

시공조건에 따른 심층혼합처리 개량체의 강도에 관한 연구

Strength of Improved Soil on the Work-conditions of Deep Mixing Method

이 광 열¹ Lee, Kwang-Yeol

윤 성 태² Yoon, Sung-Tai

김 성 무³ Kim, Sung-Moo

한 우 선⁴ Han, Woo-Sun

Abstract

The deep soil mixing, on ground modification technique, has been used for many diverse applications including building and bridge foundations, port and harbor foundations, retaining structures, liquefaction mitigation, temporary support of excavation and water control. This method has the basic objective of finding the most efficient and economical method for mixing cement with soil to secure settlements through improvement of stability on soft ground. In this research, the experiments were conducted on a laboratory scale with the various test conditions of mixing method; the angle of mixing wing, mixing speed. Strength and shapes of improved soil of these test conditions of deep mixing method were analysed. From the study, it was found that the mixing conditions affect remarkably to the strength and shapes of improved soils.

요 지

심층혼합처리공법은 항만기초, 토류벽구조, 차수벽 및 가시설, 그리고 건축기초와 교량기초 등에서 다양하게 사용되어오고 있다. 이 공법은 지반개량을 통한 침하방지와 안정성확보를 위한 지반강도를 확보하기 위해 시멘트와 혼화제를 현장토와 혼합하는데 있어서 가장 효율적이고 경제적이어야 한다. 본 연구에서는 교반날개의 각도, 교반속도 등에서 다양한 교반조건을 적용하여 실내실험을 수행하였다. 실내실험은 현장 타설장비를 1:8 비율로 축소하여 제작하였다. 최적의 교반조건을 도출하기 위하여 다양한 교반조건에 따른 심층혼합처리 개량체의 강도를 분석하였다. 연구결과, 심층혼합처리공법의 교반조건은 개량체의 강도와 형상에 아주 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

Keywords : Cut-off wall, Deep soil mixing, Foundation, Liquefaction, Settlement, Soft soil, Soil improvement, Strength

1. 서 론

기초지반의 지반상태가 좋지 않거나 지반강도나 지지력이 문제가 되는 불량지반 또는 연약지반에서 지반개량을 위하여 흙에 화학약품을 혼합하여 지반을 개량하는 방법은 오래전부터 이용되어져 왔다. 연약한 점

토지반에 약제나 시멘트 등을 균일하게 혼합하여 지반을 강화시키는 공법이 일본에서 개발되었으며, 1970년 중반 일본 운수성 항만기술연구소에서는 해저의 연약한 점토지반을 화학적으로 고결시키는 공법이 개발되었다. 이것은 회전 연직축 선단에 교반날개를 설치하여 배 위에서 해저지반을 교반시키면서 소정의 심도까지

1 정회원, 동서대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Dongseo Univ., civklee@dongseo.ac.kr, 교신저자)

2 동서대학교 토목공학과 석사과정 (Master Student, Dept. of Civil Engrg., Dongseo Univ.)

3 동서대학교 토목공학과 석사과정 (Master Student, Dept. of Civil Engrg., Dongseo Univ.)

4 정회원, 해공환경산업(주) 회장 (Member, President, Haekong Environmental Industry Co. Ltd.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

내린 후 선단 부근의 구멍으로부터 시멘트 밀크를 연속적으로 주입하여 교반시키면서 서서히 인발하는 것으로 교반날개는 직경이 약 1m 정도인데 이와 같이 하여 점토지반 중에 시멘트를 균일하게 혼합한 직경 1m의 기둥을 만들 수가 있게 되었다. 이것을 조금씩 겹쳐서 계속적으로 시공하면 연속벽 및 블럭벽을 만들 수가 있게 된다. 이 공법은 심층혼합처리공법이라고 하며, 해저의 연약한 점토지반의 개량공법으로서 폭 넓게 사용되고 있다. 이 공법을 이용함으로써 매립이나 간척 시에 외주 호안제방의 기초지반을 강화시킨 후 안전하고 급속하게 제방을 축조할 수가 있게 되었다. 여기에 혼합하는 재료에 있어서 약제, 시멘트, 석회, 석고 등 다양한 재료가 개발되었다.

심층혼합처리공법이 나날이 발전됨으로 인하여 심층교반공법, 고압분사공법, 심층교반고압분사공법 등이 개발되었다. 이들은 심층혼합의 교반날개 대신에 연직 회전축에 고압의 젯트 노즐을 설치한 기계를 이용하여 회전축 방향과 직각방향으로 설치된 노즐로부터 고압에 의해 수평방향으로 약액 등을 분사하여 축을 회전시키면서 상하로 움직이면 축에서 일정거리 반경 이내에 있는 원추부분이 완전히 교반되어 약액이나 시멘트밀크와 강제 혼합되는 것이다. 이와 같은 방법이 개발되어짐으로 인하여 해안 연약지반의 기초보강 및 연약지반 보강작업이 성공적으로 수행되고 있다.

