

대형 UTM을 이용한 강관합성 말뚝재료의 강도 특성 평가

Evaluation on compressive strength of steel-concrete composite piles using a large scaled UTM(Universal Test Machine)

이주형¹⁾, Juhyung Lee, 권형민²⁾, Hyungmin Kwon, 박재현³⁾, Jaehyun Park, 광기석⁴⁾, Kiseok Kwak, 정문경⁴⁾, Moonkyung Chung

- 1) 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology
- 2) 한국건설기술연구원 지반연구실 박사후연구원, Post-Doctor, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology
- 3) 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology
- 4) 한국건설기술연구원 지반연구실 책임연구원, Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : Various model piles with different sections such as reinforced concrete, steel, steel-concrete composite without rebar and steel-concrete composite with rebar were made, and vertical load test was conducted using a large scaled UTM(Universal Test Machine) to evaluate Young's modulus and ultimate load of the model piles. Based on the tests, ultimate load of steel-concrete composite pile is 31% greater than the sum of it of reinforced concrete pile and it of steel pile. This is caused that ultimate load and Young's modulus of inner concrete increase due to confining effect by outer steel casing. Variation of ultimate load is also insignificant depending on the ratio of length to diameter(L/D), therefore bucking has not an effect on change of ultimate load in case of the L/D below 10.

Keywords : model test, load test, UTM, steel-concrete, composite

1. 서론

국내에서 사용되는 기존 대구경 현장타설말뚝의 경우 강관 내부에 콘크리트 타설 후 케이싱을 제거하거나 케이싱을 남겨 두더라도 강관 케이싱의 지지력을 무시하고 설계하는 것이 일반적이었다. 그러나 미국의 AASHTO LRFD Bridge Specifications(2004)에서는 3mm 이상의 두께를 가진 강관을 영구 케이싱으로 사용할 경우 강관을 구조재로 보고 설계에 반영할 수 있으며, 부식에 의한 두께를 통제하여야 한다고 제안하고 있다. 강관합성 현장타설말뚝(steel-concrete composite drilled shafts)은 기존의 대구경 현장타설말뚝과 같은 굴착공법을 적용하며, 굴착시 공벽보호를 위해 사용되는 케이싱을 영구부재 즉, 구조재로 보고 강관 케이싱의 지지력을 설계에 반영하는 공법이다. 그림 1과 같이 횡방향 구속에 의해 3축 응력 상태에 놓인 콘크리트의 강도는 일반적으로 1축 압축 상태의 콘크리트 보다 상당히 큰 값을 갖는다는 것은 널리 알려져 있으며, 오래 전부터 이 부분에 대한 많은 연구 진행 및 실제 적용이 되어왔다(Scott et al., 1982; Mander et al., 1988). 이러한 적용은 횡철근으로 보강된 콘크리트 기둥을 비롯하여, 강관으로 구속된 기둥(CFT : concrete filled steel tube) 등에 사용되어 왔다.

