

부마찰력 저감용 주입재의 특성 연구

A Study on the characteristics of Grouting Material to Decrease Negative Skin Friction

정성민¹⁾, Sungmin Jung, 김채민²⁾, Chemin Kim, 황정환³⁾, Jeonghwan Hwang, 이민희⁴⁾, Kyungjun Lee, 최용규⁵⁾, Yongkyu Choi

¹⁾ (주)지텍크 지반부 차장, Deputy General Manager, G-tec Ltd.

²⁾ 경성대학교 토목공학과, 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Kyung Sung Univ.

³⁾ 경성대학교 토목공학과, 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Kyung Sung Univ.

⁴⁾ (주)지텍크 지반부 대표이사, President, G-tec Ltd.

⁵⁾ 경성대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Kyung Sung Univ.

SYNOPSIS : In order to reduce negative skin friction uses bitumen most plentifully. But, Bitumen is expensive very of 1.5 or more times of pile material expense. The bitumen will be able to substitute it is necessary. It was researched that it would be able to bitumen substitutions from in products which is produced from domestic in this study. This was composed with most bentonite, added some cement. When it is used this product in the model test, the reduction ratio appear of 85% or more. In this result, this product as the reduction material is confirmed that has enough ability. Additional research leads, the product according to pile construction method must verify the reduction effect of negative skin friction in field test.

Keywords : negative skin friction, bitumen, bentonite, reduction ratio

1. 서 론

국내 전국적인 균형발전을 위하여 도시기반시설을 확보하기 위한 도로, 철도, 항만 및 공항 등 교통시설공사가 전국적으로 진행되고 있다. 그리고, 이들 교통시설이 확보된 구역에서는 공간시설(공원, 광장, 녹지, 공공지 등)의 택지공사가 이루어진 후 주택, 보건위생시설, 환경기초시설 등이 설치된다.

개발여건이 양호한 지반은 대부분 개발이 완료되었고 현재 개발되는 대부분의 지역은 논, 해안매립구역, 하천 등 연약지반이 매우 많이 분포하는 지역이다. 따라서, 연약지반에서의 구조물 기초공사가 가장 큰 문제로 대두되며 이것에 대한 설계 및 공사기간, 공사비용 등이 문제가 된다.

특히, 해안매립구역이나 기존연약지반의 성토를 이용한 도로, 철도공사시 구조물 기초공사로 말뚝기초를 이용하여 중요구조물을 시공하는 것이 합리적이고 경제적인 시공법으로 알려져 있다(이규환 등, 1998).

이와 같이 연약지반에서 말뚝을 시공하는 경우 지반이 침하하면서 말뚝과의 상대변위에 의해 발생하는 부마찰력이 말뚝에 하중으로 작용한다. 과도한 부마찰력이 예상되는 연약지반에서 말뚝기초위에 구조물을 시공하는 경우 말뚝체의 파괴나 말뚝선단지반의 파괴 등으로 부등침하나 허용변위량 이상의 침하량으로 인하여 구조물의 안전성 및 사용성에 영향을 줄 수 있다.

이러한 부마찰력에 대한 현장시험으로 “00건설공사 부마찰력 확인을 위한 현장시험”(경성대학교 공학기술연구소, 2002)에서 연직배수공법이 시공된 현장에 강관말뚝을 시공 하고 성토하중을 재하하여 SL도포

말뚝과 미도포말뚝에 대한 부마찰력의 발현양상을 장기측정하고 그 후 재하시험을 수행하였는 데 성토 완료 후 지반의 침하가 발생하면서 0.7~6.0 MN까지의 매우 큰 부마찰력이 발생하는 것을 확인하였다. 따라서, 압밀침하가 급격히 이루어지고 있는 상태에서 말뚝을 시공하는 것이 매우 위험한 것임을 재확인하였다. SL도포 말뚝에서는 과재성토로 인하여 지반이 연직 및 수평변위가 과대하게 발생하여 말뚝에 휨모멘트를 발생시켰으며, 이로 인하여 SL도포재가 손상되었다. 손상된 말뚝의 부마찰력 측정결과 미도포말뚝보다 크게 측정되기도 하였으나, 성토체의 중간부에 시공된 시험말뚝(SL도포)의 경우 미도포말뚝 보다 약 83%저감되는 것으로 나타났다.

