

# 구조물-말뚝지지 전면기초의 3차원 상호작용 해석기법 개발

## Development of Three-dimensional Interactive Analysis for Superstructure-piled raft foundation

조 재 연<sup>1</sup> Cho, Jae-Yeon

정 상 섬<sup>2</sup> Jeong, Sang-Seom

이 준 환<sup>3</sup> Lee, Jun-Hwan

### Abstract

In engineering practices, the superstructure was analyzed under a fixed boundary condition and the foundation was designed by considering the loading condition of superstructure. It may result in overestimation of forces, the bending moment, settlement of superstructure and foundation. In this study, an interactive analytical method is proposed for the interaction between the superstructure and the piled raft. The overall objective of this study is focused on the application of interactive analysis method for predicting behavior of entire structures. And a series of numerical analyses are performed to verify the interactive analysis routine in comparison to the unified analysis method. Through the comparative studies, it is found that the iterative and interactive analysis gave similar results of settlement and raft bending moment compared with those of finite element analysis. And it is also found that the proposed design method considering interaction between superstructure and foundation is capable of predicting reasonably well the behavior of entire structures. It can be effectively used to the design of a superstructure-piled raft foundation system.

### 요 지

기존의 설계에서는 상부구조물의 거동은 하부기초 및 지반을 고정단 조건으로 가정하여 분석하였고, 하부기초의 설계는 상부구조물의 하중조건만 고려하였다. 이는 상부구조물 및 기초의 부재력과 침하량을 과다하게 판단할 가능성이 있다. 본 연구에서는, 상부구조물과 말뚝지지 전면기초의 상호작용을 고려한 상호작용 해석기법을 제안하였으며, 전체 구조물의 거동을 파악하기 위한 상호작용해석기법의 적용성을 고찰하였다. 일련의 수치해석을 통하여 상호작용 해석과 일체해석의 결과를 비교한 결과, 본 설계기법으로 산정한 말뚝지지 전면기초의 침하거동 및 휨모멘트가 유한 요소해석과 유사하게 나타났다. 또한 상부구조물과 하부기초의 상호작용을 고려하여 전체구조물의 거동을 비교적 정확히 산정하는 것을 알 수 있었다. 이러한 검증을 토대로 본 해석기법이 실제 상부구조물-말뚝지지 전면기초설계에 적용 가능할 것으로 판단된다.

**Keywords :** Piled raft foundations, Superstructure, Iterative and interactive analysis, Unified analysis

1 정희원, 연세대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

2 정희원, 연세대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., Tel: +82-02-2123-7489, Fax: +82-02-364-5300, soj9081@yonsei.ac.kr, 교신저자)

3 정희원, 연세대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

건축물의 초고층화에 따라 상부구조물에서 지반으로 전달되는 하중이 증가하기 때문에, 이를 안전하게 지지할 수 있는 하부 기초구조물 또한 대형화되고 있는 실정이다. 고층 건축구조물의 하부기초는 높은 하중으로 인하여 침하가 발생하게 되며 이러한 변위는 상부구조물의 변형에 영향을 미치게 된다. 따라서 기존의 말뚝기초 설계와 같이 지지력 측면의 설계(capacity-based design)를 적용할 경우 구조물의 침하량을 과다하게 제한하여 비경제적인 설계가 될 수 있다. 이에 따라 최근 건축구조물의 하부기초로서 전면기초의 하중분담을 고려하고 일정 수준의 침하량을 허용하는 설계개념인 말뚝지전면기초의 도입이 유럽, 호주, 일본 등지에서 활발히 진행되고 있다(Burland et al., 1977; Randolph, 1994; Katzenbach et al., 2000; Poulos, 2001; Mandolini, 2005; Reul et al., 2003; Katzenbach, 2005).

그러나 지금까지 하부기초의 설계는 상부구조물의 강성을 고려하지 않고 설계하중에 대한 기초구조물의 거동을 상부구조물과 분리하여 해석하거나 기초 및 지반사이에 발생 가능한 상호작용을 고려하지 않은 해석을 통하여 기초의 지지력 및 단면을 결정하였다. 또한 상부구조물의 설계 시 하부기초와 지반을 고정단으로 가정하고 해석하여, 기초-지반의 강성을 고려하지 않은 구조계산이 이루어져 왔고, 구조해석을 통해 산정된 기초와 지반의 반력을 하중조건으로 이용하여 기초의 지지력 및 변위를 검토하였다. 그러나 이와 같은 경우 정밀한 해석기법을 통하여 상부구조물 및 하부기초 해석을 수행한다 할지라도 구조물간의 상호작용을 적절히 반영하지 못하기 때문에, 전체 구조물의 거동을 정확히 예측하지 못할 수 있다. 따라서 그 결과는 실제거동과 차이가 발생할 가능성이 있다. 앞으로의 기초구조물의 설계가 지지력 측면의 설계에서 항복 이후 극한까지 이르는 비선형 거동을 포함하고, 기준 이내의 침하량과 수평변위를 허용하는 사용한계상태(serviceability limit state)의 설계방향으로 변하고 있기 때문에 비선형 지반특성과 구조물-지반 또는 구조물-구조물 사이의 상호작용을 고려한 해석이 필요하다(Cho et al., 2010a).

최근 국내에서 교량의 하부기초 설계에 지반의 비선형성 및 지반-구조물의 상호작용을 고려한 6×6 매트릭스 스프링 모델을 적용한 사례가 보고되고 있다. 인천대교 고가교의 하부기초로 적용된 직경 2.4~3.0m의 단일

현장타설말뚝의 설계와 평택대교의 하부기초인 직경 2.5m의 단일현장타설말뚝 6본으로 구성된 파일베트 기초의 설계에 지반강성의 변화와 상부구조와 기초의 상호작용을 고려하기 위한 반복해석과정이 적용되었다(Cho et al., 2010b). 외국의 경우 구조물-구조물 혹은 기초-지반의 상호작용에 대한 연구가 이론적인 방법이나 수치해석적인 접근으로 다양하게 진행되어 왔는데, 말뚝기초-지반의 상호작용에 대한 연구는 유한요소법(Ottaviani, 1975; Randolph, 1981, Jeong et al., 2004; Lee et al., 2010), 경계요소법(Butterfield et al., 1971), 탄성해석법(O'Neill et al., 1977; Poulos, 1979), 하중전이곡선법(Reese et al., 1990) 등 다수의 연구결과가 보고되었다. 그러나 상부구조물-하부기초의 상호작용에 대한 연구는 미진한 실정이며, 최근 Chore et al.(2010)은 3차원 유한요소해석을 수행하여 상부구조물-군말뚝의 상호작용을 말뚝의 간격, 배열, 직경에 따라 상부구조물의 거동변화를 제시하였다. 또한 Thangaraj and Ilamparuthi(2010)는 상부구조물-전면기초의 해석을 통하여 상호작용을 고려한 경우 전면기초의 전체 및 부등침하량이 고려하지 않은 경우보다 작게 나타나는 것을 보고하였다. Viladkar et al.(1994)은 뼈대구조물-전면기초-지반의 해석에서 구조물을 보(beam)요소와 판(plate)요소로 모델링하고 지반의 비선형성을 고려하여 해석하는 방법을 제안하였다. 특히 3차원 유한요소해석(FEM)을 이용하여 구조물-기초-지반의 일체해석방법과 상호작용의 영향에 대한 연구들이 진행되고 있다(Dutta and Roy, 2002; Nataralan and Vidivelli, 2009; Brown and Yu, 1986). 이러한 방법들은 전체구조물을 모델링하기 때문에 한명의 기술자가 상·하부 구조물 전체에 대한 정확한 이해가 필요하며, 비정형 혹은 대형구조물의 경우 모델링과 해석에 많은 시간과 노력이 필요하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 기존의 설계에서 고려하지 않았던 상부구조물-기초-지반의 상호작용을 고려하면서 분리해석을 통하여 일체해석과 유사한 정밀성을 확보할 수 있는 상호작용 설계기법을 제안하였다. 상호작용 해석에서는 기초-지반의 CSM(Coupled Stiffness Matrix)조건을 반영하여 상부구조물에서 하부기초로 전달되는 하중을 산정하였으며, 하중조건에 따른 하부기초의 거동과 지반-하부기초의 CSM을 산정하고 이를 반복 계산하여 상·하부구조물 경계면에서의 거동을 검토하였다. 또한 제안된 설계기법의 검증을 위하여 3차원 유한요소해석법을 통한 비교·분석을 수행하였다.