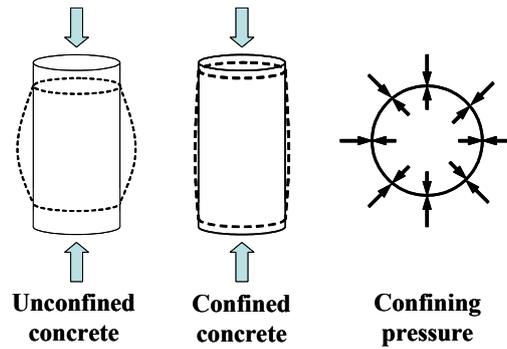


그림 1. 콘크리트 팽창에 의해 작용하는 구속압

강관합성 말뚝의 거동은 콘크리트와 강이라는 두 가지 이질적인 재료의 합성 또는 비합성 거동에 관련되어지므로 이를 예측하고 실험하는 것은 상당히 어렵다. 지금까지 대부분의 문헌들을 살펴보면 강부재의 내력과 콘크리트의 내력을 합산하여 강관합성 말뚝의 내력을 산정하는 것이 일반적인데 이는 강관의 구속효과 및 콘크리트와 강관의 합성거동으로 인한 내력의 증가를 고려하지 않는 비효율적인 방법이다. 따라서 본 연구에서는 해상 교량기초로 사용되는 현장타설말뚝에서 희생강관을 구조재로 활용하는 강관합성 말뚝 공법 개발을 위한 기초연구로 실내실험을 통하여 강관합성 말뚝의 재료적인 특성을 평가하여 강관합성 말뚝의 역학적 거동 분석을 위한 기초자료를 제공하고자 한다. 철근콘크리트, 강관, 강관합성(무근), 강관합성(철근) 등 다양한 종류의 단면을 가지는 직경 20cm, 길이 2.7m의 모형말뚝을 제작하여 200ton급 대형 UTM을 이용하여 수직방향 재하시험을 실시한다. 강관합성(철근) 모형말뚝의 경우 대형 UTM의 재하용량 제한으로 극한강도의 확인이 불가능한 점을 고려하여 각각의 모형말뚝과 동일한 단면과 직경을 가지는 길이 40cm의 말뚝 모형체를 추가적으로 제작하여 더 큰 재하용량을 가지는 300ton급 일반 UTM을 이용하여 콘크리트 및 강관, 철근 등의 탄성계수 및 극한하중의 정확한 평가를 실시한다.

2. 모형 말뚝

2.1 말뚝 재료의 선정

‘강관-콘크리트-철근’이라는 복합 재료 특성을 가지는 강관합성 말뚝의 역학적 특성을 평가하기 위하여 실험실에서 취급하기 용이하면서도 원형 구조체의 재료적 특성을 그대로 유지할 수 있는 축소 모형을 제작하기 위해서는 여러 가지 고려사항들을 만족 시켜야 한다. 콘크리트 재료의 최대 입경 및 최소 피복 두께 규정을 고려해야 하고, 말뚝 제작시의 최적 철근비 규정을 만족해야 한다. 또한, KS 규격에 따라 생산되는 강관 및 철근의 규격이 정해져 있고, 가용할 수 있는 하중 재하 시스템의 용량이 제한적이다. 본 연구에서는 이러한 요구 조건을 만족시키는 범주 내에서 모형 말뚝의 재원을 결정하였다.

강관은 KS D3566 규격 기준에 따라 생산되는 외경(D) 216.5mm, 두께(t) 5.85mm의 기성 제품을 선정하였다. 말뚝의 길이는 하중 재하 시스템 활용 여부에 따라, 400mm와 2700mm 두가지로 결정하였다. 길이 2700mm 모형 말뚝의 경우, 말뚝이 견고한 압반에 근입되는 것을 가정하여 근입부에 300mm, 하중 재하를 위한 두부에 300mm를 할당하여 순말뚝의 길이를 2100mm로 결정하였다. 모형 말뚝에 사용되는 강관의 폭두께비(D/t)는 37, 말뚝 두부를 제외한 직경대 길이비(L/D)는 10, 세장비는 44이다. 연구의 대조군 역할을 하는 ‘강관합성 말뚝’은 위와 같은 재원을 가지며 이밖에 연구의 목적에 따라 철근 콘크리트 말뚝, 강관 말뚝, 무근 콘크리트 강관합성 말뚝 등 다양한 단면 특성을 가지는 모형 말뚝을 제작하였다. 콘크리트의 설계 압축강도는 현장타설말뚝의 시공에 주로 사용되고 있는 35MPa로 결정하였다.

2.2 모형 말뚝의 종류

기존의 현장타설말뚝 말뚝과 비교하여 강관합성 말뚝이 가지는 역학적 특성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 강관의 유무, 철근 배근 등 단면 및 재료 특성이 서로 다른 4가지의 시험체를 표 1 및 그림 2와 같이 제작하였다.

