

직접기초와 파일기초로 적용된 이질기초에 대한 수치해석적 평가 The Numerical Analysis for Different Foundations Constructed by Footing and Pile

황의석¹⁾, Eui-Suk Hwang, 장경준²⁾, Kyung-Jun Jang, 탁기열³⁾, Ki-Yoel Thak,
이종성⁴⁾, Jong-Sung Lee, 김학문⁵⁾, Hak-Moon Kim

- ¹⁾ 대림산업(주) 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, Civil Research & Engineering Team, DAELIM Industrial Co. Ltd.
²⁾ 단국대학교 토목공학과 박사수료, Graduate Course, Dept. of Civil Engineering, Dankook University
³⁾ 단국대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dankook University
⁴⁾ 대림산업(주) 기술연구소 부장, Senior Researcher, Civil Research & Engineering Team, DAELIM Industrial Co. Ltd.
⁵⁾ 단국대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dankook University

개요(SYNOPSIS) : 대형 구조물의 기초 시공 시 구조물의 하부지반이 불균질하거나 경사진 지반 또는 일반토사와 암반이 혼재된 지지력이 급격히 변화하는 구간에서 시공되는 경우가 많으며 이와 같은 경우에는 경제적인 최적의 방안으로 직접기초와 말뚝기초를 혼용하여 사용하는 방안이 필요하다. 그러나 일반적으로 기초의 안정성 확보를 위해 보수적으로 말뚝기초를 적용하는 경우가 대부분이며 소규모의 아파트 기초현장에서는 부분적으로 이질기초가 적용되나 이에 대한 보강이나 안정성 검토는 형식적으로 이루어지는 경우가 대부분이다. 본 연구에서는 직접기초와 파일기초가 적용되는 이질기초에 대한 수치해석을 통하여 이질기초 적용 시 기초 및 하부지반에 대한 거동을 평가하여, 이질기초에 대한 적용가능성 여부 및 기초하부에서의 개략적인 거동에 대하여 고찰하고자 한다.

주요어(Keywords) : 이질기초, 직접기초, 말뚝기초, 부등침하, 기초지반변화

1. 서론

토목 및 건축 구조물이 대형, 대심도, 초고층화 되는 등 구조물의 규모가 커짐에 따라 하부 기초 지반 조건도 위치마다 상이하게 나타나게 되어 일부 구간에서 기초지반의 불균일성으로 인해 국부적으로 지내력이 부족한 경우가 빈번하게 발생되고 있다. 일반적으로 상부 구조물의 안정성 확보 차원에서 기초지반이 불균질할 경우에는 가능한 보수적인 기초공법을 적용함으로써 안정성 확보를 그 주안점으로 두고 있다. 그 이유는 직접기초와 파일기초가 혼용되는 이질기초의 경우에 대한 연구가 미비하여 그 적용성과 안정성이 검증되지 못하고 개략검토를 통한 이질기초의 시공이 적용되고 있는 점이 그 중요한 이유일 것이다. 이에 본 연구에서는 직접기초와 파일기초가 혼용되는 이질기초에 대한 수치해석 연구를 통해 기초 및 지반에 대한 거동 등을 평가하여, 이질기초에 대한 적용가능성 여부 및 개략적인 거동에 대하여 고찰하고자 하였다.

2. 이질기초의 개요

2.1 이질기초

이질 기초란 지층의 굴곡이 심할 경우 지지층의 깊이가 건물심도별로 차이가 많아 <그림 1>의 (a)와

같이 동일 기초지반 내에서 직접기초와 말뚝기초가 혼합되는 기초형식으로써 (b)와 같이 동일건물에서
 는 동일형식의 기초가 바람직하나 동일 기초형식으로 적용 시 토층여건상 비경제적이고 시공 시 어려움
 이 많으므로 이질기초 적용을 필요로 하게 된다.



