

수평반복하중 실험을 이용한 근입된 얇은 기초의 회전거동 메커니즘 평가

Evaluation of Rocking Mechanism for Embedded Shallow Foundation via Horizontal Slow Cyclic Tests

고 길 완¹ Ko, Kil-Wan 하 정 곤² Ha, Jeong-Gon
박 현 준³ Park, Heon-Joon 김 동 수⁴ Kim, Dong-Soo

Abstract

Rocking behavior of shallow foundation reduces the superstructure load during earthquake. However, because of deficiency of understanding of rocking mechanism and soil permanent deformation, it has not been applied to real construction. In this study, slow cyclic tests were conducted for embedded shallow foundations with various slenderness ratio via centrifuge tests. From the variation of earth pressure 'soil rounding surface' phenomenon which makes maximum overturning moment equal to ultimate moment capacity was observed. Rocking and sliding behavior mechanism was evaluated. Also, nonlinear behavior and energy dissipation increase as rotation angle increases. And ultimate moment capacity of embedded foundation is larger than that of surface foundation. Finally, adequate ultimate moment capacity can be suggested for seismic design through this study.

요 지

얇은 기초의 회전거동은 지진 시 상부 구조물의 지진하중을 줄이는 효과적인 방법으로 대두되고 있다. 그러나 회전 거동의 메커니즘에 대한 이해부족과 항복거동으로 인한 지반변형 때문에 시공에 적용되지 못하고 있다. 본 연구에서는 원심모형실험을 이용한 수평반복하중 실험을 통해 세장비가 다른 시스템의 근입된 얇은 기초의 회전거동 특성을 평가하였다. 실험결과를 통해 기초의 회전거동으로 인한 하부지반면의 원형현상을 관찰하였으며, 이로 인해 기초의 최대 전도모멘트가 기초의 극한 모멘트 지지력과 같아지는 것을 알 수 있었다. 기초 저면에서 관측된 토압변화를 통해 항복거동으로 인한 수평거동과 회전거동의 연결(coupling)과 분리(decoupling)현상을 볼 수 있었다. 또한 기초의 회전각이 증가할수록 지반의 비선형성과 에너지 감쇠가 커짐을 알 수 있었고, 근입된 기초의 극한 모멘트 지지력이 지표면에 놓인 기초의 극한 모멘트 지지력보다 더 커지는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 기초의 회전거동을 이용한 내진 설계 시 보다 정확하고 적절한 기초의 극한 모멘트 지지력을 제시할 수 있을 것이라 판단된다.

Keywords : Rocking foundation, Slow cyclic test, Shallow foundation, Ultimate moment capacity, Rocking mechanism, Embedded foundation

1 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., KAIST)

2 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., KAIST)

3 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구교수 (Member, Research Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., KAIST)

4 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., KAIST, Tel: +82-42-350-3619 Fax: +82-42-350-7200, dskim@kaist.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

기존의 얇은 기초 내진 설계는 기초의 큰 지지력을 확보하여 지진 시 기초 및 지반의 붕괴를 방지하는 방식으로 정적 상태에서 시스템의 안정성을 확보함으로써 동적 상태의 안정성도 확보하는 방법이다. 그러나 이러한 내진설계방식은 Fig. 1(a)와 같이 지진에너지가 시스템의 상부구조물에서 소산되도록 유도하여, 강진 시 상부구조물 기둥하부가 파괴되는 현상을 갖게 하며, Kobe 지진 등 여러 강진 시 피해사례에서 확인되었다(Mylonakis et al., 2006). Kobe 지진을 비롯한 강진 시 구조물의 파괴 사례를 통해 예기치 못한 강진에도 구조물의 안정성을 확보할 수 있는 내진설계의 필요성이 대두되고 있다. 이를 바탕으로 최근 수십 년간 강진 시 시스템의 안정성을 확보할 수 있는 새로운 내진설계기법이 연구되었다.

새로운 내진설계기법이란 Fig. 1(b)와 같이 지진 시 기초의 회전변형과 그로인한 하부지반의 항복을 통해 지진에너지를 소산시킴으로써 구조물의 안정성을 확보하는 설계기법이다. 이러한 내진설계기법은 지진에너지가 상부구조물이 아닌 하부지반의 변형 및 기초의 회전거동을 통해 소산되게 함으로써 지진 시 구조물에 가해지는 지진하중을 감소시키는 효과적인 기법으로 대두되고 있다(Anastasopoulos et al., 2009). 또한 기초의 회전거동은 기초의 크기가 작을수록 크게 발생되기 때문에, 새로운 내진설계기법은 시공 시 경제성과 지진 시 시스템의 안정성을 동시에 갖춘 설계기법이라 할 수 있다.

신개념 내진설계기법은 기초의 회전거동(rocking)에 의존하기 때문에 “Rocking foundation”설계기법이라 불리는데, 회전거동 이후에 발생하는 지반변형과 회전거

동의 메커니즘에 대한 이해 부족으로 실제 설계에 적용되지 못하고 있다. 이에 따라 최근 “Rocking foundation” 설계기법의 취약점을 극복하고, 시공성을 높이기 위해 다양한 연구들이 진행되고 있다. Anastasopoulos et al.(2012) and Kokkali et al.(2015)은 각각 1g와 50g상태에서 수평반복하중 실험을 통해 하부지반의 개량이 회전거동으로 인한 지반 변형을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 보였고, Deng et al.(2011)은 원심모형실험을 이용하여 하부지반의 설치된 Concrete Pad가 회전거동으로 인한 지반 변형을 저감시킬 수 있음을 보였다. Gajan et al.(2009)은 원심모형실험을 이용한 수평반복하중 실험과 진동대 실험을 통해 시스템의 세장비가 기초의 항복거동 시 발현되는 지배적인 거동, 즉 회전거동(rocking)과 수평거동(sliding)을 결정하는 중요한 요소임을 밝혔으며, 기초의 구조물에 가해지는 지진하중과 시스템의 세장비에 따른 지반변형을 평가하였다. 이러한 연구들은 대부분 지반위에 놓인 얇은 기초에 대해 수행되었다.

한편, Anastasopoulos et al.(2009)은 수치해석을 통해 기초의 항복거동이 지진하중을 효과적으로 저감시킬 수 있음을 보였고, Anastasopoulos et al.(2011)은 수치해석을 통해 다양한 안전율(FSv)을 갖는 시스템의 회전거동 특성을 관찰하였다. Gajan et al.(2005)은 원심모형실험을 이용한 동적실험에서 얇은 기초의 극한 모멘트지력이 지반변형과 구조물에 가해지는 지진하중을 결정하는데 중요한 요소임을 밝혔다. 이 또한 대부분의 연구가 세장비가 1이상인 시스템, 즉 항복거동 시 기초의 회전거동이 수평거동보다 지배적으로 나타나는 시스템에 대해서만 진행되었다.

그러나 대부분의 얇은 기초는 지반에 근입된(embedded)

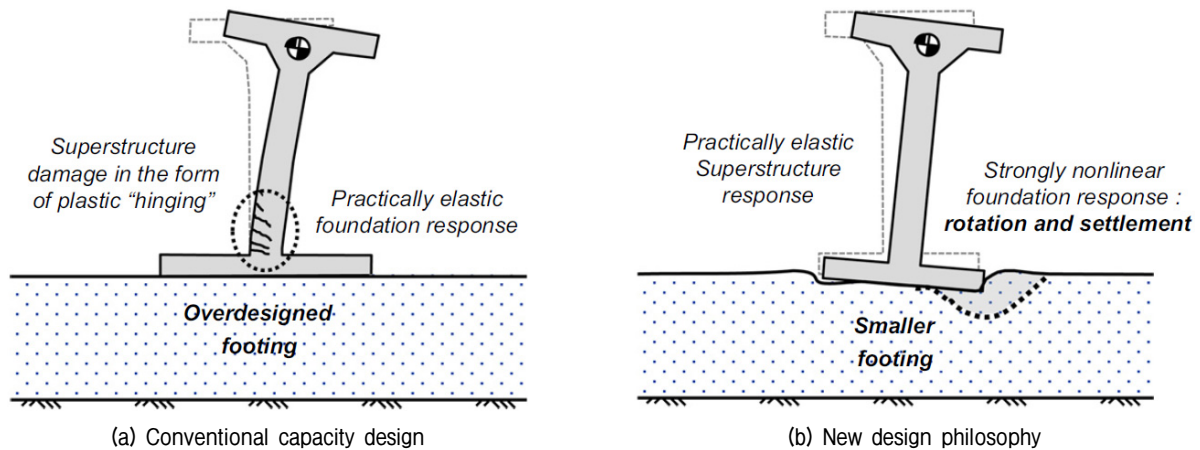


Fig. 1. Conventional capacity design versus new design philosophy (I. Anastasopoulos et al., 2012)

상태로 시공되며 지진 시 구조물에 가해지는 지진하중은 세장비가 1이상인 구조물뿐만 아니라, 세장비가 1미만인 낮은 구조물에 대해서도 적용되기 때문에 이를 반영할 수 있는 연구가 필요하다. 또한 얇은 기초의 회전거동 시 구조물에 가해지는 지진하중과 지반변형을 결정하는 중요한 요소인, 기초의 극한 모멘트 지지력을 근입된 조건에서 평가하는 것과 극한 모멘트 지지력이 발현되는 메커니즘 연구도 필요하다.