Type1은 기존에 사용되고 있는 현장타설말뚝으로 강관합성 말뚝의 내경과 동일한 크기의 단면 (직경=204.8mm)을 가지는 철근 콘크리트 말뚝이다. 8개의 D10 (공칭지름=9.53mm)을 철근을 철근망 형식으로 제작하여 배근하였으며, 철근비는 1.73%이다. 콘크리트 피복 두께는 콘크리트 구조설계기준 해설(2003)에 따라 30mm를 확보하였고, 설계기준강도 35MPa의 콘크리트를 사용하였다. Type2는 KS D3566 규격 기준에 따라 생산되는 외경(D) 216.5mm, 두께(t) 5.85mm의 구조용 탄소강관으로 현장에서 사용되는 강관 말뚝의 축소 모형에 해당 된다. Type3은 강관합성 말뚝의 설계 시, 강관에 의한 철근 대체 효과를 시험하기 위한 실험군으로, Type2에서 사용한 구조용 탄소 강관 내부에 설계기준강도 35MPa의 무근 콘크리트로 충전 된 형태의 말뚝이다. Type4는 기존의 현장타설말뚝에서 강관 케이싱을 구조체로 보고 제거하지 않은 강관합성 말뚝으로, 철근 배근 및 콘크리트 물성은 Type1과 동일하며, Type2에 사용된 강관을 이용하여 제작하였다. 또한, 말뚝 시험체의 재료적인 특성 평가 및 실험에 대한 길이 효과를 평가하기 위하여 Type 1~4와 동일한 단면 및 재료 특성을 가지는 길이 40cm의 말뚝 모형체를 제작하였다. Type 5~8의 단면 특성은 각각 Type 1~4와 동일하며, 말뚝의 길이에서만 차이를 보인다.

모형 말뚝의 제작 과정에 하중의 재하에 따른 시험체의 변위 측정을 위하여 전기 저항식 변형률 게이지를 설치하였다. Type5 모형 말뚝의 경우, 높이 20cm되는 지점에 90° 간격으로 4등분하여 콘크리트 외벽에 변형률 게이지를 부착하였으며, 내부 변형률을 함께 측정하기 위하여 모형체의 제작전에 동일 높이의 철근망에 변형률 게이지를 부착하였다. 강관이 사용된 Type6, 7, 8 모형체의 경우, 모두 강관 외벽에 90° 간격으로 4등분하여 변형률 게이지를 부착하였다. 내부에 철근이 없는 Type7의 경우 가이드 프레임을 제작하여 철근망을 이용한 경우와 동일한 위치에 콘크리트 매립용 변형률 게이지를 부착하였으며, 철근망을 포함하는 Type8의 경우, Type5와 동일하게 매설하였다. 설치된 변형률 게이지의 배열은 그림 2와 같다. 길이 2700mm인 Type 1~4 모형 말뚝의 경우에는 단면내 배열은 Type 5~8과 동일하게 하였으며, 말뚝의 축방향 배열은 선단부를 기준으로 하여 높이 330, 475, 650, 825, 1000, 1175, 1350, 1700, 2050, 2370mm되는 곳에 설치하였다.

표 1. 모형 말뚝의 종류

	강관	콘크리트	철근	길이(m)	설 명
Type1	-	35MPa	8×D10	2.7	철근콘크리트 말뚝
Type2	D216.5	-	-	2.7	강관 말뚝
Type3	D216.5	35MPa	-	2.7	강관합성 말뚝 (무근)
Type4	D216.5	35MPa	8×D10	2.7	강관합성 말뚝 (철근)
Type5	-	35MPa	8×D10	0.4	철근콘크리트 말뚝
Type6	D216.5	-	-	0.4	강관 말뚝
Type7	D216.5	35MPa	-	0.4	강관합성 말뚝 (무근)
Type8	D216.5	35MPa	8×D10	0.4	강관합성 말뚝 (철근)

