

단자유도 매크로요소를 이용한 깊은기초의 상호작용 모델

S.D.O.F Macro-element for Interaction of Deep Foundation

나 창순†

Rha, Chang-Soon

(논문접수일 : 2008년 3월 6일 ; 심사종료일 : 2008년 5월 28일)

요 지

본 연구에서는 수평하중을 받는 깊은 기초에서 나타나는 지반과 기초의 상호작용을 분석할 목적으로 전통적인 소성이론을 응용하여 개발한 단자유도의 매크로요소 모델을 제시하였다. 제시한 매크로요소 모델은 지반에 매립된 깊은 기초가 수평하중을 받을 때 지반과 기초사이에 발생하는 응력의 제 성분을 각각 모델링하고 합성함으로써 구성하였는데, 이는 기초와 지반의 상호작용을 단순 스프링으로 모델링하는 기존의 방법에 비해 상호작용에 관련된 응력을 성분별로 분리하여 재공하는 장점이 있다. 본 연구에서는 상호작용과 관련한 응력의 제 요소를 마찰력과 축압저항으로 크게 분류하고 각 요소를 소성이론을 이용하여 모델링하였으며, 최종적으로 이들을 병렬로 조합하는 방식으로 매크로요소를 구성하였다. 제시한 매크로요소를 이용하여 점성토에 매립된 깊은 기초가 수평하중을 받는 경우를 해석한 결과 기초의 전체적인 거동과 더불어 상호작용 매크로요소를 구성하는 각 요소들로부터 상호작용 응력의 제 요소들을 분석해 냄으로써 기존 모델에 비해 개선된 결과를 얻을 수 있었다.

핵심용어 : 상호작용, 매크로요소, 마찰저항요소, 간극요소, 탄소성요소

Abstract

In this paper single degree of freedom macro-element model was presented to investigate the interaction between soil and the deep foundation under the lateral loads. It was made by modelling each component related to the soil-structure interaction and combining them into one piece. It enhanced the conventional method that was not able to break down the interaction components in piece due to the usage of simple spring element for interaction. A proposed macro-element classified the stress components in relation to the interaction into frictional and compressive resistance. Each component was modelled using the classical plasticity theory, and finally combined in parallel. An example study was carried out using the proposed macro-element for deep foundation embedded in three layered cohesive soil. It showed improved results compared to the conventional method by producing additional information of the interaction components as well as the overall behavior of foundation.

Keywords : *interaction, macro-element, frictional element, gap element, elastoplastic element*

1. 서 론

상호작용(interaction)은 이질적인 두 구조체가 거동하는데 있어 둘 사이에 힘이 작용하여 서로의 원인과 결과가 되는 현상을 말한다. 오늘날 대부분의 고층건물과 도로교 등의 기초구조로 말뚝기초가 사용하는데, 말뚝기초와 같은 깊은 기초는 지반에 매립되어 지반과 상호작용을 하는 대표적인 구조물로 볼 수 있다. 지반에 매립된 말뚝이 지진과 같은 수평하중을 받는 경우, 그 거동은 자연히 구조물을 둘러싼 주

변 지반의 영향을 받으며 지반도 역시 말뚝의 거동에 영향을 받게된다. 일반적으로 흙의 응력-변형 거동이 비선형으로 이루어지므로 매립된 말뚝기초의 거동도 역시 비선형 거동을 하게 된다. 수평하중을 받는 말뚝기초와 지반사이의 상호작용에 의한 거동분석은 유한요소법과 함께 Winkler의 탄성기초이론에서 발전한 형태의 p-y 해석법이 이용된다. 유한요소법은 지반과 말뚝을 2차원 또는 3차원의 유한요소로 모델링하여 해석하는 방법으로서 근래에는 동하중해석으로 그 영역을 확장하고 있다(김문겸 등, 2000; Yang 등, 2002; 서춘

† 책임저자, 정회원 · 국민대학교 건축대학 전임강사
Tel: 02-910-4592 ; Fax: 02-942-3110
E-mail: csrha@kookmin.ac.kr

• 이 논문에 대한 토론을 2008년 10월 31일까지 본 학회에 보내주 시면 2008년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

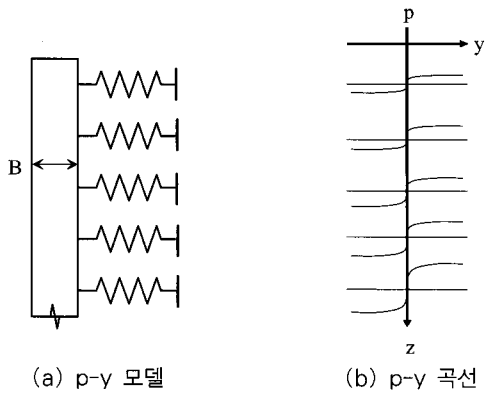


그림 1 수평하중에 대한 말뚝기초 모델

교 등, 2007). 한편 p-y해석법(McClelland 등, 1958)은 그림 1과 같이 지반을 선형 또는 비선형의 하중 변위 특성을 갖는 일련의 탄소성 스프링(p-y스프링)으로 모델링하는 전통적인 방법으로서 상대적으로 간편한 해석법이라고 할 수 있으며, 다양한 해석 기법들이 연구되고 있다(김수일 등, 1995; 장범수 등, 2001). 그림 1(a)는 직경이 B인 말뚝과 이를 둘러싼 지반을 p-y스프링으로 모델링한 것이며, 그림 1(b)는 각 p-y스프링의 재료특성을 나타내는 p-y곡선을 보여준다. 여기서 p는 지반의 단위길이당 저항내력을 나타내며 y는 각 수직위치에서 말뚝의 수평변위를 나타내며 z는 지표에서의 깊이를 나타낸다. 대표적인 말뚝기초 설계용 p-y곡선으로는 1970년대 이루어진 실험들을 근거로 해서 미국석유학회(API)가 제시한 p-y곡선이 있으며(API, 1993), 이외에도 여러 연구에 의해 제안된 다양한 형태의 p-y곡선들이 사용되고 있다(김영수 등, 1997).

