

지반 반력 스프링 시스템을 이용한 강관 합성 말뚝의 수평 지지 특성 평가 Estimation of the lateral behavior of steel-concrete composite piles using subgrade-reaction spring system

권형민¹⁾, Kwon, Hyungmin, 이주형²⁾, Lee, Juhyung, 박재현³⁾, Park, Jaehyun, 정문경⁴⁾, Chung, Moonkyung,
곽기석⁵⁾, Kwak, Kiseok

¹⁾ 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 박사후연구원, Post-doctoral researcher, Geotech div., KICT

²⁾ 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 연구원, Researcher, Geotech div., KICT

³⁾ 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 선임연구원, Senior researcher, Geotech div., KICT

⁴⁾ 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 책임연구원, Researcher fellow, Geotech div., KICT

⁵⁾ 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 책임연구원, Researcher fellow, Geotech div., KICT

SYNOPSIS : Steel casing used to keep a borehole wall in the construction of drilled shaft increases the vertical and lateral stiffness and strength of pile, but it is usually pulled out or ignored due to the absence of standard or the problem of erosion of steel casing. In order to make use of steel casing as a permanent structure, this study carried out an experimental work for the steel-concrete composite pile. Four types of piles were used to estimate the lateral behavior of piles, which are reinforced concrete pile, steel pile and steel-concrete composite pile with and without reinforcing bar.

The subgrade-reaction spring system was developed to simulate the lateral stiffness of soil in laboratory. Also, the composite loading system which can apply the axial and lateral load simultaneously was employed.

Keywords : steel-concrete composite pile, subgrade-reaction spring system, steel casing, drilled shaft, lateral load

1. 서 론

지반을 굴착한 뒤, 굴착 공내에 철근 콘크리트를 타설하여 시공하는 현장 타설 말뚝은 최근 증가하는 해상 장대교량의 수요 증가에 맞물려 지지력 확보를 위해 점차 대형화 하고 있는 추세이다. 해상 장대교량에 사용되는 현장 타설 말뚝의 시공 시, 공벽 보호용으로 주로 사용되는 강관 케이싱은 말뚝 재료의 연직 및 수평 강성의 큰 증가를 가져오지만 사용 기준이 명확히 정립되어 있지 않고, 강관 재료의 방부식 문제 등으로 인하여 대개 인발하거나 희생 강관 형태로 사용되고 있다. 본 연구에서는 이러한 강관 케이싱을 영구 구조재로 활용하기 위하여 횡방향 하중을 받는 강관 합성 말뚝에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 강관말뚝, 철근 콘크리트 말뚝 및 두 가지 부재를 합성한 강관 합성 말뚝에 대하여 수평 하중 재하시의 거동 특성을 평가하였다. 말뚝이 근입되어 있는 지반의 횡방향 강성에 대한 원활한 모사를 위하여 지반반력계수의 개념을 활용한 지반 반력 시스템을 개발 및 적용하였으며, 사용하중 크기의 연직하중이 재하되고 있는 말뚝에 수평 하중을 재하할 수 있는 하중 재하 시스템을 활용하여 연직하중이 재하되고 있는 상태에서의 강관 합성 말뚝의 수평 거동 특성을 평가하였다.

2. 모형 말뚝

기존의 현장타설말뚝과 비교하여 강관 합성 말뚝이 가지는 역학적 특성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 강관의 유무, 철근 배근 등 단면 및 재료 특성이 상이한 모형 말뚝을 제작하였다. 표 1 및 그림 1은 연구에 사용된 4가지 타입의 말뚝 단면 특성을 보여주고 있다.

표 1. 모형 말뚝의 종류

설 명	강관(mm)	콘크리트	철근	길이(m)
Case1	-	35MPa	8*D10	2.7
Case2	D216.5/t5.85	-	-	2.7
Case3	D216.5/t5.85	35MPa	-	2.7
Case4	D216.5/t5.85	35MPa	8*D10	2.7