(a) 이질기초

(b) 말뚝기초

그림 1. 이질기초의 개요도

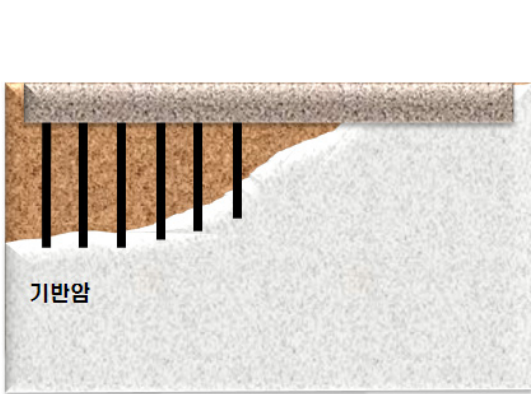


그림 2. 전면기초 + 말뚝기초

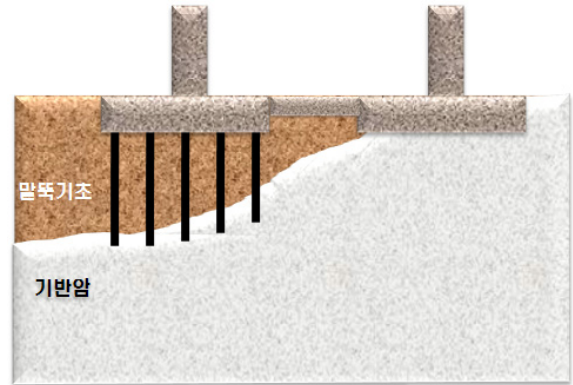


그림 3. 독립기초 + 말뚝기초

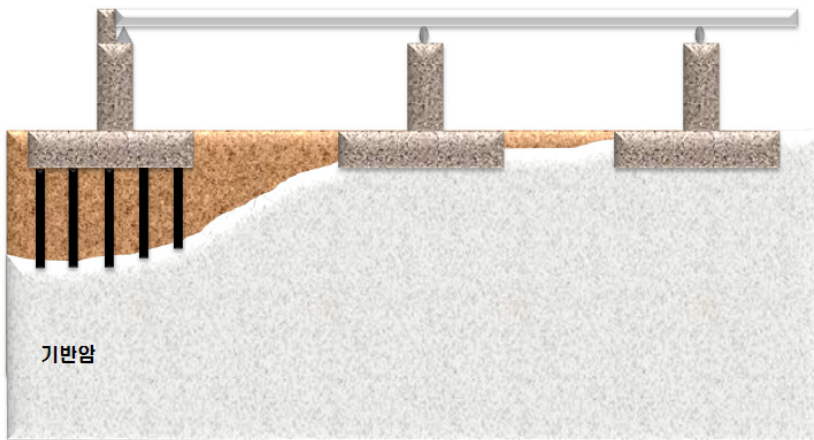


그림 4. 3경간 이상 연속 교량 구조물

다음의 <그림 2~그림 4>는 현장에서 빈번하게 적용되어지고 있는 이질기초의 다양한 형태를 나타내었다. 단일구조물의 경우 <그림2>와 같이 말뚝기초와 전면기초를 접목하여 기초를 시공할 수 있고, 또는 <그림3>과 같이 독립기초를 연결하고 말뚝기초를 혼용한 형태로 기초를 시공할 수 있다. 단일구조물의 경우뿐만 아니라 <그림4>와 같이 3경간 이상의 연속 교량 구조물에서도 이질기초의 활용이 가능하며, 그 이외에도 지반의 조건에 따라 다양한 형태의 기초양식이 적용되어 보다 경제적인 시공을 가능하게 할 수 있다.

2.2 해석프로그램

본 연구에서는 이질기초의 지지력특성 및 침하특성을 분석하고, 그 결과를 정량적으로 해석하기 위해서 유한요소해석 프로그램인 MIDAS-GTS를 사용하여 해석을 수행하였다. MIDAS-GTS는 지반거동 및 구조물의 안정, 지반내 응력분포를 예측할 수 있으며, 주변지반의 응력분포 및 소성상태의 확인이 가능한 설계 및 연구를 위한 범용해석 프로그램이다.

2.2.1 개요

본 과업에 사용한 프로그램은 MIDAS - GTS 는 국내에서 개발하여 현재 광범위하게 사용되고 있는 안정 해석 프로그램으로서 비선형 재료들의 구성 방정식을 손쉽게 다루고 지배미분방정식과 전혀 무관하게 대상 구조체를 분할하고 분할된 요소 내부에 가정된 변수에 따라 구성되는 행렬방정식의 해를 구하는 방법인 Implicit method를 사용하기 때문에 해석시간이 단축되고 큰 변형을 일으키는 모델링에 적합하다. 본 해석에 사용된 지반과 암반의 구성모델은 구성방정식이 선형탄성(Elastic) - 소성(Plastic)의 관계로 표현되는 Mohr-Coulomb의 파괴 기준을 따르는 탄소성 구성모델을 사용하였으며, 변형율이 항복면에 직각인 관련 유동법칙(Associate flow rule)을 적용하였다. 말뚝은 Hooke의 법칙을 따르는 선형탄성 모델을 사용하였다. 또한 말뚝과 지반과의 Slip을 모사하기 위하여 Interface Element를 적용하였다.