최근 국내의 부마찰력 저감공법은 대부분 SL도포를 이용하고 있지만 강관말뚝($\phi 508$, $t=10\text{mm}$)의 가격에 비하여 SL도포 말뚝은 1.5배 이상으로 매우 높은 가격이다. 이러한 상황에서 SL도포말뚝 외에 현장에서 말뚝의 부마찰력을 저감할 수 있는 공법이 필요하게 되었다. 이런 필요에 따라 개발된 공법을 2가지로 살펴볼 수 있는데 첫 번째로는 말뚝보다 큰 케이싱을 지반에 시공하고 내부를 터파기한 후 기성말뚝을 시공하고 케이싱과 말뚝사이에 역청재 또는 벤토나이트를 주입하는 방법(출원번호 10-2006-0037409)이고 2번째로는 항타 또는 선굴착에 의해 시공된 기성말뚝의 경우 말뚝외부 저감재를 주입 및 분사가 가능한 케이싱을 말뚝외부에 중립점까지 회전관입시켜 인발하면서 부마찰력 저감재를 분사하는 시공방법과 말뚝시공 전 케이싱을 관입시키고 케이싱내부를 굴착하여 기성말뚝을 시공하고 케이싱을 인발하면서 저감재를 주입 및 분사하는 방법(출원번호 10-2008-0014469)이다.

상기 2가지의 부마찰력 저감공법을 통하여 강관말뚝 재료비를 제외한 SL도포 말뚝의 시공비(재료비 포함)보다 최소 17%이상의 비용을 저감할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 역청재를 이용할 경우 주입된 일정온도를 유지하여 주입이 가능하도록 하여야 하며 역청재를 보관 및 온도유지하기 위한 대형 플랜트가 필요하다. 또한, 이를 작동하기 위해서는 많은 비용이 추가될 것으로 사료된다. 그러나 현장에서 교반하여 바로 사용가능한 저감재를 이용할 수 있다면 대형의 플랜트가 불필요하여 시공비를 저감시킬 수 있을 것이다.

따라서, 본 연구에서는 부마찰력의 저감을 위하여 사용되는 역청재 대신 국내에서 생산되는 제품으로 현장에서 제작하여 바로 사용할 수 있도록 하기 위해 실내모형말뚝시험을 실시하였으며 여기서 저감율 및 저감재의 특성을 규명하고자 하였다.

2. 실험장치

단일말뚝에 대한 부마찰력관련 실험을 진행하였다. 바닥면과 상부에 배수재를 설치한 원형토조 내에 모형점토지반을 조성하고 모형말뚝을 시공한 후 모형지반의 상부에 하중을 가하여 지반의 침하를 발생시켰다. 또한, 이때 말뚝에 발생하는 부마찰력을 측정하였다. 그러나, 본 연구에서는 저감재의 저감율을 확인하기 위하여 자연건조된 모래지반과 포화된 모래지반을 각각 형성하고 말뚝을 인발하여 지반과의 상대변위를 발생시켰다. 이때 말뚝두부의 변위와 하중을 측정하여 최대 인발저항력을 측정함으로써 저감재의 마찰력 저감효과를 확인하고자 하였다.

본 연구에서 사용된 모형토조(그림 1)는 내경 38cm, 외경 40cm, 높이 100cm로 제작하였으며, 모형말뚝은 선단을 원추형 선단으로 폐색시켰으며 말뚝의 외경은 40mm이었다. 또한, 저감재 주입 케이싱의 외경은 46mm, 52mm, 58mm를 이용하여 말뚝외부 저감재의 두께를 3mm, 6mm, 9mm로 변화 시켰다.

그림 1은 단일말뚝 실험장치의 개요도인데 실험장치는 원형토조, 모형말뚝, 로드셀, 수조로 구성되어 있다. 변위계는 0.01mm의 정도를 가진 줄변위계를 사용하여 말뚝두부와 상당거리 이격되게 설치하였다. 하중재하는 수조에 물을 지속적으로 공급함으로써 작은 하중으로 부터 지속적으로 증가할 수 있도록 하였다. 유압잭이나 추를 이용할 경우 임의 재하단계에서 급작스러운 파괴가 발생할 수 있으므로 파괴상태의 하중을 찾기가 어렵다. 따라서 본 실험에서와 같이 밸브조정에 의해 유량을 조절함으로써 재하속도를 조절할 수 있게 한다면 파괴상태를 비교적 정확하게 알아낼 수 있다. 그리고, 최대유량 980N을 최소 0.196N 단위로 측정할 수 있는 로드셀을 이용하였으며 변위와 하중을 매초단위로 측정하였다.