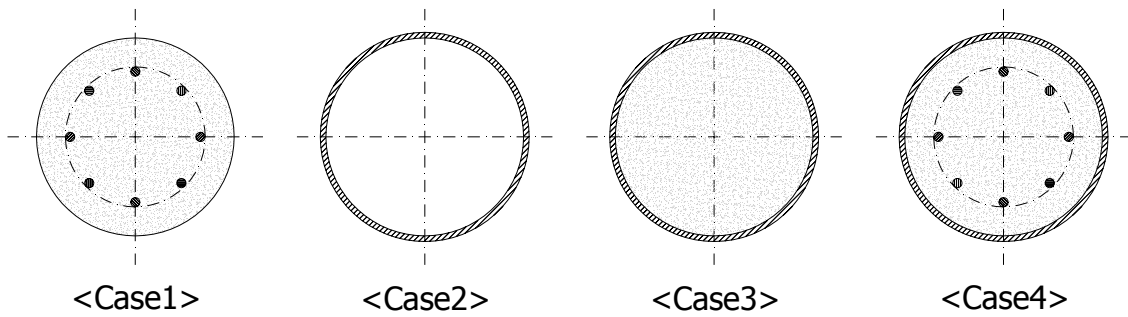


그림 1. 모형 말뚝의 단면 특성

<Case1>은 기존에 사용되고 있는 현장타설말뚝으로 강관 합성 말뚝의 내경과 동일한 직경 204.8mm의 크기의 단면을 가지는 철근 콘크리트 말뚝이다. 8개의 공칭지름이 9.53mm인 D10 철근을 철근망 형식으로 제작하여 배근하였으며, 철근비는 1.73%이다. 콘크리트 피복 두께는 콘크리트 구조설계기준 해설(2003)에 따라 30mm를 확보하였고, 설계기준강도 35MPa의 콘크리트를 사용하였다. <Case2>는 KS D3566 규격 기준에 따라 생산되는 외경(D) 216.5mm, 두께(t) 5.85mm의 구조용 탄소강관으로 현장에서 사용되는 강관 말뚝의 축소 모형에 해당 된다. <Case3>은 강관 합성 말뚝의 설계 시, 강관에 의한 철근 대체 효과를 평가하기 위한 실험군으로, <Case2>에서 사용한 구조용 탄소 강관 내부에 설계기준강도 35MPa의 무근 콘크리트를 충전한 형태의 말뚝이다. <Case4>는 현장타설말뚝의 시공에 사용되는 강관 케이싱을 구조체로 보고 제거하지 않은 강관 합성 말뚝으로, 철근 배근 및 콘크리트 물성은 <Case1>과 동일하며, <Case2>에 사용된 강관을 이용하여 제작하였다. 각 모형 말뚝의 제작 과정에 하중의 재하에 따른 변형을 및 응력의 변화를 측정하기 위하여 전기저항식 변형률 게이지를 매설 및 부착하였다. Case1, 4와 같이 내부에 철근망이 사용되는 모형 말뚝의 경우에는 철근의 돌기를 제거하고 부착하였으며, Case3의 경우에는 콘크리트 매립용 게이지를 사용하였다. 단면 내의 게이지의 배열은 인장측과 압축측을 분리하여 내부, 외부에 총 4개를 부착하였다.

3. 지반 반력 시스템

연직 하중 및 수평 방향 하중을 받는 말뚝의 거동은 지반의 반력이 존재한다는 점에서 건축 구조물에 사용되는 기둥 구조물과 차별점을 가진다. 지반에 의한 반력을 고려하여 말뚝의 거동 특성을 평가하기 위한 일반적으로 사용되는 방법은 압력토조를 이용한 방법과 현장 재하 시험을 이용하는 방법 등이 있

다. 압력 토조를 이용하는 방법은 균질한 지반을 반복적으로 조성할 수 있고, 원하는 지반 응력 조건의 구현이 용이하다는 장점을 가지고 있으나, 일반적으로 활용되고 있는 규모가 직경 1.5m 이내라는 점을 고려할 때, 말뚝의 크기 문제에 제한을 받게 된다. 반면 현장 재하 시험은 원하는 규모의 말뚝에 대한 시험이 가능하고, 지반 고유의 특성을 그대로 반영할 수 있는 장점을 지니고 있으나, 반복적인 시험에는 부적합하고, 매우 많은 비용이 소요된다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 지반의 반력 특성을 적절히 모사할 수 있으며, 모형 말뚝의 크기를 비롯한 다양한 시험 조건에 대한 경제성을 확보할 수 있는 방안으로 지반의 강성을 스프링을 이용하여 모사할 수 있는 반력 스프링 시스템을 개발하여 적용하였다.

