

# 가시설 H-pile의 유동화 채움재 개발

## A Study on the Development of Flowable Fill Materials for H-pile

정 원 정<sup>1)</sup> · 임 중 철<sup>†</sup> · 김 태 효<sup>2)</sup> · 주 인 곤<sup>3)</sup> · 강 현 우<sup>4)</sup>

Jeong, Won-Jeong · Im, Jong-Chul · Kim, Tae-Hyo · Joo, In-Gon · Kang, Hyun-Woo

**ABSTRACT** : Nowadays, H-piles are usually used as temporary retaining walls, and sometimes buried in the ground after construction. The purpose of this study is the development of flowable fill materials that are easy to fill holes of retaining wall structure and minimize friction during pulling out H-pile. The first test was performed to decide mix proportion that is reasonable for purpose, in the second test, direct shear test was performed to get pullout resistance between flowable fills material and H-pile, and one dimensional consolidation test was performed to analyze the compressibility. In the test result, it showed that flowable fill material mix proportion is 350-450% of water, 70-100% of cement and 70-100% of sand based on the bentonite weight.

**Keywords** : Flowable Fills, H-pile, Bentonite

**요 지** : 흙막이 가시설 공사에 사용되는 H-pile은 철거의 어려움으로 공사 완료 후 그대로 지중에 사장되거나 사용 후 인발된다. 이때 H-pile 외부에 공동이 있을 경우 지반 변형을 일으키게 된다. 본 연구의 목적은 H-pile을 이용한 흙막이 구조물 조성 시 천공 후 공동 충진을 용이하게 할 수 있고, H-pile 회수 시 마찰을 최소화하는 채움재 개발에 있다. 일차시험에서는 연구 목적을 만족하는 배합비를 선정하기 위해 수행되었고, 이차시험에서는 사용재료와 철판의 전단시험으로 인발 시 적용성을, 압밀시험을 통해 공동 충진 시 적용성을 평가하였다. 시험결과 유동화 채움재로서 우수한 성질을 보이는 배합은 벤토나이트를 기준으로 물 350%~450%, 시멘트 70%~100%, 모래 70%~100%가 포함된 배합으로 나타났다.

**주요어** : 유동화 채움재, H-pile, 벤토나이트

## 1. 서 론

현재 시공되고 있는 아파트건설, 지하철공사 등 지하굴착이 필요한 현장에서 흙막이 공법이 많이 사용되고 있다. 이러한 도심지역에서의 지하 공간 공사는 인접 건물 및 지하구조물과 근접 시공되고 있으며, 제한된 공간에서 대형 지하구조물을 시공해야 하는 현장에서는 주변지반의 안정이 우선되어야 한다. 이를 위한 흙막이 공사의 중요성은 점차 커지고 있는 실정이다.

흙막이 공법은 일반적으로 많이 사용되는 버팀대(strut) 지지공법과 건축물 외벽 구조체가 흙막이 벽 역할을 하여 지하구조물을 축조하는 2가지 방법으로 구분할 수 있고, 이들 중 지반앵커 등과 복합형으로 시공이 용이한 버팀대 지지공법이 주로 사용되고 있다.

하지만 시공완료 후 엄지말뚝인 H-pile의 강제인발 시 주변지반의 영향 및 안정성문제 등으로 철거가 어려워, 지하공사 완료 후 그대로 지중에 사장되어 아까운 자원이 낭비

되고 있다. 이로 인하여 공사비가 증대되고, 장기적으로 환경오염의 요인이 되기도 한다. 따라서 지하구조물 공사 완료 후 지중에 사장되는 H-pile을 주변지반의 거동을 최소화하여 회수함으로써 재활용할 수 있는 기술 개발이 절실하다.

본 연구는 배합조건에 따른 유동성과 마찰력의 관계를 규명하고 이를 적용하여, H-pile을 이용한 가시설 흙막이 구조물 조성 시 공동 충진을 용이하게 하고, 철거 시 마찰을 최소화하여 회수를 용이하게 하는 채움재를 개발하는 데 목적이 있다.

## 2. 시험개요

### 2.1 시험 재료

#### 2.1.1 벤토나이트

본 연구에 사용된 벤토나이트는 국내 S사의 Ca-형 벤토나이트를 사용하였으며 일반적 물성치는 표 1과 같다.

1) 비회원, 부산대학교 토목공학과 석사과정

† 비회원, 부산대학교 토목공학과 정교수(E-mail : imjc@pusan.ac.kr)

2) 정회원, 부산대학교 토목공학과 박사과정

3) 비회원, 부산정보대학 토목공학과 교수

4) 학생회원, 부산대학교 토목공학과 석사과정

표 1. 벤토나이트의 물리적 성질

수분(%)	팽윤도(mL/g)	겉보기비중	pH값	입도(200 mesh 잔류량)
12 이하	11 이상	0.75~0.85	11 이하	20% 이하

2.1.2 시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 국내 L사의 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 품질시험 결과는 표 2와 같다.

2.1.3 골재

본 연구에 사용된 골재는 KS L 5100규정에 만족하는 표 준사를 사용하였고 기본 물성치는 표 3과 같다.

2.1.4 유동화제

본 연구에서 국내 D사의 나프탈렌 변성리그닌이 주성분인 나프탈렌계 유동화제를 사용하였고, 품질규준은 표 4와 같다.

2.2 일차시험

2.2.1 일차시험 개요

일차시험에서는 H-pile 매입 시 공동충진을 용이할 수 있는 유동성이 우수한 압축강도와 탄성계수를 보이는 유동화 채움재의 배합을 선정하는 것을 목적으로 한다.

2.2.2 일차시험 방법

(1) 플로우 테스트

굳지 않은 유동화 채움재의 유동특성을 평가하기 위하여 플로우 테스트를 실시하였다. 유동성 확인을 위해 일본 기준인 JHSA 313으로 유동성 시험을 실시하였으며, 고유동성의 기준은 20cm 이상이다(서창범, 2009).

(2) 일축압축강도시험

압축강도는 유동화 채움재의 적용분야나 굴착저항성에 따라 중요한 매개변수이므로 규격인 KS F 2314에 따라 압축강도시험을 수행하였다.

2.3 이차시험

2.3.1 이차시험 개요

이차시험에서는 일차시험을 통해 도출한 배합비를 선정하여 직접전단시험을 통해 H-pile 인발 시 마찰 저항성 적합여부를 판단하고, 일차원압밀시험을 통해 압축성을 평가한다.

2.3.2 이차시험 방법

(1) 직접전단시험

유동화 채움재와 H-pile 강재의 경계면 마찰특성을 파악하기 위해 유동화 채움재와 유동화 채움재, H-pile과 유동화 채움재 간의 마찰저항력에 대하여 직접전단시험을 실시하였다. 직접전단시험의 전단 시 수직응력을 57kPa, 117kPa, 170kPa로 가하였으며, 전단변형률은 1.0%/min으로 제어하였다.

(2) 일차원압밀시험

유동화 채움재의 주입 후 압축성을 평가하는 방법으로 압밀침하량의 측정을 통해 유동화 채움재의 압밀정수를 구하기 위하여 KS F 2316에 따라 일차원압밀시험을 실시하였다.

표 2. 시멘트의 물리적 성질

분말도( $cm^2/g$ )	비중	안정도(%)	압축강도(MPa)			응결시간(min)	
			재령 3일	재령 7일	재령 28일	초결	종결
3,488 이상	3.15	0.08	22.4	30.8	40.4	231	407

표 3. 표준사 기본 물성치

비 중	입도분포( $\mu m$ )	300 $\mu m$ 통과분	투수계수(k, $cm/sec$ )	통일분류법
2.6	300~600	6% 이하	$3 \sim 4 \times 10^{-3}$	SM

표 4. 유동화제의 품질규준(ASTM C 494)

단위수량(%)	응결시간(분)		압축강도(%:분)			휨강도(%:분)			길이변화율(%)	상대 내구성 지수
	초결	종결	3일	7일	28일	3일	7일	28일		
최대 : 88	1:00 전 또는 1:30 후		125	115	110	110	100	100	최대 : 135	최대 : 80

### 3. 일차시험

#### 3.1 플로우 테스트

유동화 채움재의 고유동 상태의 기준 배합비를 도출하기

표 5. 물-벤토나이트(W/B) 배합 플로우 테스트 배합비

배합번호	W/B (%)	물 (g)	벤토나이트 (g)	유동화제 (g)	Flow (mm)
#1	250	750	300	-	85
#2	300	900	300	-	145
#3	350	1,050	300	-	180
#4	400	1,200	300	-	190
#5	450	1,350	300	-	220
#6	250	750	300	30	85
#7	300	900	300	30	155
#8	350	1,050	300	30	205
#9	400	1,200	300	30	205
#10	450	1,350	300	30	245