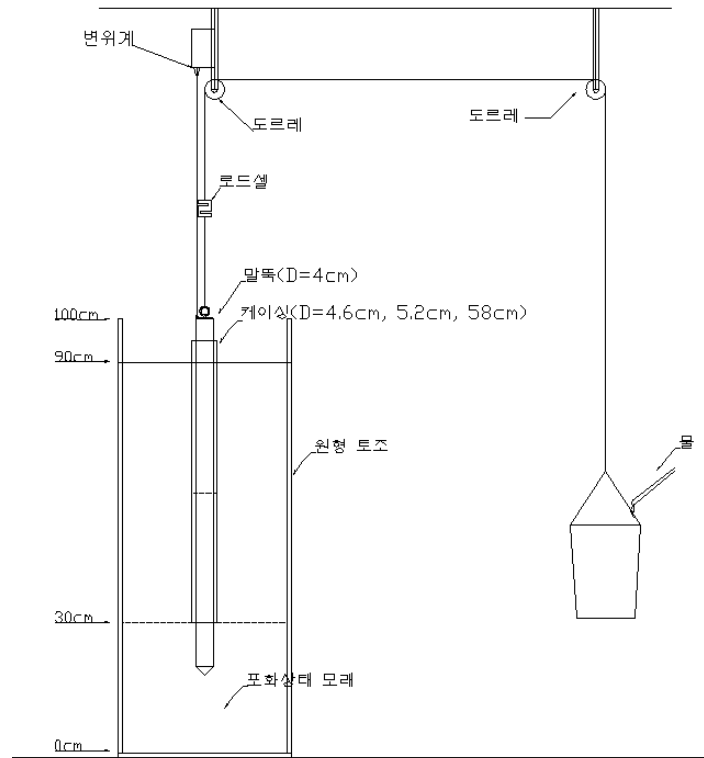


그림 1. 모형말뚝시험 개요도

3. 실험준비 및 방법

3.1 저감재의 조성

본 모형실험에서는 저감재의 주성분으로 벤토나이트를 이용하였으며, 물과의 혼합시 벤토나이트의 배합량에 따라 슬러리상태의 점성이 달라진다. 그러나, 말뚝의 시공과정에서 케이싱을 인발하면서 저감재를 주입하게 되는 데 이 때 지반이 느슨한 경우 케이싱 인발에 의하여 공벽이 붕괴되어 저감재가 채워진 공간으로 흠이 흘러내릴 우려가 있다. 따라서, 느슨한 상태의 지반의 공벽이 무너지지 않을 적정의 배합비를 찾는 것을 우선으로 하였다. 그래서, 물 1L에 벤토나이트의 함량을 최소 0.49N에서 0.098N씩 증가 시켰으며, 교반기에서 2000rpm으로 10분을 교반하여 저감재를 제작하였다. 벤토나이트의 함량이 0.69N이상의 경우 교반 후 겔 상태가 바로 나타났으나, 0.49N과 0.58N의 경우 교반 직후에는 다소 점성이 부족하여 액체상태를 나타내었으나, 5시간 정도 경과 후에는 겔상태를 나타내었다.

느슨한 모래지반에서 공벽의 유지상태를 확인하기 위하여 1000ml의 비이커의 중앙을 아크릴판으로 막고 반쪽에는 포화된 모래를 그리고 다른 반쪽에는 저감재를 넣은 후 칸막이를 제거하였다. 이때, 모래가 저감재 쪽으로 무너지는 것을 볼 수 있었는데 이때 침하된 높이와 바닥면에서 모래가 이동한 거리를 측정하였다(그림 2). 각 배합비에서 측정한 결과를 표 1에 나타내었다. 벤토나이트 0.78N이상의 배합비에서는 수직 변위량과 수평 변위량이 동일하게 나타났다. 따라서, 벤토나이트의 함량은 최소 0.78N으로 하여 저감재를 제작하였으며, 저감재의 비중을 높이기 위하여 시멘트를 혼합하여 저감재를 제작하도록 하였으며, 모형시험에선 약 0.098N의 시멘트를 혼합하여 저감재의 비중을 증가시켰으며 0.392N의 시멘트를 혼합한 저감재에서도 모형말뚝시험을 수행하였다.



(a) 모래 및 저감재 (b) 수직 변위량 (c) 수평 변위량

그림 2. 포화된 모래와 저감재의 안정성 확인

표 1. 그림 2에서 측정된 시료별 수직 및 수평 변위량

	시료(벤토나이트함량(N)/물1L)					
	A(0.49N)	B(0.59N)	C(0.69N)	D(0.78N)	E(0.88N)	F(0.98N)
수직변위량(mm)	50	45	22	10	10	10
수평변위량(mm)	50	20	14	4	4	3

3.2 실험방법

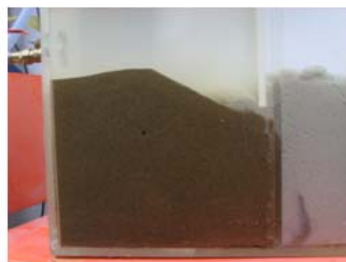
본 연구에서는 처음 자연건조상태로 모래지반을 형성하고 저감재 A를 이용하여 시험을 수행하였으나, 저감재가 현장에서 시공되었을 때 지하수의 흐름에 의해 모래지반의 공극으로 침투되지 않을까 하는 우려로 인하여 그림 3(a)와 같은 장치에 물의 흐름을 발생 시켰다. 그러나, 모래지반으로의 저감재의 침투보다는 좌측의 모래지반이 벤토나이트 쪽으로 무너지는 현상이 발생하게 되었다. 따라서, 앞의 그림 2와 같은 시험을 통하여 최소배합량을 확인하였다.