한편 기존의 p-y해석법은 말뚝의 전체적인 거동을 해석하는 데는 어려움이 없는 반면 말뚝과 지반의 복잡한 상호작용을 단순한 탄소성스프링으로 나타내기 때문에 말뚝과 지반 사이의 응력의 제 성분을 분석하는 데는 한계가 있다. 이와 같은 기존 해석법의 단점을 개선하고자 말뚝과 지반의 상호작용을 몇 개의 성분으로 분류하고 각 성분을 직렬 또는 병렬 등의 다양한 형태로 조합하여 하나의 매크로요소로 모델링하는 개선된 형태의 p-y요소를 사용하는 해석법이 한편으로 연구되고 있다(Nogami 등, 1992; Wang 등, 1998; Boulanger 등, 1999; Taciroglu 등, 2006). 개선된 형태의 매크로 p-y요소를 구성하는 각 요소들은 말뚝과 지반 사이에 작용하는 응력의 제 성분들로서 각 요소에 작용하는 응력의 해석을 통해 말뚝과 지반사이에 작용하는 응력성분들을 별도로 산출할 수 있는 장점이 있다. 동하중하에서의 상호작용 매크로요소에는 지반의 방사감쇠(radiation damping)를 고려하기 위한 dashpot를 구성요소에 직렬 또는 병렬로 결합하는 형식을 사용하기도 한

다. 본 연구에서는 수평하중이 정적으로 가해지는 말뚝기초에 대해 기초와 지반의 상호작용을 크게 말뚝표면의 마찰력 성분과 말뚝 가압면에 대한 지반의 압축저항 성분으로 분류하고 각 성분을 모델링한 요소들을 병렬형식으로 합성하는 방식의 상호작용 매크로요소(interaction macro-element)를 제안하였다. 상호작용 매크로요소의 각 구성요소들은 수평방향에 대한 자유도만을 갖도록 하였으며, 따라서 이들이 복합된 상호작용 매크로요소도 수평방향에 대한 자유도만을 가지는 단자유도 요소로 구성되었다. 제안한 상호작용 매크로요소는 그림 1에 나타난 기존 지반모델에서 사용하는 스프링을 대체하며 스프링과 같이 말뚝에 일정간격으로 연결되어 말뚝의 수평이동에 대한 지점역할을 하게 된다. 본 연구에서는 제안된 상호작용 매크로요소를 이용한 예제의 해석을 통해서 말뚝의 전체적인 수평거동에 대한 정보와 더불어 상호작용 매크로요소가 부착된 말뚝의 각 위치에서 지반과 말뚝에 작용하는 응력성분을 산출하였다.

2. 상호작용 매크로요소(Interaction Macro-element)

2.1 상호작용 매크로요소의 구성

말뚝과 지반의 상호작용을 표현하는 상호작용 매크로요소는 그림 2(a)에 나타난 바와 같으며 크게 마찰저항요소(그림 2(b))와 축압저항요소(그림 2(c))로 구성된다. 마찰저항요소는 지반에 의해 말뚝표면에 작용하는 마찰내력을 나타내는 반면 축압저항요소는 말뚝에 수평하중이 가해질 때 말뚝의 전면부, 즉 말뚝의 가압면에 작용하는 지반의 압축내력을 나타낸다. 마찰저항요소는 재하 초기 말뚝의 저항내력에 영향을 주며 일정 내력에 도달할 때까지 말뚝을 고정하다가 항복내력을 초과하면 완전소성(perfectly plastic)으로 거동하는 것으로 가정하여 강소성(rigid plastic)요소로서 구성하였다(그림 2(b)). 축압저항요소는 일반적인 흙의 압축특성에 맞춰 탄소성(elastoplastic) 거동을 하는 것으로 가정하였으며 인장에 대한 저항능력은 무시하였다. 따라서 축압저항요소는 압축력이 가해지는 경우 이를 저항하는 탄소성요소와 인장력이 작용하는 경우 하중의 전달을 차단하는 간극요소(gap element)가 직렬로 조합된 구성이 된다. 한편 주기하중과 같이 반복되는 수평하중에 대한 말뚝의 거동은 하중방향에 좌우될 뿐 그 특성은 동일하므로 반복 수평하중에 대한 말뚝의 거동과 지반의 응력은 상호작용 매크로요소를 말뚝의 전면부와 후면부에 동시에 배치하여 얻을 수 있다. 다만 이 경우 해석모델의 절점 및 부재의 개수가 많아지게 되고 따라서 강성행렬의 차수가 증대하게 되므로 계산의 효율성 측면에서

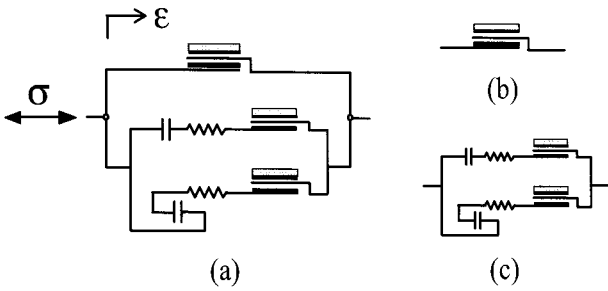


그림 2 상호작용 매크로요소와 구성요소: (a)매크로요소의 구성, (b)마찰저항요소, (c)축압저항요소

불리한 면이 있다. 따라서 계산의 효율성 제고를 위해 축압 저항요소를 간극요소의 배치를 달리하여 압축과 인장을 각각 저항할 수 있도록 두 종류의 형태로 개발하여 병렬로 조합하였다(그림 2(c)). 즉, 그림 2(a)에서 왼쪽에서 오른쪽으로 가해지는 정가력의 하중에 대해서 말뚝 우측의 압축내력을 나타내는 요소와 방향이 반전된 부가력의 하중에 대해 말뚝 좌측의 압축내력을 나타내는 요소를 병렬로 조합함으로써 방향이 반전되는 반복 수평 하중에 대해 말뚝 양쪽의 압축저항 능력을 동시에 나타내도록 구성하였다. 상호작용 매크로요소에 작용하는 힘(σ)은 수평방향의 일방향이며 이에 따른 요소의 변위(ϵ)도 하중방향과 동일하다.