따라서 본 연구에서는 세장비가 다른 3가지 근입된 기초에 대해 원심모형실험을 통한 수평반복하중 실험을 수행하였다. 실험의 주요 변수는 구조물의 높이와 기초 폭의 비인 세장비로 이는 동일한 기초에 높이가 다른 구조물을 사용함으로써 구현하였다. 또한 지반은 실트질이 포함된 새만금(SM)흙을 상대밀도 40%로 느슨하게 조성하였다. 본 실험의 결과를 바탕으로 근입된 기초의 회전거동 시 토압변화를 통한 회전거동의 메커니즘을 관찰하고, 근입된 기초의 극한 모멘트 지지력을 평가하였다.

2. 얇은 기초의 극한 모멘트 지지력(Ultimate moment capacity)

지진 시 상부구조물에서 발생한 지진하중에 의해 얇은 기초는 모멘트 힘을 받게 되며, 그로인해 기초는 회전하게 된다. 기초가 회전함에 따라 기초 하부지반면은 동글게 변화하며 이러한 변형을 지반의 원형현상(soil surface rounding)이라 한다(Fig. 2). 지반의 원형현상이 발생하면서 지반면의 곡률이 증가하고, 이로 인해 기초와 지반의 접촉면이 한쪽 끝으로 이동하며 점점 감소한다. 기초의 회전이 계속될수록 접촉면적은 감소하다가 특정한 값에 수렴하게 되며, 이 상태를 임계상태(critical state)라 한다. 임계상태에서의 기초와 지반면의 접촉면적은 임계접촉면적(critical contact area, A_c)이라 하며, 임계접촉면적은 상부하중을 지탱할 수 있는 지반의 최

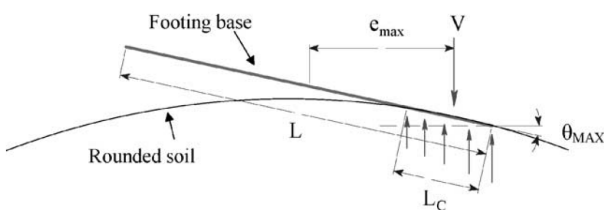


Fig. 2. Illustration of the geometry and contact of the rigid footing with deformed soil surface (S. Gajan et al., 2005)

소 면적이다(Deng et al., 2011). 또한 임계상태에서 지표면에 놓인 기초가 받는 전도모멘트는 기초의 극한 모멘트 지지력(Ultimate moment capacity, M_{ult})과 같으며, 극한 모멘트 지지력의 식은 다음과 같다.

$$M_{ult} = \frac{V \times L}{2} \left[1 - \frac{A_c}{A} \right] \quad (1)$$

여기서 V : 지반에 작용하는 시스템의 전체하중, L : 기초의 폭, A_c : 임계 접촉 면적, A : 기초면적

이때 기초의 너비가 일정하다는 가정을 통해 임계 접촉 면적과 기초 면적의 비를 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$\frac{A_c}{A} = \frac{L_c \times B}{L \times B} = \frac{L_c}{L} \propto \frac{1}{FS_V} \quad (2)$$

여기서 L_c : 임계 접촉 폭, B : 기초의 너비, FS_V : 시스템의 수직 안전율

Gajan et al.(2005)와 Deng et al.(2011)은 극한 모멘트 지지력을 결정하는 L_c/L 값은 수직 안전율(FS_V)에 반비례하며 포편적인 극한 지지력 식을 통해 구할 수 있음을 밝혔다. 안전율이 상대적으로 큰 시스템, 즉 지반변형이 작게 발생하는 시스템은 식 (1)과 (2)에 의해 보다 큰 극한 모멘트 지지력을 갖는다. 따라서 극한 모멘트 지지력은 회전거동 시 지반변형을 결정하는 중요한 요소이다.

한편 Kim et al.(2015)은 지진 시 구조물 상부에 가해지는 지진하중으로 인한 기초의 전도 모멘트는 극한 모멘트 지지력을 넘을 수 없음을 밝혔다. 즉 극한 모멘트 지지력이 약한 시스템은 상부구조물의 지진하중을 줄일 수 있는 장점이 있지만, 지반 변형을 많이 발생시키는 단점이 있다. 반대로 극한 모멘트 지지력이 강한 시스템은 상부구조물의 지진하중을 크게 하는 단점이 있지만, 지반 변형을 줄일 수 있는 장점이 있다. 이와 같이 극한 모멘트 지지력의 조건에 따라 지진 시 구조물의 지진하중과 지반변형은 상반되는 결과를 나타낸다. 이러한 영향을 고려하여 설계자들에게 적절하고 정확한 얇은 기초의 극한 모멘트 지지력 값을 제시해주는 것이 중요하다. 또한 기존 연구에서 제시한 얇은 기초의 극한 모멘트 지지력 식 (1)은 지표면에 놓인 기초에 해당한다. 그러나 실제 얇은 기초는 대부분 근입된 상태로 시

공된다. 따라서 본 연구에서는 근입된 얇은 기초의 극한 모멘트 지지력을 평가하였다.

3. 원심모형실험 모델

본 연구에서는 지반의 자중에 의한 흙의 응력상태를 재현하기 위해 원심모형실험을 수행하였다. 원심모형시험기는 KAIST에 위치한 KOCED 지오센트리피지 실험센터의 원심모형실험 시설을 이용하였다. 원심가속도 20g 상태에서 실험을 진행하였으며, 이후에 표현된 모델 제원 및 결과해석은 상사법칙(Scaling law)을 적용하여 20g 원심가속도 수준에 대한 원형 수준(prototype scale)으로 표기하였다(Schofield, 1980). 본 연구에 사용된 원심모형시험기는 회전반경이 5m이고, 최대 용량이 240g-tons로 최대 2400kg의 모형을 100g 상태까지 가속할 수 있는 장비이다(Kim et al., 2013).

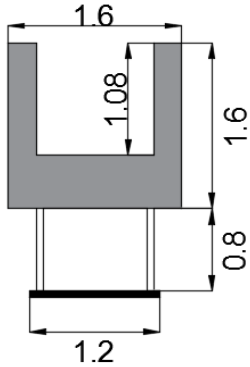
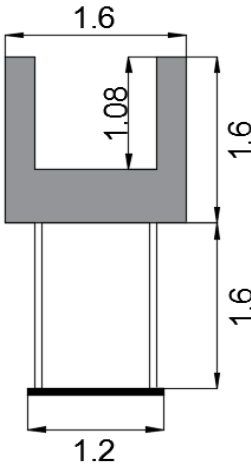
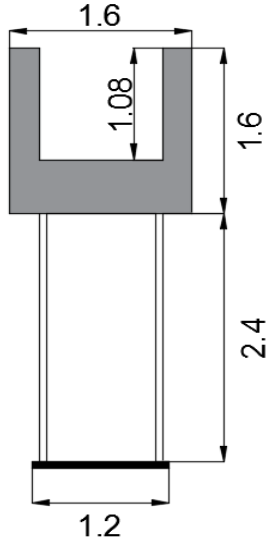
3.1 단자유도 구조물 및 얇은 기초 모델링

항복거동 시 발현되는 얇은 기초의 회전거동과 수평거동은 시스템의 세장비(h/L)에 의존한다. 세장비(h/L)는 시스템의 질량중심이 위치한 높이(h)를 기초의 폭(L)로

나눈 값이다. 세장비(h/L)가 1보다 작은 시스템은 항복거동 시 회전거동보다 수평거동이 지배적이며, 반대로 세장비가 1보다 큰 시스템은 항복거동 시 회전거동이 지배적이다(Gajan et al., 2009). 따라서 본 연구에서는 시스템의 세장비를 조절하기 위하여 높이가 다른 3가지 단자유도 구조물을 사용하였다. 단자유도 구조물 각각의 모델 제원은 Table 1과 같으며, 모두 강철로 제작되었다. 제작된 실험체는 단자유도 모델을 재현하기 위해 구조물의 머리(top)에 질량이 집중되게 하였다. 단자유도 구조물의 머리는 U자 형태를 띠고 있는데, 이는 구조물에 수평반복하중 재하 시 하중 재하를 보다 용이하게 하기 위함이다.