## 2. 상부구조물-기초-지반의 상호작용 해석기법

상부구조물과 하부기초의 일체화된 해석에 관해서는 그 중요도에 비하여 상대적으로 연구가 미진한 편이다. 이는 상부구조와의 일체화된 해석을 위해서는 복잡한 상부구조의 모델링기법 및 구조해석기법이 필요하기 때문이다. 따라서 모델링이 간편하고 상·하부 구조물의 상호작용을 고려할 수 있는 설계기법이 필요하다.

본 연구에서는 하부기초-지반의 강성을 고려하여 상부구조물에서 전달되는 하중을 정확히 산정하고 이를 하부기초의 설계에 반영할 수 있는 상호작용 해석기법(Interactive analysis)을 제안하였다. 상호작용을 고려한 해석에서는 상부구조해석 시 상용 프로그램인 Midas civil을 통하여 상부구조물을 뼈대(frame)구조와 전면기초를 모델링하고 전면기초의 하부에 CSM을 고려한 스프링을 통해 각 절점의 지반 및 말뚝두부의 강성을 적용하여 구조해석을 실시한다(Fig. 1 참조). CSM은 하부기초-지반의 상호작용을 고려한 6×6의 강성행렬로서 식 (1)과 같이 이동, 회전, 상호 커플링(cross-coupling)이 모두 고려된다. 말뚝지지 전면기초의 경우 식 (1)의 강성행렬에서 대각행렬이 거동에 지배적인 역할을 하기 때문에(Zafir, 2002), 커플링강성( $K_{15}$ ,  $K_{51}$ 과  $K_{24}$ ,  $K_{42}$ )은 고려하지 않았다. 이를 통해 각 절점의 반력을 산정하고, 하부기초의 하중조건으로 이용하게 된다. 하부기초의 해석 및 설계에서는 상부 구조해석에서 산정한 각 절점의 반력을 하중으로 작용시켜 거동분석을 하고 하중조건에 따른

지반 및 말뚝두부에서의 CSM을 산정하여 기초-지반의 강성을 고려한 절점조건을 상부구조물 설계에 반영할 수 있게 한다.

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & -K_{15} & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & K_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{42} & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ -K_{51} & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $K_{11}$ 과  $K_{22}$ 은 수평방향 강성(kN/m)을,  $K_{33}$ 은 수직방향 강성(kN/m),  $K_{44}$ 과  $K_{55}$ 는 회전강성(rocking stiffness, kN-m/rad)을,  $K_{66}$ 은 비틀림 강성(torsional stiffness, kN-m/rad)을 나타내며,  $K_{15}$ ,  $K_{51}$ 과  $K_{24}$ ,  $K_{42}$ 는 상호 커플링강성(cross coupling stiffness, kN/rad 또는 kN-m/m)을 나타낸다.

하부기초인 말뚝지지 전면기초의 해석 및 CSM 산정은 Cho et al.(2012)이 제안한 YSPR 프로그램을 이용하였다(Fig. 2 참조). YSPR은 군말뚝 및 말뚝지지 전면기초 설계프로그램으로 전면기초의 거동을 고려하기 위해 평면 쉘요소를 이용하였고 말뚝-지반의 비선형 상호작용을 고려하기 위해 사질토의 p-y 곡선(Reese et al., 1977), t-z곡선, q-z 곡선(FHWA, 1999) 등의 하중전이 함수를 이용하였다.

상호작용 해석은 구조물-구조물, 하부기초-지반의 상호작용과 상부구조물의 형상 및 강성에 따른 하중조건을

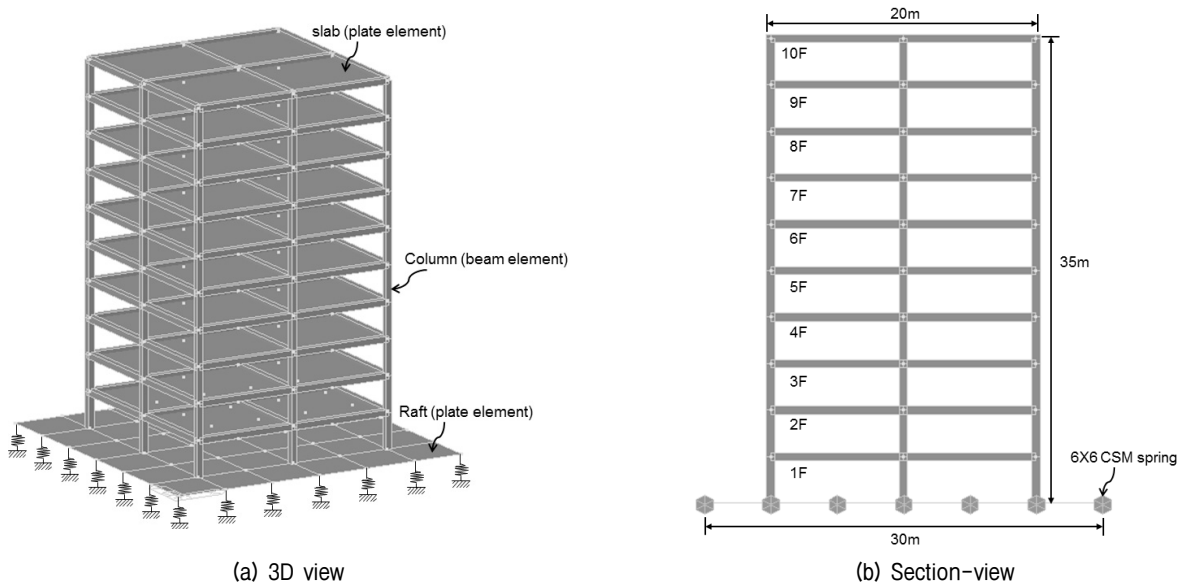
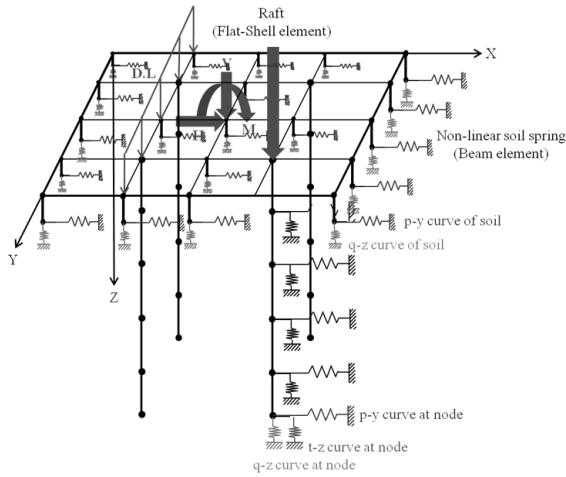
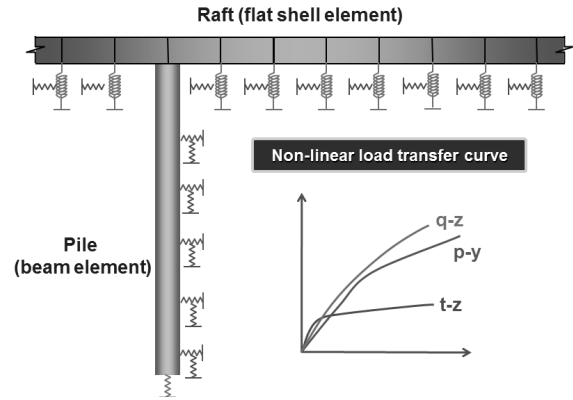


Fig. 1. Modeling of superstructure (Midas civil)

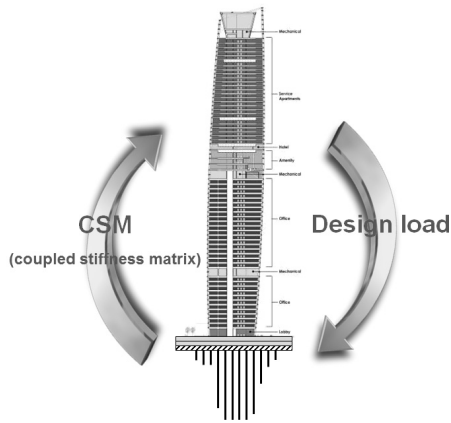


(a) 3D view

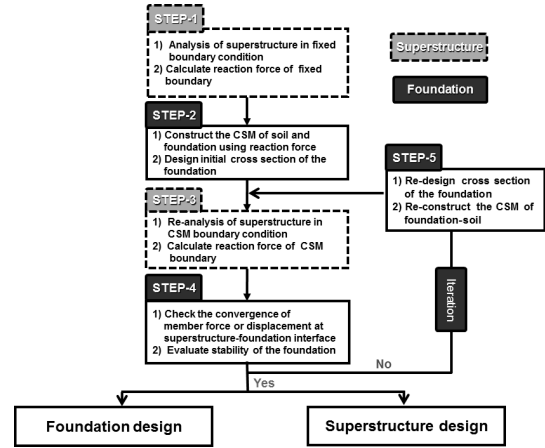


(b) Section-view

Fig. 2. Modeling of piled raft foundation (YSPR)



(a) Schematic diagram



(b) Flow chart

Fig. 3. Proposed interactive analysis

고려할 수 있으며, 구조기술자와 지반기술자의 협업이 필요하다. 상호작용해석의 반복계산 과정은 다음과 같다.