2.2 상호작용 매크로요소의 거동

2.2.1 마찰저항요소의 거동

마찰저항요소는 말뚝의 표면에 작용하는 지반의 마찰력을 고려하기 위한 요소이다. 이 요소는 마찰응력이 마찰내력을 초과하기 전까지는 변위가 발생하지 않다가 일단 마찰내력을 초과하는 응력이 작용하면 이론적으로 무한한 변위가 발생하는 강소성 요소로 가정하였다. 그림 3은 매크로요소 중 그림 2(b)에 나타난 마찰저항요소의 거동을 나타낸 그림이다. 강소성의 마찰저항요소는 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 쿨롱 마찰요소(CFD, Coulomb friction device)로 표현할 수 있으며(Simo 등, 1998) 수평방향의 응력에 대해 응력방향으로 움직이는 단자유도(SDOF, single degree of freedom) 요소로 가정되었다. 마찰저항요소의 거동특성을 나타낸 그림 3(b)에서 1사분면은 마찰저항요소의 압축특성을 나타내며 3사분면은 인장특성을 나타낸다. 이때의 응력 σ_f 는 마찰내력 σ_y 를 매개변수로 하여 소성이론의 1차원 완전소성 요소의 특성방정식을 통해 정의할 수 있다. 즉,

$$\sigma_f = \sigma_y \cdot \text{sign}(\dot{\epsilon}) \quad (1)$$

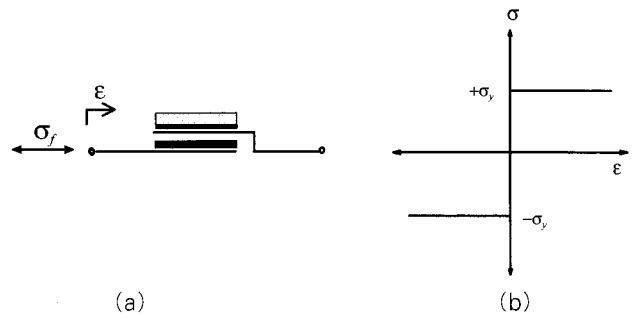


그림 3 마찰저항요소: (a)마찰저항요소의 구성, (b)마찰저항요소의 거동특성

여기서 우변의 $\dot{\epsilon}$ 는 변형도율(strain rate)이며, signum 함수는 아래의 식 (2)와 같이 정의하여 변형도율에 따른 응력의 부호를 결정한다.

$$\text{sign}(\dot{\epsilon}) = \begin{cases} +1 & \text{if } \dot{\epsilon} > 0 \\ 0 & \text{if } \dot{\epsilon} = 0 \\ -1 & \text{if } \dot{\epsilon} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

마찰저항요소의 메커니즘이 1차원 완전소성요소와 동일하므로 요소의 항복을 나타내는 항복함수(yield function) f 는

$$f = |\sigma_f| - \sigma_y \leq 0 \quad (3)$$

로 정의한다. 이때 항복함수 f 의 값은 작용응력이 마찰내력을 초과할 수 없으므로 항상 0이하의 값을 가지며, 항복 상태에서는 0의 값을 가진다. 한편, 완전소성요소의 항복상태에서 일관성조건(consistency condition) 및 지속조건(persistency condition)은 각각

$$|\dot{\epsilon}| \cdot f = 0 \quad (4a)$$

$$|\dot{\epsilon}| \cdot \dot{f} = 0 \text{ if } f = 0 \quad (4b)$$

로 표현된다. 마찰저항요소에 대한 이들 지배방정식은 return mapping 알고리즘을 이용한 수치해석에 의해 해석할 수 있다.

2.2.2 축압저항요소의 거동

축압저항요소는 말뚝이 거동할 때 말뚝 전면부에 작용하는 지반의 압축내력을 나타내는 요소이다. 그림 1(c)에서 설명한 바와 같이 축압저항요소는 하중의 방향에 따라 각기 저항하는 두 요소 즉, 정가력저항요소와 부가력저항요소로 구성된다. 정가력저항요소는 정가력의 하중에 대한 말뚝의 전면부에 작용하는 지반의 저항을 나타내며, 부가력저항요소는

방향이 반전된 부가력의 하중에 대한 말뚝의 후면부에 작용하는 지반의 저항을 각각 표현한다. 두 요소는 감당하는 하중의 방향이 다를 뿐 그 기능은 동일하며, 마찰저항요소와 마찬가지로 응력방향으로 움직이는 단자유도 요소이다. 정가력 저항요소 및 부가력저항요소는 말뚝면에 대한 지반의 저항을 의미하므로 이 요소들의 하중-변위 특성은 인장력과 압축력에 대한 흙의 하중-변위 특성에 의해 결정된다. 일반적인 수평하중을 받는 말뚝기초에 대해 흙의 압축내력은 제안된 여러 p-y곡선(김영수 등, 1997)에서 볼 수 있듯이 비선형 거동을 보이는 한편 인장에 대한 저항능력은 무시할 수 있다. 따라서 정가력저항요소와 부가력저항요소는 지반의 압축 특성을 나타내는 탄소성요소와 인장 특성을 나타내는 간극요소가 결합된 형태의 조합요소로 구성하였다. 탄소성요소는 탄성부분을 나타내는 스프링과 소성부분을 나타내는 쿠울롱 마찰요소(CFD)를 직렬로 연결하여 탄성부분은 선형거동을 하고 소성부분에서는 비선형거동을 하도록 설계하였다. 여기서는 축압저항요소를 형성하는데, 가장 근본이 되는 기본요소인 탄소성요소와 간극요소를 기능과 메커니즘을 먼저 서술하고 이들 기본요소가 1차적으로 조합된 형태인 정가력저항요소와 부가력저항요소, 그리고 이들 1차 조합요소가 다시 결합된 형태의 2차 조합요소에 해당하는 축압저항요소의 메커니즘에 대해 서술하기로 한다.