한편, 항복거동 시 발생하는 지반변형은 기초의 극한 모멘트 지지력(M_{ult})에 의존하며, 극한 모멘트 지지력(M_{ult})은 기초의 면적(A)과 기초와 지반면의 임계 접촉 면적(critical contact area, A_c)의 비(A/A_c)에 의존한다. 본 연구에서는 세장비에 따른 지반변형을 관찰하기 위하여 적절한 지반변형을 야기할 수 있는 A/A_c 값을 10으로 산정하고, 그에 따른 얇은 기초의 크기를 정하였다(Gajan et al., 2008). 얇은 기초 모델로는 모델 수준(model scale)으로는 0.25kg, 원형 수준(prototype scale)으로는 2000kg의 정사각 알루미늄 기초를 사용하였으며, 3가지 높이

Table 1. Properties of SDOF structure models (prototype scale)

Structure models	SDOF1	SDOF2	SDOF3
Dimension (m)			
Effective mass (ton)	21.27	21.71	22.13
Effective height (h) (m)	1.36	2.1	2.8
Footing length (L) (m)	1.4	1.4	1.4
Slenderness ratio (h/B)	0.97	1.5	2
Effective stiffness (kN/m)	56615	13372	3881

가 다른 단자유도 구조물에 동일하게 사용하였다(Fig. 3). 얇은 기초와 단자유도 구조물은 볼트로 결합시켰으며, 두 실험체는 수평반복하중 실험 중 강체(rigid)거동한다고 가정하였다.

3.2 지반 모델링

지반조성에는 실트질이 포함된 사질토(SM)인 건조한 새만금 흙을 사용하였다. 새만금 흙의 균등계수(C_u)는 2.11이며, 평균입경(D_{50} , mm)은 0.080이다. 기초의 회전거동으로 인한 지반변형을 극대화하기 위하여 지반은 40%의 느슨한 상대밀도로 결정하였다. 40%의 상대밀도에 해당하는 건조 단위중량(γ_d)은 $1.3t/m^3$ 으로, 지반조성을 위해 토조의 부피에 해당하는 지반의 질량을 계산하고, 이에 맞추어 층 다짐으로 조성하였다. 지반모델은 20cm의 높이, 원형기준으로 4m의 지반을 모사하였다. 상대밀도 40%로 조성된 지반의 마찰각은 37.3° 로, 새만

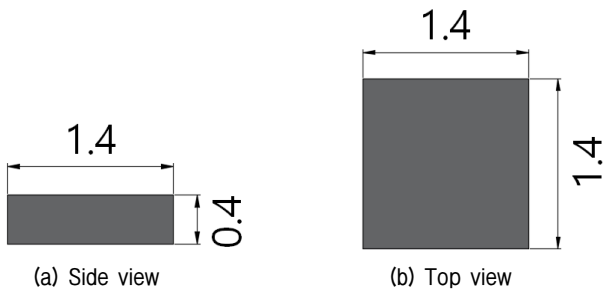


Fig. 3. Sectional view of shallow foundation (prototype scale, dimension: m)

금 흙의 불규칙한 입자표면에 의해 상대적으로 높은 마찰각을 가지며, 이는 본 연구에 앞서 수행된 기초모델의 수직재하 실험을 통해 얻은 극한지지력을 Meyerhof(1951) 방정식으로 역계산하여 구하였다. 지반조성을 위해 사용된 토조는 폭, 너비, 높이가 각각 99.5cm, 99.5cm, 47.5cm인 사각 토조를 사용하였다(Fig. 4).

3.3 수평반복하중 실험(Slow cyclic test)

최근 수십 년간 “Rocking Foundation”에 관한 실험적 연구는 크게 동적실험과 수평반복하중 실험을 통해 연구되었다. 수평반복하중 실험은 느린 주기의 수평변위를 실험체에 반복적으로 가하는 실험이다. 느린 주기의 변위가 구조물 상부에 가해지기 때문에 기초와 구조물이 고정된 상태로 동일하게 거동하게 되므로 실험체 거동 해석 시 구조물의 관성력을 배제할 수 있다. 또한 수평반복하중 실험은 관성력을 배제하기 때문에 구조물에 가해지는 하중이 기초의 거동에 직접적으로 미치는 영향을 관찰 할 수 있으며, 기초의 회전거동 및 수평거동의 메커니즘을 이해하기에 적절하다. Gajan et al.(2005)과 Anastasopoulos et al.(2011)은 각각 원심모형실험과 수치해석을 통해 수평반복하중 실험으로 지진 시 얇은 기초의 회전거동을 예측할 수 있다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 근입된 얇은 기초의 회전거동을 평가하기 위해 수평반복하중 실험을 수행하였다.

본 실험에서는 수평반복하중 실험을 변위제어(displacement control)방식으로 수행하였다. 세장비가 다른 각각

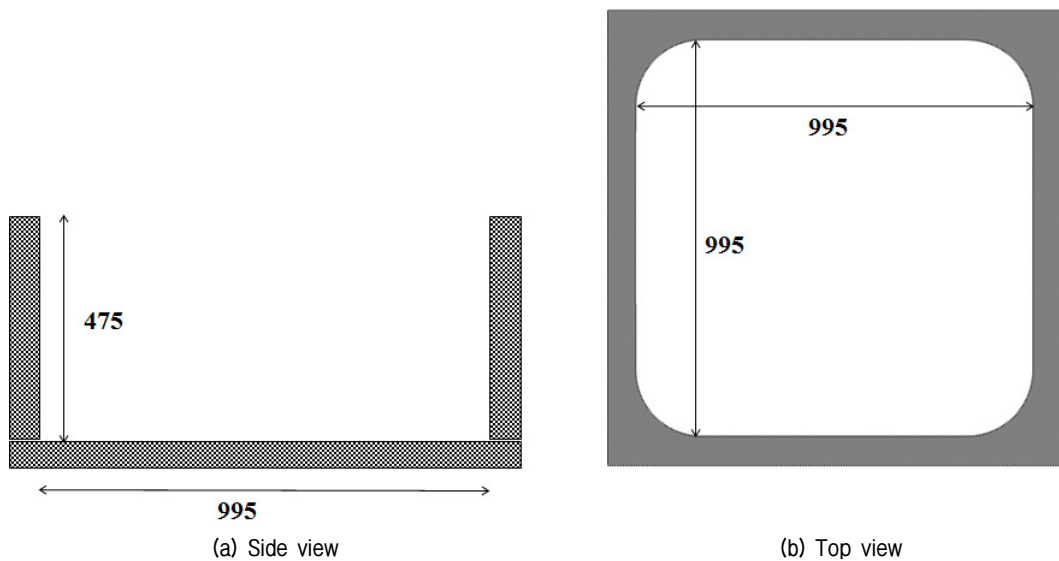


Fig. 4. Sectional view of rectangular box (dimension: mm)

의 시스템에는 동일한 변위하중단계를 적용하였다. Housner (1963)의 회전거동 이론에 따라 구조물의 항복변위(δ_R)를 기초크기의 1/2(0.7m)로 정하고, 구조물 상부에 항복 변위의 5%, 10%, 20%, 30%, 50%를 단계별로 5번 총 25번 가하였다(Fig. 5). 구조물 상부에 항복변위의 50% 변위를 가함으로써 지진 시 시스템이 나타낼 수 있는 극한상태까지 모사하였다. 각각의 변위하중 단계별 속도는 0.14mm/s(항복변위의 5% 변위단계), 0.28mm/s(항복 변위의 10% 변위단계), 0.56mm/s(항복변위의 20% 변위단계), 0.84mm/s(항복변위의 30% 변위단계), 1.4mm/s(항복변위의 50% 변위단계)를 가하였으며, 단계별 속도에 따른 반복하중의 주기는 모델 수준으로 50초, 원형 수준으로 1000초로 상대적으로 느린 주기로 결정하였다. 해당 주기는 Anastasopoulos et al.(2012)이 수평반복 하중 실험 시 구조물의 관성력이 발생하지 않도록 사용한 주기이다.