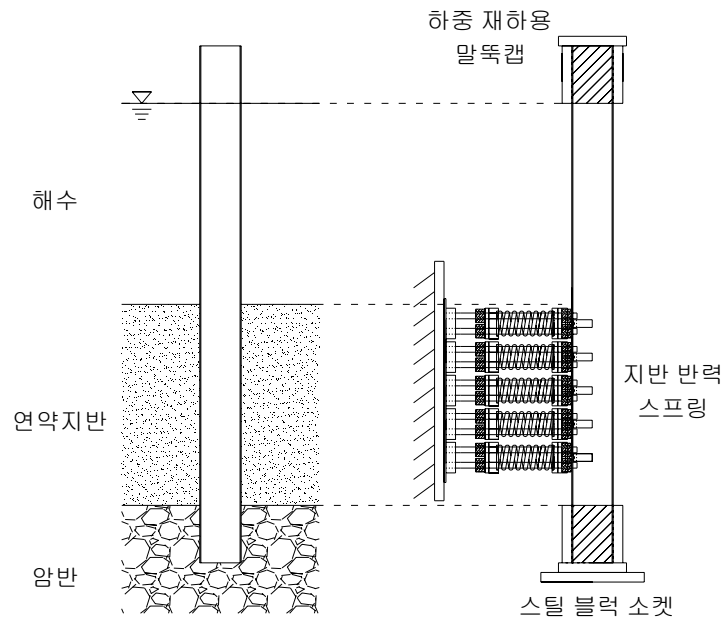


그림 2. 지반 조건의 모사

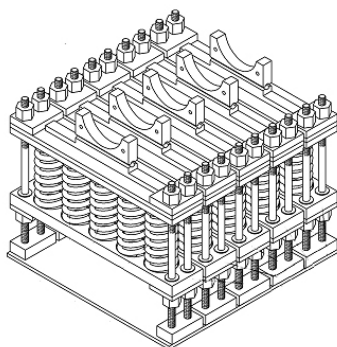
본 연구에서 대상으로 삼고 있는 해상 장대교량은 구조물의 특성상 지반에 근입 되는 부분과 해수면 아래 존재하는 구간이 복합적으로 존재한다. 근입부의 길이와 해상구간에 존재하는 길이는 대상 지반의 지층 구성이나 수심에 따라 달라지지만, 인천대교 현장에서 사용된 말뚝의 해수부와 근입부의 길이를 평균적으로 고려하여, 암반 근입부를 제외한 연약지반에 위치하는 말뚝의 길이와 해수면 아래 존재하는 길이가 동일하다고 가정하였다 (그림 2). 따라서, 모형 말뚝 전체 길이 2700mm중, 암반 근입부 모사를 위한 구간 300mm 및 하중 재하를 위한 두부 300mm를 제외하면 지반 및 해수에 1050mm 씩 위치하게 된다. 말뚝 하부 300mm 구간인 암반 근입 조건은 스틸 블럭을 이용하여 변위가 발생하지 않는 캔틸레버 조건으로 모사하였다. 연약지반은 서해안에 흔히 분포하는 중간 굳기의 점토(medium clay)를 선정하여 지반의 물성을 결정하였다. 말뚝의 횡방향 거동에 저항하는 지반의 반력은 지반의 탄성계수와 근입된 구간의 말뚝의 폭 및 길이에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한 지반의 반력 특성을 탄성지반반력법에 기반한 수평 지반반력계수(k_h , modulus of subgrade reaction)로 정량화하여 모형 실험에 적용하였다. 탄성지반반력법은 말뚝의 횡방향 거동에 저항하는 지반을 탄성 스프링으로 치환하여 생각하는 개념으로 지반의 파괴는 고려하지 않는다. 이는 지반의 파괴 보다도 말뚝의 재료 특성에 초점을 맞추고 있는 본 과제의 목적과 일치 하고 있다. 수평 지반반력계수는 말뚝의 수평 거동에 저항하는 지반의 저항을 말뚝 단위 길이당 작용하는 압력의 형태로 나타낸 지반 특성으로 지반의 탄성계수 및 말뚝의 폭에 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Poulos & Davis, 1980). 구조물 기초설계기준 해설(2003)에서는 다양한 방법의 수평 지반반력계수를 결정하는 방법을 제안하고 있다. 본 연구에서는 지반의 탄성계수를 이용하는 방법을 적용하여 대상 지반의 수평 지반반력계수를 결정하였다. 탄성계수는 중

간 굳기 점토에 대하여 기존에 제안된 값들(Das, 1984; Coduto, 1994; Bowles, 1996)의 평균값 및 서해안 지역의 지반조사 자료들을 참조하여 10MPa로 결정하였으며, 이를 바탕으로 식 (1)을 이용하여 지반 반력계수를 결정하였다.

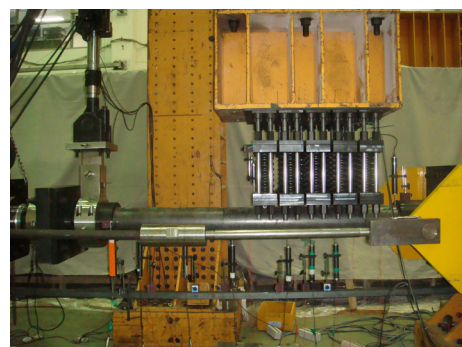
$$k_h = \frac{0.56E_s}{B} \quad (1)$$

여기서, k_h 는 수평방향 지반반력계수이고, B , E_s 는 각각 말뚝의 직경과 지반의 탄성계수이다. 식 (1)에 말뚝의 폭 216.5mm와 탄성계수 10MPa을 대입하면, 지반반력계수는 2.64kg/cm^3 로 결정된다.