탄소성요소의 메커니즘

탄소성요소는 그림 4(a)와 같이 탄성계수가 E인 선형 스프링요소와 항복응력 σ_Y 를 상수로 갖는 쿠울롱 마찰요소(CFD)가 직렬로 연결된 형태이며 요소의 거동은 그림 4(b)에 나타난 바와 같이 탄성구간과 소성구간을 갖는다. CFD는 항복응력 σ_Y 가 작용하여야 변형이 발생하며 그전에 발생하는 모든 변형은 스프링에만 발생된다. 따라서 탄소성요소의 전체변형 ϵ 는 탄성스프링의 탄성 변형과 CFD의 소성 변형의 합으로 산출할 수 있다. 즉,

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p \tag{5}$$

여기서 ϵ^e , ϵ^p 는 각각 탄소성요소의 탄성 및 소성 변형을 나타낸다. 스프링과 CFD가 직렬로 연결되어 있으므로 이 요소에 작용하는 탄성 응력-변형도 관계식은

$$\sigma_{ep} = E \cdot \epsilon^e = E \cdot (\epsilon - \epsilon^p) \tag{6}$$

로 정의할 수 있다. 또한 마찰요소 CFD에 대한 항복함수 f 는

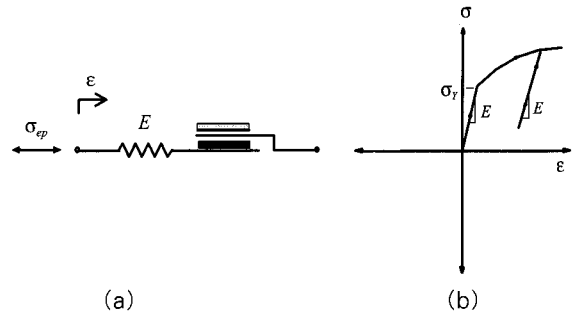


그림 4 탄소성요소: (a)탄소성요소의 구성, (b)탄소성요소의 거동특성

$$f(\sigma, a) = |\sigma_{ep}| - (\sigma_Y + a) \leq 0 \tag{7}$$

로 정의되는데 여기서 a 는 경화변수(hardening variable)로서 항상 양의 값을 가진다. 앞서의 마찰저항요소는 식 (7)에서 경화변수값이 0인 상태, 즉 항복응력 도달이후에 경화가 발생하지 않는 완전소성의 경우에 해당한다. 한편 항복응력 σ_Y 에 도달하기 전과 후, 즉 탄성상태와 소성상태에서의 응력과 경화변수 (σ, a) 의 전개방정식은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\dot{\sigma}, \dot{a}) = \begin{cases} (E \dot{\epsilon}, 0) & \text{if } f(\sigma, a) < 0 \\ (K(\epsilon) \dot{\epsilon}, |\dot{\sigma}|) & \text{if } f(\sigma, a) = 0 \end{cases} \tag{8}$$

여기서 E와 K(ε)는 탄성과 소성상태에서의 탄성계수를 나타내는데 특히 소성상태에서는 그림 4와 같은 비선형거동을 하므로 변형도의 함수로 나타냈다. 탄소성요소에서는 탄성상태에서의 하중을 스프링이 감당하므로 하중을 제거하면 변형은 원래의 위치로 회복되지만 항복응력 σ_Y 를 넘어선 이후의 소성거동에서 하중이 제거되면 탄성계수 E의 기울기로 제하(unloading)되고 소성변형이 발생한다.

그림 4(b)에 나타난 하중-변위 곡선은 탄소성요소가 압축 응력을 받는 경우를 나타내며 인장응력을 받는 경우는 원점에 대해 대칭으로 나타나게 된다.

간극요소의 메커니즘

간극요소는 연결된 임의의 요소에 특정 하중만을 전달하는 역할을 한다. 그림 5(a)에 나타난 조합요소는 스프링 요소와 간극요소가 결합된 형태를 보여주는데 스프링 요소에 작용하는 하중 σ 는 간극요소를 통해 $p(\sigma)$ 로 치환되어 전달된다. 간극요소의 기능은 투영연산자(projection operator)의 개념을 이용하였는데 이 연산자의 기능은 그림 5(b)에 나타난 바와 같이 어떤 힘에 대해서는 모든 응력을 전달하는 반면

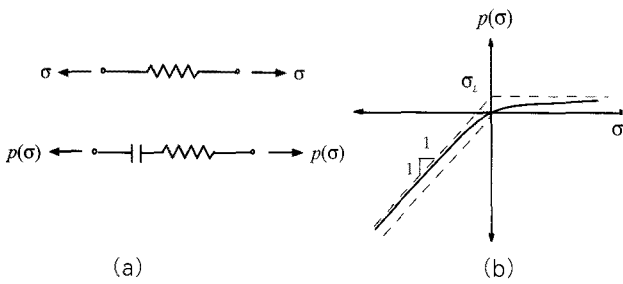


그림 5 간극요소: (a)간극요소의 구성, (b)간극요소의 거동특성

(즉, $p(\sigma) = \sigma$) 그 반대의 힘에 대해서는 응력의 전달이 차단되도록(즉, $p(\sigma) = 0$)하는 역할을 한다(Taciroglu 등, 1999). 본 연구에서는 아래 식 (9)에 나타난 바와 같이 비선형의 투영 연산자를 사용함으로써 응력의 방향이 변이할 때 발생하는 불연속점을 없애고 수치해석의 안정성을 확보하도록 하였다.

$$p(\sigma) = \sigma - \frac{1}{2\beta} \log\left(\frac{e^{2\beta\sigma} + 1}{2}\right), \quad \beta = \frac{\log 2}{2\sigma_L} \quad (9)$$

한편 간극요소가 부착된 조합요소의 강성, 즉 변형도에 대한 투영응력(projected stress)의 변화율은 간단히 수학의 연쇄법칙(chain rule)에 의해 산출할 수 있다. 즉,

$$\frac{\partial p(\sigma)}{\partial \epsilon} = \frac{\partial p(\sigma)}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} = \frac{1}{\left(2 \frac{\sigma}{\sigma_L} + 1\right)} \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} \quad (10)$$

위의 식 (9)와 식 (10)에 사용되는 매개변수 σ_L 은 한계 응력(limit stress)으로서 물리적으로는 흙의 점착력에 의한 최소한의 인장내력을 의미한다. 본 연구에서는 흙의 인장저항은 무시하는 것으로 가정하였기 때문에 여기서의 값은 무시할 정도의 작은 값을 사용하였다.