3.4 실험 단면 및 계측

원심가속도 20g 수준에서 수행된 실험의 단면 및 센서 구성은 Fig. 6과 같다. 조성된 지반은 기초 크기의 약 2.8배로 모델 수준으로 20cm, 원형 수준으로 4m에 해당하며, 얇은 기초는 해당 기초의 높이인 0.4m만큼 근입되었다. 수평반복하중 재하를 위하여 실험체에 맞는 덮개를 제작하였으며, 액추에이터와 덮개 사이에는 하중 계측계(load cell)를 설치하였다. 하중 계측계를 통해 얻은 데이터는 얇은 기초에 가해지는 모멘트를 계산하는데 이용하였다. 또한 기초의 회전각을 구하기 위하여 구조물의 양 끝단에 변위 센서(LVDT)를 설치하였다. 회전각은 2개의 변위 센서 값의 차($L_1 - L_2$)를 기초의 폭(L)으로 나눠주고, 해당하는 값($(L_1 - L_2)/L$)의 \tan^{-1} 를

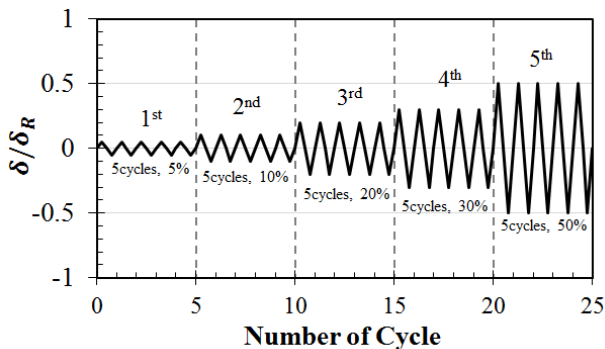


Fig. 5. Cyclic displacement stages normalized by toppling displacement δ_R

취해주는 것으로 구하였다. 그리고 회전거동으로 인한 토압변화를 보기위하여 얇은 기초의 중앙, 끝단, 수평방향에 토압계(earth pressure)를 설치하였다.

4. 얇은 기초의 회전거동 메커니즘 평가

극한 모멘트 지지력은 지진 시 구조물에 가해지는 지진하중과 지반 변형을 결정하는 중요한 요소이다. 또한 극한 모멘트 지지력은 지반의 임계상태에서 발현되며, 지반의 임계상태는 기초의 회전에 의한 지반의 원형현상을 통해 발생한다. 따라서 4장에서는 기초의 토압 변화를 통해 기초의 회전에 의한 지반의 원형현상을 기술하였다. 또한 지반에 근입된 얇은 기초의 회전거동과 수평거동의 발현 메커니즘을 관찰하였다.

4.1 지반의 원형 현상(Soil surface rounding)

Fig. 7은 SDOF2 모델의 토압 변화를 수평반복하중의 1단계(Fig. 7(a), 항복변위의 5% 변위하중)와 3단계(Fig. 7(b), 항복변위의 20% 변위하중)에 대하여 작성한 그림이다.

4.1.1 수평반복하중의 1단계(Fig. 7(a))

(i) A단계

A단계는 첫 변위하중이 작용하여 기초의 끝단과 옆면 토압이 증가된 상태이다. Fig. 7(a)의 A와 같이 지반의 원형현상이 일어나지 않아 얇은 기초의 중앙부분은

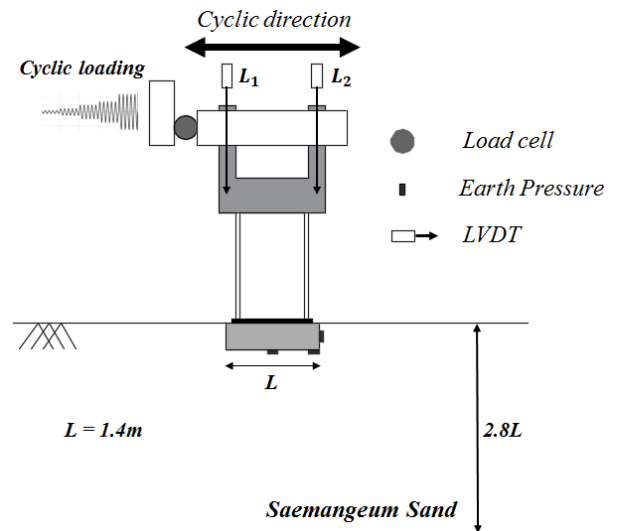


Fig. 6. Sectional view of slow cyclic tests setup

아직 지반과 접촉해 있다. 따라서 기초의 회전으로 인한 중앙토압 감소가 크지 않음을 알 수 있다.

(ii) B단계

B단계는 기초가 다시 중앙으로 돌아온 상태이다. 따라서 기초 중앙부분의 토압은 약간 증가했음을 알 수 있다. 그러나 A단계에서의 회전으로 인한 하부지반 변형이 기초 끝단 토압의 감소를 야기했음을 알 수 있다.

(iii) C단계

C단계는 A단계의 반대편으로 기초가 회전한 상태이며, B단계보다 중앙토압이 감소했음을 알 수 있다. 그러

나 A단계의 중앙토압과 비교해봤을 때 C단계의 중앙토압이 더 크음을 알 수 있다. 이는 Fig. 7(a)의 A와 C같이 기초가 완전한 대칭으로 회전하지 않고, 반복하중의 첫 방향보다 더 작게 회전했기 때문이다. 즉 기초가 첫 방향으로 회전하면서 지반의 변형을 형성하고, 그로 인해 A단계로 갈 때보다 B단계로 돌아올 때 기초의 회전에 필요한 상부의 구조물의 수평변위가 길어진 것이다. 따라서 C단계에서 기초가 A단계만큼 회전하지 못하고 기초의 중앙부분이 지반과 더 강하게 맞닿아 있다. 이 결과는 지표면에 놓인 기초의 수평반복하중 실험결과를 기술하였던 Kokkali et al.(2015)과 Panagiotidou et al.(2012)의 결과와 일치한다.