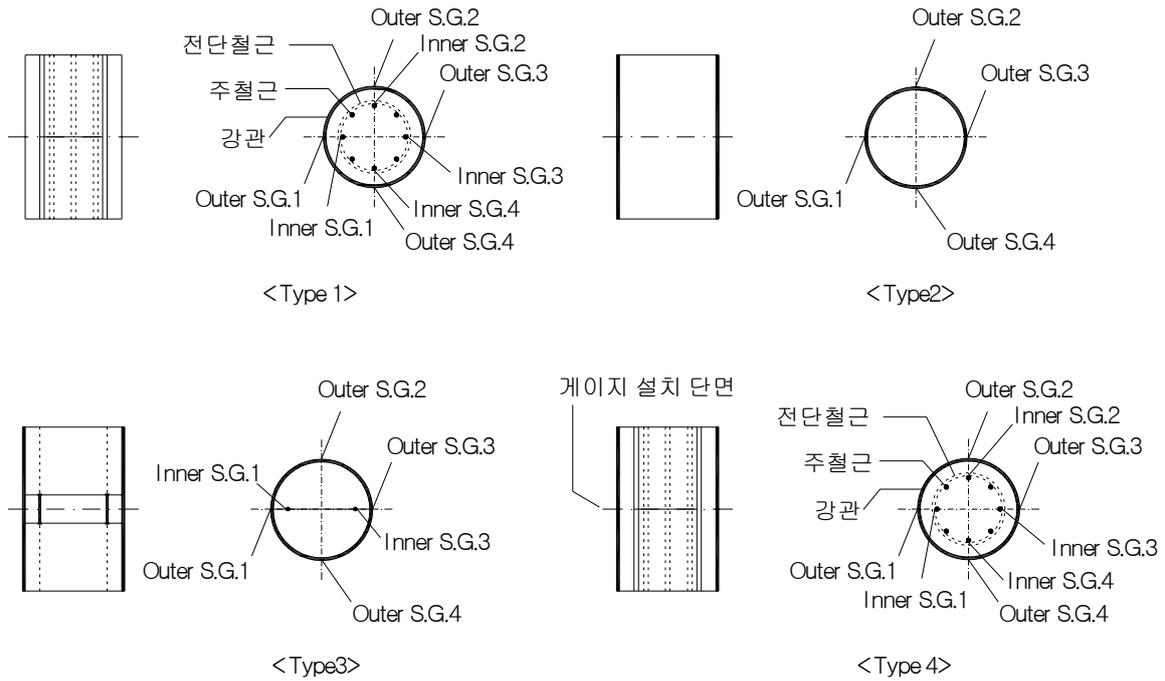


그림 2. 모형 말뚝의 단면 특성 및 변형률 게이지의 설치

3. 하중 재하 시스템

본 연구에서는 재료 특성으로 예측한 말뚝의 단면 특성에 따른 극한하중 및 모형 말뚝의 크기를 고려하여 2가지 하중 재하 시스템을 사용하였다. 첫째는, 길이 40cm 말뚝에 적용한 UTM으로 최대 300ton의 하중을 재하할 수 있다. 그림 3(a)는 길이 40cm 말뚝에 대하여 시험을 수행중인 UTM의 모습으로 하중 제어 방식 및 변위 제어 방식을 적용할 수 있다. 하중의 재하에 따른 말뚝의 변위는 90o간격으로 설치한 4개의 변형률계(LVDT)를 이용하여 특정할 수 있다. 하중의 재하는 콘크리트 말뚝의 급격한 항복을 막기 위하여 변형률 속도 1.3mm/min의 변위 제어 방식을 사용하였다.

모형 말뚝의 변형특성 및 연직 극한하중의 평가는 기본적으로 길이 40cm의 말뚝 모형체를 이용하여 평가할 수 있다. 그러나, 실제 모형 말뚝의 거동에 있어서 길이 효과의 확인 및 시험체의 균질성 확보 등을 위하여 모형 말뚝에 대한 수직 압축 재하 시험을 수행하였다. 여기서 길이 효과는 모형 시험에서 나타나는 크기 효과의 확대된 개념으로 좌굴하중에 의한 극한하중의 저평가를 포함하고 있다.