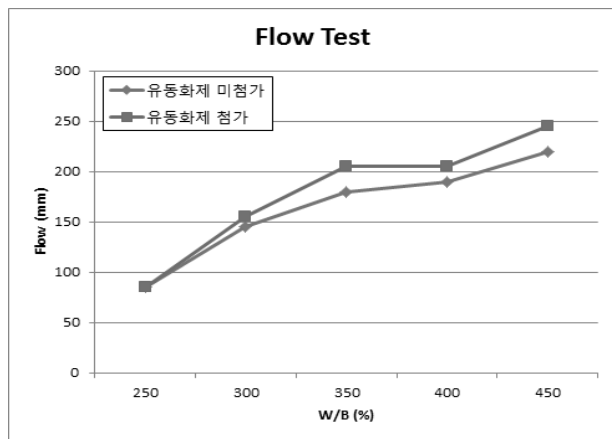


그림 1. 물-벤토나이트비(W/B)에 따른 플로우 곡선

표 6. 시멘트 함량에 따른 유동화 채움재의 일축압축강도시험 결과

시리즈	타입	배합비 (B:C:W)	7일		14일		28일	
			압축강도(kPa)	탄성계수(MPa)	압축강도(kPa)	탄성계수(MPa)	압축강도(kPa)	탄성계수(MPa)
I	1	1 : 0.3 : 3.5	72.1	3.93	101.31	3.35	169.51	8.27
	2	1 : 0.5 : 3.5	76.62	3.48	122.9	7.31	181.29	8.06
	3	1 : 0.7 : 3.5	97.18	5.78	213.42	6.78	337.08	11.36
	4	1 : 1 : 3.5	159.02	7.62	274.1	12.66	359.72	16.59
II	1	1 : 0.3 : 4	49.27	3.93	106.8	3.01	88.64	6.56
	2	1 : 0.5 : 4	60.27	6.78	110.09	3.35	137.08	6.79
	3	1 : 0.7 : 4	99.13	7.31	146.2	3.48	238.05	11.96
	4	1 : 1 : 4	147.77	7.62	193.63	5.78	239.81	14.88
III	1	1 : 0.3 : 4.5	48.07	1.9	67.54	2.66	121.51	5.23
	2	1 : 0.5 : 4.5	51.08	4.26	81.93	3.01	161.29	7.26
	3	1 : 0.7 : 4.5	64.79	3.47	142.28	4.3	223.30	7.63
	4	1 : 1 : 4.5	106.01	4.7	182.73	5.05	249.68	9.23

위해서 벤토나이트 첨가율에 따른 플로우 테스트를 실시했다. 벤토나이트는 팽윤성으로 인해 물을 흡수하여 10~16배의 체적으로 팽창하므로 유동성에 영향을 미치는 주요 인자가 되기 때문이다(정광옥, 2003).

배합비는 표 5와 같이 물-벤토나이트비를 250%에서 50%씩 증가시키면서 450%까지 배합하여 유동화제 첨가 유무로 나누어 총 10가지 배합비의 플로우테스트를 실시하였다. 유동화제 첨가량은 벤토나이트량의 10%로 고정하였다. 시험 결과 그림 1과 같이 유동화제를 첨가하지 않은 배합들 중 물-벤토나이트비 450%를 제외한 배합들은 고유동성에 미치지 못하는 플로우값을 보였다. 반면 유동화제를 첨가한 배합들은 유동화제를 첨가하지 않은 배합들에 비해 플로우값이 5~20% 개선되었다. 플로우 테스트한 결과 물-벤토나이트비 350% 이상의 배합들에게서 플로우값 200mm이상의 고유동성을 보였지만 물-벤토나이트비 300% 이하의 저유동성을 보이는 배합에서는 플로우값이 다소 개선됨을 확인할 수 있었지만 유동화제의 첨가가 고유동성으로의 변화를 일으키지는 않았다.

따라서 유동화 채움재 배합시험에서의 유동성에 영향을 미치는 주요 인자인 물-벤토나이트비는 유동화제 첨가 시 고유동성의 특성을 보일 수 있는 물-벤토나이트비 350%, 400%, 450%로 고정하였다.

#### 3.2 일축압축강도시험

시멘트 함량에 따른 유동화 채움재의 일축압축강도와 탄성계수와의 관계를 알아보기 위해 시멘트 중량을 달리함으로써 배합시험을 실시하였다. 본 시험에서의 중량비를 함량비로 표현하였다. 시험은 표 6과 같이 물의 양을 벤토나이트량의 350%, 400%, 450%으로 고정하고 시멘트량을 벤토

나이트량의 30%, 50%, 70%, 100%로 달리함으로써 3가지 시리즈의 4가지 타입으로 구분하였다.

각 시리즈별 시멘트 함량에 따른 유동화 채움재의 일축 압축강도변화를 그림 2에 나타내었다. 물-벤토나이트비가 비교적 작은 시리즈 1의 유동성 채움재의 일축압축강도가 시리즈 2와 시리즈 3에 비해 크게 나타났다. 특히 동일한 벤토나이트 함량의 배합에서는 시멘트 함유량이 비교적 높은 타입 3과 타입 4가 다른 제작시료에 비해 큰 강도 발현을 보여 시멘트함량이 일축압축강도에 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 탄성계수와 시멘트 함유량과의 관계를 그림 3에 나타내었다. 시멘트 함량이 높을수록 탄성계수가 증가하는 일반적인 경향을 보이며, 시멘트 함량에 따른 탄성계수의 증가율은 일축압축강도와 비례하는 경향을 보였다. 하지만 벤토

나이트와 시멘트 배합으로 시험한 유동화 채움재의 경우 전반적으로 느슨한 모래에도 미치지 못하는 작은 탄성계수를 보였다. 이 결과로부터 알 수 있듯이 시멘트 첨가량으로 탄성계수를 조절하는 것에는 한계를 보였으며 잔골재와 같은 다른 재료의 첨가 등 다른 방안이 요구된다고 판단된다.

잔골재의 함량에 따른 유동화 채움재의 일축압축강도와 탄성계수와의 관계를 알아보기 위해 잔골재 함량을 달리함으로써 배합시험을 실시하였다. 시험은 표 7과 같이 물-벤토나이트비 350%로 고정하여 잔골재량을 벤토나이트량의 0.5, 0.7, 1, 1.2, 1.5, 2배로 변화시킨 배합을 사용하였으며, 현재 현장에서 H-pile 인발 후 모래로 공동충진을 하고 있기 때문에 느슨한 모래 이상의 탄성계수 17.8MPa~28.1MPa를 목표탄성계수로 정하여 배합시험을 실시하였다.