2.2.2 Interface Element

이질기초를 모델링함에 있어서 말뚝과 지반사이 경계면의 상호작용을 수치 해석적으로 구현하기는 상당히 어려운 문제이다. 기존의 연구 결과인 Ellison & D'Appolonia(1971)에 의하면 교란의 범위는 일반적으로 수인치내로 제한되며 말뚝과 주변지반의 부착력을 감소시킬 수 있다고만 언급하고 있다. 따라서 본 수치해석에서는 접촉면 거동을 해석하기 위하여 힘-변위 관계를 사용하였다. 수직방향에서 응력 - 변형 관계는 선형적이라 가정하고 수직 강성도에 의해 지배된다.

$$F_n = k_n u_n \quad (1)$$

여기서 ,

$$k_n = \frac{F_{n\max}}{u_{n\max}} \quad (2)$$

마찬가지로 interface에서의 전단강성도의 변화량은 아래의 식과 같이 정의되며,

$$F_s = k_s u_s \quad (3)$$

여기서,

$$k_s = \frac{F_{s\max}}{u_{s\max}} \quad (4)$$

본 해석에서는 기본적으로 프로그램에서 제공된 스프링강성 k_s 를 사용하였으며, 접촉면에 연직인 스프링 강성 k_n 은 k_s 의 10배로 가정하였다.

2.2.3 지반정수 산정

본 연구에서 수치해석을 위한 모형화는 대표적으로 지반, 말뚝 두 가지의 요소로 나눌 수 있다. 해석대상 지반은 토사와 기반암으로 구성되며, 가정된 지반의 N치를 근거로 하여 탄성계수 및 Poisson's ratio의 값을 사용하였고, 단위 중량(γ_w)과 점착력(c) 그리고 내부마찰각(ϕ)은 일반적으로 평가되는 토사 및 기반암에 적용하는 값을 근거로 사용하였다. <표 1> 은 지반해석에 적용한 입력 지반 정수이다. 지반 적용정수는 3개의 해석조건별로 모두 동일한 지반정수로 적용하였다.

표 1. 지반 적용정수

지층	단위중량 (kg/m^3)	점착력 (kg/m^2)	내부마찰각 (ϕ°)	탄성계수 (kg/m^2)	포아송비 (ν)
토사 (풍화토)	1.9	0	30	3700	0.35
기반암 (연암)	2.8	5	40	100000	0.25

<표 2>는 수치해석 시 기초해석에 적용한 입력 물성치이다. 이질기초에 적용한 기초의 형태로서 직접기초는 매트기초로 적용하였고, 말뚝 기초는 강관파일, PHC말뚝, 그리고 현장 타설 말뚝의 세 가지 타입으로 적용하였다.

표 2. 기초 입력 물성치

말뚝종류	단위중량 (kg/m^3)	직경 및 두께 (m)	탄성계수 (kg/m^2)	포아송비 (ν)
Mat기초	2.5	1.5 ~ 2	2200000	0.3
강관 말뚝	1.47	0.508	12000000	0.3
PHC 말뚝	2.7	0.5	3500000	0.18
현장타설 말뚝	2.2	1	2200000	0.3

2.2.4 경계조건 및 해석순서

해석영역에 대한 경계조건은 좌·우 경계부를 연직방향 변위만을 허용하기 위하여 roller조건으로 하였고, 하부 경계부는 hinge로 설정하여 회전만을 허용하였다. 프로그램 해석순서는 원지반과 말뚝을 동시에 모델링하고 응력상태를 초기상태로 안정화하였고, 그 후에 재하하중을 초기($20\text{ton}/\text{m}^2$), 중기($40\text{ton}/\text{m}^2$), 최종($60\text{ton}/\text{m}^2$) 3단계로 나누어 재하 하는 것으로 수행 하였다. <그림 5> 는 수치해석을 하고자 하는 지반의 모델링을 위한 기초 및 지반 개요도로서 기반암 위에 직접기초를 적용하고 토사부분

에는 매트기초에서부터 암반까지 말뚝기초를 적용하였다. 이러한 지반을 <그림 6>처럼 개략적으로 단순화시켜서 모델링하여 MIDAS 프로그램에서 요소망을 생성하였다.