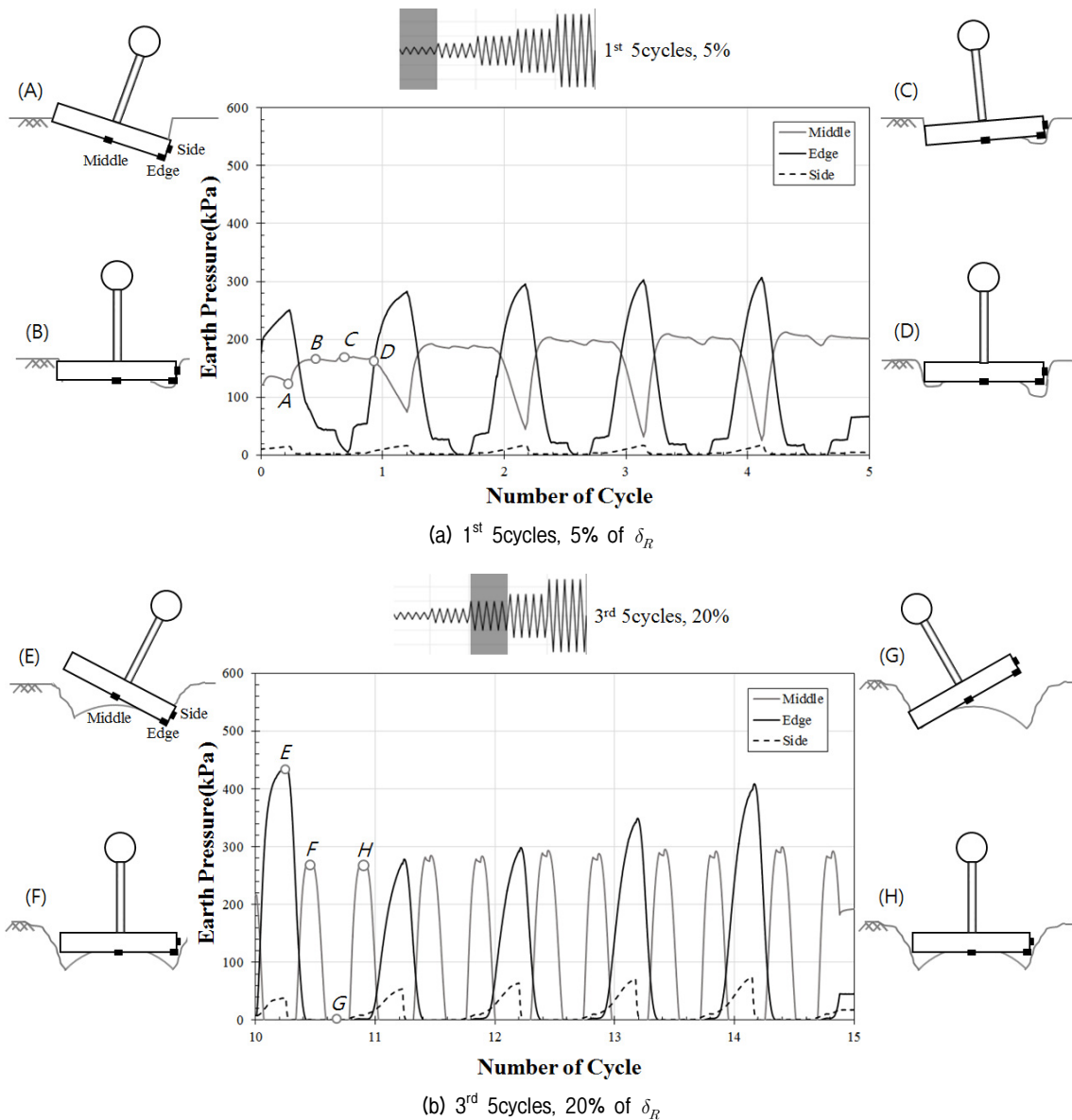


Fig. 7. Earth pressure variation of shallow foundation and rounded soil surface (model: SDOF2)

(iv) D단계

D단계에서는 A단계에 의해 변형된 하부지반에 의해 기초 끝단 토압이 회전을 시작하기 전의 토압 보다 더 감소했음을 알 수 있다. 또한 변위하중이 증가하지 않아도 하중횟수가 늘어남에 따라 중앙토압의 감소현상이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 지반의 곡률이 증가한다는 것을 말해준다. 그러나 원형현상의 초기단계이기 때문에 이때의 기초의 전도 모멘트는 극한 모멘트 지지력 값보다 작은 값을 갖는다.

4.1.2 수평반복하중의 3단계(Fig. 7(b))

(i) E단계

3번째 변위하중 단계의 E단계를 보면 명확하게 기초 하부지반면의 원형현상이 많이 일어났음을 알 수 있다. Fig. 7(b)의 E처럼 곡률이 증가된 지반 표면으로 인해 한 쪽방향으로 회전이 진행됐을 때 기초의 중앙은 지반과 완전하게 떨어지게 되어, 기초 중앙토압은 존재하지 않게 되고 이때의 기초 끝단 토압은 최댓값을 갖게 된다.

(ii) F단계

F단계에서도 Fig. 7(b)의 F와 같이 기초가 중앙에 놓였을 때 기초 하부지반면의 원형현상으로 인해 기초 끝단 토압이 존재하지 않음을 알 수 있다.

(iii) G, H단계

G단계 역시 E단계와 같이 기초 하부지반면의 원형현상으로 인해 기초 중앙토압이 존재하지 않음을 알 수 있으며, H단계 또한 F단계와 같이 기초 하부지반면의 원형현상으로 기초가 수평상태를 유지하였을 때 기초 끝단 토압이 존재하지 않게 된다.

4.1.1과 4.1.2를 통해 기초 하부지반면의 원형현상은 기초의 회전으로 인해 발생됨을 알 수 있다. 따라서 설계 시 하부지반의 개량을 통해 기초 하부지반면의 원형현상의 정도를 조절할 수 있다면 “Rocking foundation” 설계의 취약점인 지진 시 지반의 영구변형을 줄일 수 있을 것이다.

4.2 얇은 기초의 회전 및 수평거동 메커니즘 평가

Fig. 8은 SDOF2 모델의 토압 변화를 수평반복하중의 1단계(Fig. 8(a), 항복변위의 5%변위하중), 4단계(Fig. 8(b),

항복변위의 30%변위하중) 그리고 5단계(Fig. 8(c), 항복변위의 50%변위하중)에 대하여 작성한 그림이다. 그래프의 점선은 수평토압의 최댓값이 발생하는 위치를 나타낸 것이다.

Fig. 8(a)는 수평반복하중 첫 번째 단계인 항복변위의 5%변위하중이 모델에 가해질 때의 그래프이다. 그래프의 점선을 통해 알 수 있듯이 초기 단계에서는 기초의 수평토압의 최댓값과, 기초 끝단에 놓인 토압의 최댓값이 동시에 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 8(a)의 그래프 점 A와 점 B까지 동시에 토압이 증가하는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 기초의 초기 항복거동에서는 기초의 수평거동과 회전거동이 동시에 발생되며 두 거동이 서로 연결(coupling)되어 있음을 말한다.

한편 Fig. 8(b)는 수평반복하중의 4번째 단계인 항복변위의 30%변위하중이 모델에 가해졌을 때의 그래프이다. 수평반복하중의 한 주기(cycle)안에서 기초의 중앙토압의 최댓값이 두 번 발생하는 것을 토대로, 수평반복하중 3번째 단계이후에는 지반의 원형현상이 완전히 이루어졌음을 알 수 있다. Fig. 8(b)의 점 C는 기초의 수평토압의 최댓값을 나타낸다. Fig. 8(a)와 마찬가지로 점 C까지 기초의 수평토압과 기초 끝단에 놓인 토압이 동시에 증가하며, 기초의 회전거동과 수평거동이 서로 연결되어 발생됨을 관찰할 수 있다. 그러나 Fig. 8(a)와 달리 기초의 수평토압의 최댓값을 나타내는 지점에서 기초 끝단토압의 최댓값이 발생되지 않았다. 기초 수평토압의 최댓값이 발생된 후 수평토압이 감소하면서 기초 끝단에 설치된 토압의 최댓값이 발생되었다. 이는 회전거동과 수평거동이 연결되어 발생되다가 수평거동이 회전거동만 발생된다는 것을 의미한다. 해당 현상의 발생 원인은 수평거동이 발생되면서 기초의 수평면에 놓인 지반의 경화현상(hardening)을 일으키고, 그로 인해 수평거동이 억제되면서 시스템에 가해진 에너지가 오로지 기초의 회전거동을 야기하기 때문으로 판단된다.

Fig. 8(c)는 수평반복하중의 마지막 단계인 항복변위의 50%변위하중이 모델에 가해졌을 때의 그래프이다. Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)의 결과처럼 반복하중의 초기 거동은 유사하다. 기초 끝단에 놓인 토압의 초기 최댓값인 점 E까지 기초의 수평토압과 끝단 토압이 같이 증가하는 것이다. 이를 바탕으로 5번째 수평반복하중단계의 초기거동 역시 회전거동과 수평거동이 서로 연결되어 발생함을 관찰할 수 있다. 그러나 점 E이후 점 F까지 기초 끝단에 놓인 토압은 감소하면서 기초의 수평토압은 최