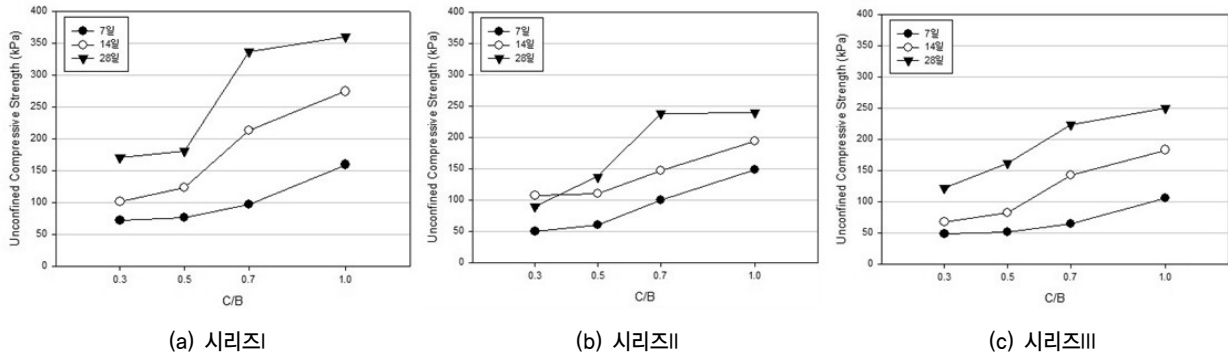


그림 2. 시멘트 함량에 따른 유동화 채움재의 일축압축강도 그래프

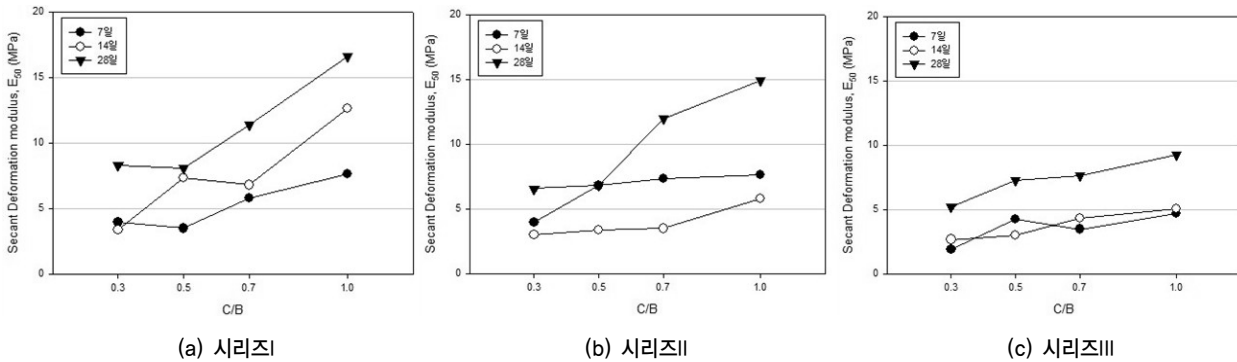


그림 3. 시멘트 함량에 따른 유동화 채움재의 탄성계수 그래프

표 7. 모래 함유량에 따른 유동성 채움재의 일차시험 압축강도와 탄성계수 결과

배합 번호	배합비 (B:S:C:W)	7일		14일		28일	
		압축강도 (kPa)	탄성계수 (MPa)	압축강도 (kPa)	탄성계수 (MPa)	압축강도 (kPa)	탄성계수 (MPa)
#1	1 : 0.5 : 1 : 3.5	97.40	6.53	174.23	18.40	290.56	17.95
#2	1 : 0.7 : 1 : 3.5	98.20	6.05	156.23	14.22	266.66	15.36
#3	1 : 1 : 1 : 3.5	104.65	6.96	225.31	18.34	335.68	21.95
#4	1 : 1.2 : 1 : 3.5	112.56	9.12	237.21	19.68	374.20	21.96
#5	1 : 1.5 : 1 : 3.5	112.56	9.56	343.20	21.44	523.69	23.01
#6	1 : 2.0 : 1 : 3.5	159.56	11.70	395.13	23.23	601.24	29.23

모래 함유량이 유동화 채움재의 일축압축강도에 미치는 영향을 그림 4에 나타내었다. 벤토나이트에 대한 모래의 함량에 비례하여 일축압축강도가 증가하는 일반적인 형상을 보였다. 벤토나이트에 대한 모래의 함량이 120% 이하인 경우 다소간의 증가폭은 있었지만 비교적 느슨한 증가폭을 보인 반면 벤토나이트에 대한 모래의 함량을 120% 이상의 경우 일축압축강도가 큰 폭으로 증가됨을 알 수 있었다.

모래 함유량이 유동화 채움재의 탄성계수에 미치는 영향을 그림 5에 나타내었다. 재령일수 28일을 기준으로 전반적으로 느슨한 모래~중간정도 모래의 탄성계수를 보였다. 일반적으로 모래 함유량에 따른 탄성계수의 증가율은 일축압축강도와 비례하는 경향을 보였으며 일축압축강도의 경우 벤토나이트에 대한 모래의 함량이 120% 이상의 경우에서 크게 증가하였으나 탄성계수의 경우 벤토나이트에 대한 모래의 함량이 120% 이하의 경우에서도 느슨한 모래 이상의 탄성계수를 유지하고 있다.

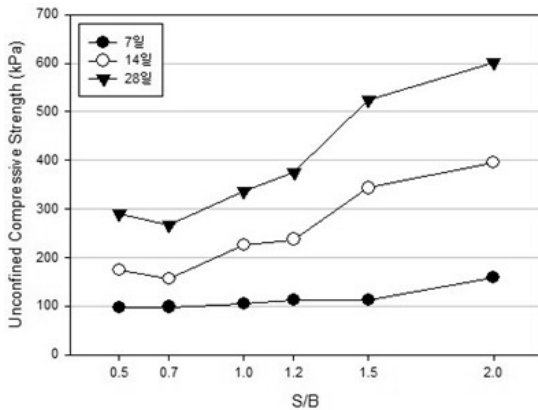
이 결과로부터 알 수 있듯이 모래를 포함한 유동화 채움재 배합에 대하여 모래-벤토나이트비(S/B) 120% 이상인 경

우 유동화 채움재 배합의 일축압축강도에 큰 영향을 미치므로 큰  $c_u$ 로 인해 H-pile의 타설 심도 조절에 어려움이 있기 때문에 일차시험에서는 벤토나이트에 대한 모래의 함량을 50%, 70%, 100%로 고정한다.

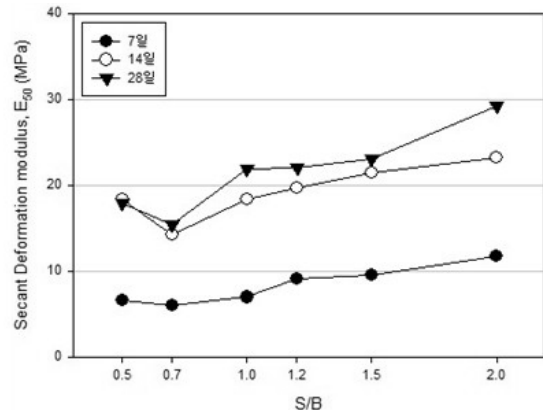
따라서 이차시험을 위한 배합비를 도출하기 위해서 표 8과 같이 물-벤토나이트비(W/B)를 350%, 400%, 450%으로 고정, 시멘트-벤토나이트비(C/B)를 30%, 50%, 70%, 100%로 첨가율에 따라 3가지의 시리즈의 4가지 타입으로 구별하였고, 이를 다시 모래-벤토나이트비(S/B)를 50%, 70%, 100%로 첨가율을 달리하여 구분하였다.

일축압축강도시험을 통해 각 타입별로  $c_u$  값을 찾아 낼 수 있고 이를 바탕으로 H-pile의 표면적을 이용, H-pile에 작용하는 각 타입별 유동화채움재의 단위심도별 점착저항력을 계산하여 유동화채움재의 각 심도별 점착저항력을 통해 현재 상용되고 있는 인발기의 인발력에 따른 적용가능성을 파악하였다. H-pile은 현재 지하구조물 공사에서 가장 많이 쓰이는 300×305×9×14규격의 단위표면적으로 계산하였다.