모형 말뚝의 주재료인 콘크리트 및 강철의 문헌상 재료특성을 고려하여 평가한 연직 극한 하중은 말뚝 Type에 따라 100 ~ 300ton 사이에 분포한다. 현실적으로 이와 같은 용량의 대형 압축 재하 장비 운용에는 어려움이 있어 강관 및 철근콘크리트 말뚝의 재하 특성에 초점을 맞추어 200ton 규모의 대형 UTM을 이용하여 말뚝의 재료 특성 및 연직 거동 특성을 평가하였다. 연직하중 재하 시, 말뚝에 편심하중이 가해지는 것을 방지하기 위하여, 재하 프레임에 말뚝을 고정할 수 있는 스틸 블럭을 이용한 부가장치를 제작하여 적용하였다. 하중의 재하에 따른 말뚝의 변위는 180o간격으로 설치한 2개의 와이어 타입 변형률계를 이용하여 특정할 수 있다. 그림 3(b)는 모형 말뚝의 연직 하중 재하 시험에 사용된 200ton 용량의 대형 UTM을 보여주고 있다.



(a) 하중 재하 장치 (300ton)



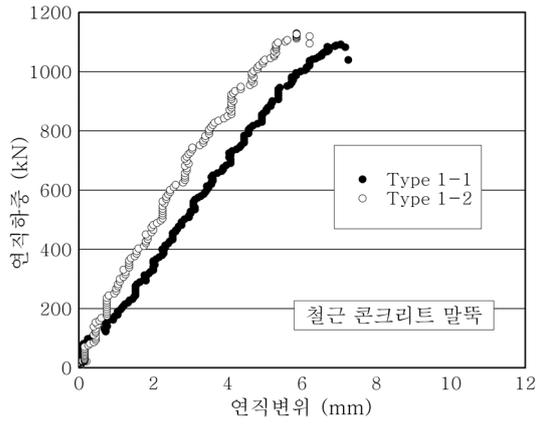
(b) 대형 UTM (200ton)

그림 3. 하중 재하 장치

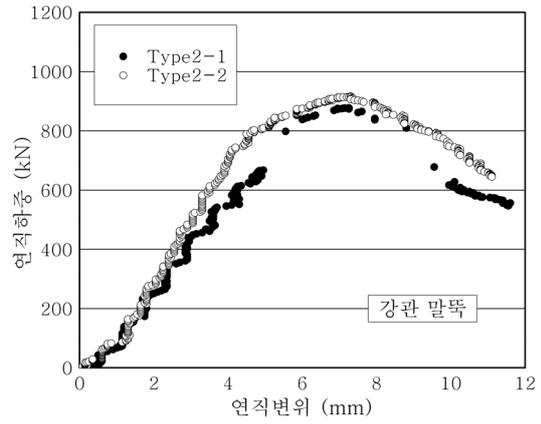
4. 실험 결과

본 연구에서는 단면 특성 및 길이를 달리한 8가지 모형 말뚝에 대하여 각각 2~3회씩 연속 재하 시험을 수행하여 강관합성 말뚝의 구조적 거동 특성을 평가하였다. 그림 4는 재하 시험으로부터 얻은 하중-변위 곡선을 보여주고 있다. Type 3, 4의 길이 2.7m인 강관합성 말뚝에 대해서는 하중 재하 시스템의 재하 용량 한계로 극한하중까지의 실험 결과를 얻지 못하였다. 각 시험 결과로부터 얻어진 극한 하중은 표 2에 정리한 바와 같다. 시험 결과 얻어진 극한 하중은 철근 콘크리트로 구성된 Type5를 제외하고는 평균값 대비 편차가 3% 이내로 시험 결과의 좋은 재현성을 보여주었다.