지반반력계수는 단위 면적당 지반을 탄성 스프링으로 치환하여 지반 반력을 모사하는 개념으로 모형 실험에 적용하기 위해서는 말뚝의 투영 면적을 고려하여 스프링의 강성으로 지반의 반력을 효율적으로 모사할 수 있다. 탄성지반반력법을 이용하여 지반을 모사하기 위해서는 말뚝 및 지반을 작은 요소로 분할하여 지반의 강성을 모사하는 스프링의 수가 많을수록 보다 정확한 결과를 도출할 수 있다. 그러나, 모형 실험에 적용함에 있어서는 설치 공간상의 문제로 스프링의 수량에 제한을 받는다. 이를 고려하여 본 연구에서는 연약지반층에 놓이게 되는 말뚝의 길이 1075mm 중, 길이방향으로 하단의 200mm를 제외한 875mm 구간을 5등분하여 5층의 스프링 반력 시스템을 설치하는 것으로 계획하여 스프링의 강성을 결정하였다. 이와 같이 5층으로 스프링 반력 시스템을 설치하는 경우, 스프링 1층당 담당하게 되는 말뚝의 투영 단면은 길이 175mm, 폭 216.5mm로 지반반력계수 2.64kg/cm^3 를 가지는 지반의 강성을 식 5.1을 이용하여 스프링 상수가 약 1000kg/cm 인 스프링으로 모사할 수 있다. 스프링 상수가 1000kg/cm 인 단일 스프링의 설치하는 공간의 제약 문제로 설치가 불가능하여, 본 연구에서는 5개의 스프링을 병렬 연결하여 1층의 스프링 강성을 1000kg/cm 로 맞추는 방법을 채택하였다. 스프링의 제작은 ‘압축 및 인장용 원통 코일 스프링 설계 기준 (KS B 2400)’을 따랐으며, 설계 강성은 200kg/cm 이다. 제작된 스프링은 말뚝 길이 175mm 구간에 적용되기 위해서 5개씩 병렬 연결하여 사용되었다. 스프링의 병렬 연결을 위하여 본 연구에서는 그림 3(a)와 같이 프레임에 이용한 스프링 시스템을 제작하였다. 스프링 시스템은 상·하 재하판 및 재하판의 원활한 이동을 위한 4개의 가이드 봉으로 구성되어 있다. 상·하 재하판은 병렬 연결된 스프링의 강성에 비하여 충분히 큰 휨강성을 가져 말뚝의 변위를 스프링에서만 흡수할 수 있도록 제작하였으며, 가이드봉과 재하판 사이의 마찰력을 최소화하여 말뚝에 작용하는 힘이 스프링을 인장 및 압축에만 전달될 수 있도록 하였다. 말뚝과 반력 스프링 사이에는 힌지 역할을 하는 롤러 연결 장치를 두어, 말뚝에 휨이 발생하여도 스프링 시스템의 반력이 항상 수평방향을 유지할 수 있도록 하였다. 또한, 스프링 시스템은 전체 높이 조절이 가능하도록 하여, 시험 초기 말뚝의 측면에 접할 수 있도록 하였다. 제작 완료된 스프링 시스템에 대하여 별도의 시험을 통하여 설계 강성을 확인하였다. 그림 3(b)는 스프링 시스템 5조를 연결하여 완성한 지반 반력 시스템의 모습을 보여주고 있다.



(a) 지반 반력 시스템의 개략도



(b) 시스템에 부착된 모습

그림 3. 지반 반력 시스템

4. 수평 하중 재하 시스템

사용중인 말뚝에 재하되는 수평 하중은 보통 단독으로 재하되는 것이 아니라, 사용 하중 만큼의 연직 하중이 재하되고 있는 상태에서 수평 하중이 재하되는 특성을 지니고 있다. 말뚝의 수평거동에 따른 지반의 지지력을 평가하는 소형 모형 말뚝에 대한 재하 실험은 일반적으로 연직하중은 생략한 채, 말뚝에 수평 변위를 가하는 방식을 채택하고 있다. 그러나, 본 연구는 말뚝에 하중이 재하되는 과정에서 말뚝 자체의 강성이나 강도를 평가하는데 목적을 두고 있기 때문에 연직하중과 수평 하중의 개별적인 재하가 가능해야 한다. 말뚝에 설계 하중 만큼의 연직하중을 재하하여 일정하게 유지시키면서 수평 하중을 재하하는 과정의 구현이 수평 하중 재하 시험 장비의 주된 목적이다. 이를 위하여 본 연구에서는 교각 실험에 사용되는 시험 장비를 말뚝의 재하 실험에 적합하게 그림 4와 같이 개량하였다.