모래-벤토나이트비(S/B)와 시멘트-벤토나이트비(C/B)가 일

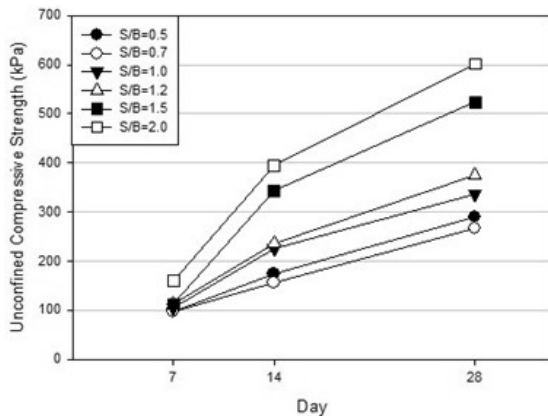


(a) 일축압축강도

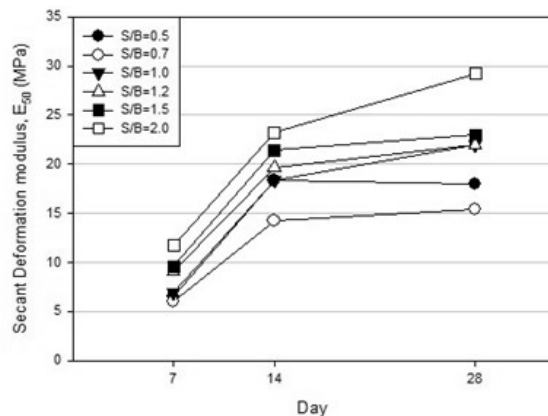


(b) 탄성계수

그림 4. 재령일별 모래함유량에 따른 유동성 채움재의 일축압축시험 결과



(a) 일축압축강도



(b) 탄성계수

그림 5. 모래함유량별 재령일수에 따른 유동성 채움재의 일축압축시험 결과

표 8. 일축압축강도시험 결과 및 각 심도별 정착 저항력

시 리 즈	타 입 번 호	배합비 (B:S:C:W)	7일		14일		28일		E <sub>50</sub> (MPa)	cu (kPa)	1m길이당 점착 저항력 (kN)	5m길이당 점착 저항력 (kN)	10m길이당 점착 저항력 (kN)	15m길이당 점착 저항력 (kN)	20m길이당 점착 저항력 (kN)
			압축 강도 (kPa)	탄성 계수 (MPa)	압축 강도 (kPa)	탄성 계수 (MPa)	압축 강도 (kPa)	탄성 계수 (MPa)							
I	1	#1 1:0.5:0.3:3.5	24.77	2.84	74.81	7.32	130.28	9.25	9.25	65.14	125.93	629.64	1,259.28	1,888.92	2,518.56
		#2 1:0.5:0.5:3.5	45.52	4.43	107.16	9.93	156.79	11.30	11.30	78.40	151.52	757.62	1,515.24	2,272.86	3,030.48
		#3 1:0.5:0.7:3.5	98.82	5.23	160.35	13.21	224.78	13.39	13.39	112.39	217.30	1,086.48	2,172.96	3,259.44	4,345.92
		#4 1:0.5:1:3.5	97.40	6.53	194.23	14.49	266.66	15.36	15.36	133.33	257.80	1,288.98	2,577.96	3,866.94	5,155.92
	2	#1 1:0.7:0.3:3.5	36.50	3.64	84.79	9.23	160.01	15.82	14.92	80.01	154.66	773.28	1,546.56	2,319.84	3,093.12
		#2 1:0.7:0.5:3.5	67.07	5.24	121.46	11.32	167.35	16.93	15.23	83.68	161.78	808.92	1,617.84	2,426.76	3,235.68
		#3 1:0.7:0.7:3.5	85.38	5.64	154.12	14.93	237.92	17.33	17.05	118.96	229.93	1,149.66	2,299.32	3,448.98	4,598.64
		#4 1:0.7:1:3.5	98.20	6.05	176.23	16.29	310.32	20.19	<b>20.19*</b>	155.16	299.92	1,499.58	2,999.16	4,498.74	5,998.32
	3	#1 1:1:0.3:3.5	36.96	3.93	101.92	9.33	164.80	17.75	15.48	82.40	159.30	796.50	1,593.00	2,389.50	3,186.00
		#2 1:1:0.5:3.5	67.91	5.66	145.99	12.93	195.57	21.02	17.79	97.79	189.00	945.00	1,890.00	2,835.00	3,780.00
		#3 1:1:0.7:3.5	127.39	7.13	219.21	13.36	285.27	21.53	<b>21.53*</b>	142.64	275.72	1,378.62	2,757.24	4,135.86	5,514.48
		#4 1:1:1:3.5	159.35	9.12	249.61	17.33	346.20	25.25	<b>25.25*</b>	173.10	334.58	1,672.92	3,345.84	5,018.76	6,691.68
II	1	#1 1:0.5:0.3:4	23.83	3.09	45.06	4.41	85.70	8.03	8.03	42.85	82.84	414.18	828.36	1,242.54	1,656.72
		#2 1:0.5:0.5:4	49.56	3.71	84.25	7.27	101.23	11.93	11.93	50.62	97.85	489.24	978.48	1,467.72	1,956.96
		#3 1:0.5:0.7:4	79.92	5.08	127.56	8.42	187.67	12.92	12.92	93.84	181.44	907.20	1,814.40	2,721.60	3,628.80
		#4 1:0.5:1:4	94.63	5.49	167.87	11.26	203.63	15.49	14.49	101.82	196.88	984.42	1,968.84	2,953.26	3,937.68
	2	#1 1:0.7:0.3:4	29.27	3.28	52.20	5.39	102.18	11.10	11.10	51.09	98.82	494.10	988.20	1,482.30	1,976.40
		#2 1:0.7:0.5:4	62.60	3.99	96.43	6.96	125.62	15.02	14.02	62.81	121.39	606.96	1,213.92	1,820.88	2,427.84
		#3 1:0.7:0.7:4	117.77	5.18	144.58	9.97	244.86	16.99	15.99	122.43	236.63	1,183.14	2,366.28	3,549.42	4,732.56
		#4 1:0.7:1:4	116.21	5.91	146.96	13.92	250.10	18.63	<b>17.63*</b>	125.05	241.70	1,208.52	2,417.04	3,625.56	4,834.08
	3	#1 1:1:0.3:4	34.35	3.38	72.01	4.76	109.87	14.93	13.93	54.94	106.16	530.82	1,061.64	1,592.46	2,123.28
		#2 1:1:0.5:4	61.95	5.05	101.51	7.92	129.78	17.02	16.02	64.89	125.50	627.48	1,254.96	1,882.44	2,509.92
		#3 1:1:0.7:4	119.24	6.35	173.78	10.76	247.59	18.93	17.63	123.80	239.33	1,196.64	2,393.28	3,589.92	4,786.56
		#4 1:1:1:4	136.40	7.48	202.71	11.96	287.39	21.36	<b>21.36*</b>	143.70	277.78	1,388.88	2,777.76	4,166.64	5,555.52
III	1	#1 1:0.5:0.3:4	16.51	2.42	49.88	2.47	72.61	6.50	6.50	36.31	70.20	351.00	702.00	1,053.00	1,404.00
		#2 1:0.5:0.5:4	32.07	3.22	61.26	4.99	90.85	7.16	7.16	45.43	87.80	439.02	878.04	1,317.06	1,756.08
		#3 1:0.5:0.7:4	59.24	5.22	110.14	6.94	160.81	11.48	11.48	80.41	155.41	777.06	1,554.12	2,331.18	3,108.24
		#4 1:0.5:1:4	83.44	6.7	117.01	9.03	174.66	12.96	12.96	87.33	168.80	844.02	1,688.04	2,532.06	3,376.08
	2	#1 1:0.7:0.3:4	24.34	3.16	56.53	4.33	89.18	8.32	8.32	44.59	86.18	430.92	861.84	1,292.76	1,723.68
		#2 1:0.7:0.5:4	41.12	4.33	71.36	5.33	111.14	11.25	11.25	55.57	107.46	537.30	1,074.60	1,611.90	2,149.20
		#3 1:0.7:0.7:4	87.29	6.93	124.83	7.48	180.32	14.82	14.82	90.16	174.31	871.56	1,743.12	2,614.68	3,486.24
		#4 1:0.7:1:4	101.90	7.89	125.09	8.92	197.51	15.23	15.23	98.76	190.94	954.72	1,909.44	2,864.16	3,818.88
	3	#1 1:1:0.3:4	24.64	3.02	67.95	4.30	91.85	9.33	9.33	45.93	88.78	443.88	887.76	1,331.64	1,775.52
		#2 1:1:0.5:4	44.38	4.39	92.34	7.22	129.88	15.23	15.23	64.94	125.50	627.48	1,254.96	1,882.44	2,509.92
		#3 1:1:0.7:4	88.38	6.53	150.04	9.46	203.43	16.93	16.93	101.72	196.67	983.34	1,966.68	2,950.02	3,933.36
		#4 1:1:1:4	110.56	7.3	170.01	9.96	234.52	18.58	<b>18.58*</b>	117.26	226.69	1,133.46	2,266.92	3,400.38	4,533.84

축압축강도에 미치는 영향을 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 시리즈 I의 경우 그림 6의 S/B별 C/B에 따른 유동화 채움재의 압축강도 그래프에서 볼 수 있듯이 C/B가 증가할수록 압축강도가 선형으로 증가하였다. 그러나 그림 7의 S/B별 C/B에 따른 유동화 채움재의 압축강도에서도 일축압축강도는 비교적 선형으로 증가하였으나 그림 6의 압축강도 직선에 비해 기울기가 작았다. 이러한 현상은 시리즈 II와 시리즈 III에서도 확인할 수 있다. 따라서 유동화 채움재의

일축압축강도에서 시멘트-벤토나이트비(C/B)가 더 지배적으로 영향을 미침을 확인할 수 있다.