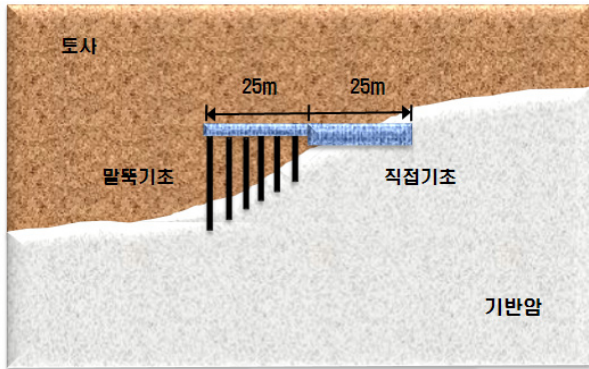


그림 5. 모델링을 위한 기초 및 지반 개요도

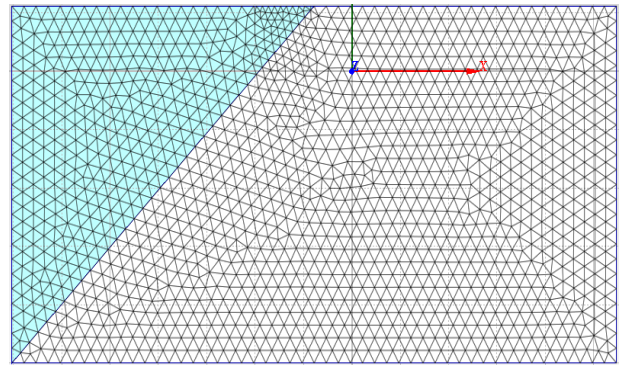


그림 6. 요소망 생성

<그림 7> 에서 기초의 모델링은 단일 구조물기초의 경우로서 매트기초는 전체길이가 50m로 25m 지점을 중앙으로 하여 우측으로는 전면기초와 좌측으로는 말뚝기초를 적용하였으며 중앙부에서 지층이 경사 변화하게 하였다. <그림 8> 처럼 매트기초는 Beam요소로 모두 동일하게 적용하고 강관말뚝과 PHC 말뚝도 Beam 요소를 적용하였다. 현장 타설 말뚝은 Beam요소인 매트기초 하부에 말뚝에서는 Solid요소로 적용하였다. 암반에 근입된 깊이는 각각의 말뚝 직경의 1.5~2배로 근입시키고 각각의 말뚝간의 중심에서부터 거리를 말뚝 직경의 2.5배 이상으로 하여 균말뚝의 거동이 되지 않도록 모델링 하였다. 또한 기초의 가장 자리에서 말뚝의 중심까지의 거리를 강관말뚝과 PHC말뚝의 경우에는 직경의 1.25배, 현장타설 말뚝은 1.0배의 간격으로 모델링 하였다.

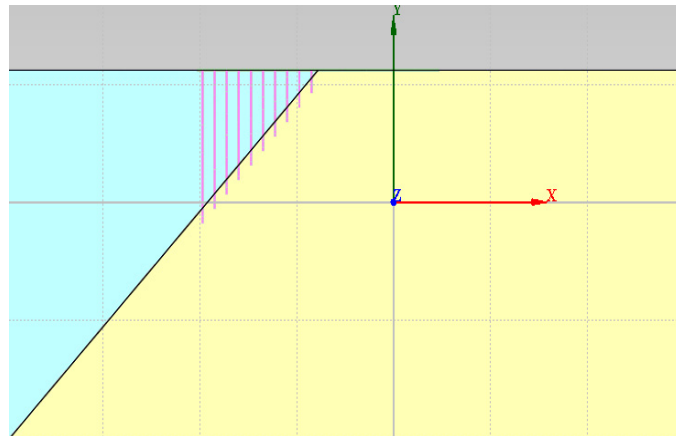
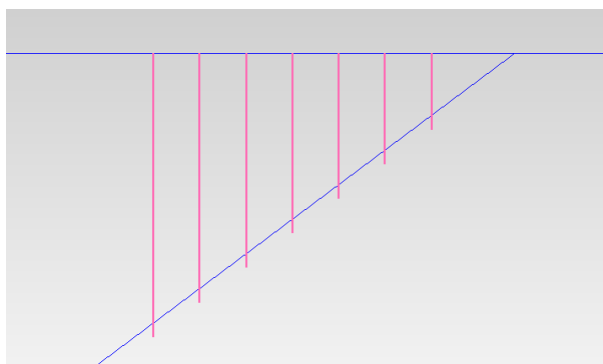
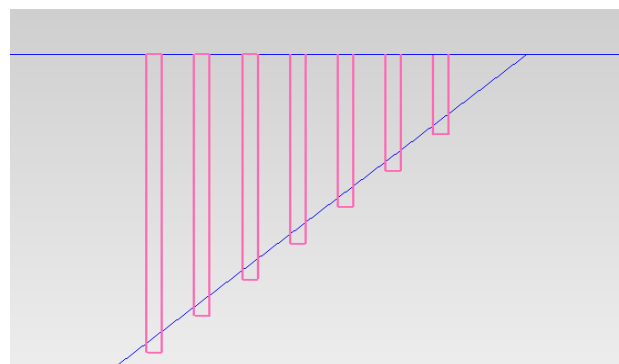