하중 재하 시스템은 말뚝의 거치와 실험, 해체를 용이하게 하기 위하여 모형 말뚝을 수평으로 거치하는 방식을 취하고 있다. 수평 하중 재하 장치는 반력 프레임, 연직 및 수평 하중 재하용 액츄에이터, 말뚝 고정용 그립, 연직하중 재하용 프레임 장치, 지반 반력 시스템, 수평 하중 재하용 힌지 연결 장치 및 계측 시스템으로 구성되어 있다. 모형 말뚝 고정을 위해 사용되는 그립은 선단부에서 캔틸레버 조건을 유지시키기 위한 장치로 180°로 나뉘는 구조로 제작하여 시험을 위한 모형 말뚝의 거치와 분해를 용이하게 하였다. 지반 반력 시스템은 앞절에서 설명한 바와 같이 말뚝이 근입된 지반을 모사하기 위한 반력 시스템으로 지반에 횡방향 하중이 작용할 때 압축측만이 말뚝의 변위에 저항하고 인장측의 지반은 말뚝에 영향을 미치지 않는다는 가정하에 압축측에만 설치하였다. 계측 시스템은 말뚝에 재하되는 하중과 이에 따른 말뚝의 변위를 측정할 수 있는 시스템으로 구성되어 있다. 재하되는 축하중 및 수평 하중의 크기는 액츄에이터의 로드셀을 이용하여 측정하며, 말뚝 각 지점의 변위는 LVDT로 측정한다. 말뚝 길이 방향으로 9개의 지점에서 수평 하중의 재하에 따른 수평 변위를 측정할 수 있는 시스템을 갖추고 있다.

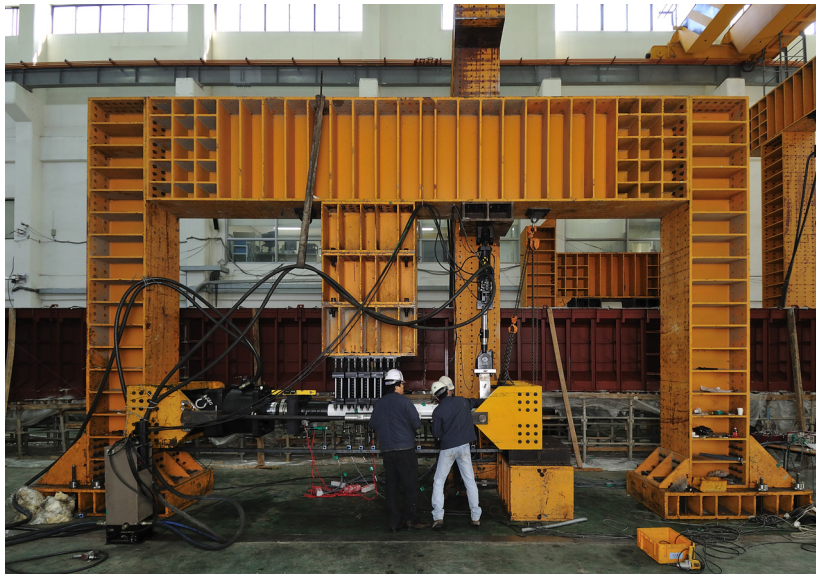


그림 4. 지반 반력 시스템을 적용한 하중 재하 시스템

5. 수평 하중 재하 시험

5.1 연직하중 재하 수준의 결정

말뚝에 작용하는 수평 하중은 상재 하중의 성격을 띄지 않는 풍하중, 지지하중과 같은 비상사적인 하

중의 형태이다. 반면 말뚝의 축방향으로 작용하는 하중은 구조물의 자중과 같이 상재 하중의 형태로 작용하게 된다. 따라서, 수평 하중은 모형 말뚝에 축하중이 상재하는 상태에서 재하되는 것이 실제 말뚝의 거동과 유사하다. 축방향의 상재 하중 크기는 수평 하중의 받는 말뚝의 거동에 직접적으로 영향을 끼치게 된다.

말뚝의 단면 크기는 부재의 극한 하중에 영향을 미치면서 동시에 지반의 지지력 산정에도 영향을 미친다. 말뚝 설계의 기본적인 개념은 말뚝 부재의 극한 하중과 지반의 지지력 중, 작은 값을 선택하는 것이며, 동시에 극한 하중과 지지력은 상부에서 전달되는 하중보다는 커야 한다. 또한, 말뚝의 재료 및 지반의 불확실성을 고려하여 안전율이라는 개념이 적용된다. 지반의 지지력에는 주로 3~4의 안전율을 적용하며, 말뚝 재료의 극한 하중은 허용 응력의 개념을 적용한다. 구조물 기초 설계기준에는 강재의 허용 응력을 인장강도의 40% 이내로 규정하고 있으며, 콘크리트의 허용응력은 압축강도의 27% 이내로 규정하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 재료의 부재력이 지반의 지지력보다 작다는 가정 하에 각 재료의 허용응력 개념을 적용하고, 강관 합성 말뚝을 기준으로 하여 축방향 상재 하중의 크기를 결정하였다. 강관 합성 말뚝과 같은 복합 단면에 전달되는 하중은 탄성영역 내에서는 재료의 축강성의 크기에 따라 상부에서 전달되는 하중의 분담비율이 결정된다. 표 2는 강관 합성 말뚝의 축강성 및 분담비율을 보여주고 있다.