다음은 모래-벤토나이트비(S/B)와 시멘트-벤토나이트비(C/B)가 탄성계수에 미치는 영향을 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 시리즈 I의 경우 그림 8의 C/B에 따른 유동화 채움재의 시멘트-벤토나이트비 압축강도 그래프에서 볼 수 있듯이 시멘트-벤토나이트비가 증가할수록 탄성계수가 선형으로 증가하였다. 그러나 그림 9의 모래-벤토나이트비에 따른

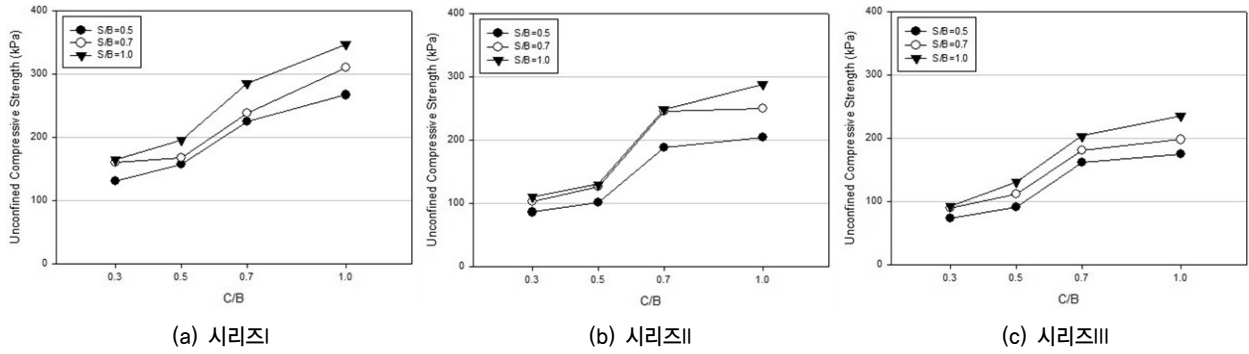


그림 6. 시멘트 함유량에 따른 유동성 채움재의 일축압축강도 관계도

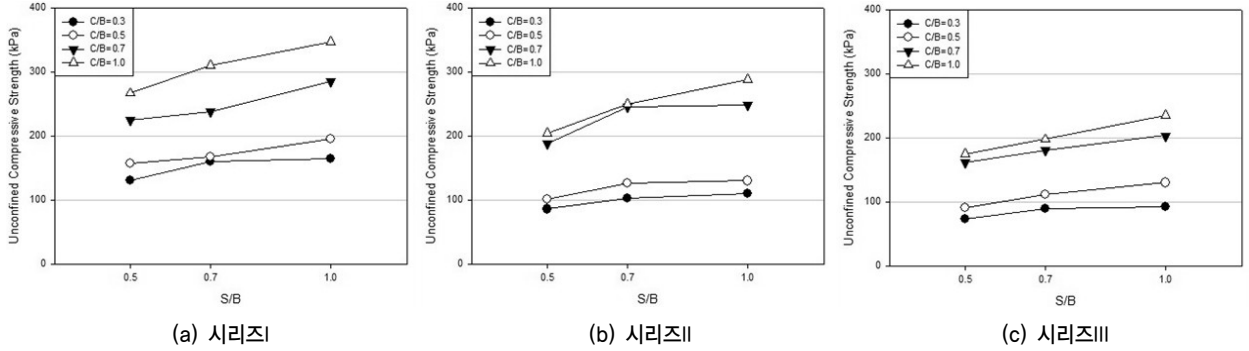


그림 7. 모래 함유량에 따른 유동성 채움재의 일축압축강도 관계도

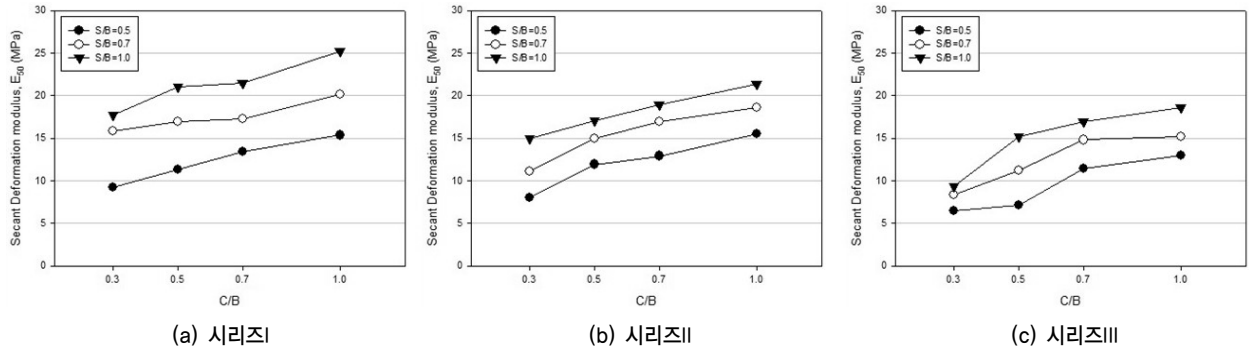


그림 8. 시멘트 함유량에 따른 유동성 채움재의 탄성계수 관계도

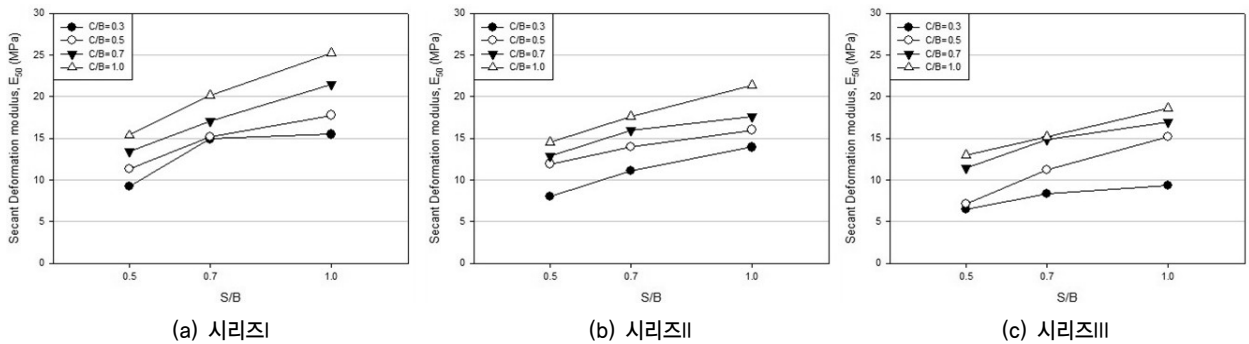


그림 9. 모래 함유량에 따른 유동성 채움재의 탄성계수 관계도

유동화 채움재의 탄성계수는 비교적 선형으로 증가하였으나 모래-벤토나이트비 탄성계수 직선에 비해 기울기가 작았다. 이러한 현상은 시리즈 II와 시리즈 III에서도 확인할 수

있다. 따라서 유동화 채움재의 탄성계수에서 모래-벤토나이트비가 더 지배적으로 영향을 미침을 확인할 수 있다.

일축압축강도시험을 통해 찾아낸 각 타입별  $c_u$  값을 바탕

표 9. 이차시험 배합의 일축압축강도시험 결과 및 각 심도별 점착 저항력

타입	배합비 (B:S:C:W)	7일		14일		28일		E50 (MPa)	c <sub>u</sub> (kPa)	1m길이당 점착 저항력 (kN)	5m길이당 점착 저항력 (kN)	10m길이당 점착 저항력 (kN)	15m길이당 점착 저항력 (kN)	20m길이당 점착 저항력 (kN)
		압축 강도 (kPa)	탄성 계수 (MPa)	압축 강도 (kPa)	탄성 계수 (MPa)	압축 강도 (kPa)	탄성 계수 (MPa)							
1	1:0.7:1:3.5	98.20	6.05	176.23	16.29	310.32	20.19	20.19	155.16	27.77	138.87	277.74	416.60	555.47
2	1:1:0.7:3.5	127.39	7.13	219.21	13.36	285.27	21.53	21.53	142.64	25.53	127.66	255.33	382.99	510.65
3	1:1:1:3.5	159.35	9.12	249.61	17.33	346.20	25.25	25.25	173.10	30.98	154.92	309.85	464.77	619.70
4	1:0.7:1:4	116.21	5.91	146.96	13.92	250.10	18.63	17.63	125.05	22.38	111.92	223.84	335.76	447.68
5	1:1:1:4	136.40	7.48	202.71	11.96	287.39	21.36	21.36	143.70	25.72	128.61	257.22	385.83	514.45
6	1:1:1:4.5	110.56	7.3	170.01	9.96	234.52	18.58	18.58	117.26	20.99	104.95	209.90	314.84	419.79

으로 현장에서 빈번히 쓰이는 300×305×9×14 규격의 H-pile의 표면적을 이용, H-pile 엄지말뚝에 작용하는 각 타입별 유동화채움재의 단위심도별 점착저항력을 계산하였다. 현장에서 H-pile 천공 후 공동 충진을 위해 느슨한 모래를 주입하므로, 중간정도 모래의 탄성계수인 17.8~28.1MPa의 범위를 만족하는 6가지 유동화 채움재의 배합을 이차시험의 배합으로 선택하였으며 그 배합은 표 9와 같다.