조합요소의 메커니즘

정가력저항요소와 부가력저항요소는 상기한 탄소성요소와 간극요소를 직렬의 형태로 결합한 1차 조합요소이다(그림 6). 그림 6(a)에 나타난 정가력저항요소는 탄소성요소에 압축력은 전달하고 인장력은 차단하도록 간극요소를 연결한 형태인 반면 그림 6(b)에 보인 부가력저항요소는 반대로 탄소성요소에 대해 인장력은 전달하고 압축력은 차단하도록 간극요소를 부착한 것이다. 수치해석의 측면에서 정가력저항요소와 부가력저항요소가 감당하는 하중의 형태는 식(9)와 식(10)에서 사용된 한계응력, σ_L 의 부호를 통해 결정한다. 그림 6(a)와 같이 간극요소가 압축력을 전달하는 경우 한계응

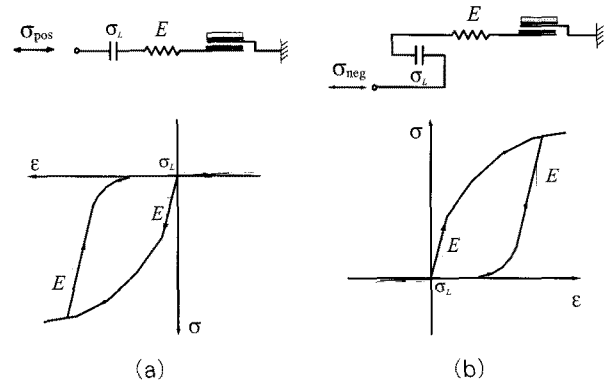


그림 6 조합요소와 메커니즘: (a)정가력조합요소, (b)부가력조합요소

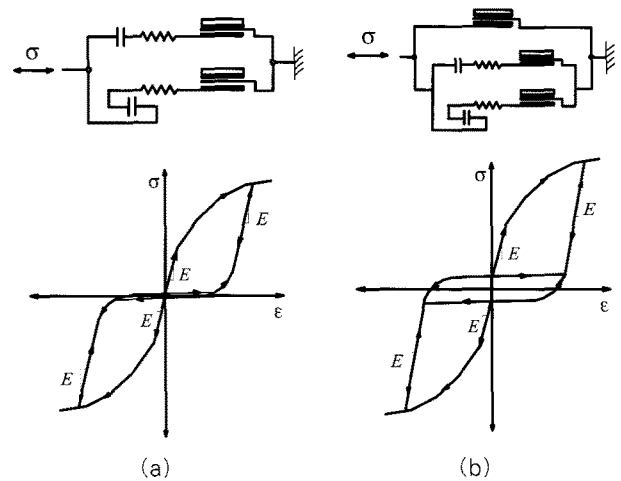


그림 7 조합요소와 메커니즘: (a)축압저항요소, (b)상호작용 매크로요소

력 σ_L 은 양(+)의 값을 선정하며, 반대로 그림 6(b)와 같이 간극요소가 인장력을 전달하는 형태에서는 한계응력의 값을 음(-)의 값으로 선정함으로써 해결할 수 있다.

축압저항요소는 그림 6의 정가력저항요소와 부가력저항요소를 병렬로 연합한 2차 조합요소로서 앞서 서술한 바와 같이 말뚝 가압면 전후면의 지반압축내력을 나타낸다(그림 7(a)). 이 축압저항요소에 그림 2에서 서술한 마찰저항요소가 결합한 매크로요소가 본 연구에서 제시한 상호작용 매크로요소이며(그림 7(b)) 정가력과 부가력에 대한 지반의 압축내력과 말뚝 표면의 마찰저항 성분을 표현할 수 있다. 제시한 상호작용 매크로요소는 각 구성요소가 수평의 응력방향에 대한 단자유도 요소들이 결합된 형태로서 역시 응력방향으로의 단자유도 요소가 된다. 그림 7(a)는 정가력저항요소와 부가력저항요소를 병렬로 결합한 축압저항요소와 그 하중-변위 특성을 나타낸 것이며 그림 7(b)는 축압저항요소에 마찰저항요소를 다시 병렬로 결합한 최종적인 형태의 상호작용 매크로요소와 이 요소가 갖는 하중-변위의 일반적 형태를 나

타낸 것이다. 물론 마찰저항이 무시된 상호작용 매크로요소의 하중-변위 특성은 그림 7(a)에 나타난 축압저항요소만의 거동과 동일하다.

2.3 하중-변위 관계식

그림 7에 나타난 상호작용 매크로요소의 일반적인 하중-변위 특성은 지반의 하중-변위 특성에 맞춰 그 형식을 정의할 필요가 있다. 수평하중에 대한 지반의 압축내력을 나타내는 탄소성요소의 경우 식 (6)~식 (8)에서 나타난 바와 같이 탄성계수 E 와 소성계수 $K(\epsilon)$ 에 의해 표현할 수 있다. 여기서 소성상태에서의 기울기 $K(\epsilon)$ 는 변형도(strain)에 대한 함수인데 특히 소성상태에서 계수가 일정한 기울기 K 를 가지는 경우, 즉 선형경화(linear isotropic hardening)의 경우는 $E \cdot K / E + K$ 와 같은 비교적 간단한 형태를 취한다. 그러나 일반적으로 흙의 하중-변위 특성은 비선형의 형태를 가지게 된다. 본 연구에서는 미국석유학회(API)에서 제시한 포물선 형태의 점성토 p-y 곡선을 기초로 하여 제시한 상호작용 매크로요소의 상관관계식으로 정의하고자 한다.