심층혼합처리공법은 전 세계적으로 매우 다양하게 적용되어 왔지만, 타설장비의 시공조건에 대한 최적화 연구는 미흡한 실정이다. 타설장비의 최적 운영조건(또는 시공조건)을 위한 연구는 교반날개의 형식, 교반속도, 관입/인발속도, 안정제의 분출방식 등을 다양하게 고려하여 적용할 필요가 있다. 이러한 연구는 현장 규모의 실험이 필요하지만, 소요경비의 고가와 실험대상 현장의 확보에 어려움이 따른다. 따라서 실내모형실험을 이용하는 방법이 가장 적절할 것으로 판단된다. 이러한 연구는 실험상의 어려움 때문에 국내외를 통하여 거의 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 심층혼합처리공법의 개량효과를 검토하기 위하여 실내모형 장치를 개발하여 실내 실험을 실시하고, 다양한 시공조건이 개량체의 강도에 미치는 영향과 효율을 분석하고, 개량체의 축방향 저항력을 산정하여 공법의 시공조건과 타설장비의 적정 운영조건을 도출하는데 목적을 두고 있다.

2. 실내모형실험

심층혼합처리공법에 의한 개량체의 강도는 교반날개

의 각도, 교반속도 그리고 혼화제의 분사조건 등에 의하여 영향을 받는다. 이러한 시공조건은 대형장비를 운영하는 현장에서는 지반의 불균질성과 개량체의 확인이 불가능한 점 그리고 장비 운영상의 불확실성으로 인하여 더욱 더 큰 영향이 따를 것으로 예상된다. 본 연구에서는 실내모형실험을 통하여 혼화제 분사구의 위치(교반날개분사, 룯드측면분사), 교반날개각도, 교반속도 등의 다양한 시공조건을 적용하여 시공하고, 개량체의 일축압축강도를 측정하여 지반개량을 위한 최적 시공조건을 도출하고자 하였다. 특히 시험장치는 실제 장비를 1:8로 축소하여 제작하였으며, 교반속도와 타설속도(또는 관입속도)를 기계적으로 조절 가능하도록 하여 실험의 신뢰성을 확보하는 시험을 실시하였다.

심층혼합처리 모형실험장비는 교반날개가 부착된 교반장치, 모형토조, 굴진장치, 혼화제 주입장치, 제어장치로 구성하였다. 교반장치는 모형지반을 타설하기 위하여 교반속도의 범위는 0~44회/min의 룯드회전 속도이며, 교반장치 내의 교반날개는 막대형 날개로 1층에 3개씩 3층으로 되어 있으며, 룯드의 직경은 60.5mm, 교반날개길이는 44.5mm이며 교반날개의 회전직경은 150mm이다. 그리고 분사구의 크기는 룯드측면분사 형식은 분출구가 2개(∅8mm)로 룯드의 측면에 설치하였으며, 교반날개분사 형식은 분출구가 6개(∅5mm)로 교반날개의 아래에 설치하였다. 토조는 L700mm×B700mm×H1,000mm로서 중간을 분리하여 2개의 공간으로 제작하였고 유효개량깊이는 800mm로 하였다. 그림 1은 실험장치의 전체적 전경과 동력장치를 사진으로 제시한 것이고, 그림 2는 교반날개의 상세도를 제시한 것이다.

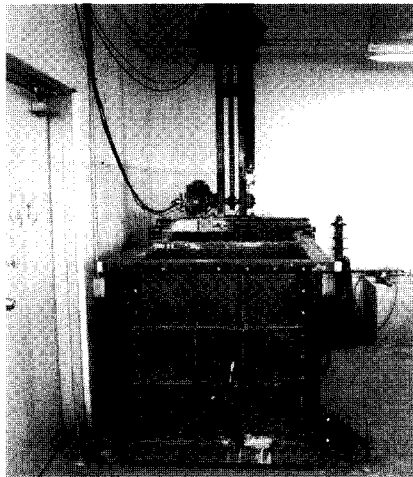
교반장치는 룯드를 회전하게 하여 타설 시에 교반날개에 의해 지반을 교반하고 적외선 센서를 장착하여 관입인발시 룯드의 회전속도의 측정과 조절이 가능하다. 굴진장치는 룯드의 선단에 장착된 오거를 지반내로 연직 진입시키면서 지반을 굴착하는 동시에 교반장치를 일정한 속도로 상하운동을 하는 기능과 교반장치를 이동시켜 개량지반의 유효깊이를 조성한다. 혼화제 주입 펌프는 교반장치를 지반 내에 관입한 후 인발 시에 룯드의 중앙관을 통하여 혼화제를 지반 내에 주입한다. 제어장치는 교반속도, 굴진속도 등의 운전조건을 자동제어하는 기능을 한다.