(a) 칸막이 제거 전



(b) 칸막이 제거 직후



(c) 칸막이 제거 후 10분 경과 후



(d) 물의 흐름에 의한 토사 붕괴

그림 3. 모래지반에서 벤토나이트의 침투시험

자연건조 모래지반과 포화된 모래지반에 대하여 각각 모형실험을 실시하였으며 포화된 모래지반에서 실시한 시험방법을 설명하면 다음과 같다.

먼저 원형 토조내에 포화된 모래를 이용하여 바닥면에서부터 30cm 높이까지 지반을 조성하고 토조의 중앙에서 모형말뚝을 지반속으로 10cm만큼 근입시키고 하부케이싱을 설치하였다. 그리고, 하부케이싱의 상단 높이까지 다시 지반을 형성하고 저감재를 일차 주입하였다. 그리고, 상부케이싱을 연결하고 나머지 지반을 형성하고 저감재를 주입하였다. 케이싱의 인발이 완료된 후 케이싱 두께의 공간을 채우면서 침하된 저감재의 높이를 보충하기 위하여 저감재를 2차로 주입하였다. 이후 말뚝의 상부에 로드셀이 연결된 케이블과 변위측정용 줄변위계를 설치하였다. 하중재하속도는 분당 9.81N의 속도로 하중을 재하 하였다.

4. 시험결과

4.1 자연건조 모래 지반

지반의 조성 시 가장 느슨한 상태를 유지하여야 하였으므로 레이닝의 낙하높이를 거의 없게 하여 모래를 뿌려 지반을 형성하였으며 이때 지반의 단위중량은 표 2와 같다.

표 2. 자연건조 모래지반의 단위중량

구 분	A	B	C
모래+ 캔(N)	6.25	6.59	6.25
물+ 캔(N)	5.08	5.04	5.09
캔(N)	0.61	0.56	0.61
모래 무게(N)	5.65	6.02	5.64
물 무게(N)	4.47	4.48	4.48
모래의단위중량(kN/m ³)	12.39	13.19	12.36
평균단위중량(kN/m ³)	12.39		

그림 4에서 저감재를 사용하지 않은 경우 평균 인발하중은 약 93.55N으로 나타났으며, 저감재 A를 사용 하였을 때 두께별 최대인발하중은 $t_1=3\text{mm}$ 의 경우 20.99N, $t_2=6\text{mm}$ 의 경우 32.36N, $t_3=9\text{mm}$ 의 경우 25.20N으로 나타났다(그림 5). 이 때의 저감율은 표 3에 나타내었으며 최소 저감율은 65.4%로 나타났