- (1) 구조기술자는 하부기초-지반을 고정단 절점조건(fixed boundary condition)으로 가정하여 상부구조해석을 수행하고 전면기초의 각 절점에서 반력을 산정한다.
- (2) 지반기술자는 상부구조해석에서 산정한 절점반력을 기초의 하중조건으로 적용하여 기초의 거동 및 각 절점의 CSM을 산정하고 하부기초의 단면을 설계한다.
- (3) (2)에서 산정한 CSM을 하부기초-지반의 절점조건(CSM boundary condition)으로 적용하여 상부구조해석을 수행하고 각 절점에서의 반력을 재산정 한다.
- (4) 재산정된 반력을 하중조건으로 입력하여 하부기초의 거동 및 CSM을 산정한다.
- (5) 이때 (3)과 (4)에서 산정한 상·하부 구조물 경계면

(전면기초)에서의 부재력 혹은 변위가 수렴할 때까지 (2)~(4)의 과정을 반복하여 계산한다.

- (6) 경계면에서의 부재력 혹은 변위가 수렴하면 상부/하부구조물의 설계를 수행한다. 이때 (2)에서 설계한 기초단면의 축방향 및 횡방향 하중에 대한 안정성 평가를 수행하고, 구조물의 안정성에 문제가 있을 경우, 기초단면을 변화시켜 CSM을 재산정한 후 (3)~(6) 설계과정을 반복한다.

위에서 언급한 상호작용 해석의 해석순서 및 개요도는 Fig. 3과 같다.

### 3. 상호작용 해석과 일체해석(FEM) 결과 비교

본 연구에서는 상호작용 해석기법의 적용성을 검증하기 위하여 3차원 유한요소(finite element, FE)해석을

이용하여 전체구조물을 일체화 해석한 결과와 비교·분석을 수행하였다. 유한요소 메쉬(mesh) 및 해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS 3D Foundation(Ver. 2.2, 2008)을 사용하였다.

### 3.1 해석 대상 단면 및 해석 mesh

해석 대상 구조물은 Fig. 4(a)에 나타낸 바와 같이 10층 규모의 높이 35m인 상부구조물과 말뚝지지 전면기초로 구성되어 있다. 하부기초의 경우 말뚝의 직경은 1m로 가정하였고, 근입깊이는 마찰말뚝 형태인 10m로 적용하였다. 전면기초의 경우, 정사각형 형태로 폭 15m, 두께 1m로 가정하였으며 지반 위에 접촉(contact)하도록 모델링하였다. 상부구조물은 층당 3.5m의 콘크리트 구조물로 가정하여 바닥 슬래브와 기둥 및 가로보로 구성되었다. 슬래브의 단면은 폭 10m의 정사각형으로, 두께는 0.2m를 적용하였고, 기둥 및 가로보의 단면은 0.6×0.6의 정사각형 단면으로 가정하였다. 대상 지반은 Fig. 4(b)에 나타낸 바와 같이 20m 깊이의 풍화토 지반과 그 하부 80m 두께의 연암층 및 경암층으로 구성하였다. 해석모델의 경계 바닥면은 핀으로 고정하였으며, 수직 경계면은 모두 롤러를 사용하여 수직방향의 변위를 허용하도록 하였다. 지하수위의 영향은 고려하지 않았다.

본 해석에서는 재료의 자중을 고려한 초기 응력분포를 산정하여 초기 평형단계(initial equilibrium state)를 구현하고 초기단계 이후, 말뚝지지 전면기초에 작용하

는 하중은 상부구조물의 자중에 의해 발생하는 증가하중으로 모델링하였다. 또한 기초의 근입에 의한 주변지반의 응력변화 및 말뚝에 발생하는 잔류하중 등을 수치해석적으로 구현하기 위해서는 많은 시간이 필요하므로, 기초의 시공효과는 고려하지 않았다.

### 3.2 지반물성 및 구성모델

본 유한요소 해석에서 말뚝은 탄성모델(linear-elastic)을 적용하였으며, 풍화토층과 암반층은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 각 모델에 필요한 재료 정수는 일반적인 콘크리트 물성과 국내의 현장 지반조사결과를 토대로 대표적인 풍화토, 연암 및 경암 물성을 선택하였다.

말뚝과 지반 혹은 전면기초와 지반 사이의 경계면(interface)에는 PLAXIS에서 제공하는 접촉요소(contact element)를 사용하여 지반과 구조물 사이의 미끄러짐(slip behavior) 및 구조물의 가력 반대방향에서 발생할 수 있는 인장력에 의한 분리현상(gap behavior)을 모델링 하였다(Kim et al., 2010). 특히 말뚝과 지반의 경계면에서 지반과 접해있는 말뚝 요소의 절점은 Coulomb 마찰이론에 의해 거동하며, Coulomb 마찰이론은 경계면에서 발생하는 미소변형 상태의 탄성거동과 영구 변형 상태의 소성거동 형태로 구분할 수 있다. 즉, 탄성거동 상태를 넘어서는 변형이 발생하게 되면 소성거동 상태로 전이되어 경계면 요소의 미끄러짐 거동(slip behavior)이 발생하게 된다(Won et al., 2006; Jeong et al., 2009).

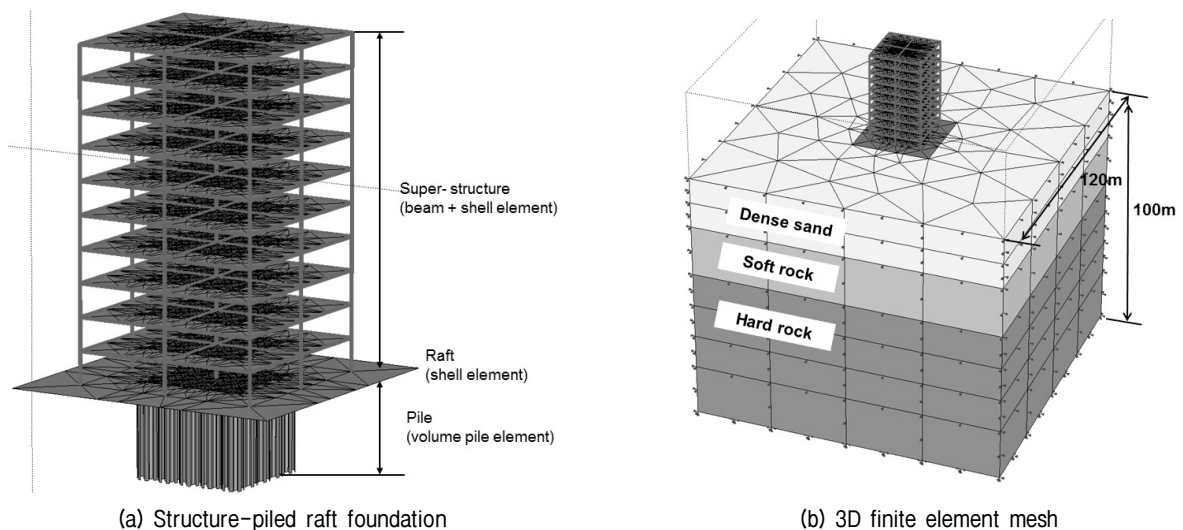


Fig. 4. Unified analysis structure-foundation-soil system

해석에 사용된 말뚝, 지반 및 전면기초의 물성은 Table 1에 나타내었다.

### 3.3 상호작용 해석과 3차원 유한요소 해석 결과비교

본 절에서는 현장 및 실내모형실험으로 규명하기 어려운 상부구조물-하부기초-지반의 거동을 구조물-지반의 상호작용을 고려할 수 있는 3차원 유한요소해석(FEM)을 이용하여 해석한 결과와 비교하여 본 해석기법의 타당성을 검토하였다.