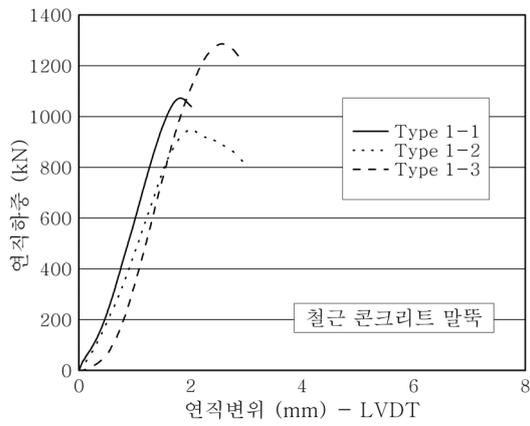
각 단면 type에 따른 하중-변위 양상을 살펴보면 다음과 같이 정리해볼 수 있다. 압축력만을 받는 철근 콘크리트 말뚝의 경우, 철근에 인장력이 발현되는 경우가 없기 때문에, 철근 콘크리트 말뚝 모형체는 단면이 증가된 무근 콘크리트 공시체와 유사한 거동을 보이게 된다. 따라서, Type1, 2, 5, 6은 재료의 고유 특성에 의해 극한하중이 결정되는 단일 부재로 볼 수 있다. 이들의 하중-변위 곡선은 기존에 알려진 바와 같이, 철근 콘크리트 말뚝 모형체는 극한하중을 지난 뒤, 급격한 취성 파괴의 양상을 보여 주고 있으며, 강관 말뚝 모형체는 일반적인 강재의 하중-변위 곡선처럼 극한 하중을 지난 뒤, 유사한 하중 수준을 유지하는 연성파괴의 거동을 보여주고 있다.



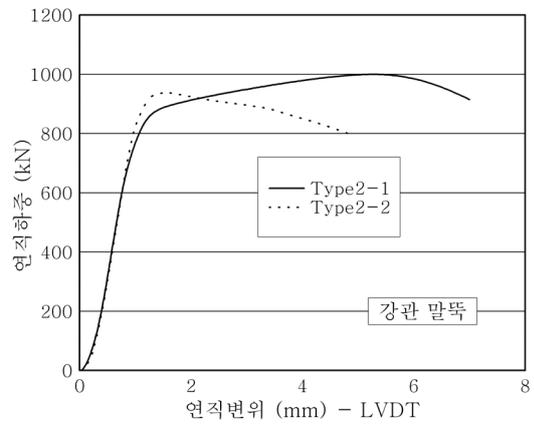
(a) Type1 - 철근 콘크리트 말뚝



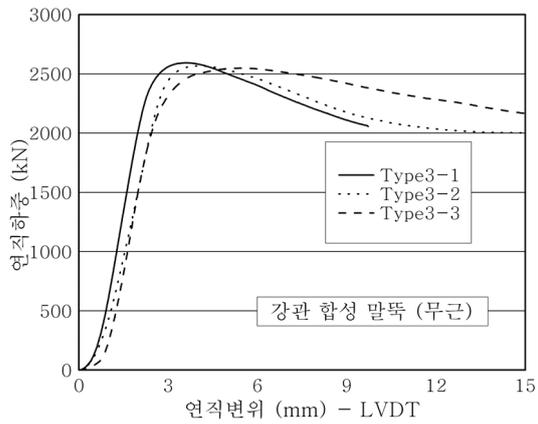
(b) Type2 - 강관 말뚝



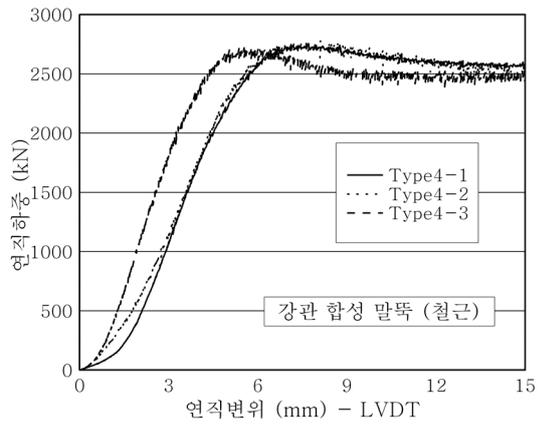
(c) Type5 - 철근콘크리트 말뚝 (L=0.4m)