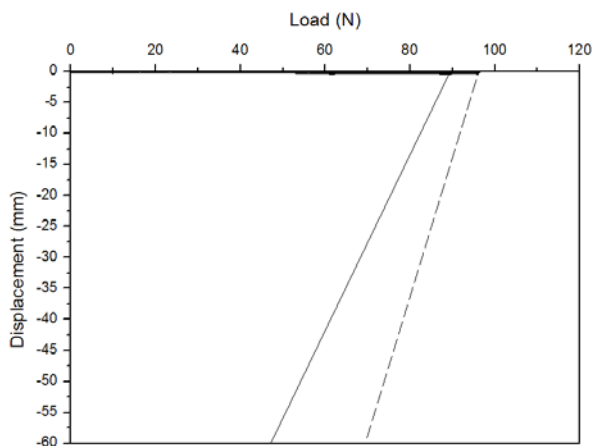


그림 4. 저감재 미사용시

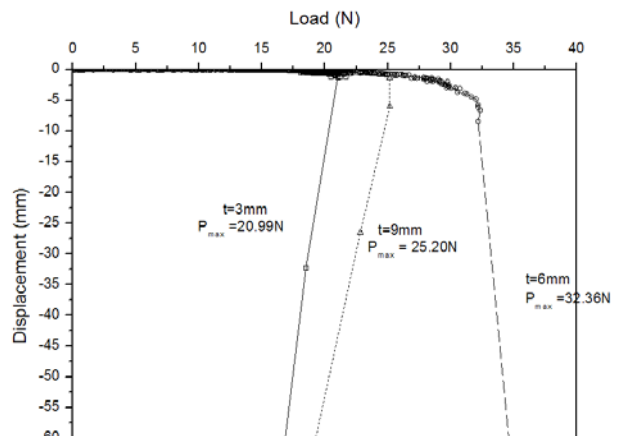


그림 5. 저감재 A 이용시

표 3. 저감재 A이용시 부마찰력 저감율

구 분	저감재 두께			비고
	3mm	6mm	9mm	
①저감재 미사용시 인발력(N)	93.55			평균인발력
②저감재 A사용시 인발력(N)	20.99	32.36	25.20	
③감소된 인발력(N)	72.57	61.19	68.35	
저감율(%)	77.6	65.4	73.1	③/①×100

4.2 포화된 모래 지반

공벽의 유지를 위하여 최소 벤토나이트의 배합량은 0.78N으로 결정하였으며, 저감재의 비중을 높이기 위하여 시멘트 0.098N과 0.39N을 혼합하여 저감재를 제작하여 모형시험을 실시하였다. 이후 벤토나이트와 시멘트의 함량에 따라 저감재의 기호를 다음 표 4와 같이 구분하였다.

표 4. 배합비에 따른 저감재의 구분

	시료명							
	A	B	C	D	E	F	G	H
물(L)	1	1	1	1	1	1	1	1
벤토나이트(N)	0.49	0.59	0.69	0.78	0.88	0.98	0.78	0.78
시멘트(N)	-	-	-	-			0.0981	0.39

그림 5에서와 같이 포화된 모래지반에서의 저감재를 사용하지 않은 경우 인발하중은 112.14~136.22N으로 나타났으며, 시험말뚝보다 직경이 큰 케이싱을 설치하였다가 인발한 경우 인발하중은 24.07N으로 저감재 미사용시 보다 작은 인발하중을 나타내었다(그림 6).

저감재 D를 사용한 경우 그림 7에서와 같이 최대인발하중이 10.60~19.23N의 범위로 나타났으며, 저감재 G를 사용한 경우 그림 8에서는 최대인발하중이 9.16~22.64N으로 나타났다. 그리고, 저감재 H를 사용하여 저감재 두께를 9mm 일때 최대인발하중 하중은 13.65~17.96N으로 나타났다.