표 2. 강관 합성 말뚝의 축강성 및 분담비율

	단면적(mm ²)	탄성계수(GPa)	축강성(EA)	분담비율
강관	3,871	155	600,066	0.503
콘크리트	32,371	15.6	504,993	0.423
철근	571	155	88,449	0.074

모형 말뚝에 대한 수직 하중 재하 실험 결과 강관 합성 말뚝의 연직 극한 하중은 2,754kN이었다. 표 2의 분담 비율은 탄성 영역내에서만 적용되는 개념으로, 허용응력 이내의 하중 수준에서는 표 2의 분담 비율을 적용할 수 있다. 따라서, 강관 합성 말뚝의 극한 하중 2,754kN을 제안한 분담 비율에 따라 나누고, 구조물 기초 설계기준에서 정하는 허용응력의 수준을 적용하면 Case1~4는 각각 408, 554, 880, 962kN이 된다. 말뚝에 전달되는 수직 하중의 크기는 대부분의 경우 최대 허용 하중 보다 작지만, 본 연구에서는 기준 선정을 위하여 최대 하중을 사용하중으로 보고 축방향 상재 하중으로 결정하였다.

5.2 말뚝 두부에서의 하중-변위 곡선

본 연구에서는 수평 하중 재하에 따른 말뚝 두부 및 지반면에서의 하중-변위 곡선 분석을 통하여 강관 합성 말뚝의 수평 지지 성능을 평가하였다. 그림 5는 4개의 단면 타입에 대하여 수행된 수평 재하 시험 결과로부터 얻어진 말뚝 두부에서의 하중-변위 곡선을 보여주고 있다.

강관 및 철근콘크리트 단일 부재로 이루어진 Case1과 Case2의 수평 거동은 복합부재로 이루어진 다른 시험체에 비하여 극한 하중에 다다른 후, 급격한 강도저하를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 반면 강관 및 철근 콘크리트의 복합 재료로 이루어진 Case3 및 Case4의 경우에는 극한 하중을 지나고서도 급격한 하중의 감소가 아니라 완만한 변형률 연화(Strain softening) 현상을 보이고 있다. 단면 특성에 따른 수평 극한 하중의 변화를 살펴보면 우선 단일 부재 (Case1, 2)에 비하여 복합부재(Case3, 4)의 수평 극한 하중이 큰 폭으로 증가함을 알 수 있다. 이는 1차적으로 단면을 이루는 재료적인 특성에 기인한 것으로 현장타설말뚝의 시공에 사용되는 강관을 희생강관이 아닌 구조재로 볼 경우 말뚝의 수평 저항 성능면에서 매우 큰 증가 효과를 볼 수 있음을 의미한다. 단면의 재료적인 특성만을 고려할 때, Case4는 Case1과 Case2의 합과 등가 단면을 가진다. 그러나 극한 하중의 차이는 Case1과 Case2의 합이 27.7kN, Case4가 41.05kN으로 개별말뚝의 합에 비하여 48% 가량 극한 하중이 증가함을 알 수 있다. 강관 내부에 채워진 콘크리트의 경우, 하중 재하시 부피 팽창이 자유롭지 않아 횡방향 구속압 증가를 유발하고,

이는 다시 탄성계수 및 항복강도의 증가로 연결되어 콘크리트 단일 부재일 경우에 비하여 콘크리트의 항복강도를 증가시켜 전체적으로 극한 하중을 증가시키는 원인이 되는 것으로 판단된다. 또한 Case3과 Case4의 비교를 통하여 강관 합성 말뚝에 사용되는 철근이 수평 극한 하중에 거의 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있다. 이는 말뚝의 설계, 시공에서 철근망을 조립하고 설치하는 과정을 생략할 수 있음을 의미한다.