#### 4. 이차시험

##### 4.1 직접전단시험

유동화 채움재와 H-pile 강재의 경계면 마찰특성을 파악

하기 위해 유동화 채움재와 유동화 채움재, H-pile과 유동화 채움재 간의 마찰저항력에 대하여 직접전단시험을 실시하였다. 그림 10은 유동화 채움재와 강재 간의 마찰특성을 위해 고안된 유동화 채움재에 H-pile과 같은 재질의 강재를 감싼 모습이고, 유동화 채움재에 강재의 상부표면이 전단상자와 전단면이 일치하도록 설치한 후 시료를 삽입하였다. 수직응력의 경우 H-pile이 약 10m 이내로 근입된다고 판단하고, 최대 수직응력을 약 10m의 흙의 하중인 170kPa의 범위 내에서 시험을 수행하였다.

표 10은 이차시험을 통해 선정된 배합들을 바탕으로 유동화 채움재와 유동화 채움재, H-pile 신재와 유동화 채움재, H-pile 고재와 유동화 채움재 간의 직접전단시험 결과이다. 유동화 채움재의 직접전단시험을 통해 나타난 결과로서

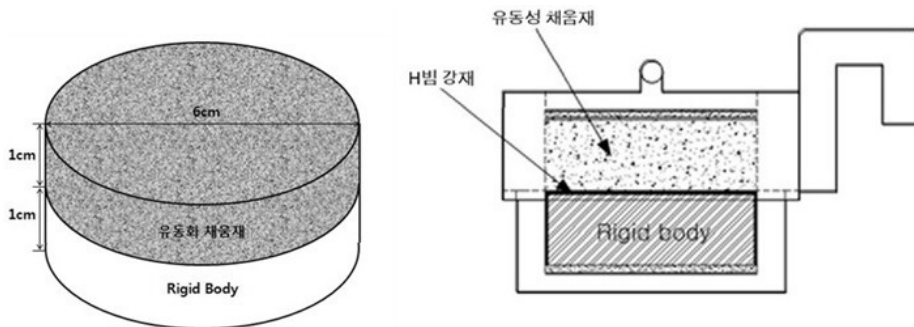


그림 10. H-pile 엄지말뚝-유동화 채움재 간의 직접전단시험 모식도

표 10. H-pile과 유동화 채움재 간의 직접전단시험 결과

타입	γ <sub>t</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	유동화 채움재-유동화 채움재					H-pile(신재)-유동화 채움재					H-pile(고재)-유동화 채움재				
		τ <sub>f</sub> (kPa)			c (kPa)	φ (°)	τ <sub>f</sub> (kPa)			c (kPa)	φ (°)	τ <sub>f</sub> (kPa)			c (kPa)	φ (°)
		57	113	170			57	113	170			57	113	170		
1	1.47	160.82	203.36	232.39	127.12	37.2	58.60	80.23	104.67	34.94	21.1	65.94	90.48	117.46	39.62	23.7
2	1.43	154.82	196.32	228.37	119.43	36.5	50.99	75.27	94.32	31.09	23.4	55.67	82.35	103.95	32.24	25.5
3	1.50	172.55	219.07	253.92	133.61	39.7	62.33	87.91	110.54	38.45	24.6	70.22	99.03	126.16	42.37	27.2
4	1.42	140.82	181.12	212.39	106.36	35.7	48.13	69.28	86.56	29.46	20.7	54.11	75.84	99.82	30.74	21.2
5	1.45	150.04	191.40	225.57	113.27	36.5	51.92	75.81	94.92	31.11	23.1	61.19	88.39	113.76	35.06	25.9
6	1.41	132.46	169.21	205.29	95.95	33.3	44.29	60.63	79.15	28.46	22.3	50.48	74.08	90.69	31.44	22.9



그림 11은 유동화 채움재와 유동화 채움재, H-pile 신재와 유동화 채움재, H-pile 고재와 유동화 채움재로 시료를 제작하여 각 타입별 전단강도 관계를 나타내고 있다. 세 경우 모두 물-벤토나이트비가 작은 타입이 큰 전단강도를 보임을 나타내고 있다. 또한 유동화 채움재와 유동화 채움재 간의 전단강도가 H-pile 신재와 유동화 채움재, H-pile 고재와 유동화 채움재 간의 전단강도보다 더 크게 나타났다.

그림 12는 제작된 시료별 전단강도를 비교하여 나타낸 것으로 x축은 유동화 채움재 간의 전단강도를 나타내고 있고, y축은 각각 H-pile 신재와 유동화 채움재, H-pile 고재와 유동화 채움재 간의 전단강도를 나타내고 있다. 시료별 전단강

도비는 각각 2.53과 2.04로 유동화 채움재 간의 전단강도가 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 현장에서 고화된 유동화 채움재 간의 파괴없이 H-pile을 인발할 수 있다고 판단된다.

그림 13은 제작된 시료별 전단시험결과로서 수직응력에 대한 전단강도 관계를 나타낸 것이다. 수직응력이 증가할수록 전단강도는 증가하는 것으로 나타났다.

수직응력과 전단강도 관계를 통해 그림 14와 같이 내부마찰각을 산출하였다. 유동화 채움재 간의 내부마찰각은 32°~37°, H-pile 신재와 유동화 채움재 간의 내부마찰각은 21°~26°, H-pile 고재와 유동화 채움재 간의 내부마찰각은 23°~31°의 범위를 보이며 유동화 채움재 간의 내부마찰각