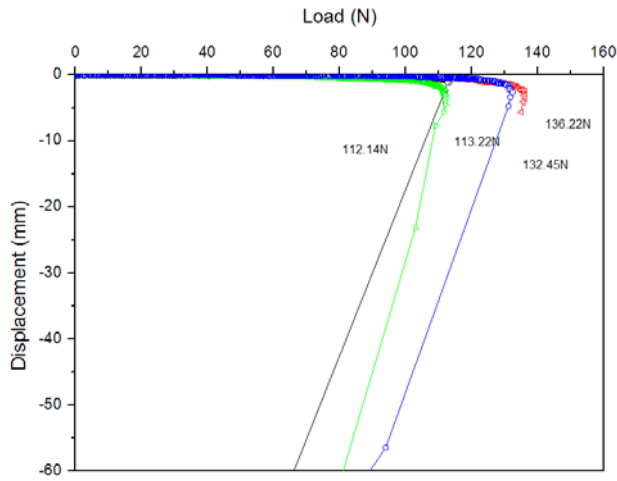


그림 5. 저감재 미사용시 인발시험 결과

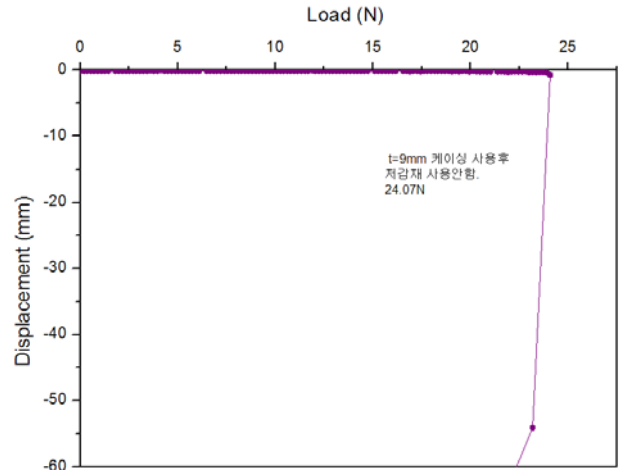
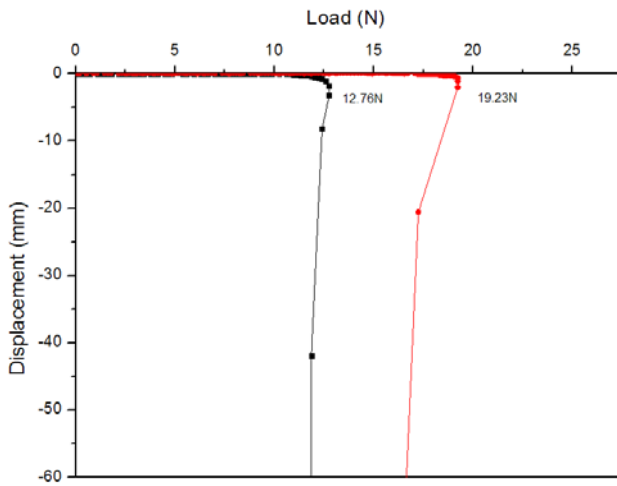
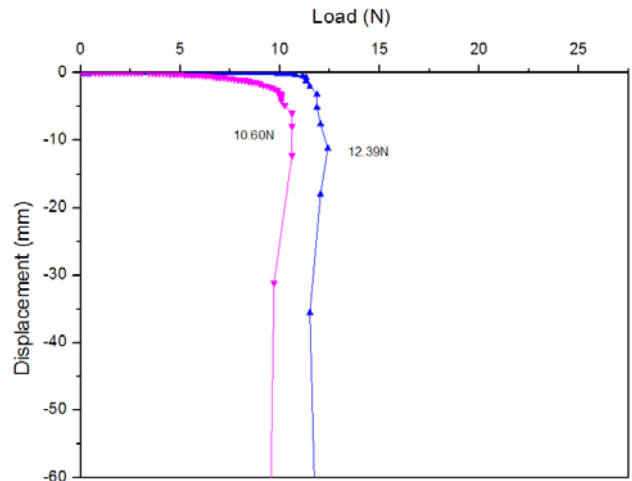