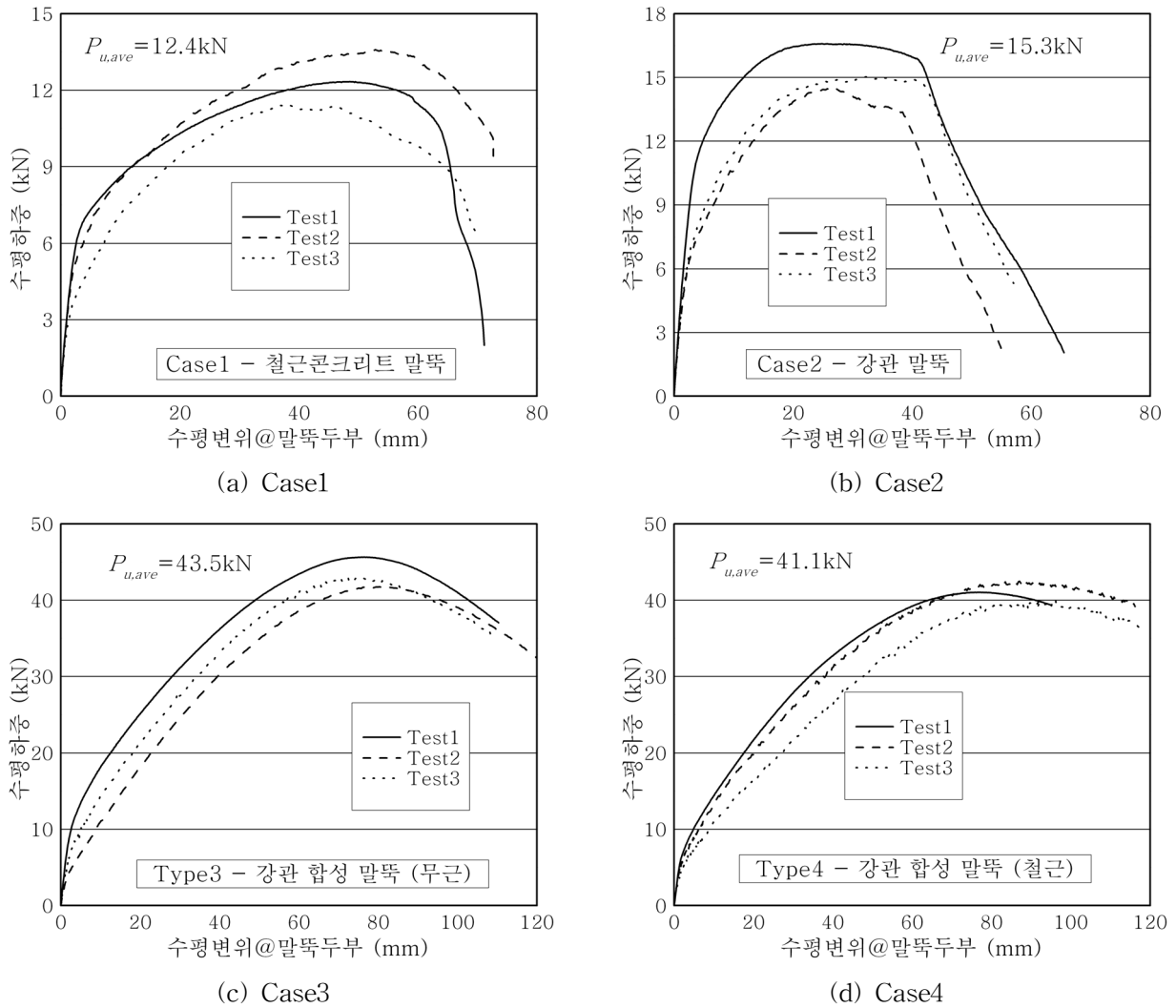


그림 5. 말뚝 두부에서의 하중-변위 곡선

극한 하중이 발현되는 변위에 대한 비교를 통해서도 강관 합성 말뚝의 효율성을 설명할 수 있다. 그림 6은 극한 하중에서의 말뚝의 수평 변위를 보여주고 있다. 여기서, 지반면은 수면과 지반의 경계면 의미하며, 본 실험에서는 말뚝 선단에서 1050mm되는 지점으로 910mm 및 1200mm되는 지점에서 측정된 변위의 평균값을 사용하였다. 극한 하중 상태에서의 말뚝의 변위를 보면, 강관 말뚝 및 철근콘크리트 말뚝에 비하여 수평 변위가 2배가량 큼을 알 수 있다. 이는, 상부 구조물에 미치는 영향을 배제하고 단순히 말뚝의 성능 측면에서 보았을 때, 극한 하중 시까지 허용할 수 있는 변위가 크다는 것을 의미한다. 허용변위의 증가는 상부 구조물의 안정성 해석 측면에서도 유리한 방향으로 작용하게 된다.