API(1993)에서 제시한 점성토의 p-y 곡선식은

$$p = \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_c} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

이며 극한지지력과 임계변위에 해당하는 매개변수 p_u 와 y_c 는 다음과 같이 구하도록 하고 있다.

$$p_u = \begin{cases} \left(3 + \frac{\gamma z}{c_u} + \frac{Jz}{B} \right) c_u B & (0 < z \leq z_r) \\ 9 c_u & (z \geq z_r) \end{cases} \quad (12)$$

$$y_c = 2.5 \epsilon_c B$$

여기서 기호 z 는 지표면에서의 깊이, $z_r = \frac{6B}{\gamma B/c_u + J}$ 이고 γ, c_u, B, J 는 각각 흙의 단위무게, 점착력, 말뚝의 직경 및 경험상수를 나타낸다. ϵ_c 는 실험실에서 결정되는 상수로 상관곡선에서 최대응력의 절반에서의 변형도 값을 의미한다. 식 (11)과 식 (12)에서 보는 바와 같이 하중-변위 곡선은 흙의 성질뿐만 아니라 지면에서의 깊이에 따라서도 변화하게 된다. 식(11)에서 정의한 점성토의 p-y곡선식으로부터 간격 L_u 으로 배치된 탄소성요소의 응력-변위 관계식을 일반화된 형태로 유도하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = a \cdot \text{sign}(\epsilon) \cdot \left(\frac{|\epsilon|}{b} \right)^n \quad (13)$$

여기서 σ 와 ϵ 는 탄소성요소에 작용하는 힘과 변위이며 매개변수 a, b 는 재료상수로서 각각 $0.5 p_u L_u$ 과 y_c 를 의미하며 지수 n 의 값은 1/3에 해당한다. 또한 signum 함수는 변위의 방향에 따라서 응력의 형태, 즉 압축과 인장을 결정해준다. 한편 소성상태에서의 소성계수는 식 (13)의 변위에 대한 도함수로 구할 수 있다. 즉,

$$K(\epsilon) = \frac{an}{b^n} |\epsilon|^{(n-1)} \quad (14)$$

로 산출할 수 있다. API(1993)에서 제시한 점성토에서의 p-y 관계식은 탄성구간을 고려하지 않았지만 본 연구에서는 그림 4에서 나타난 바와 같이 항복응력 σ_Y 를 초과하지 않는 구간에서는 탄성으로 거동하고 이를 초과하는 구간에서 소성으로 거동하는 것으로 가정하였다. 이때 항복응력 σ_Y 는 지반의 탄성계수 및 기타 재료상수에 의해 결정된 값이다. 즉, 식 (13)에서 산출되는 응력과 탄성거동에서의 응력($\sigma = E \epsilon$)이 교차하는 지점에서의 응력으로서 식 (15)에서 나타난 바와 같이 교차점에서의 변위, ϵ_{cr} 에 탄성계수 E 를 곱하여 산출할 수 있다.

$$\sigma_Y = E \epsilon_{cr} = E \sqrt{(1-n)} \text{of} \frac{a}{E b^n} \quad (15)$$

탄소성요소의 특성 방정식은 return-mapping 알고리즘에 의한 수치해석으로 해석한다.

3. 해석예제 및 분석

본 연구에서는 각기 다른 점착력과 단위 무게를 가진 점성토층에 매립한 말뚝기초의 경우를 예로 제시하였다. 그림 8에 나타난 예제는 기둥하부의 말뚝기초를 나타낸 것으로 직경 1m의 강관말뚝이 16m 깊이로 매립된 경우이다. 지반은 깊이에 따라 세 종류의 점성토로 구성된 것으로 하였다. 지표면에서 4m까지는 비교적 부드러운 점성토로 되어있고, 하부 6m는 중간정도의 점성토, 그리고 하부는 단단한 점성토로 되어있다. 지층별 지반의 성질은 그림 8(a)에 나타난 바와 같다. 한편 연구에서 제시한 상호작용 매크로요소는 그림 8(b)와 같이 네모상자로 표현하였으며 요소간의 간격 L_u 은 2m로 하였고, 요소별로 동일한 부담길이를 가지도록 배치하