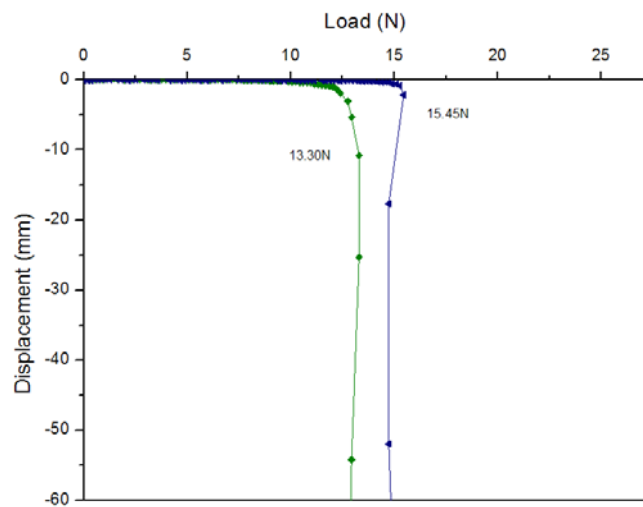
그림 6. 말뚝직경 보다 굴착공만을 크게한 경우 인발시험 결과



(a) 두께 t=3mm 일때

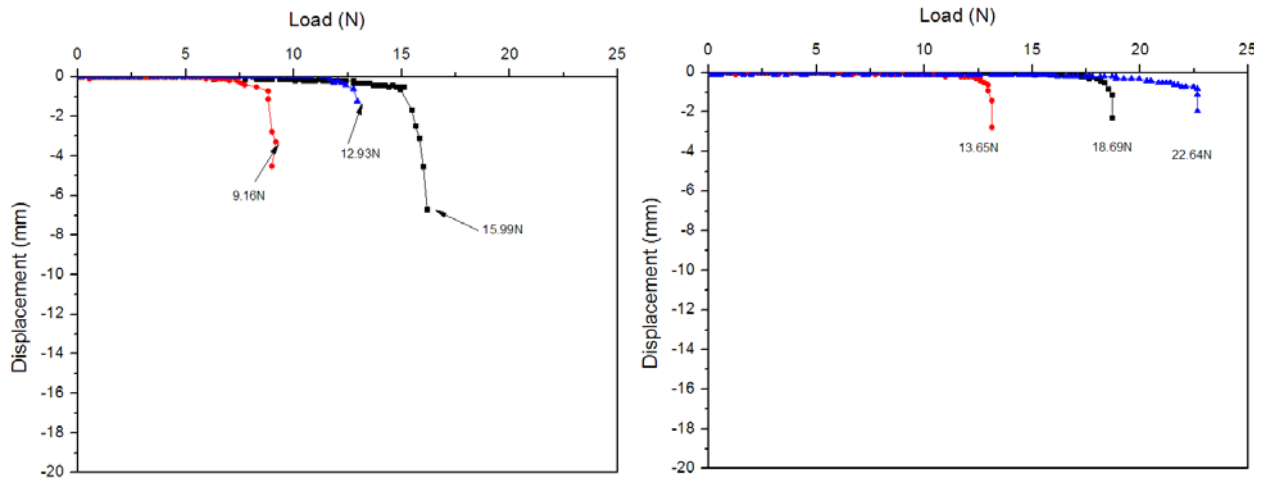


(b) 두께 t=6mm 일때



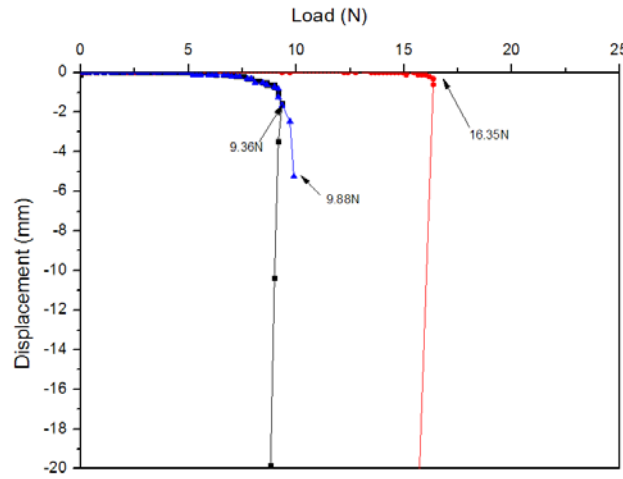
(c) 두께 t=9mm 일때

그림 7. 저감재 D 사용시 인발시험 결과



(a) 두께 $t=3\text{mm}$ 일때

(b) 두께 $t=6\text{mm}$ 일때



(c) 두께 $t=9\text{mm}$ 일때

그림 8. 저감재 G 사용시 인발시험 결과

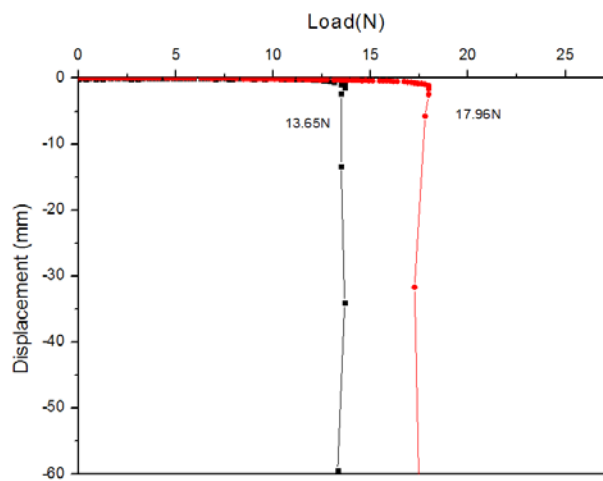


그림 9. 저감재 H 사용시 인발시험 결과(두께 $t=9\text{mm}$ 일때)
(그림 5~9에서 SI단위로 환산)

4.3 저감율에 대한 분석

상기 그림 5~9의 결과를 표 5에 요약하였으며, 케이싱만을 사용시 저감재를 미사용한 경우 보다 인발하중은 감소하였으나, 저감재를 사용한 경우 보다 크게 나타났다. 이는 케이싱을 인발한 후 공벽이 붕괴되었기 때문에 저감재를 사용한 경우보다 인발하중이 크게 나타난 것으로 사료되었다. 또한 시멘트의 함량이 증가된 H 시료의 경우 G시료의 인발저항력보다 크게 나타남으로 시멘트의 함량을 최소로 하여야 할 것으로 사료되었다.

그림 10에는 표 5의 결과를 이용하여 시료 및 두께별 저감율을 나타내었다. 시료의 두께가 9mm일 때 저감율이 다소 크게 나타나며, 대부분 85%이상의 저감율을 나타내었다.