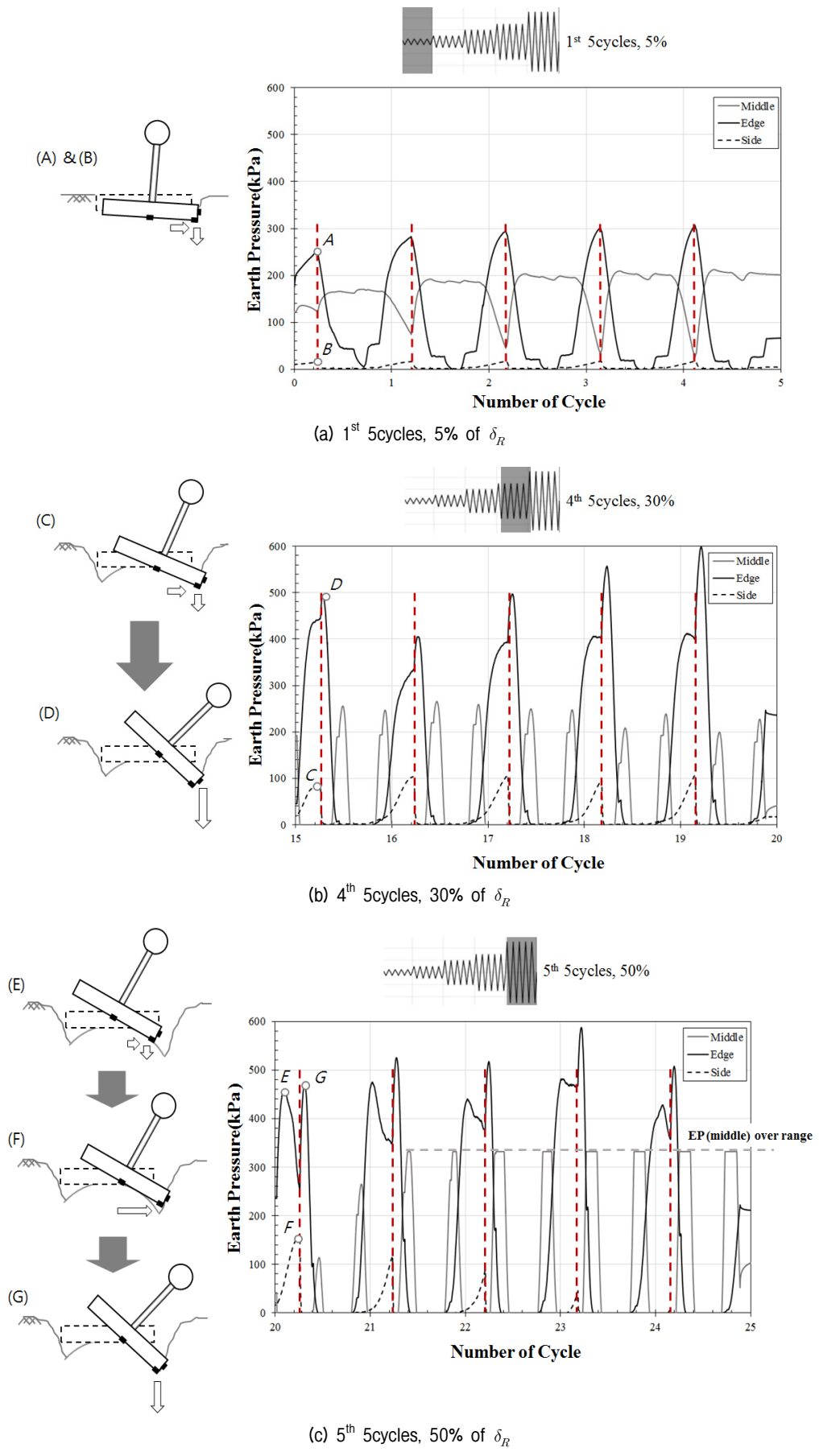


Fig. 8. Earth pressure variation of shallow foundation and rocking, sliding behavior mechanisms (model: SDOF2)

댓값을 나타낸다. 즉, 회전거동이 억제되고 수평거동이 크게 발생하는 현상이 나타나는 것이다. 이는 지반의 원형현상이 지속되면서 해당 지반의 경화현상(hardening)으로 더 이상 지반이 더 큰 곡률을 형성할 수 없게 되고 그로인해 기초의 회전거동이 억제되는 것으로 판단된다. 그 이후 점 G까지는 기초의 수평토압이 줄어들면서 기초 끝단에 놓인 토압이 최댓값을 갖게 된다. 이러한 현상의 이유는 다음 두 가지의 이유가 복합적으로 작용하기 때문이라고 판단된다. 첫 번째는 점 F에서 발생한 기초의 수평거동으로 인해 미처 지반의 원형현상이 진행되지 못한 지반까지 기초가 거동하여 회전현상을 일으키는 것이다. 두 번째는 Fig. 8(b)의 설명과 같이 기초의 수평거동의 증가로 인해 수평지반의 반발력이 증가하고 이를 토대로 시스템에 작용한 에너지가 수평거동에서 회전거동을 더 발전시키는 쪽으로 작용했다는 것이다. 또한 반복하중 횟수가 증가함에 따라 기초의 수평토압이 감소하며 사라짐을 볼 수 있다. 이는 수평거동의 증가로 지지력 이상의 하중이 수평지반에 가해졌을 때 지반이 견디지 못하고 소성(yielding)변형을 일으키는 것 때문으로 판단된다.

본 4장에서는 기초의 토압변화를 통해 기초의 수평거동과 회전거동은 초기에는 연결(coupling)되어 발전되며, 수평반복하중이 진행될수록 하중크기와 작용된 횟

수에 따라 수평거동과 회전거동이 각각 독립적으로 분리(decoupling)되어 발전되는 것을 관찰하였다. 하중단계에 따라 기초의 수평거동과 회전거동이 발전되는 메커니즘은 시스템의 세장비에 관계없이 동일하였다. 이를 바탕으로 수평거동이 우세한 시스템(시스템의 세장비 < 1)의 경우 수평거동 억제를 통해 회전거동을 보다 많이 발전시키는 “Rocking foundation”설계를 할 수 있을 것이다.

5. 수평하중단계에 따른 모멘트-회전각 특성

Fig. 9는 SDOF2 모델의 수평반복하중 단계별 기초에 가해지는 전도모멘트를 기초의 회전각에 대해 그래프를 그린 것이다. 그래프에 사용된 수치는 모두 원형모델(20g)에 해당하는 수준으로 환산한 것이다. 식 (1)을 통하여 해당 모델이 지표면에 놓였을 때의 극한 모멘트 지지력을 구하고 이를 빨간 점선으로 도시하였다.

초기 변위하중 단계(항복변위의 5% 변위하중)에서 모멘트-회전각 이력곡선(hysteresis loop)은 시스템의 선형성을 보여준다. 또한 탄성거동에 가까운 거동을 보이므로 인해 지반으로 소산되는 에너지 감쇠(damping)가 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 변위하중의 크기가 증가할수록 시스템의 비선형성과 비탄성거동은 커짐을 알

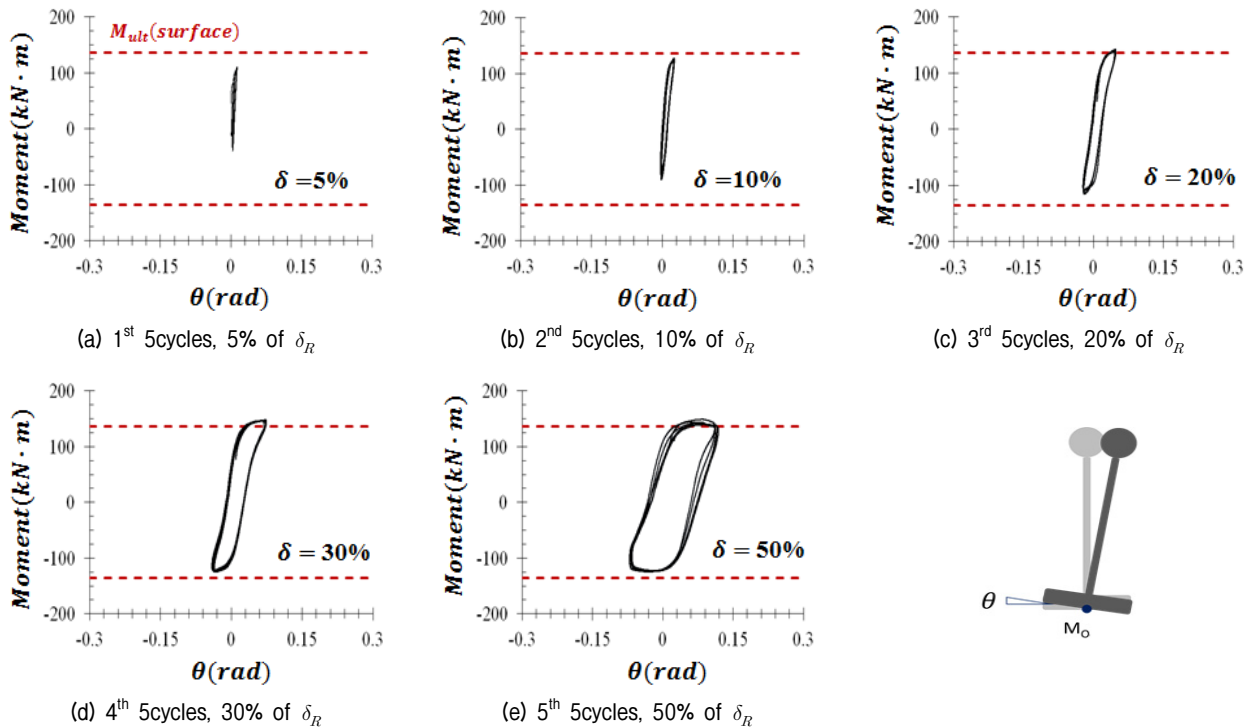


Fig. 9. Moment-rotation curve for each cyclic amplitude (model: SDOF2)