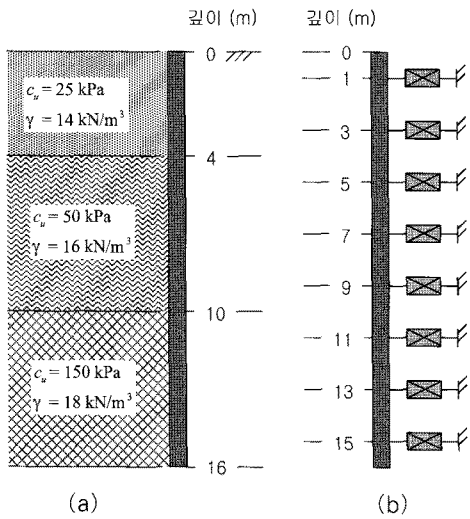


그림 8 해석 예제: (a)지반조건, (b)해석모델

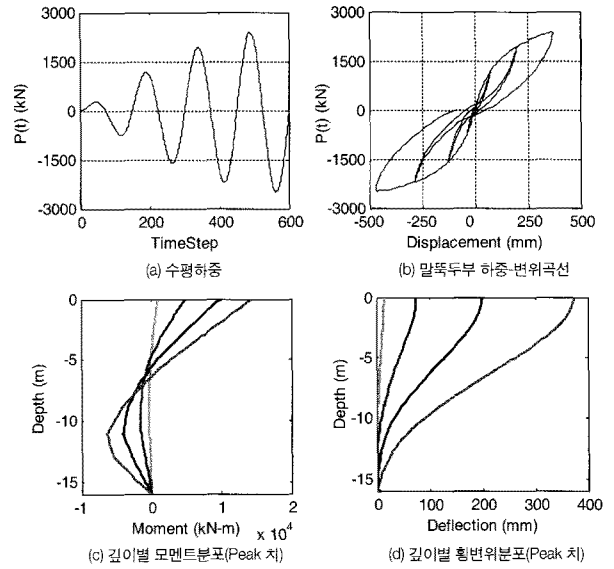


그림 10 가력하중과 기초구조의 거동

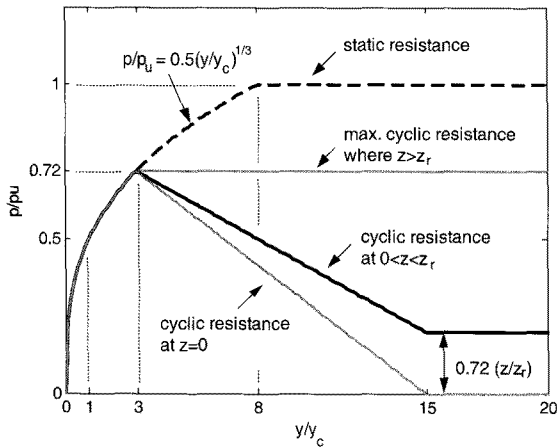


그림 9 상호작용 매크로요소의 하중-변위 상관관계

여 기초에 연결하였다. 기초에 연결된 각각의 상호작용 매크로요소의 하중-변위 관계식은 그림 9와 같이 표현되는 API p-y곡선을 이용하였다. 식 (12)에서 사용하는 상수 J 와 ϵ_c 는 각각 0.25, 0.01로 가정하였다. 한편 상호작용 매크로요소를 구성하는 요소에서 마찰저항요소 마찰내력은 극한지지력의 5%, 즉 식 (1)에서 $\sigma_y = 0.05 p_u$ 로 가정하였다. 기존의 API곡선식에서 지지력은 모든 성분을 포함한 것이기 때문에 축압저항요소의 응력은 전체내력에서 마찰저항요소의 응력을 감한 값이 된다. 말뚝에 대해서는 상단은 푸팅에 의해 회전이 구속된 것으로 가정하고 말뚝의 하단은 힌지로 가정하여 모델링하였다. 해석에 사용한 말뚝은 1000×16mm의 원형 강관으로 탄성계수는 200GPa, 단면적은 $4.946 \times 10^4 \text{mm}^2$, 단면2차모멘트는 $5.98 \times 10^9 \text{mm}^4$ 이다. 하중은 아래 식 (16)과 같이 두 sine함수의 곱으로 표현되는 비선형 주기하중으로 그림 10(a)에 나타난 형태의 반복하중이다.

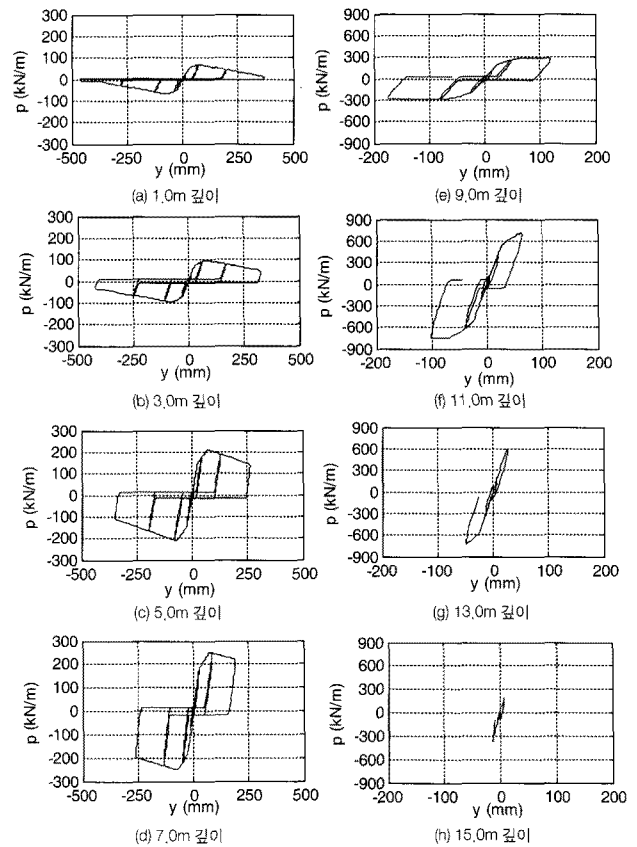


그림 11 상호작용 매크로요소별 반응 p-y 곡선

$$P(t) = P_o \sin(0.25t) \sin(4.0t) \quad (16)$$

이때 P_o 의 크기는 2500kN이며, 하중은 말뚝의 두부에 수평으로 작용하는 것으로 하였다. 식 (16)에서 하중의 작용시간은 $0 \leq t \leq 2\pi$ 로 제한하였으며, 해석에서 사용한 시간증

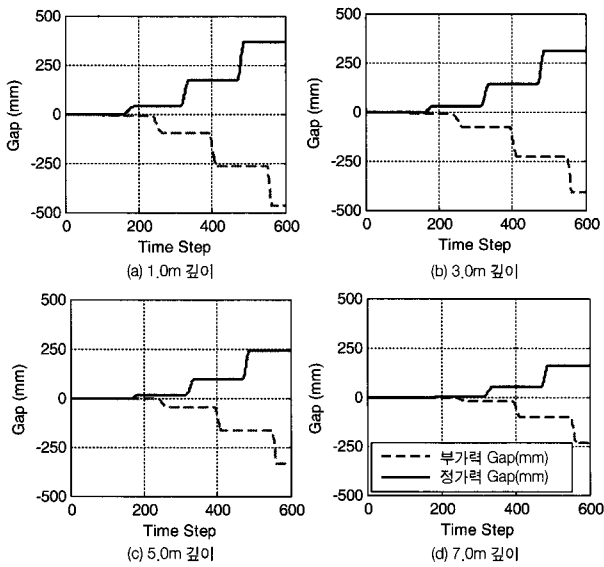


그림 12 기초구조의 깊이별 수평간극

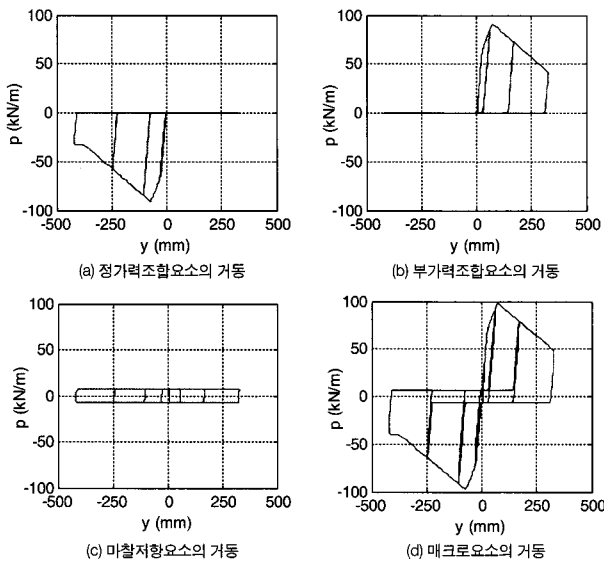


그림 13 상호작용 매크로요소의 요소별 거동과 조합

분은 $\Delta t \approx 0.01$ sec 이다.