표 5. 시료에 따른 저감율 요약

시료명	D			G			H	저감재 미사용	9mm 케이싱만 사용시	
	3mm	6mm	9mm	3mm	6mm	9mm	9mm			
최대 인발력 (N)	1	12.76	10.60	13.30	9.16	13.65	9.35	13.65	112.14	24.07
	2	19.23	12.39	15.45	12.93	18.69	9.88	17.96	113.22	
	3				15.99	22.64	16.35		132.45	
	4								136.22	
	평균	15.99	11.50	14.38	12.70	18.33	11.86	15.81	123.51	
저감율	87.1	90.7	88.4	89.7	85.2	90.4	87.2			

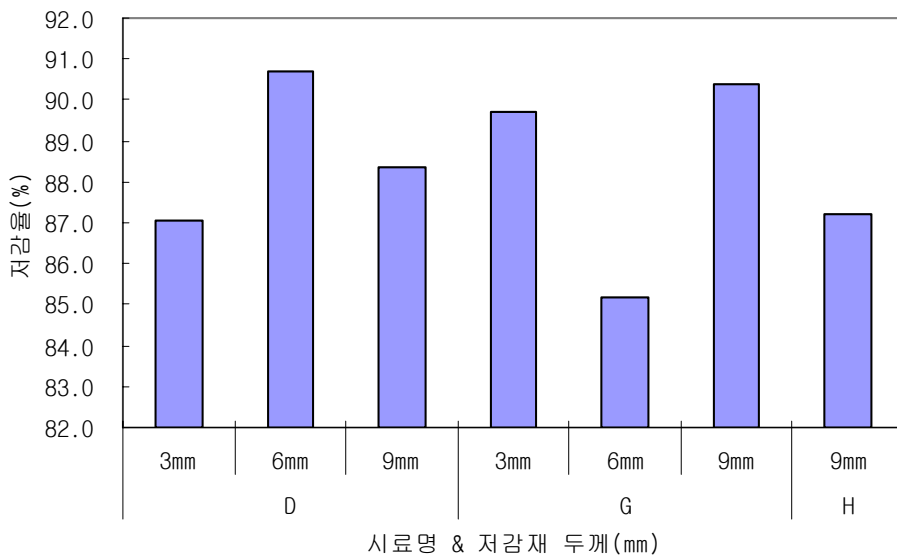


그림 10. 시료 및 두께에 따른 저감율

5. 결 론

본 연구에서는 벤토나이트를 이용하여 부마찰력 저감시 벤토나이트의 배합비와 저감효과를 확인하기 위하여 실내모형시험을 수행하였으며, 이를 통하여 다음과 같은 연구결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 느슨한 모래지반의 공벽을 유지하기 위한 벤토나이트의 최소 배합비를 확인하기 위하여 물 1L에 벤토나이트를 0.098N 증가시켜 시료를 제작하였으며 공벽의 붕괴시험을 통하여 벤토나이트의 최소 배합량은 물 1L에 0.78N(D시료)을 나타냈다.
- 2) 인발재하시험의 결과 저감재를 사용하지 않은 경우 최대인발하중은 112.14~136.22N으로 나타났으며, 저감재 D를 사용한 경우 최대인발하중이 10.60~19.23N의 범위로 나타났다. 그리고, 저감재 G를 사용한 경우 최대인발하중이 9.16~22.64N으로 나타났다. 저감재의 사용시 저감율은 평균적으로 85%이상으로 나타났다.
- 3) 저감재 G와 H를 사용하여 저감재 두께를 9mm 일때 각각의 평균최대인발하중 11.86N, 15.81N으로 나타나 시멘트의 함량이 증가 할수록 시멘트의 점착력에 의해 인발하중이 증가하는 것을 사료되었다. 따라서, 저감재의 비중을 높이기 위하여 최소 시멘트량을 결정하여야 할 것이다.
- 4) 추후 현장시험을 통하여 시공과정에서 발생할 수 있는 주입관의 크기, 주입용 펌프의 출력 등 추가적으로 검토할 요소들이 있지만 기존의 저감재를 사용하는 경우보다 훨씬 경제적인 방법으로 사료되었으며, 추후 현장시험을 통하여 시험장비 등의 제작과 현장검증시험이 병행되어야 할 것으로 사료되었다.

감사의 글

본 고의 내용은 부산테크노파크에서 시행한 산학공동기술혁신사업으로 경성대학교, (주)지텍크가 공동으로 수행한 “약액주입재를 활용한 부마찰력 저감공법 개발” 연구과제의 성과임을 밝힙니다.

참고문헌

1. 이규환, 심민보, 이장덕, 이송(1998), “모형말뚝에 작용하는 부마찰력 특성 연구”, **대한토목학회논문집**, 제Ⅲ-5호, pp.711~724.
2. 경성대학교 공학기술연구소(2002), “00 건립공사 부마찰력 확인을 위한 현장시험 연구용역”, 2002. 1..
3. (주)다이크(2007), “부마찰력을 감소시키기 위한 말뚝 시공 방법 및 그 방법에 의하여 시공된 말뚝구조물”, 출원번호 10-2006 -0037409.
4. (주)지텍크, 이민희(2009), “말뚝의 부마찰력 저감을 위한 약액주입 보강공법”, 출원번호 10-2008 -0014469.