#### 3.3.1 변위 및 반력의 수렴 검토

Fig. 5는 상호작용 해석을 이용하여 상부구조와 하부기초의 경계면(전면기초)에서 산정한 침하량과 반력을 통해 거동의 수렴여부를 확인하였다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 상호작용에서 상부 구조해석 프로그램(Midas Civil)과 하부기초 해석프로그램(YSPR)으로 각각 산정

한 전면기초의 침하량을 비교하였다. 첫 번째 계산과정에서 산정한 침하량 분포를 비교해 보면 전면기초의 중앙부에서는 상부구조해석과 하부기초해석 각각 17.94mm, 21.62mm로 약 4mm(하부기초 침하량 기준의 20%)의 변위차를 보였고 코너부에서는 각각 17.54mm, 15.31mm로 약 2mm(하부기초 침하량 기준의 13%)의 오차를 보였다. 또한 부등침하는 크게 발생하지 않았으나 전체적인 침하거동의 차이를 나타내었다. 두 번째, 세 번째 반복계산과 비교하여 첫 번째 계산과정에서 산정한 전면기초 중앙부의 침하량은 다른 절점의 침하량보다 작게 발생된 것으로 보이며, 이는 반복계산을 통하여 CSM의 강성변화가 이루어지고, 강성변화에 따른 반력의 재분배가 발생하여 각 절점의 침하량 분포가 변화하면서 코너부 보다 중앙부에서 상대적으로 큰 침하량이 발생하는 침하거동으로 수렴하게 되는 것을 알 수 있다.

반력의 재분배 현상은 Fig. 5(b)에 나타내었다. 전면기초의 절점을 총 81개로 구분하여 각 절점에서 산정한

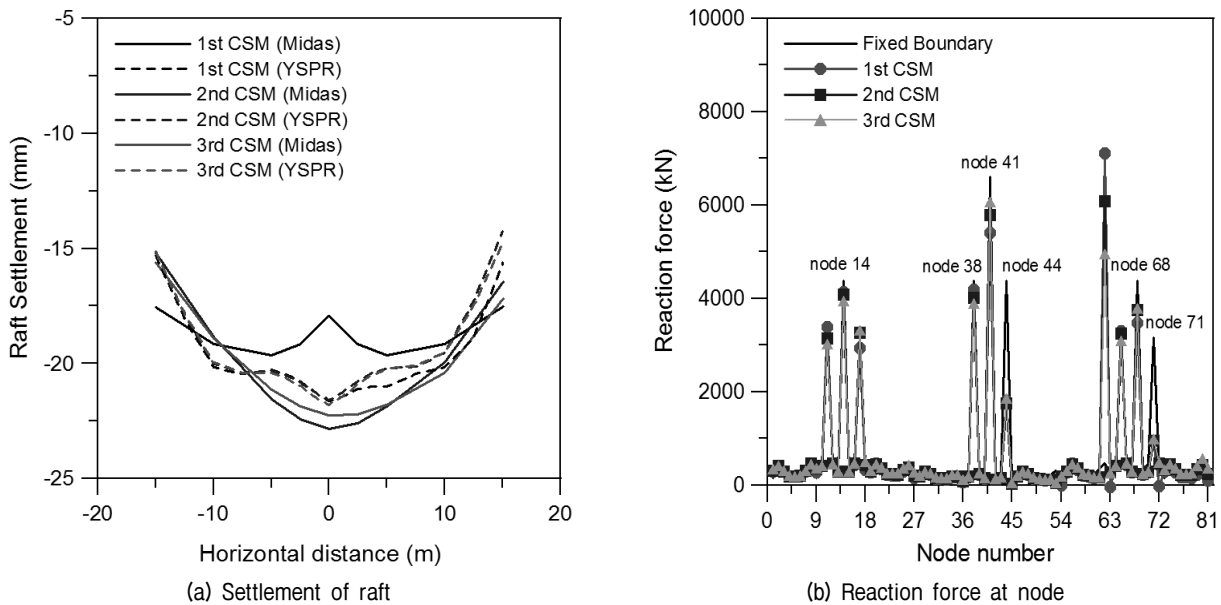


Fig. 5. Convergence check

Table 1. Material properties used in the analysis

	Soil			Structure		
	Weathered soil	Soft rock	Hard rock	Raft	Pile	Column & slab
$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	19	23	26	25	25	24.5
E (MPa)	50	500	2,000	24,645 (C30) 27,277 (C35)		
c (kPa)	15	50	100	0.18	0.18	0.2
$\phi$ (deg.)	35	40	45	-	-	-
$\nu$	0.32	0.25	0.2	-	-	-

반력을 반복계산 과정(CSM 경계조건) 및 고정단 경계 조건에 따라 비교한 것이다. 특히 경계조건에 따른 반력의 차이는 절점 14, 38, 41, 44, 68 그리고 71에서 크게 나타나는데 이때 고정단 조건으로 상부 구조해석을 수행할 경우 CSM 조건과 비교하여 최대 322%(절점 71) 큰 반력이 산정되었다. 또한 절점 62번에서는 CSM 조건에서의 반력이 고정단 조건보다 크게 발생하였고 이 차이는 계산을 반복하면서 점차 감소하였으나 수렴하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 기존 설계에서 하부기초 및 지반을 고정단으로 가정하여 계산 할 경우 상부와 하부의 경계면에서의 반력을 다르게 산정할 수 있고 이러한 차이가 하부기초의 설계 시 하중조건에도 영향을

미칠 수 있음을 확인하였다. 결과적으로 구조물에서 하부기초로 전달되는 하중을 과도하게 산정할 경우 하부기초의 단면을 증가시켜 기초의 시공비용을 증가시킬 수 있고, 실제보다 하중을 작게 산정할 경우 기초 단면의 축소로 인하여 전체구조물의 안정성에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

### 3.3.2 일체해석 및 고정단 경계조건 해석과의 비교

Fig. 6은 Fig. 5(b)에서 산정한 반력을 하중조건으로 적용하여, 상부구조물의 침하량과 전면기초의 침하량과 휨모멘트 분포로 나타낸 것이며, 고정단 및 CSM 경계 조건과 3차원 유한요소 해석을 통하여 산정한 결과와