모형토조에 표준사를 이용하여 시료를 조성한 다음(시멘트:HWS=9:1)와 물을 1:1중량비로 믹싱플랜트에서 골고루 혼합한다. 제어장치에서 교반속도와 관입속도를

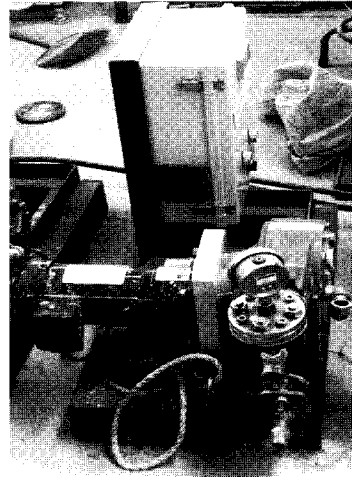
지정하고 교반기 하단에 장착된 오거 선단을 지반의 표면에 고정시킨다. 오거의 관입과 교반기의 교반을 작동시킨다. 유효깊이까지 교반한다. 제어장치에서 인발속도를 지정한다. 오거의 인발을 작동시킨다. 오거의 인발이 시작되는 시점에서 혼화제 주입펌프를 작동시켜 혼화제가 교반기의 분사구로부터 지반에 주입되도록 한다. 교반기를 상하로 1번 교반하여 균질의 개량체를 형성한다. 타설이 완료된 후에는 양생기간이 필요한데 본 연구에서는 양생기간은 28일이며, 양생방법은 타설 후 7일 동안 모형토조에서 양생하고 그 후 양생수조에서 온도 20°, 습도 70%를 유지하여 21일간 양생한다. 양생 후 개량체의 길이중심으로 20cm씩 상단, 중간, 하단부로 나누어 직경, 둘레 등을 측정한다. 본 연구에서는 실

험장비 운영계획과 개량체의 시험계획을 혼화제 분사 형식: 교반날개분사, 릫드측면분사, 교반속도: 10회/min, 20회/min, 30회/min, 교반날개 각도: 10도, 20도, 30도, 굴진속도: 10cm/min(굴진 및 인발), 개량체 양생기간: 28일로 하였다.

본 연구의 목적은 시공조건에 따른 개량체의 강도를 검토하여 최적 시공조건을 도출하는데 있으므로, 모형지반의 균질성과 실험의 용이성을 위하여 표준사를 이용하여 실험을 수행하였다. 시료의 기본 물성은 다음의 표 1과 같다. 시료조성은 한 칸의 토조에 총무게가 760.0kg의 표준사를 상대밀도 60%가 되도록 10개의 층으로 분할성토 하여 안정된 인공지반을 형성하였다. 본 연구에서는 현장에서 사용되고 있는 혼화재로서 HWS 고화재를 사용하였다.

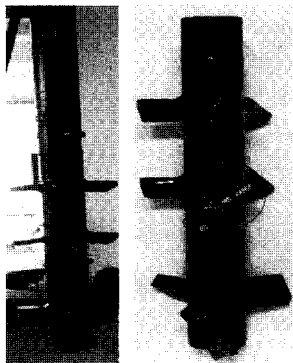


(a) 타설장비와 모형토조

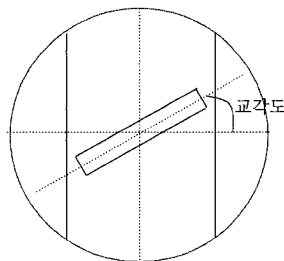


(b) 혼화제 주입펌프

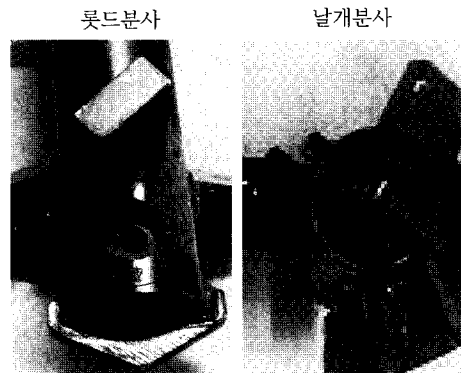
그림 1. 실험장치 전경



(a) 교반기 세트



(b) 교반날개의 구조(날개각도)