수 있다. 즉, 기초의 회전각이 커짐에 따라 기초의 회전 강성(rocking stiffness)이 감소하고 지반으로 소산되는 에너지 감쇠가 커진다는 것이다. 특히 4장에서 관찰하였듯이 3번째 변위하중단계를 기점으로 지반의 원형현상이 완전히 이루어지면서 기초의 전도 모멘트는 극한 모멘트 지지력에 도달하게 되고, 그 이후로 비선형성과 에너지 감쇠가 보다 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 지반의 원형현상으로 인해 상부구조물의 에너지가 지반에서 소산되며 이는 “Rocking foundation” 설계 기법이 상부구조물의 지진하중을 효과적으로 줄일 수 있음을 말한다.

또한 모든 변위하중 단계의 모멘트-회전각 이력곡선에서 기초의 초기거동방향(양의 회전각)으로 더 큰 모멘트 하중이 발생한다. 이는 4.1절에서 언급하였듯 기초의 극한모멘트 지지력은 수평반복하중의 방향성에도 의존한다는 것을 말해준다.

6. 근입된 기초의 극한 모멘트 지지력 평가

6.1 근입된 기초의 극한 모멘트 지지력 증가현상

Gajan et al.(2008)은 근입된 기초의 극한 모멘트 지지

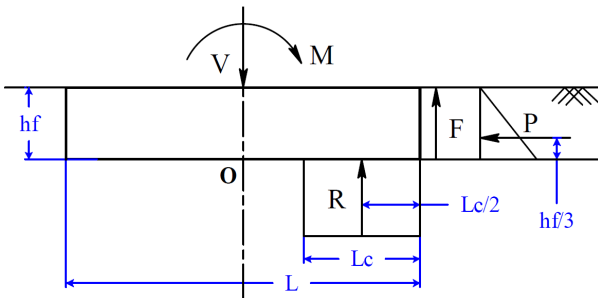


Fig. 10. Embedded footing-soil contact area and the forces and reactions (S. Gajan et al., 2008)

력이 지표면에 놓인 기초의 극한 모멘트 지지력보다 크 을 확인하였다. Fig. 10은 Gajan et al.(2008)이 근입된 기초의 극한 모멘트 지지력을 설명하기 위해 사용한 그림이다. 기초가 지표면에 놓이지 않고 지반에 근입된 상태로 회전한다면, 임계 접촉 길이(L_c)에서 수직반발력이 작용할 뿐만 아니라 기초의 수평방향에서 기초와 지반의 마찰력(F)과 수평지반의 토압(P)도 작용한다. 이는 반시계방향으로 작용하는 근입된 기초의 극한 모멘트 지지력을 향상 시킨다. 식 (1)이 지표면에 놓인 기초의 극한모멘트 지지력이라면 근입된 기초의 극한 모멘트 지지력은 다음 식과 같다.

$$M_{ult(embedded)} = \frac{V \times L}{2} \left[1 - \frac{L_c}{L} \right] + F \times \frac{L_c}{2} + P \times \frac{h_f}{3}$$

$$= M_{ult(surface)} + F \times \frac{L_c}{2} + P \times \frac{h_f}{3} \quad (3)$$

여기서 V : 지반에 작용하는 시스템의 전체하중, L : 기초의 폭, L_c : 임계 접촉 길이, F : 수평지반과 기초의 마찰력, P : 수평지반의 토압, h_f : 기초의 근입 깊이

6.2 모멘트-회전각 곡선을 통한 극한 모멘트 지지력 평가

Fig. 11(a), 11(b), 11(c)는 각각 SDOF1, SDOF2, SDOF3의 모멘트-회전각 이력곡선이다. 점선은 기초가 지표면에 놓였을 때의 극한모멘트 지지력을 나타낸 것이다. 기초의 회전이 진행될수록 기초에 가해지는 전도모멘트 값이 증가하나, 기초의 회전각이 일정수준 이상의 값을 갖게 되면 기초의 전도모멘트가 일정해짐을 알 수 있다. 이는 기초가 임계상태(critical state)에 도달하고 그에 따른 극한 모멘트 지지력을 갖기 때문이다. 그리고 근입된

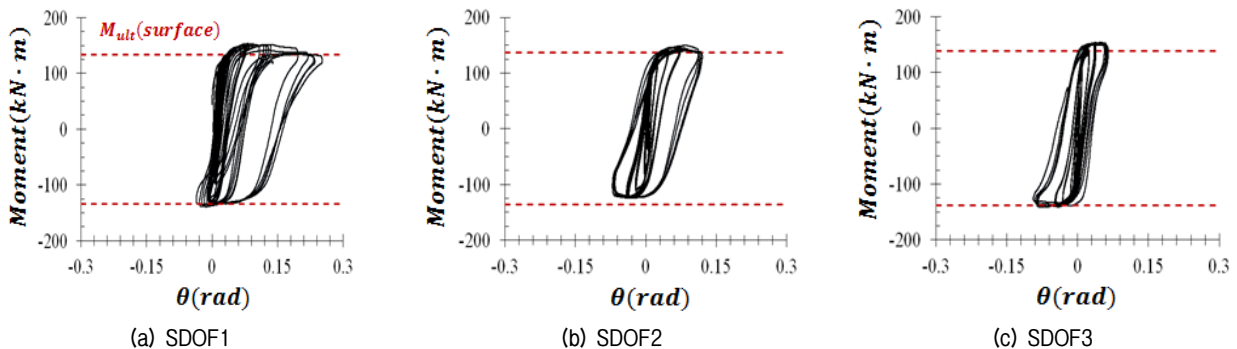


Fig. 11. Moment-rotation curve for each model

기초의 최대 전도모멘트(극한 모멘트 지지력)가 수평반복하중 첫 방향(양의 회전각)에서 지표면에 놓인 기초의 극한모멘트 지지력보다 크게 발현되는데, 이는 기초가 수평반복하중의 첫 방향으로 기울기 때문으로 판단된다.

한편 모델에 상관없이 구조물 상부에 똑같은 크기의 변위하중단계를 재하했기 때문에 상대적으로 세장비가 작은 SDOF1이 보다 큰 회전각을 갖는 것을 관찰할 수 있으며, 세장비가 작은 시스템일수록 비대칭한 모멘트-회전각 이력곡선을 보인다. 이는 세장비가 작은 시스템일수록 수평거동이 많이 발생하여 비대칭적인 지반의 원형현상을 넓은 영역에서 만들고, 이로 인해 기초의 기울어짐 현상을 극대화시키기 때문이다.

6.3 수평토압과 극한 모멘트 지지력 관계

근입된 기초의 극한 모멘트 지지력 증가현상은 수평지반에 의해 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 기초의 수평토압과 모멘트와의 관계를 관찰하였다. Fig. 12는 SDOF1과 SDOF2에 대해 근입된 기초의 모멘트(M)를 지반위에 놓였을 때의 기초의 극한 모멘트지지력($M_{ult(surface)}$)으로 나눠준 값과 수평토압(EP)을 수평반복하중 동안 발생한 최대 수평토압(EP_{max})으로 나눠준 값을 표기한 것이다.

