뚝에 작용하는 하중이 지반으로 더 잘 전달되기 때문인 것으로 판단된다. 말뚝 두부의 변위는 보강말뚝의 경우 무보강말뚝보다 작게 발생하였다. 이처럼 제안된 하중전이합수를 적용한 해석이 보강효과를 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 수평 및 인발 지지력이 보강된 수증잡제 지지말뚝의 보강효과를 분석하기 위하여 대상 말뚝의 하중전이거동을 분석하였다. 제안된 하중전이합수를 이용하여 보강말뚝을 해석한 결과, 보강효과가 해석에 잘 반영되었음을 알 수 있다. 본 연구에서 제안된 보강효과를 고려한 하중전이합수가 실제 보강말뚝의 거동을 예측하는지 확인하기 위해서는 실내모형실험 또는 현장실험을 통해 검증할 필요가 있다. 본 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수평 및 인발하중이 작용할 때, 보강말뚝의 변위가 무보강말뚝의 변위보다 작게 나타났으며, 2단으로 보강한 경우보다 4단으로 보강한 경우의 보강효과가 더 크게 나타났다. 하지만 보강 단수에 따른 보강효과의 차이는 적은 것으로 나타났다.
- (2) 지반의 극한저항력을 기준으로 보면, 수평하중이 작용하는 경우 Loose Sand 조건에서 약 45%정도, Dense Sand 조건에

서 약 100%정도의 보강효과가 나타났다. 인발하중이 작용하는 경우 보강효과는 수평하중이 작용하는 경우보다 작지만, Loose Sand 조건에서 약 40%정도, Dense Sand 조건에서 약 60%정도의 보강효과가 있음을 알 수 있었다.

- (3) 무보강말뚝에 비해 보강말뚝의 전단력과 휨 모멘트는 비교적 작게 발생하였으며, 말뚝 상부에 집중되는 것으로 나타났다. 이는 보강날개(Blade)가 부착된 말뚝 상단에 응력이 집중된 결과로 판단된다. 지반반력 또한 말뚝 상부에 집중되는 것으로 나타났지만, 보강말뚝의 경우 더 크게 발생하였다. 이는 보강효과로 인해 말뚝에 작용하는 하중이 지반으로 더 잘 전달되기 때문인 것으로 판단된다. 말뚝 두부의 변위는 보강말뚝의 경우 무보강말뚝보다 작게 발생하였다. 이처럼 제안된 하중전이합수를 적용한 해석이 보강효과를 잘 반영하고 있으며, 수증잡제 지지말뚝에 보강말뚝을 적용하면, 잡제가 파손되거나 유실되는 것을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2011-0030040)의 지원과 2014년도 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 “연안침식 대응기술 개발” 연구과제의 연구 결과이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

### References

Braja, M. Das. (2008). Principle of Foundation Engineering, Boston, Massachusetts (in USA).

Brinch Hansen, J. (1961). “The ultimate resistance of rigid pile-sag against transversal forces.” Bulletin No. 12, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, pp. 5-9 (in Denmark).

Broms, B. (1964). “Lateral resistance of piles in cohesive soils.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, ASCE, Vol. 90, No. 4, pp. 27-63.

Brown, D. A. and Shie, C. F. (1991). “Some numerical experiments with a three-dimensional finite element model of laterally loaded piles.” *Computers and Geotechnics*, Vol. 12, pp. 149-162.

Castelli, F., Maugeri, M. and Motta, E. (1992). “Analisi non lineare del cedimento di un Palo Singolo.” *Rivista Italiana di Geotecnica*, Vol. 26, No. 2, pp. 115-135.

Coyle, H. M. and Reese, L. C. (1966). “Load transfer for axially loaded piles in clay.” *Journal Soil Mech. and Found. Div*, ASCE, Vol. 92, No. 2, pp. 1-26.