해석결과는 그림 10부터 그림 13에 나타내었다. 그림 10은 기초 상단에 작용하는 하중(그림 10(a))과 하중에 의한 말뚝 두부에서의 하중-변위곡선(그림 10(b)), 기초에 작용하는 모멘트 및 수평변위의 깊이에 따른 분포도(그림 10(c), (d))를 나타낸다. 모멘트와 수평변위의 깊이에 따른 분포도는 그림 10(a)의 주기하중에서 정가력 하중의 peak에 해당하는 종단면 값을 나타낸 것이다.

그림 11은 각 깊이에서 상호작용 매크로요소들에서 취한 하중-변위 곡선으로서 그림 9에 나타낸 API(1993)의 p-y 곡선 중 반복하중을 받을 때의 p-y곡선과 유사하다.

이는 상호작용 매크로요소의 상관관계, 즉 하중-변위 관계

식을 API에서 제시한 곡선식을 사용하였기 때문이며 여기에 전체저항의 5%로 가정한 마찰저항 성분이 포함되어 있다. 한편 그림 12와 그림 13에 나타낸 곡선은 연구에서 제시한 매크로요소를 통해서 얻을 수 있게된 추가의 정보이다. 그림 12는 기초와 지반사이의 벌어진 간극(gap)값을 깊이별로 나타낸 것인데, 여기서 점선과 실선은 기초에 작용하는 하중의 방향에 따라 기초의 좌우측에 발생하는 값을 의미한다. 좌우로 반복하는 하중에 의해 정가력조합요소 또는 부가력조합요소를 구성하는 CFD의 소성변형 값에서 구한 것이다. 또한 그림 13은 지면에서 3m 깊이에 배치된 상호작용 매크로요소의 구성 요소별 거동을 나타내는데, 그림 13(a)~(c)는 각각 정가력조합요소, 부가력조합요소 및 마찰저항요소의 거동을 나타내며 그림 13(d)는 이들 구성요소들이 조합된 매크로요소의 거동을 나타낸다.

4. 결 론

수평하중을 받는 깊은기초의 거동을 p-y해석법으로 해석하는데 있어서 기존에 이용되던 스프링요소(p-y-요소)는 본 연구에서 제시한 단자유도 상호작용 매크로요소에 의해 대체할 수 있다. 기초구조에 대한 지반내력이 단순히 스프링으로 모델링된 기존의 p-y-요소에 비해 본 연구에서 제시한 매크로요소는 기초와 지반사이에 발생하는 상호작용의 제 성분을 분석하여 조합한 것으로서 기존의 p-y-요소에서는 분석할 수 없는 제 성분(마찰성분 및 압축저항성분)들을 별도로 분별하여 구할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서 제시한 상호작용 매크로모델을 이용한 예제의 수치해석을 통해서 기존의 p-y-요소로 얻을 수 있는 기초구조의 전체적인 거동을 구하였으며, 또한 지반과 기초구조에 작용하는 상호작용의 성분별 반응을 추가로 구함으로써 상호작용 매크로요소의 효율성을 확인하였다. 제시한 상호작용 매크로요소를 보다 효율적으로 활용하기 위해서는 실험을 통해 각 성분의 기여도를 파악하여 매크로요소를 구성하는 제 요소의 재료특성으로 적용할 필요가 있으며, 이를 통해 기초구조의 거동에 영향을 미치는 인자를 정밀하게 고려할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 제시한 상호작용 매크로요소를 이용하여 수평하중을 받는 기초구조의 거동을 보다 정밀하게 해석하고 또한 다양한 결과 값을 분석해냄으로서 기존의 p-y해석법의 효율성을 향상할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국민대학교 신진교수 연구지원금으로 수행된 연구입니다.

참 고 문 헌

- 김문겸, 임윤묵, 김민규, 조석호 (2000) 횡하중을 받는 지반-말뚝 상호작용계의 동적 주파수 응답해석, 한국전산구조공학회 논문집, 13(4), pp.437~448.
- 김수일, 정삼성, 이상원 (1995) 횡하중을 받는 군말뚝의 해석 기법 개발, 대한토목학회 논문집, 15(6), pp.1783~1794.
- 김영수, 서인식, 김병탁, 김기영 (1997) 수정 Vlasov모델에 의한 휨성 강관말뚝의 수평거동연구, 대한토목학회 논문집, 17(3), pp.249~260.
- 서춘교, 윤정방, 김재민 (2007) 3차원 지반-구조물 상호작용 해석을 위한 입방형 무한요소, 한국전산구조공학회 논문집, 20(1), pp.39~50.
- 장범수, 이진형, 서동희, 정삼성 (2001) 축방유동을 받는 교대 말뚝기초의 해석, 대한토목학회 논문집, 21(1), pp.81~90.
- American Petroleum Institute (1993) Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design, Report RP2A-WSD, 20th Edition.
- Boulanger, R. W., Curras, C. J., Kutter, B. L., Wilson, D. W., Abghari, A. (1999) Seismic Soil-Pile-Structure Interaction Experiments and Analyses, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(9), pp.750~759.
- Taciroglu, E., Hjelmstad, K. D. (1999) Isotropic limit tension or compression elasticity, *13th ASCE Engineering mechanics Conf.*, Baltimore, Maryland
- McClelland, B., Focht, J. (1958) Soil Modulus for Laterally Loaded Piles, *Transactions of ASCE*, 123, pp.1049~1086.
- Nogami, T., Otani, J., Konagai, K., Chen, H. L. (1992) Nonlinear soil-pile Interaction Model for Dynamic Lateral Motion, *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 118(1), pp.89~106.
- Simo, J.C., Hughes, T.J.R. (1998) Computational Inelasticity, 7 of Interdisciplinary Applied Mechanics, Springer, New York
- Taciroglu, E., Rha, C., Wallace, J. W. (2006) A Robust Macroelement Model for Soil-pile Interaction under Cyclic Loads, *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(10), pp.1304~1314.
- Wang, S., Kutter, B. L., Chacko, M. J., Wilson, D. W., Boulanger R. W., Abghari, A. (1998) Nonlinear Seismic Soil-pile Structure Interaction, *Earthquake Spectra*, 14(N2), pp.377~396.
- Yang, Z., Jeremic, B. (2002) Numerical Analysis of Pile Behavior under Lateral Loads in Layered Elastic-plastic Soils, *Int. J. Num. Anayt. Meth. Geomech.*, 26, pp.1385~1406.