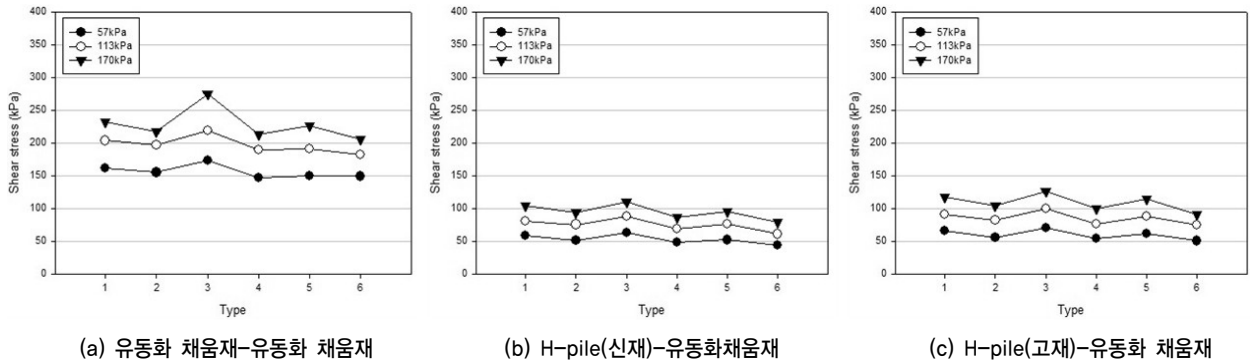


그림 11. 각 타입별 유동화 채움재의 전단강도 관계도

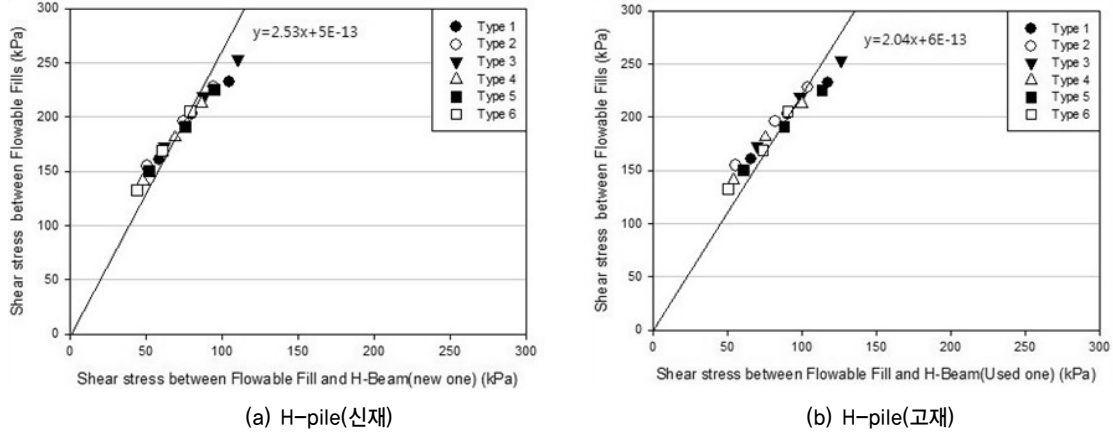


그림 12. 유동화 채움재 간의 전단강도와 H-pile과 유동화 채움재 간의 전단강도 비교

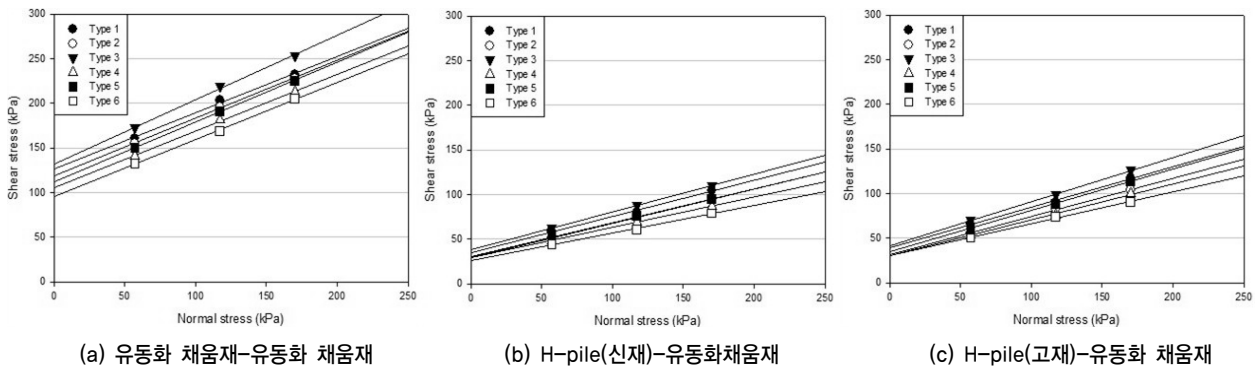


그림 13. 각 타입별 수직 응력에 대한 유동화 채움재의 전단강도 관계도

이 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 제작된 시료별 전단시험 결과로서 내부마찰각은 물-벤토나이트비가 큰 타입 1,2,3에서 높은 내부마찰각이 나타났으나 대체로 균일한 내부마찰각을 보였다. 이와 같은 결과는 선정된 유동화 채움재 배합비의 모래 함량이 비교적 크므로 배합된 모래가 역물림 작용을 지배하기 때문인 것으로 사료된다.

용을 지배하기 때문인 것으로 사료된다.

그림 15에서는 수직응력과 전단강도 관계를 통해 산출된 점착력을 나타내었다. 유동화 채움재 간의 점착력은 95~133kPa, H-pile 신재와 유동화 채움재 간의 점착력은 28~38kPa, H-pile 고재와 유동화 채움재 간의 점착력은 30~42kPa의

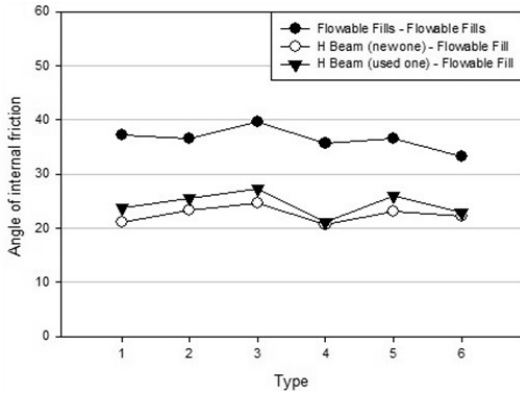


그림 14. 각 타입별 유동화 채움재의 내부마찰각 관계도

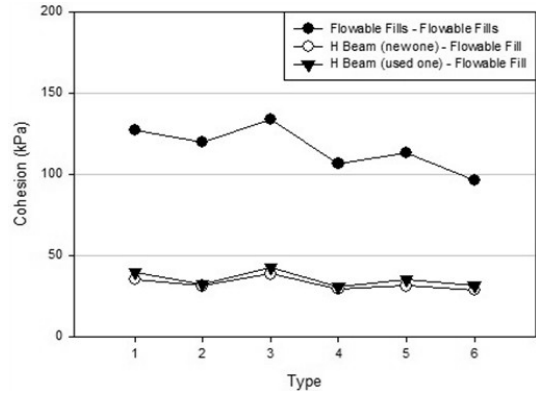


그림 15. 각 타입별 유동화 채움재의 점착력 관계도

표 11. 유동화 채움재 간의 각 심도별 점착저항력과 H-pile과 유동화 채움재 간의 각 심도별 점착저항력

(a) 유동화 채움재 간의 각 심도별 점착 저항력

타입	배합비 (B : S : C : W)	c (kPa)	1m길이당 점착저항력 (kN)	5m길이당 점착저항력 (kN)	10m길이당 점착저항력 (kN)	15m길이당 점착저항력 (kN)	20m길이당 점착저항력 (kN)
1	1 : 0.7 : 1 : 3.5	127.12	159.74	798.72	1,597.44	3,194.87	4,792.31
2	1 : 1 : 0.7 : 3.5	119.43	150.08	750.40	1,500.80	3,001.60	4,502.40
3	1 : 1 : 1 : 3.5	133.61	167.90	839.50	1,678.99	3,357.99	5,036.98
4	1 : 0.7 : 1 : 4	106.36	133.66	668.28	1,336.56	2,673.12	4,009.68
5	1 : 1 : 1 : 4	113.27	142.34	711.70	1,423.39	2,846.79	4,270.18
6	1 : 1 : 1 : 4.5	95.95	120.57	602.87	1,205.74	2,411.49	3,617.23

(b) H-pile(신재)과 유동화 채움재 간의 각 심도별 점착 저항력

타입	배합비 (B : S : C : W)	c (kPa)	1m길이당 점착저항력 (kN)	5m길이당 점착저항력 (kN)	10m길이당 점착저항력 (kN)	15m길이당 점착저항력 (kN)	20m길이당 점착저항력 (kN)
1	1 : 0.7 : 1 : 3.5	34.94	62.54	312.71	625.43	625.43	1,876.28
2	1 : 1 : 0.7 : 3.5	31.09	55.65	278.26	556.51	556.51	1,669.53
3	1 : 1 : 1 : 3.5	38.45	68.83	344.13	688.26	688.26	2,064.77
4	1 : 0.7 : 1 : 4	29.46	52.73	263.67	527.33	527.33	1,582.00
5	1 : 1 : 1 : 4	31.11	55.69	278.43	556.87	556.87	1,670.61
6	1 : 1 : 1 : 4.5	28.46	50.94	254.72	509.43	509.43	1,528.30

(c) H-pile(고재)과 유동화 채움재 간의 각 심도별 점착 저항력

타입	배합비 (B : S : C : W)	c (kPa)	1m길이당 점착저항력 (kN)	5m길이당 점착저항력 (kN)	10m길이당 점착저항력 (kN)	15m길이당 점착저항력 (kN)	20m길이당 점착저항력 (kN)
1	1 : 0.7 : 1 : 3.5	39.62	70.92	354.60	709.20	1,418.40	2,127.59
2	1 : 1 : 0.7 : 3.5	32.24	57.71	288.55	577.10	1,154.19	1,731.29
3	1 : 1 : 1 : 3.5	42.37	75.84	379.21	758.42	1,516.85	2,275.27
4	1 : 0.7 : 1 : 4	30.74	55.02	275.12	550.25	1,100.49	1,650.74
5	1 : 1 : 1 : 4	35.06	62.76	313.79	627.57	1,255.15	1,882.72
6	1 : 1 : 1 : 4.5	31.44	56.28	281.39	562.78	1,125.55	1,688.33

범위를 보이며 유동화 채움재 간의 점착력이 H-pile 신재와 유동화 채움재 간의 점착력의 3.6~3.8배, H-pile 고재와 유동화 채움재 간의 점착력의 3.1~3.4배 큰 점착력을 보였다. 표 11는 직접전단시험을 통해 구한 각 타입별 점착력을 바탕으로 단위심도별 점착저항력을 계산하여 유동화 채움재 간의 각 심도별 점착저항력과 H-pile과 유동화 채움재 간의 각 심도별 점착저항력을 비교하였다. H-pile과 유동화 채움재 간의 각 심도별 점착저항력은 300×305×9×14 규격의 H-pile의 표면적으로 계산하였고, 유동화 채움재 간의 각 심도별 점착저항력은 H-pile 삽입을 위해 일반적으로 천공하는 직경 400mm 공의 표면적으로 계산하였다. 표 11에서 볼 수 있듯이 H-pile의 표면적이 직경 400mm 공의 표면적보다 크지만 점착력에서 큰 차이를 보여 현장에서도 유동화 채움재의 파괴없이 인발이 가능 할 것으로 예상된다.