(d) Type6 - 강관 말뚝 (L=0.4m)



(e) Type7 - 강관합성 말뚝 (무근, L=0.4m)



(f) Type8 - 강관합성 말뚝 (철근, L=0.4m)

그림 4. 모형 말뚝에 대한 압축 재하 실험 결과 (하중-변위 곡선)

표 2. 말뚝의 단면 형태에 따른 극한 하중의 변화

Test	구성	극한하중(kN)		편차 (%)
			평균	
Type1-1	철근 콘크리트 말뚝	1092	1111	-1.7
Type1-2		1129		1.7
Type2-1	강관 말뚝	919	926	-0.8
Type2-2		933		0.8
Type5-1	철근 콘크리트 말뚝	1075	1131	-4.9
Type5-2		1030		-8.9
Type5-3		1287		13.8
Type6-1	강관 말뚝	1000	969	3.3
Type6-2		937		-3.3
Type7-1	강관합성 말뚝 (무근)	2594	2570	0.9
Type7-2		2568		-0.1
Type7-3		2548		-0.9
Type8-1	강관합성 말뚝 (철근)	2758	2754	0.1
Type8-2		2776		0.8
Type8-3		2729		-0.9

말뚝의 길이에 따른 극한하중 변화를 보기 위하여 Type 1, 2와 Type 5, 6의 결과를 비교하면, 표 3에 서와 같이 L=2700mm인 말뚝의 극한 하중은 각각 1111kN과 926kN으로 L=400mm인 모형 말뚝에 대한 실험으로부터 얻어진 극한 하중의 96%, 98%에 해당하는 값이다. 2가지 단면 type에 대한 실험 결과를 기준으로 판단할 때, L/D가 10이내에서는 L/D 값의 증가에 따른 극한하중 변화가 거의 미미한 것을 알 수 있다. 즉, L/D가 10인 경우에도 좌굴과 같이 재료가 가지는 극한 강도 이전에 모형체가 먼저 항복에 이르는 현상이 발생하지 않음을 알 수 있다. 좌굴하중은 말뚝의 길이 및 단면의 휨강성(EI) 값에 의해 결정되는 특성을 가진다. 강관합성 말뚝의 경우, 말뚝의 길이는 동일하나 단면의 휨강성이 철근 콘크리트 말뚝이나 강관 말뚝에 비하여 크게 증가하기 때문에 좌굴에 대한 안정성은 Type1, Type2에 비하여 클 것으로 판단된다. 비록 두가지 단면에 대하여만 비교 실험을 수행하였으나, 강관합성 말뚝(Type3, Type4)의 경우에도 L/D에 따른 극한하중의 변화는 없을 것으로 판단된다.

표 3. 길이대 직경비에 따른 극한 하중의 비교

Test	L/D (길이/직경)	극한하중(kN)
Type1	10	1111
Type2	10	926
Type5	2	1131
Type6	2	969

Type7과 Type8의 모형 말뚝은 강관의 특성과 콘크리트의 특성을 함께 가지는 복합체로 압축하중을 받을 때, 부재간의 상호 간섭을 통하여 단독 부재들의 수치적인 합과는 다른 결과를 보일 수 있다. Type5과 Type6의 극한하중의 합은 2100kN이나, 이들의 조합으로 이루어진 Type8의 극한하중은 2754kN이다. 이는 강관합성말뚝과 같은 복합 부재의 경우, 단일 부재의 극한 응력의 수치합으로 극한 하중을 산정할 수 없음을 의미한다. 이와 같은 복합 재료에서 나타나는 하중 증가효과를 ‘강관합성효과’

로 정의하면 본 연구에 사용된 모형체에서 나타나는 강관합성효과는 식 1을 이용하여 평가해볼 수 있다.