수평 하중을 받는 말뚝의 설계 시, 허용 하중의 크기는 재료의 휨응력에 대한 안정성 및 말뚝 직경의 1% 이내로 규정하는 두가지 조건을 만족시켜야 한다. 그림 6에서 보는 바와 같이 극한 하중시의 말뚝의 수평 변위는 말뚝 직경의 1% (2.16mm) 보다 매우 큼을 알 수 있다. 말뚝 직경의 1%까지 수평 하중을

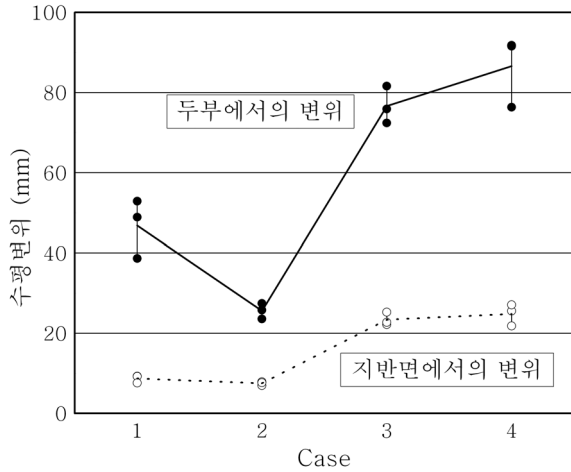


그림 6. 극한 하중에서의 말뚝 두부 및 지반면의 변위

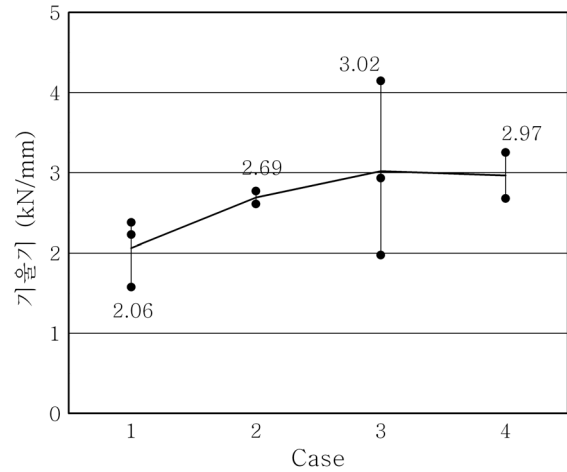


그림 7. 말뚝 직경 1%의 수평 변위 발생 시, 하중 변위 곡선의 기울기

재하 하였을 때의 하중 변위 곡선의 기울기는 그림 7과 같다. 그림 7의 기울기는 말뚝 두부에서의 수평 변위가 말뚝 직경의 1%(2.16mm)일때의 하중-변위 곡선상의 점과 원점을 연결한 직선의 기울기로 값의 상대적인 크기는 동일한 변위 기준에서 저항할 수 있는 하중의 크기를 의미한다. 이 값은 휨강성에 관련된 값으로, 극한 하중에 비하여 명확히 드러나지는 않지만, 강관 합성 말뚝의 기울기 값이 강관 말뚝 및 철근콘크리트 말뚝에 비하여 증가되는 결과를 보여주고 있다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 다양한 단면 특성을 가지는 모형 말뚝에 대한 수평 재하 시험을 통하여 강관 합성 말뚝이 가지는 수평 지지 특성에 대하여 살펴 보았다. 강관 합성 말뚝은 강관 케이싱을 구조재로 사용하지 않는 철근 콘크리트 말뚝에 비하여 3배 이상 극한 하중의 증가를 보였고, 극한 하중에 이르는 변형을 또한 증가하여 말뚝의 극한 거동에 유리한 결과를 보여주고 있다. 극한 하중의 증가는 단순히 강관 케이싱에 의한 강성 증가분 뿐만 아니라, 강관 내부 콘크리트의 구속응력 증가로 인하여 콘크리트의 강도 및 강성이 증가하여 얻어진 결과이다. 수평 하중을 받는 말뚝의 설계에 사용되는 변위 기준으로 판단하였을 때에도, 강관 합성 말뚝은 일반 현장타설말뚝에 비하여 증가된 지지 성능을 보여주고 있다. 또한, 강관 합성 말뚝의 활용 시, 강관에 의한 철근 대체 효과를 고려할 수 있다. 강관 케이싱의 방부식 처리에 대한 추가적인 연구를 통하여 강관을 희생 구조물이 아닌 영구 구조물로 설계에 반영할 수 있는 기준 제정이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국지반공학회(2003), 구조물 기초설계기준 해설
2. 한국콘크리트학회(2003), 콘크리트 구조설계기준 해설
3. Bowles, J.E. (1996), *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill Book Co., NY.
4. Coduto, D.P. (1994), *Foundation Design*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliff, NJ.
5. Das, B.M. (1984), *Principles of Foundation Engineering*, Monterey, CA.
6. Poulos, H.G. and Davis, E.H.(1980), *Pile foundation analysis and design*, John Wiley & Sons, NY