## 4.2 일차원압밀시험

일차시험에서 선정된 배합에 대하여 일차원압밀시험을 실시하였다. 표 12는 그림 16의 압밀시험결과  $e - \log P$  곡선에서 구한 초기간극비, 압축지수, 팽창지수를 나타낸 것이다.

표 12. 각 타입별 유동화 채움재의 압밀시험 결과

타입	Initial Void ratio, $e_0$	Compression index, $C_c$	Swelling index, $C_s$
1	1.485	0.423	0.046
2	1.554	0.442	0.053
3	1.397	0.384	0.037
4	1.717	0.524	0.058
5	1.582	0.495	0.046
6	1.81	0.576	0.058

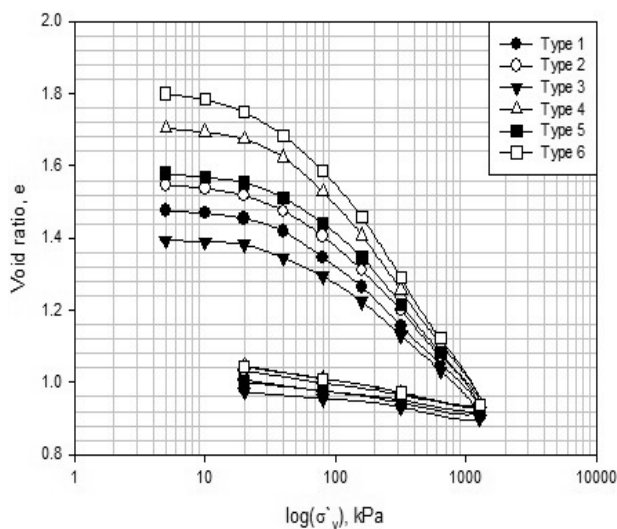


그림 16. 각 타입별 유동화 채움재(재령 28일)의 압밀시험

각 타입별 배합에 대한 초기 간극비를 측정하여 그림 17에 나타내었다. 물-벤토나이트비가 높은 배합의 초기 간극비가 크게 나타났다. 이러한 현상은 물-벤토나이트비가 작은 배합의 입자들이 더 조밀한 상태를 유지하고 있기 때문이라고 판단된다.

그림 18은 하중 간극비 곡선에서 처녀압밀곡선 기울기로 산정된 각 타입별 배합에 대한 압축지수를 그래프로 나타내었다. 물-벤토나이트비가 큰 배합일수록 압축지수가 감소하는 경향을 보이고 있다. 물-벤토나이트비가 3.5인 배합의 경우 0.38~0.44의 압축지수 값을 나타내지만 물-벤토나이트비가 4인 배합은 0.5~0.53, 물-벤토나이트비가 4.5인 배합은 0.58으로 압축지수의 감소현상이 나타났다. 이는 압밀하중이 재하되었을 때 물-벤토나이트비가 작을수록 침하량이 적다는 뜻으로 해석된다. 그리고 물-벤토나이트비가 같은 배합의 경우 모래와 시멘트의 함량에 따른 다소간의 압축지수의 변화를 확인할 수 있었다.

압축지수의 값은 흙에 따라 차이가 많으나 대표적인 값은 0.2에서 0.9 사이에 있다(백영식, 2007). 따라서 일차시험을 통해 선정된 유동화 채움재 배합의 압축지수는 대표적인 흙의 범위에 존재함을 확인하였다.

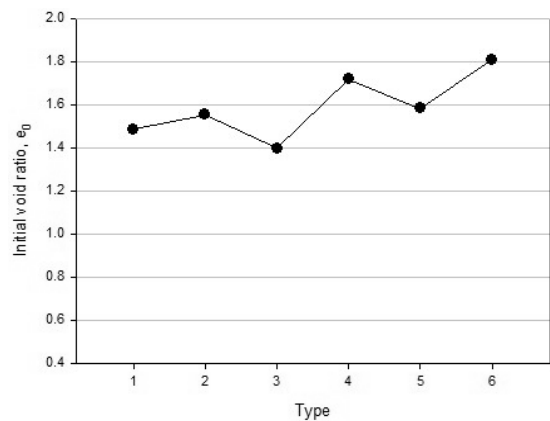


그림 17. 각 타입별 유동화 채움재의 초기 간극비

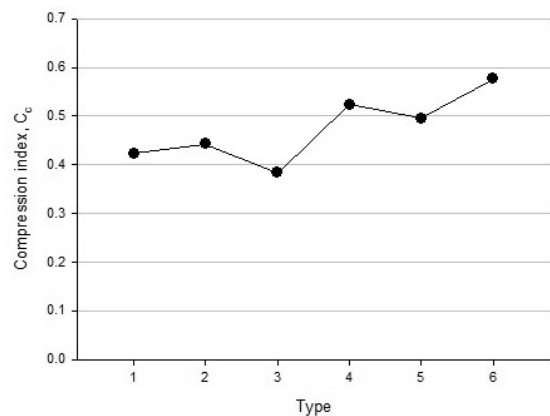


그림 18. 각 타입별 유동화 채움재의 압축지수

## 5. 결 론

H-pile을 이용한 흙막이 구조물 조성 시 천공 후 공동 충진을 용이하게 할 수 있고, H-pile 회수 시 마찰을 최소화하는 채움재 개발을 위하여 벤토나이트, 시멘트, 모래를 이용하여 실내시험을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 유동화 채움재의 유동성에 영향을 미치는 주요 인자인 벤토나이트에 대한 물의 함량은 350% 이상에서 JHS A 313의 고유동성 기준을 만족하였다.
- (2) 유동화 채움재의 배합에서 압축강도에 영향을 미치는 주요 인자는 시멘트 함량이었고, 탄성계수에 영향을 미치는 주요 인자로는 모래 함량임을 확인할 수 있었다. 따라서 각 배합에 대한 일축압축강도 시험 결과 유동화 채움재로서 우수한 성질을 보이는 배합은 벤토나이트를 기준으로 물 350%~450%, 시멘트 70%~100%, 모래 70%~100%가 포함된 배합으로 나타났다.
- (3) 직접전단시험에서 각 심도별 유동화 채움재 간의 점착저항력이 H-pile과 유동화 채움재 간의 점착저항력에 비해 더 크게 나타났다. 예를 들어, H-pile을 10m 매입 후 배합비(B:S:C:W)가 1:1:1:3.5이 유동화 채움재를 주입하였을 때, 유동화 채움재 간의 점착저항력은 1678.99 kN으로 H-pile(신재)과 유동화 채움재 간의 점착저항력 688.26kN, H-pile(고재)과 유동화 채움재 간의 점착저항력 758.42kN보다 각각 2.44배, 2.21배 크게 나타났다

(표 11 참조). 따라서 본 연구에서 제안한 재료를 채움재로 사용하며, 채움재 내부의 H-pile 인발이 가능하게 된다.

- (4) 일차원압밀시험에서 벤토나이트에 대한 물의 함량이 350%인 경우 0.38~0.44의 압축지수 값을 나타내지만 400%에서는 0.5~0.53, 450%에서는 0.58으로 벤토나이트에 대한 물의 함량이 증가할수록 압축지수가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이 값들을 이용하면 현장에서 채움재의 압축량을 산정할 수 있으며 이 양은 무시할 수 있을 정도의 소량일 것으로 추정된다.

## 감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 백영식(2007), *토질역학*. 구미서관. 서울. pp. 408~410.
2. 서창범(2009), *뒷채움재료로서의 유동화 충전재의 강성평가 기술개발 연구*. 석사학위논문, 배재대학교. pp. 76.
3. 정광옥(2003), *인공점토재의 공학적 특성 연구: 모래, 화강풍화토-벤토나이트 혼합토를 중심으로*. 석사학위논문, 동신대학교. pp. 29~30.

(접수일: 2011. 4. 25 심사일: 2011. 5. 13 심사완료일: 2011. 7. 21)