$$\frac{Type8(\text{강관합성})}{Type5(RC) + Type6(\text{강관})} = 1.31 \quad (1)$$

식 1에 나타난 강관합성효과는 약 31%로 강관합성 말뚝의 사용 시, 철근 콘크리트 말뚝 및 강관 말뚝을 개별적으로 사용하는 것에 비하여 31%의 부재력 증가 효과를 볼 수 있다는 의미이다. 이러한 강관합성효과가 나타나는 원인은 두 가지 측면에서 생각해 볼 수 있다. 첫째는, 강관 내부에 구속된 콘크리트의 극한하중 증가이다. 콘크리트 공시체를 이용한 극한하중의 평가는 구속압이 없는 1축 압력 재하 상태에서 이루어진다. 반면, 재료의 강도는 구속응력의 존재 여부 및 그 크기에 의해 영향을 받는다. 재료의 항복시점을 정의하는 재료 모델 중, Mohr-Coulomb model 및 Drucker-Prager model은 구속압과 관련된 재료의 항복 특성을 포함하고 있다. 강관은 콘크리트에 비하여 매우 큰 탄성계수 및 극한응력을 갖는데, 이들에 의한 구속으로 인하여 내부 콘크리트의 항복하중이 증가하는 원리이다. 이러한 측면에서 보면 강관의 항복시점까지 내부의 콘크리트는 횡방향 부피 변형이 발생하지 않기 때문에 항복상태에 이르지 않고 계속 내부 응력이 증가하게 되고, 증가된 항복응력이 강관합성 말뚝의 극한강도를 증가시키는 결과를 가져오게 된다. 둘째는, 관 내부에 구속된 콘크리트의 탄성계수 증가이다. 단일 부재의 탄성계수는 극한하중과 무관한 값이지만, 보다 큰 탄성계수를 가지는 재료에 의하여 구속된 재료의 탄성계수 증가는 극한하중 증가를 가져올 수 있다. 첫 번째 요인에서 언급한 바와 같이 강관의 항복 시점까지 콘크리트의 내부 응력은 증가하게 되는데, 이러한 과정에서 탄성계수가 클수록 내부 응력의 증가 정도가 더 커지게 된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 해상 교량기초로 사용되는 현장타설말뚝에서 희생강관을 구조재로 활용하는 강관합성 말뚝 공법 개발을 위한 기초연구로 수직재하시험 통하여 강관합성 말뚝의 재료적인 특성을 평가함으로써 강관합성 말뚝의 역학적 거동 분석을 위한 기초자료를 제공하고자 한다. 철근콘크리트, 강관, 강관합성(무근), 강관합성(철근) 등 다양한 종류의 단면을 가지는 모형말뚝을 제작하고 대형 UTM을 이용하여 철근콘크리트 및 강관, 강관합성의 탄성계수 및 극한하중 등의 재료적인 특성을 평가하였다. 모형말뚝에 대한 재하시험 결과 철근콘크리트와 강관의 극한하중 합계에 비하여 강관합성(철근)의 극한하중이 약 31% 증가하는 결과를 보였으며, 이는 강관에 의한 횡방향 구속으로 인하여 강관 내부 콘크리트의 항복강도 및 탄성계수가 증가하기 때문이다. 또한 길이대 직경비(L/D)에 관계없이 모형말뚝의 극한하중이 비슷한 결과를 보이는 것으로 나타나 본 연구에서 제작된 모형말뚝의 경우 좌굴발생에 의한 극한하중 감소 및 길이대 직경비(L/D)의 영향은 무시할 수 있는 수준으로 확인되었다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회 (2008), 콘크리트 구조설계 기준 해설, 기문당.
2. Mander, J.B., Priestly, M.J.N., and Park, R., (1988), "Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete, Journal of Structural Engineering", ASCE, V. 114, No. 8, Aug., pp. 1827-1849.
3. Scott, B.D., Park, R. and Priestley, M.J.N., (1982), "Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates", ACI, Title No.79-2, January-February, pp.13-27.