Goh, A. T., The, C. I. and Wong, K. S. (1997). “Analysis of piles subjected to embankment induced lateral soil movement.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, ASCE, Vol.

- 123, No. 9, pp. 792-801.
- Hiroi, I. (1920). "The force and power of waves." *Engineering*, Aug. pp. 184-185.
- Jeong, S. and Cho, J. (2014). "Proposed nonlinear 3-D analytical method for piled raft foundations." *Computers and Geotechnics*, Vol. 59, No. 6, pp. 112-126.
- Jeong, S. and Seo, D. (2004). "Analysis of tieback walls using proposed p-y curves for coupled soil springs." *Computers and Geotechnics*, Vol. 31, pp. 443-456.
- Jeong, S., Ham, H. and Lee, D. (2004). "Load transfer analysis of drilled shafts reinforced by soil nails." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 20, No. 1, pp. 37-47 (in Korean).
- Jeremic, B. and Yang, Z. (2002). "Numerical analysis of pile behavior under lateral loads in layered elastic-plastic soils." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 26, pp. 1385-1406.
- Joseph, E. B. (1996). *Foundation analysis and Design*, McGraw Hill, New York, N.Y.
- Kempfert, H. G., Göbel, C., Alexiew, D. and Heitz, C. (2004). "German recommendations for reinforced embankments on pile-similar elements." EuroGeo3-Third European Geosynthetics Conference, *Geotechnical Engineering with Geosynthetics*, pp. 279-284.
- Kim, H., Won, M. and Jamin, J. (2014). "Finite-element analysis on the stability of geotextile tube-reinforced embankments under scouring." *Int. Journal Geomech*, 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622. 0 000420, 06014019.
- Kim, J., Hwang, T. and Jeong, S. (2011). "Simplified analysis of pile bent structures and minimum reinforcement ratio." *Journal of Korean Geotechnical Society*, Korean Geotechnical Society, Vol. 27, No. 5, pp. 33-43.
- Kim, J., Jeong, S. and Ahn, S. (2013). "Proposed optimized column-pile diameter ratio with varying cross-section for bent pile structures." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 33, No. 5, pp. 1935-1946 (in Korean).
- Kim, J., Jeong, S. and Kim, J. J. (2014). "Analysis of steel reinforcement ratio for bent pile structures considering column-pile interaction." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 5, pp. 181-188 (in Korean).
- Kim, Y. and Jeong, S. (2011). "Analysis of soil resistance on laterally loaded piles based on 3D soil-pile interaction." *Computers and Geotechnics*, Vol. 38, No. 2, pp. 248-257.
- Korea Meteorological Administration (2012). *The Korea Climate Change Outlook Report* (in Korean).
- Matlock, H. (1970). "Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay." *The second annual offshore technology conference*, Houston, TX, pp. 577-607.
- O'Neill, M. W. and Gazioglu, S. M. (1984). "Evaluation of p-y relationships in cohesive soils." *Proceedings of a Analysis and Design of Pile Foundations*, ASCE Geotechnical Engineering Division, pp. 192-213.
- Prasad, Y. V. and Rao, S. N. (1996). "Lateral capacity of helical piles in clays." *Journal of geotechnical engineering*, Vol. 122, No. 11, pp. 938-941.
- Reese, L. C. and Wright, W. (1977). *Drilled shaft manual*, U. S. Department of Transportation.
- Sim, J., Kim, S., Jeon, I., Park, G. and Kim, J. (2011). "Construction and the device an increase in the pile bearing." Patent registration number 10-1091585 (in Korean).
- Ulker, M. (2012). "Pore Pressure, Stress Distributions, and Instantaneous Liquefaction of Two-Layer Soil under Waves." *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, Vol. 138, No. 6, pp. 435-450.
- Verhaeghe, H., De Vos, L., Boone, E. and Goemaere, J. (2014). "Using field data to improve the settlement prediction model of a breakwater on soft soil." *Journal Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, Vol. 140, No. 2, pp. 173-187.