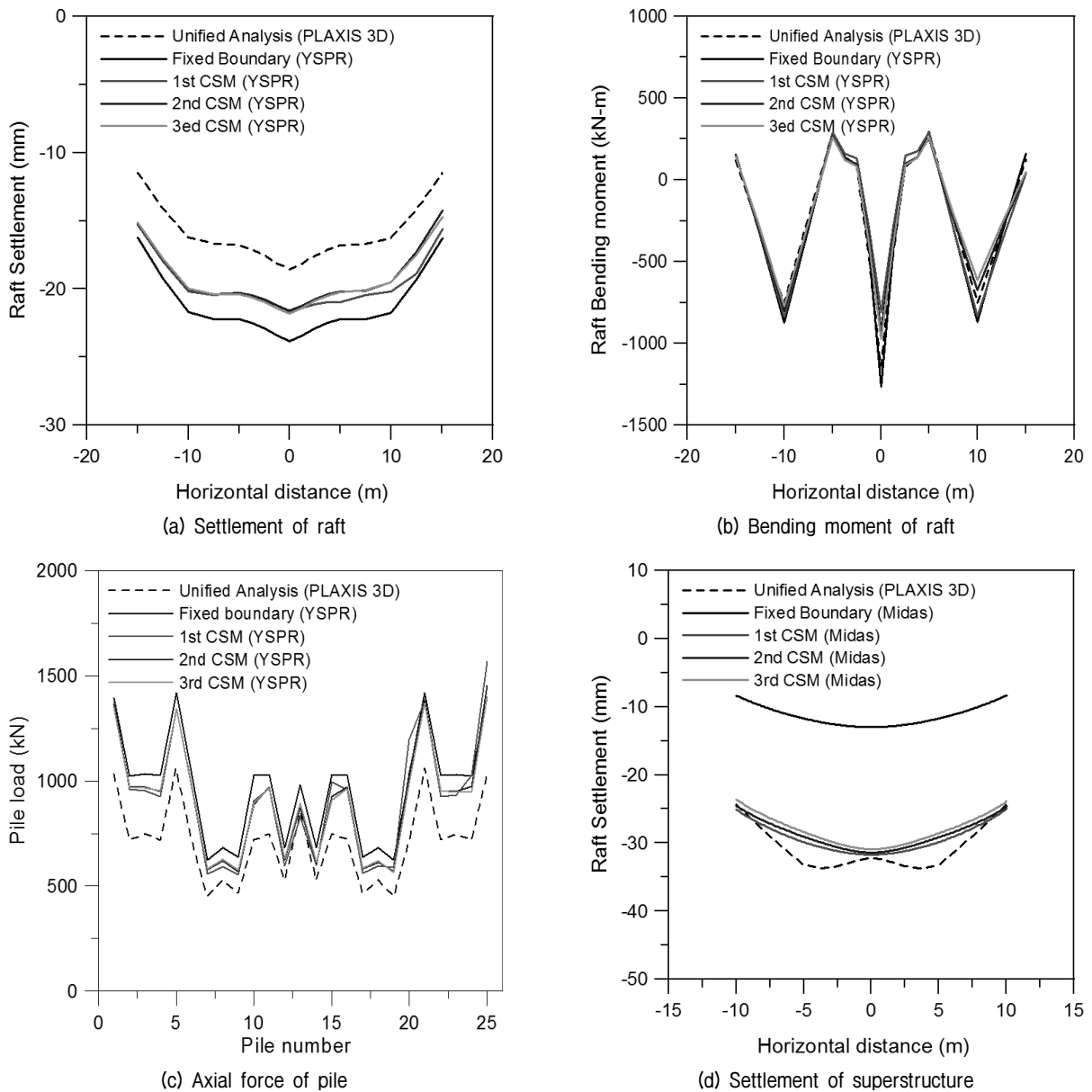


Fig. 6. Behavior of superstructure and foundation

비교하였다. Fig. 6(a)는 전면기초의 침하량 분포를 각 해석기법에 따라 비교한 것이다. 분석 결과, 본 연구에서 제시한 CSM 조건을 고려한 상호작용 해석이 기존의 고정단 조건 해석결과보다 좀 더 일체해석에 근접하는 것으로 나타났다. 해석결과 고정단 조건에서 전면기초의 침하량은 상호작용해석과 일체해석과 비교하여 각각 7~9%, 28~42% 크게 산정하는 것으로 나타났다. 이는 고정단 조건에서의 반력이 CSM 조건의 반력보다 다소 크게 산정되기 때문에 이를 하부기초의 하중조건으로 적용했을 경우, 침하량을 크게 산정하는 것으로 판단된다. Fig. 6(b)는 전면기초 단면에서 발생한 휨모멘트 분포를 비교한 것이다. 분석 결과, 고정단의 경우 3차원 일체해석과 CSM 조건의 해석 값 보다 큰 휨모멘트 분포를 나타냈으며, 이 차이는 전면기초의 중앙부에서 최대 57% 크게 산정되었다. 또한 고정단 조건보다 CSM 경계조건을 이용한 상호작용 해석이 일체해석과 좀 더 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 말뚝의 축력의 경우 Fig. 6(c)에서 알 수 있듯이, CSM을 이용한 상호작용 해석이 고정단 경계조건의 해석보다 약 7% 작게, 일체해석 결과보다 22% 크게 산정하는 것으로 나타났고, 상부 구조물의 침하량은 고정단 경계조건 의 경우 상부구조물의 침하량을 가장 작게 산정하였다. 이는 앞서 기술하였듯이, 하부절점의 강성 및 침하량을 고려하지 않은 기존의 고정단 경계조건은 상부 구조물의 침하량을 제한하여 하부기초로 전달되는 하중조건을 과대 평가 할 수 있고 이는 하부기초의 과대 예측으로 이어져, 실제 설계 시 기초의 비경제적 설계가 발생할 수 있다. 따라서, 상부구조물 및 하부기초의 설계 시 정확한 하부기초-지반의 CSM 경계조건 산정이 중요함을 알 수 있었다.

#### 4. 구조물 거동의 영향인자 매개변수 연구

전체 구조물의 거동은 현장계측 혹은 실내모형시험

으로 명확히 규명하기 어려운 점이 있다. 따라서 본 연구에서는 구조물 거동의 영향인자를 분석하기 위하여, 상부 구조물의 강성 및 하부기초의 강성변화에 따른 매개변수연구(parametric study)를 수행하였다. 지반 및 재료물성은 3차원 유한요소 해석과 동일한 값을 적용하였으며, Table 2에 본 매개변수 연구에 적용된 case를 요약하였다.

##### 4.1 하부기초의 강성이 상부구조물에 미치는 영향

하부기초의 강성변화가 상부구조물의 거동에 미치는 영향을 규명하기 위하여 하부기초의 강성을 말뚝의 간격, 직경, 길이 및 전면기초의 두께로 나누어 분석하였다. 상부구조물의 거동은 슬래브에서 발생하는 휨모멘트, 침하량 분포와 기둥에서 발생하는 부재력을 통하여 변수에 따른 영향을 분석하였다.

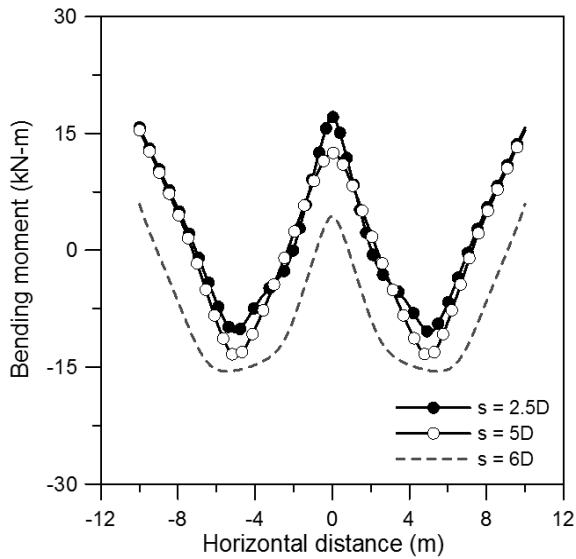
Fig. 7(a)~(d)는 하부기초의 강성변화에 따른 슬래브에 발생하는 휨모멘트 분포를 나타내었다. Fig. 7(a)는 말뚝의 간격 변화에 따른 슬래브의 휨모멘트 분포를 비교한 것이다. Fig. 7(a)에서 나타난 바와 같이, 말뚝의 간격이 커질수록 슬래브 중앙에서 발생하는 휨모멘트는 최대 75% 감소하는 것으로 나타났으며, 말뚝의 직경, 길이 및 전면기초의 두께의 차이는 휨모멘트에 큰 영향을 주지 않았다. 슬래브 중앙에서 휨모멘트가 감소하는 현상은 중앙 기둥 직하의 말뚝에서 기둥을 통하여 슬래브에 전달되는 축하중이 말뚝의 간격이 증가함으로서 감소하여 발생하는 것으로 판단되며, 이때 중앙 기둥의 발생 축하중은 각각 6839.01kN(2.5D), 6575.11kN(5.0D), 6515.97kN(6.0D)으로 나타났다.

Fig. 8(a)~(d)는 상부구조물의 침하량 분포를 비교한 것이다. 휨모멘트 분포와 달리 침하량은 말뚝의 간격보다 직경, 길이 그리고 전면기초의 두께에 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며, 말뚝의 길이 및 전면기초의 두께가 증가할수록 침하량은 감소하는 것을 확인할 수

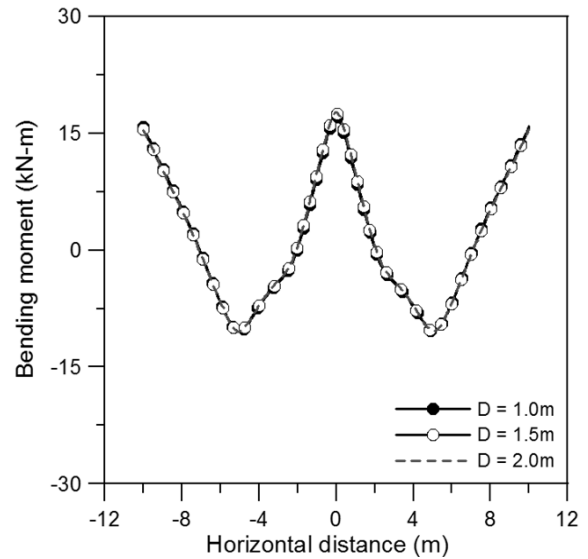
Table 2. Analysis case of parametric study

Raft		Piled raft				Superstructure	
B (m)	t (m)	D (m)	L (m)	s (m)	array	Column Section (m)	Slab Thickness (m)
30	0.5	1.0	10	2.5	5×5	0.6×0.6	0.2
	1.0	1.5	15	5		1.0×1.0	0.6
	4.0						
	C35	2.0	20	6		C35	C35