그림 7. 말뚝 근입 모사도



(a) 강관, PHC 말뚝 - Beam 요소



(b) 현장 타설 말뚝 - Solid 요소

그림 8. 말뚝 형상

3. 해석결과

<그림 9~11>은 구조물의 기초 위치별 하중단계의 영향에 따른 침하량 그래프를 PHC, 현장타설 말뚝, 강관말뚝으로 구분하여 나타내었다. <그림 9>는 PHC말뚝과 전면기초의 침하량 그래프로 하중이 총 3단계인 20ton/m², 40ton/m² 그리고 최종하중인 60ton/m² 가 단계적으로 가해졌을 때 침하량의 변화를 보여준다. 하중이 최대로 60ton/m²의 등분포하중이 가해졌을 때 말뚝기초와 매트기초의 접목부분인 중앙부에 PHC 말뚝인 경우에 침하량이 74.1mm로 최대의 침하량이 발생함을 알 수 있다. <그림 10>에서는 현장타설 말뚝과 전면기초가 접목한 이질기초로 역시 매트기초와 말뚝기초가 접목한 중앙부에서 최종하중인 60ton/m²의 하중이 주어졌을 때 68.5mm의 최대 침하량을 확인할 수 있다. 일반적으로 중앙에서 기초 주변부로 갈수록 상대적으로 침하량이 급격하게 줄어드는 현상을 볼 수 있으며, 토사 층에 비해 기반암층의 침하량이 적은 것으로 나타났다. <그림 12>의 기초의 깊이별 지반 내 응력 분포도에서는 기초의 중앙부에서 최대 응력이 집중되어 발생하는 것을 확인할 수 있으며 말뚝기초의 토사에서보다 전면기초의 암반층에서 응력이 더 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. <그림 13>에서도 역시 각각의 기초가 접목하는 중앙부에서 최대 모멘트가 발생하였고, <그림 14>와 같이 직접기초와 말뚝기초가 접목하는 부분에서 전단력의 변화가 크게 발생하였다.