Fig. 12는 정규화(normalization)된 수평 토압의 경향성과 정규화 된 기초의 모멘트의 경향성이 일치함을 보여준다. 또한 수평반복하중이 진행됨에 따라 기초의 모멘트는 증가하고 일정한 값에 수렴하게 되는데 이 값을 근입된 기초의 극한모멘트 지지력이라 볼 수 있다. 한편

20번째 반복하중 이후에는 근입된 기초의 극한모멘트가 수평토압이 감소하자 지표면에 놓인 극한모멘트 지지력과 같아짐을 관찰 할 수 있다. 이를 통해 수평지반에 의한 토압과 마찰력이 근입된 기초의 극한 모멘트 지지력을 증가시키는 것을 확인할 수 있다.

한편 근입된 기초의 극한 모멘트 지지력 증가현상은 세장비가 상대적으로 작은 SDOF1 모델은 13%, 세장비가 상대적으로 큰 SDOF2는 9%로 세장비가 작은 구조물에서 보다 크게 나타난다. 이는 세장비가 작은 SDOF1 모델에서 수평거동이 더 크게 발생하고 이로 인해 보다 큰 수평지반의 반발력이 발생하기 때문이다.

7. 결론

본 연구에서는 수평반복하중 실험을 통해 세장비가 다른 얇은 기초의 회전거동을 평가하였다. 실험은 원심 모형시험기를 이용하여 20g 수준에서 수행되었다. 지반은 실트질이 포함된 사질토 시료를 상대밀도 40%로 느슨하게 조성하였으며 얇은 기초 모델을 조성된 지반에 근입하였다. 높이가 다른 3가지 구조물을 기초와 결합하여 해당 구조물 상단에 변위제어 방식으로 수평반복하중을 가하였다. 본 연구에서 실험을 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) 기초의 회전이 진행됨에 따라 지반면이 둥글게 변화하는 원형현상(soil surface rounding)이 나타나며, 이로 인해 임계상태에서 기초의 최대모멘트가 극한 모멘트 지지력과 같아지는 현상을 확인하였다.
- (2) 항복거동으로 인한 기초의 수평거동과 회전거동은 수

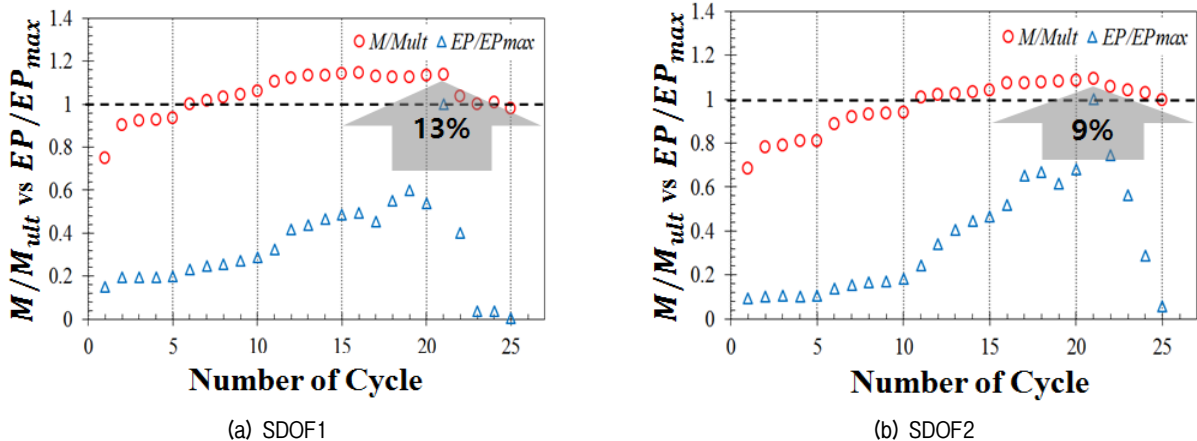


Fig. 12. Normalized overturning moment versus normalized side earth pressure

평반복하중의 단계에 따라 초기에는 연결(coupling) 되어 발생하였고, 수평반복하중이 커지면 두 거동이 함께 발생되다가 분리(decoupling)되는 현상이 반복적으로 나타났다. 이는 기초의 수평거동을 억제하는 설계에서 지진에너지를 소산시키는 기초의 회전 거동을 크게 발전시킬 수 있음을 보여준다.

- (3) 세장비에 관계없이 기초의 회전각이 작을 때는 기초는 탄성거동에 가까운 거동을 보이며, 회전각이 커질수록 시스템의 비선형성과 에너지 감쇠가 커진다. 또한 기초가 회전하는 첫 번째 방향으로 기초의 전도모멘트가 더 크게 발생하여, 초기 하중방향이 시스템의 극한거동에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.
- (4) 기초 측면 지반의 토압과 마찰력에 의해 근입된 기초는 지표면에 놓인 기초보다 10%정도 큰 극한 모멘트 지지력을 가지며, 이 현상은 더 작은 세장비의 시스템에서 크게 발생하였다. 따라서 향후 기초의 회전거동을 이용한 내진설계 시, 기초의 근입조건을 고려한 극한 모멘트 지지력을 바탕으로 상부 구조물의 지진하중을 결정하는 것이 합리적이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(030401)에 의해 수행되었음.

참고문헌 (References)

1. Anastopoulos, I., Gazetas, G., Loli, M., Apostolou, M., and Gerolymos, N. (2009), "Soil Failure Can be used for Seismic Protection of Structures", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol.8, No.2, pp.309-326.
2. Anastopoulos, I., Gelagoti, F., Kourkoulis, R., and Gazetas, G. (2011), "Simplified Constitutive Model for Simulation of Cyclic Response of Shallow Foundations: Validation against Laboratory Tests", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol.137, No.12, pp.1154-1168.
3. Anastopoulos, I., Kourkoulis, R., Gelagoti, F., and Papadopoulos, E. (2012), "Rocking Response of SDOF Systems on Shallow Improved Sand: An Experimental Study", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.40, pp.15-33.
4. Deng, L. and Kutter, B. (2011), "Characterization of Rocking Shallow Foundations using Centrifuge Model Tests", *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, Vol.41, No.5, pp.1043-1060.
5. Gajan, S., Kutter, B., Phalen, J., Hutchinson, T., and Martin, G. (2005), "Centrifuge Modeling of Load-deformation behavior of Rocking Shallow Foundations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.25, No.7, pp.773-783.
6. Gajan, S. and Kutter, B. L. (2008), "Effect of Critical Contact Area Ratio on Moment Capacity of Rocking Shallow Footings." *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV* (pp. 1-11). ASCE.
7. Gajan, S. and Kutter, B. (2009), "Effects of Moment-to-shear Ratio on Combined Cyclic Load-displacement behavior of Shallow Foundations from Centrifuge Experiments", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol.135, No.8, pp.1044-1055.
8. Housner, G. W. (1963), "The behavior of Inverted Pendulum Structures during Earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.53, No.2, pp.403-417
9. Kim, D., Kim, N., Choo, Y., and Cho, G. (2013), "A Newly Developed State-of-the-art Geotechnical Centrifuge in Korea", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.17, No.1, pp.77-84.
10. Kim, D., Lee, S., Kim, D., Choo, Y., and Park, H. (2015), "Rocking Effect of a Mat Foundation on the Earthquake Response of Structures", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol.141, No.1, p.04014085.
11. Kokkali, P., Abdoun, T., and Anastopoulos, I. (2015), "Centrifuge Modeling of Rocking Foundations on Improved Soil", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol.141, No.10, p.04015041.
12. Meyerhof, G. G. (1951), "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations", *Geotechnique* 2, No.4, pp.301-332
13. Mylonakis, G., Syngros, C., Gazetas, G., and Tazoh, T. (2006), "The Role of Soil in the Collapse of 18piers of Hanshin Expressway in the Kobe Earthquake", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.35, pp.547-575
14. Panagiotidou, A., Gazetas, G., and Gerolymos, N. (2012), "Pushover and Seismic Response of Foundations on Stiff Clay: Analysis with P-Delta Effects", *Earthquake Spectra*, Vol.28, No.4, pp.1589-1618.
15. Schofield, A. (1980), "Cambridge Geotechnical Centrifuge Operations", *Géotechnique*, Vol.30, No.3, pp.227-268.

Received : May 31st, 2016

Revised : August 4th, 2016

Accepted : August 6th, 2016