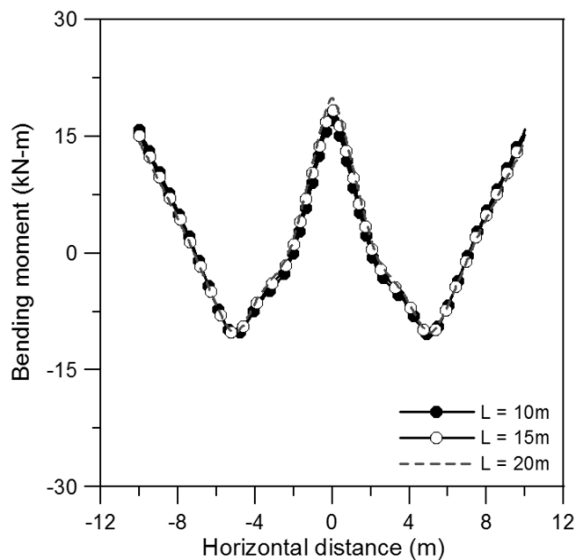




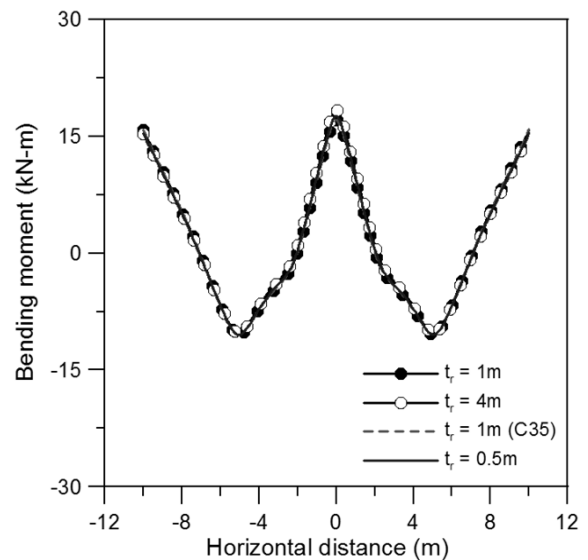
(a) Effect of pile spacing



(b) Effect of pile diameter



(c) Effect of pile length



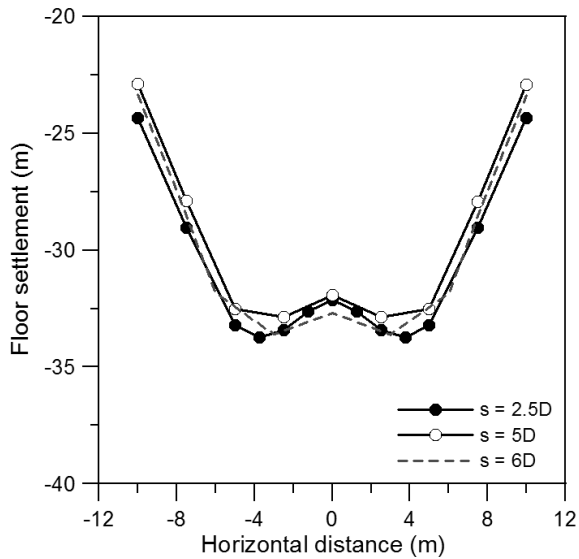
(d) Effect of raft stiffness

Fig. 7. Bending moment of slab

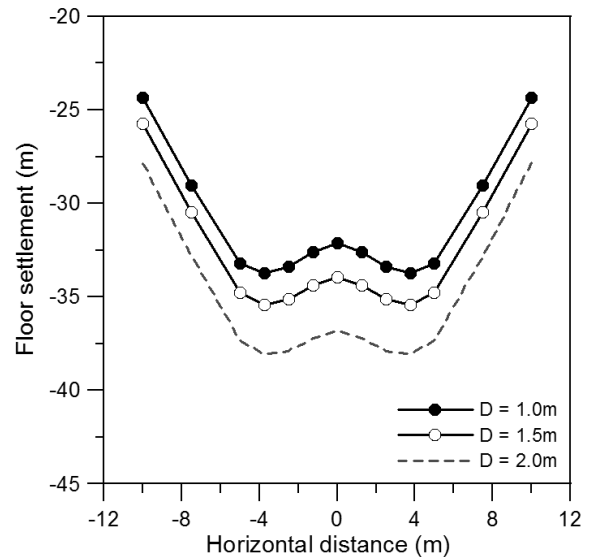
있었다. Fig. 8(b)에서, 말뚝의 직경이 증가할수록 침하량이 증가하는 현상이 발생하는 것은 말뚝의 중심간격을 2.5m로 동일하게 가정하고 직경만 증가시켰기 때문인 것으로 보이는데 이때 말뚝사이의 간섭효과가 증가하여 전체적인 균말뚝의 지지력이 감소한 것으로 판단된다.

Table 3은 기둥에 발생하는 축력의 분포를 요약한 것이다. 말뚝의 간격이 증가할수록 기둥에 발생하는 축력은 중앙부에서 감소하는 반면에 코너 및 측면부의 축력은 증가하는 것으로 나타났으며, 말뚝의 직경, 길이 변화는 중앙부에서 축력이 증가하고 코너 및 측면부의 축력이 감소하는 것으로 나타났다. 전면기초의 두

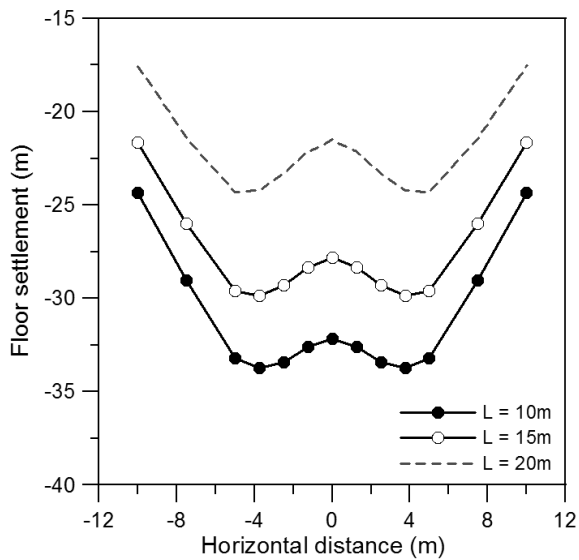
께의 변화는 코너부를 제외한 중앙부 및 측면부의 축력 모두 전체적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 전면기초의 두께가 증가하면서 기초의 부등침하량이 감소하여 상부구조물로부터 하부기초로 전달되는 하중이 중앙부와 측면부 기둥으로 집중되는 것으로 판단된다 (Table 3 참조). 또한 중앙부 기둥을 기준으로 상대적으로 코너부보다 부등침하량이 작은 측면부 기둥으로 상부구조물의 하중이 더욱 집중되는 것을 알 수 있다. 말뚝의 간격에 따른 축력분포의 경향이 다른 조건의 경우와 차이를 보이는 것은 기둥과 말뚝의 위치에 따라 변화하는 것으로 판단되는데, 중앙 기둥의 경우 말뚝과 동일한 위치에 있기 때문에 말뚝의 길이와 직경이 증



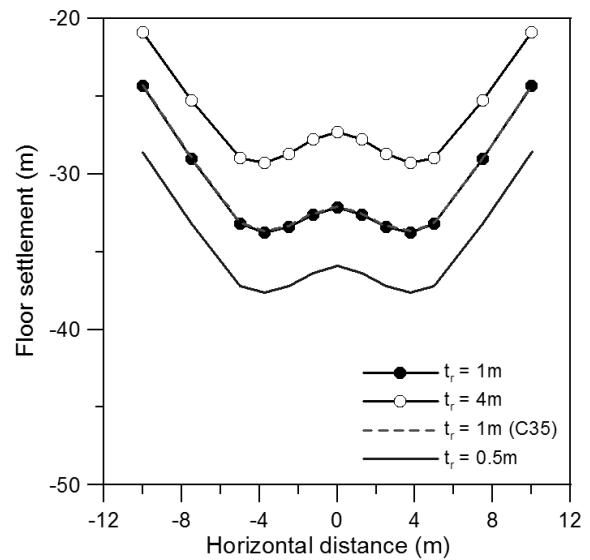
(a) Effect of pile spacing



(b) Effect of pile diameter



(c) Effect of pile length



(d) Effect of raft stiffness

Fig. 8. Settlement of slab

가할수록 더 큰 하중이 하부기초로 전달되는 것을 알 수 있었다. 이러한 축력분포의 변화는 하부기초의 강성변화에 따라서 상부구조물로부터 전달되는 하중의 재분배(redistribution) 현상 때문에 발생하는 것으로 보이며, 상부하중의 재분배는 하부기초 설계 시 하중조건을 변화시킬 수 있는 중요한 변수로 판단된다. 결과적으로, 하부기초의 강성변화는 상부구조물의 부재력보다 침하량에 더 큰 영향을 주는 것으로 확인되었으며, 부재력에서는 슬래브의 휨모멘트보다 기둥을 통해 하부기초에 전달되는 하중에 더 큰 영향을 준다고 할 수 있다.