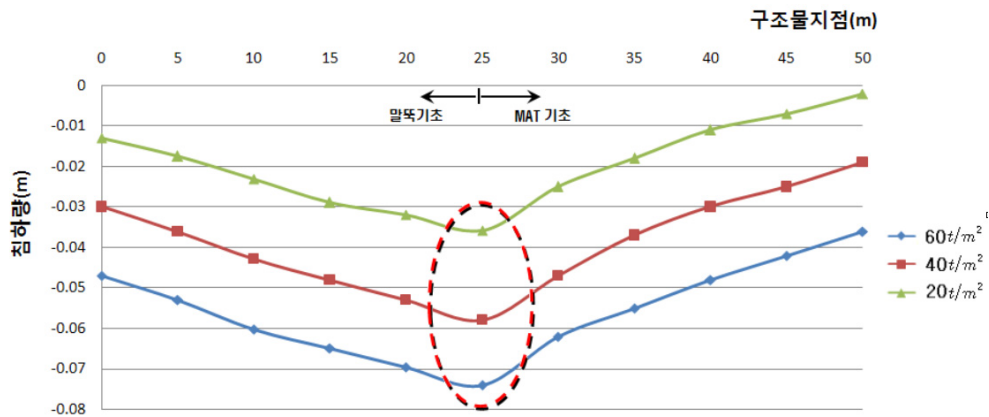


그림 9. PHC 말뚝 단계별 하중 - 침하 곡선

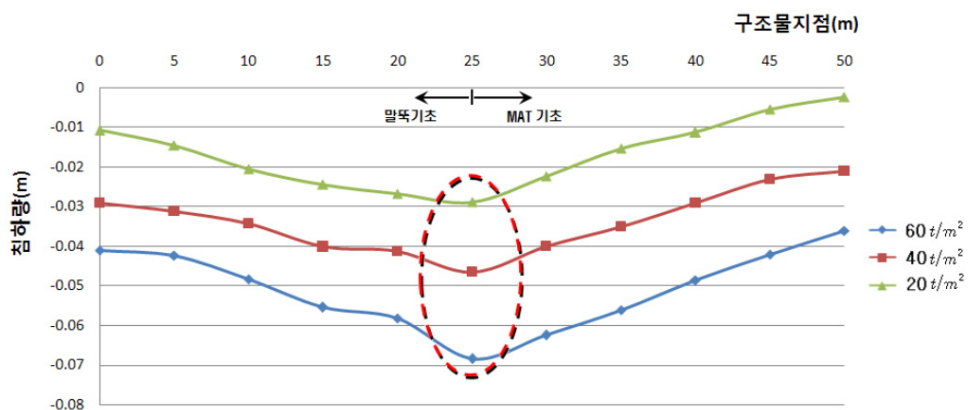


그림 10. 현장타설 말뚝 단계별 하중 - 침하 곡선

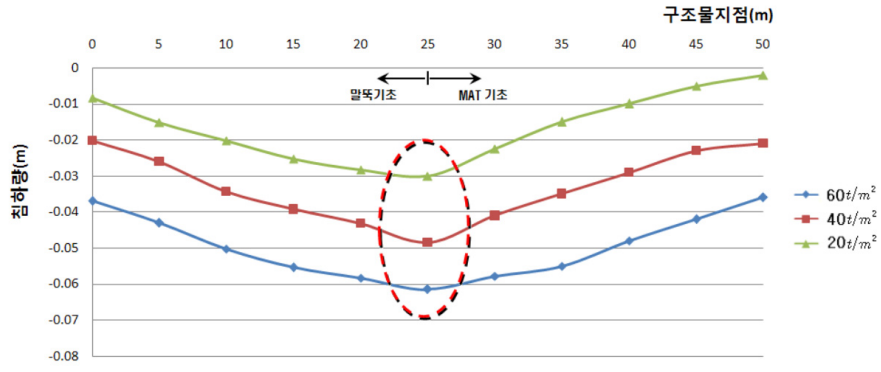


그림 11. 강관 말뚝 단계별 하중 - 침하 곡선

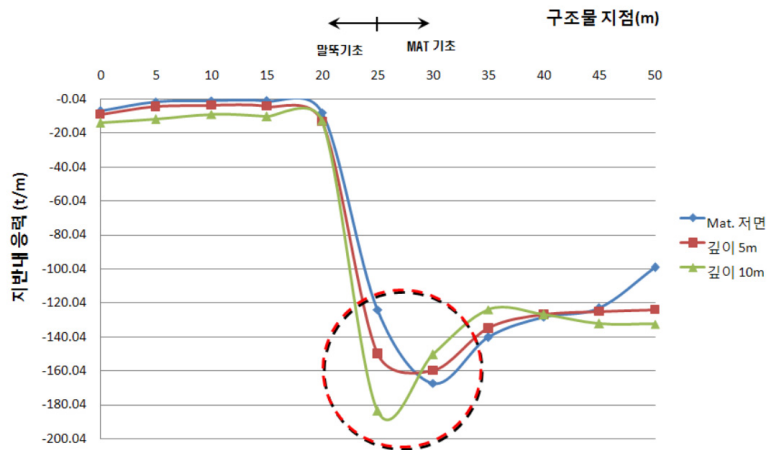


그림 12. 지반내 응력분포도

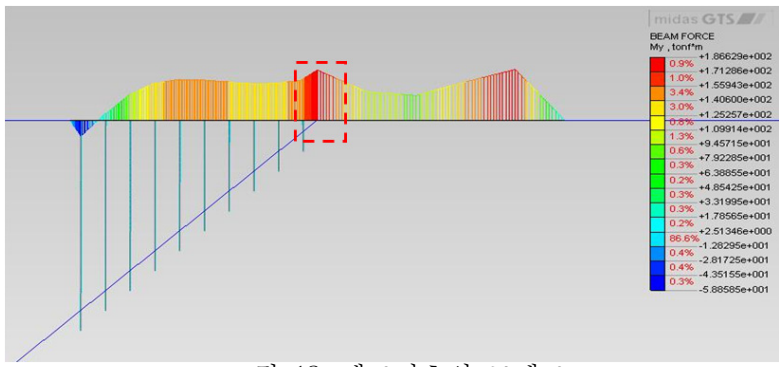


그림 13. 매트기초의 모멘트

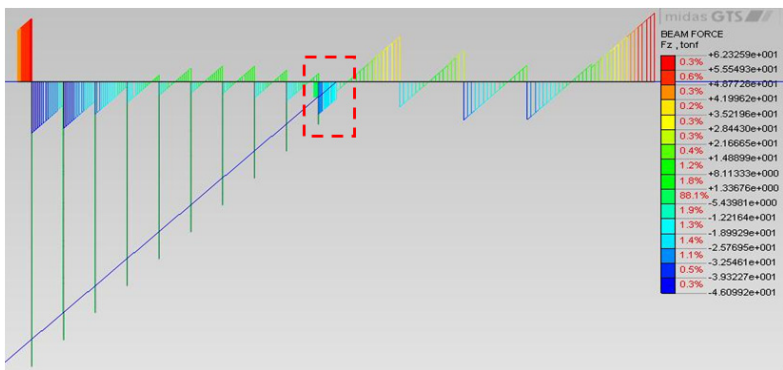


그림 14. 매트기초의 전단력

4. 결 론

본 연구에서는 동일구조물에서 직접기초와 말뚝기초가 혼용된 이질기초에 대한 수치해석을 실시하여 기초와 기초하부지반에 대한 침하 및 지지력 특성을 평가하였다. 총 3개의 이질기초 단면을 대상으로 기초별 지반거동과 지반내 발생하는 응력을 평가하였고 이를 토대로 유한요소해석을 수행한 결과를 종합하면 다음과 같다.

암반층과 토사가 접목하는 중앙 부분의 침하량이 PHC말뚝은 74.12mm, 강관말뚝은 68.45mm, 현장타설 말뚝의 경우에는 61.48mm으로 최대 침하량이 발생하였다. 기초의 중앙부에서 주변으로 갈수록 침하량은 점차적으로 감소되며 단계적으로 하중을 증가시켜 적용한 단계별하중의 침하량의 그래프 선도는 비슷한 양상을 보였다. 