#### 4.2 상부구조물의 강성이 하부기초에 미치는 영향

상부구조물의 강성변화가 하부기초의 거동에 미치는 영향을 규명하기 위하여 상부구조물의 강성을 슬래브의 두께 및 기둥의 단면을 변화시켜 분석하였으며, 하부기초의 거동은 전면기초에서 발생하는 휨모멘트, 침하량 분포를 통하여 변수에 따른 영향을 파악하였다. 본 연구에서는 전문적인 구조해석이 아닌 지반기술자에 의한 단순 구조해석이기에 때문에 상부구조물의 강성변화를 슬래브의 두께 및 기둥의 단면 변화로 제한하였고, 단면의 크기 증가에 따른 상부구조물의 자중 증가량은 고려하지 않았다.

Table 3. Axial force of column

		Axial force (kN)		
		Center	Corner	Edge
Effect of pile spacing	2.5D	6839.01	2539.79	4012.87
	5D	6575.11	2584.04	4061.58
	6D	6515.97	2563.76	4083.11
Effect of pile diameter	D=1.0	6839.01	2539.79	4012.87
	D=1.5	6907.43	2532.04	4003.37
	D=2.0	6941.69	2527.81	3998.93
Effect of pile length	L=10	6839.01	2539.79	4012.87
	L=15	7056.64	2485.56	4012.29
	L=20	7328.94	2418.03	2418.03
Effect of raft stiffness	t=0.5	6941.24	2632.53	3894.87
	t=1.0	6839.01	2539.79	4012.87
	t=4.0	7027.74	2406.55	4098.15
	Differential settlement (mm)			
		$\Delta_{\text{center-corner}}^*$	$\Delta_{\text{center-edge}}^*$	
		t=0.5	17.90	11.67
	t=1.0	13.77	7.04	
	t=4.0	2.05	1.14	

\*Note:  $\Delta_{\text{center-corner}}^*$  is center-corner and  $\Delta_{\text{center-side}}^*$  is center-side differential settlement

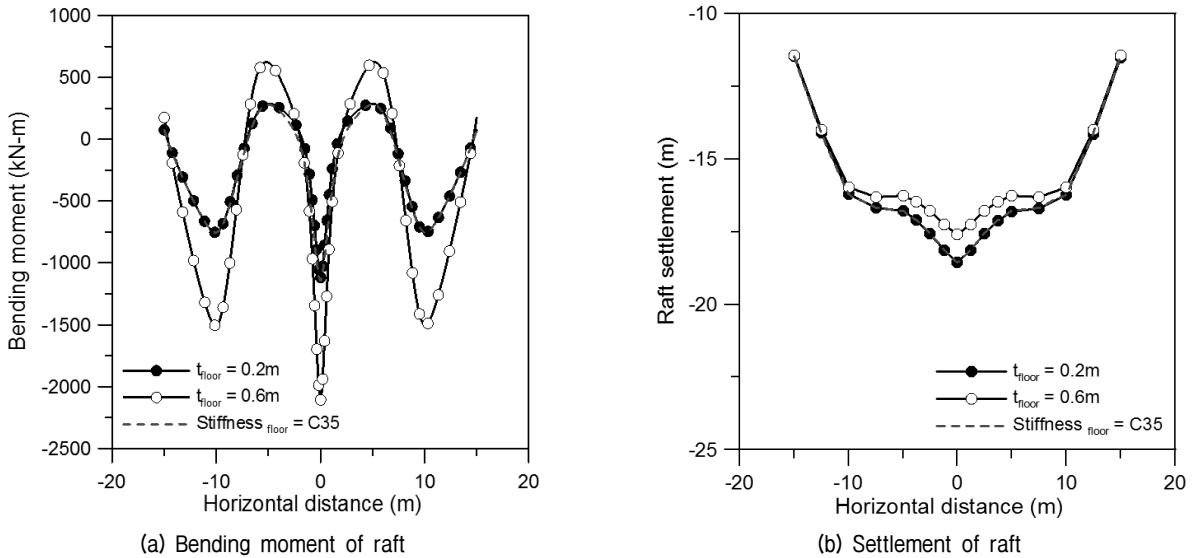


Fig. 9. Effect of slab stiffness

Fig. 9(a), (b)는 슬래브의 두께를 0.2m에서 0.6m로 증가시킨 경우와 두께는 동일하게 가정하고, 슬래브의 탄성계수를 24,645MPa(C30)에서 27,277MPa(C35)로 증가시켰을 경우 하부기초의 거동 차이를 비교한 것이다. Fig. 9에서 나타난 바와 같이, 상부구조물의 두께가 증가하여 강성이 커지게 되면 전면기초에 발생하는 최대 휨모멘트는 증가하게 되고 침하량은 감소하는 것으로 나타났다. 이때 본 해석에서 적용된 탄성계수의 변화는

하부기초의 거동에 큰 영향을 주지 않는 것으로 확인할 수 있었는데, 이는 탄성계수의 증가량이 크지 않아 두께 변화와 비교하여 하부기초에 미치는 영향이 상대적으로 작게 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 10(a), (b)는 기둥의 단면을 0.6×0.6m에서 1.0×1.0m로 증가시킨 경우와 단면을 동일하게 가정하고, 기둥의 탄성계수를 슬래브와 같이 24,645MPa(C30)에서 27,277MPa(C35)로 증가시켰을 경우를 나타낸 것이다. 슬래브의

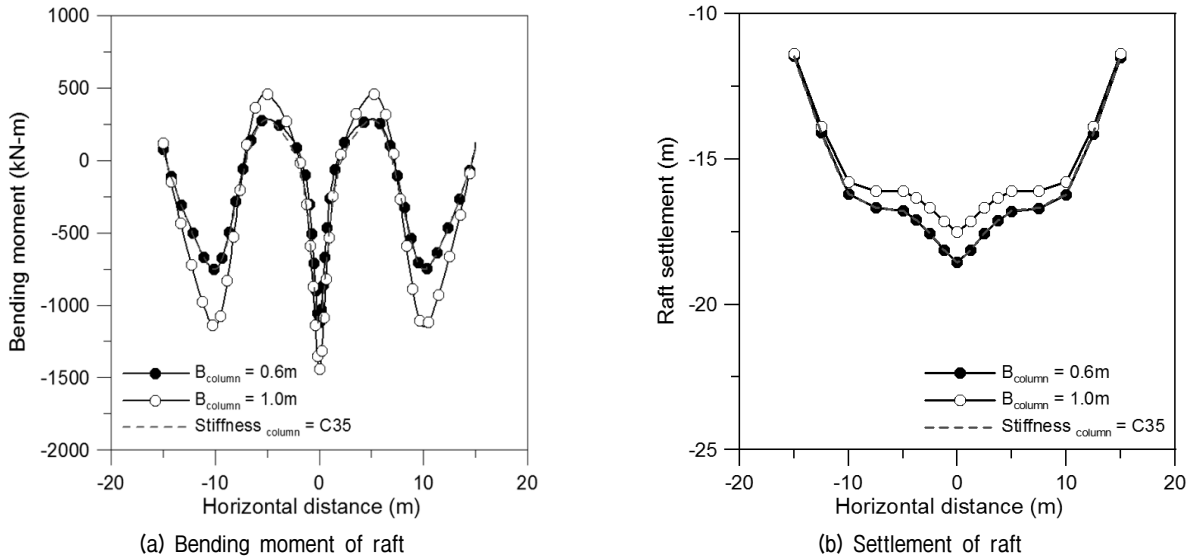


Fig. 10. Effect of column stiffness

강성변화와 동일하게 기둥의 단면이 증가하게 되면 전면기초에 발생하는 최대 휨모멘트가 증가하고 침하량은 감소하는 것으로 나타났다. 결과적으로, 상부구조물의 강성변화는 하부기초의 침하량보다 부재력에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있으며, 하부기초의 설계 시 상부구조물에서 전달되는 단순한 하중조건 뿐만 아니라 상부구조물 강성의 영향을 고려하는 설계가 필요하다고 할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 상부구조물-하부기초의 상호작용을 고려하여 전체 구조물의 거동을 적절히 예측할 수 있는 3차원 상호작용 해석기법(Interactive analysis)을 제안하였으며, 일체해석(유한요소해석) 결과와 비교하여 적용성을 검증하였다. 또한 제안된 해석기법을 통하여 상부 및 하부구조물의 강성변화가 상대 구조물에 영향을 줄 수 있다는 것을 확인할 수 있었으며, 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서 수치해석을 통하여 3차원 상호작용 해석기법(Interactive analysis)을 제안하였다. 상부구조물은 기둥과 슬래브로 구성되는 뼈대(frame) 구조물로 모델링하고 전면기초는 6자유도를 갖는 평면셀(Flat shell)요소로, 말뚝두부 및 지반의 강성은  $6 \times 6$  강성행렬을 이용하여 모델링 하였다. 또한 말뚝과 지반 사이의 비선형적 거동을 고려하는 모델을 적

용함으로써 실제 거동을 반영할 수 있도록 하였다.

(2) 제안된 상호작용 해석기법은 상부구조물의 형상 및 강성의 변화에 따른 반력의 산정, 하부기초-지반의 강성과 하중조건에 따른 CSM(Coupled Stiffness Matrix) 경계조건을 반복적으로 계산하는 방법이며, 이러한 반복계산을 통하여 상부구조물과 하부기초 경계면에서의 오차를 감소시킴으로서 전체구조물의 거동을 일체해석이 아닌 상호작용을 고려한 분리해석으로 파악할 수 있다.

(3) 3차원 유한요소해석을 이용한 일체해석과 반복계산을 통한 상호작용 해석을 비교·분석한 결과, 고정단 조건보다 상호작용 해석이 일체해석과 좀 더 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 하부절점의 침하량을 고려하지 않은 기존의 고정단 경계조건 설계는 상부 구조물의 하중조건을 과대평가 할 수 있고 이는 실제 기초설계 시 과대 설계가 발생할 수 있다. 따라서, 상부구조물 및 하부기초의 설계 시 정확한 하부기초-지반의 CSM 경계조건 산정이 중요할 것으로 판단된다.

(4) 또한 상부 구조물의 강성 및 하부기초의 강성변화에 따른 매개변수연구를 수행한 결과, 하부기초의 강성변화는 상부구조물의 부재력보다 침하량에 더 큰 영향을 주는 것으로 확인되었으며, 상부구조물의 강성변화는 하부기초의 침하량보다 부재력에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 그러므로 상부구조물-하부기초의 상호작용을 고려한 설계가 반드시 지반기술자와 구조기술자의 협업을 통해 이루어져

야 하며, 상호작용을 고려하면 보다 최적 설계를 할 수 있음을 알 수 있었다.

## 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030842).

## 참고 문헌

1. Brown, P. T. and Yu, K. R. (1986), "Load sequence and structure-foundation interaction", *J. Struct. Eng., ASCE*, 112(3), pp.481-488.
2. Burland, J. B., Broms, B. B., and De Mello, V.F.B. (1977), "Behaviour of foundations and structures", *Proceedings of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Vol.2, pp.495-549.
3. Butterfield, R. and P. K. Banerjee (1971), "The problem of pile group-cap interaction", *Geotechnique*, 21, pp.135-142.
4. Cho, J. Y., Lee, S. J., and Jeong, S. S. (2010a), "A study on the optimum design of piled-raft foundation considering pile head condition", *Journal of Korean Geotechnical Society (KGS)*, Vol.26, No.12, pp.31-40.
5. Cho, J. Y. and Jeong, S. S. (2012), "Development of three-dimensional approximate analysis method for piled raft foundations", *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.28, No.4, pp.67-78.
6. Chore, H. S., Ingle, R. K., and Sawant, V. A. (2010), "Building frame-pile foundation-soil interaction analysis:a parametric study", *Interaction and Multiscale Mechanics*, Vol.3, No.1, pp.55-79.
7. Cho, S. H., Kim, H. W., and Kim, Z. C. (2010b), "A case study on the design and construction of the pile bent system", *Proceedings, KGS national conference*, pp.357-367.
8. Dutta, S. C. and Roy, R. (2002), "A critical review on idealization and modeling for interaction among soil-foundation-structure system", *Computer. Struct.*, Vol.80, pp.1579-1594.
9. FHWA (1999), "Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods", FHWA Publication No. FHWA-IF-99-025. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Implementation, McLean, VA.
10. Jeong, S. S., Lee, J. H., and Lee, C. J. (2004), "Slip effect at the pile-soil interface on dragload", *Computers & Geotechnics*, Vol.31, pp.115-126.
11. Jeong, S. S., Seo, D. H., and Kim, Y. H. (2009), "Numerical analysis of passive pile groups in offshore soft deposits", *Computers & Geotechnics*, Vol.36, pp.1164-1175.
12. Lee, J. H., Kim, Y. H., and Jeong, S. S. (2010), "Three-dimensional analysis of bearing behavior of piled raft on soft clay", *Computers & Geotechnics*, Vol.37, pp.103-114.
13. Katzenbach, R. Arslan, U. and Moormann, C. (2000), "Piled raft foundations projects in Germany", *Design applications of raft foundations*, Hemsley, J. A. Editor, Thomas Telford, pp.323-392.
14. Katzenbach, R. Schmitt, A., and Turek, J. (2005), "Assessing settlement of high-rise structures by 3D simulations," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20, pp.221-229.
15. Kim, Y. H. and Jeong, S. S. (2010), "Analysis of soil resistance on laterally loaded piles considering soil continuity", *Journal of Korean Society of Civil Engineers (KSCE)*, Vol.26, No.12, pp. 31-40.
16. Mandolini, A., Russo, G., and Viggiani, C. (2005), "Piled foundations: Experimental I nvestigations, analysis and design," *State-of-the-Art Rep. Proc., 16th ICSMGE*, Osaka, Japan, Vol.1, pp.177-213.
17. Nataralan, K. and Vidivelli, B. (2009), "Effect of column spacing on the behavior of frame-raft and soil system", *J. Appl. Sci.*, 9(20), pp.3629-3640.
18. O'Neill, M. W., O. I. Ghazzaly, and H. B. Ha (1977), "Analysis of Three-dimensional Pile Groups with Nonlinear Soil Response and Pile-Soil-Pile Interaction", *Proceedings, Ninth offshore Technology Conference*, Vol.II, pp.245-256.
19. Ottaviani, M. (1975), "Three-Dimensional Finite element Analysis of Vertically loaded pile groups", *Geotechnique*, 25, pp.159-174.
20. PLAXIS 3D Foundation: PLAXIS 3D foundation user manual, Version 2.0, Brinkgreve, R. B. and Swolfs, W. M., PLAXIS Inc, 2008.
21. Poulos, H. G. (1979), "Group factors for pile-deflection estimation", *J. Geotech. Engrg., ASCE*, Vol.105, No.12, pp.1489-1509.
22. Poulos, H. G. (2001), "Piled raft foundations : design and applications", *Geotechnique*, 51, No.2, pp.95-113.
23. Randolph, M. F. (1981), "The response of flexible piles to lateral loading", *Geotechnique*, 31, pp.247-259.
24. Randolph, M. F. (1994), "Design Methods for pile groups and piled rafts", *Proceedings of 13th ICSMFE*, New Delhi, India, Vol.5, pp.61-82.
25. Reese, L. C. (1977), "Laterally Loaded Piles: Program Documentation", *J. Geotech. Eng. Div.*, Vol.103.
26. Reese, L. C., K. Awoshika, P. H. Lam, and S. T. Wang (1990), "Analysis of a group of piles subjected to axial and lateral loading", *Group version 2.0*, Ensoft, Austin, TX.
27. Reul, O. and Randolph, M.F. (2003), "Piled rafts in overconsolidated clay-Comparison of in-situ measurements and numerical analyses," *Geotechnique*, Vol.53, No.3, pp.301-315.
28. Viladkar, M. N., Noorzai, J., and Godbole, P. N. (1994), "Interactive analysis of a space frame-raft-soil system considering soil nonlinearity", *Computer. Struct.*, Vol.51, pp.343-356.
29. Won, J. O., Jeong, S. S., Lee, J. H., and Jang, S. Y. (2006), "Nonlinear three- dimensional analysis of pile group supported columns considering pile cap flexibility", *Computers & Geotechnics*, Vol.33, pp.355-370.
30. Zafir, Z. (2002), "Seismic Foundation Stiffness For Bridges", *Deep Foundations 2002*, pp.1421-1433.

(접수일자 2013. 1. 11, 심사완료일 2013. 5. 29)