수치해석의 결과로 각 기초의 침하량 그래프에서 직접기초와 말뚝기초가 접목되는 중앙부에서의 침하량이 가장 크게 나타난 결과로서 기초현장에서 이질기초를 적용할 경우 직접기초와 말뚝기초가 접목되는 중앙부분에 있어서 안정성을 고려한 기초의 보강이 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 한국지반공학회(2002), “지반공학시리즈 No.4 깊은 기초”, 구미서관
- 2) 오세봉, 안대경, 최용규(1999), “국내 말뚝 재하시험에 대한 지반-말뚝계의 수치해석”, 한국해양 공학회지, 제 13권, 제 1호 pp.99~104
- 3) 정동진(2006), “마이크로파일 기초시스템의 하중분담 거동에 관한 수치해석 평가”, 단국대학교
- 4) 임해식(1999), “기초 지지력 변화구간에서의 기초안정성 검토방안”, 대한주택공사
- 5) 대한주택공사(1996), “토질 및 기초의 유형별 아파트건물의 침하관측 및 분석”, 대한주택공사
- 6) 건설교통부(1998), “도로교 표준시방서”, 건설교통부, pp.697~699
- 7) 이혁진, 김홍택(2006) “,암반에 근입된 현장타설말뚝의 주변부 거동에 영향을 미치는 변수분석을 위한 수치해석”, 대한 토목학회지, 제 26권, 제 6C호, pp.395~406
- 8) 이상현(2003), “대구경 현장타설 콘크리트말뚝의 지지력 산정에 대한 수치해석”, 서울산업 대학교
- 9) 이광용등(1998), “PHC PILE 의 허용지지력 결정에 관한 연구”, 대한토목학회지, 제 15권, 제 2호, pp.73~80