(c) 혼화제 분출구 위치

그림 2. 교반날개의 상세도

표 1. 시료의 기본 물성

물성실험	D10	D30	D60	Cu	Cg	emax	emin	γ_{dmax}	γ_{dmin}	Gs
실험치	0.365	0.46	0.52	1.42	1.11	0.89	0.61	1.66	1.41	2.67

3. 시험결과 및 분석

심층혼합공법의 타설방식에 대한 검토분석을 위하여 굴진속도 10cm/min(굴진 및 인발) 하에서 교반날개분사형식과 룯드측면분사형식에 대하여 교반속도 10회/min, 20회/min, 30회/min, 교반날개 각도 10도, 20도, 30도를 적용하여 실험을 수행하였다. 일정기간 양생 후 개량체로부터 시료를 채취하여 일축압축강도시험을 수행하였고 그 결과를 그림 3과 그림 4에 비교하여 제시하였다.

그림 3에서는 교반속도에 따른 교반날개분사와 룯드측면분사에 대한 시험결과를 제시하였다. 그림 3의 분석결과에 의하면, 교반속도가 10회/m, 20회/m, 30회/m로 변함에 따라 일축압축강도가 변화하는 것을 알 수 있으며 교반속도가 증가 할수록 일축압축강도가 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 교반날개분사와 룯드측면분사에 따른 일축압축강도를 분석한 결과 교반날개분사보다는 룯드측면분사의 경우가 일축압축강도가 크게 나타나는 것으로 평가되었다. 그림 4에서는 개량체의 상단부 시료에 대한 일축압축강도로서, 룯드측면분

사형식의 경우 교반각도가 증가함에 따라 일축압축강도가 증가하는 것으로 분석되었으나 교반날개분사형식의 경우는 특별한 상관성이 발견되지 않았다.

시공조건에 따른 개량체의 효율성을 평가하기 위하여 한 개의 개량체가 저항할 수 있는 총 축방향력 즉, 상재하중(유효상재하중; P_e)의 크기를 산정하여 비교하였다. 유효상재하중은 한 개 개량체의 평균단면적에 대응하는 상재하중으로 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$\text{유효상재하중}(P_e)(\text{kg}) = \text{개량체 단면적}(\text{cm}^2) \times \text{개량체 일축압축강도}(\text{kg/cm}^2)$$

표 2는 교반날개분사형식 개량체의 강도에 대한 효율성을 평가하여 제시한 것이며, 표 3은 룯드측면분사형식 개량체의 강도에 대한 효율성을 평가하여 제시한 것이다. 표 2와 표 3에 의하면, 교반날개분사일 경우는 개량범위가 크게 나타나는 반면에, 룯드측면분사의 경우는 개량범위가 다소 작게 나타났다. 또한 교반날개분사형식의 경우에는 교반날개각도 20도까지는 교반속도가 증가할

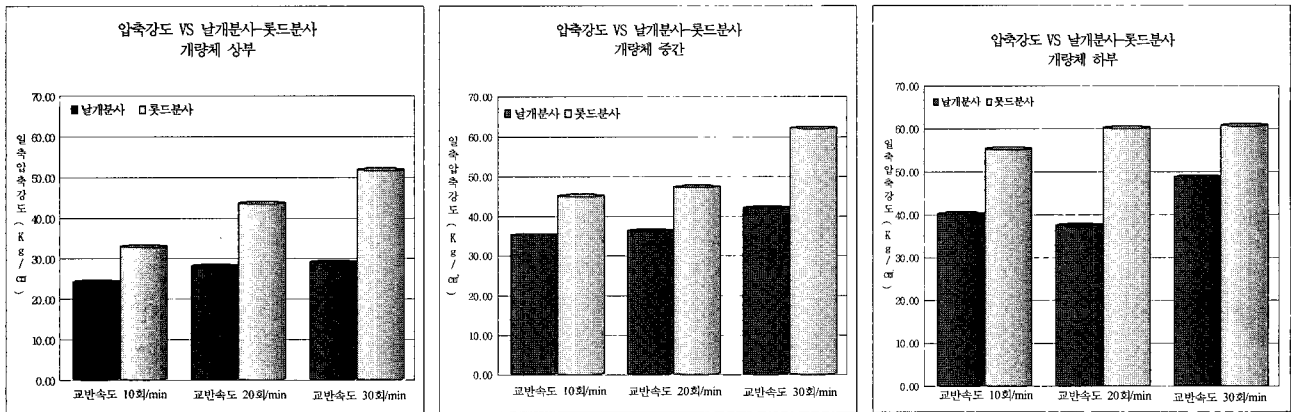


그림 3. 개량체 위치별 교반속도에 따른 일축압축강도 특성

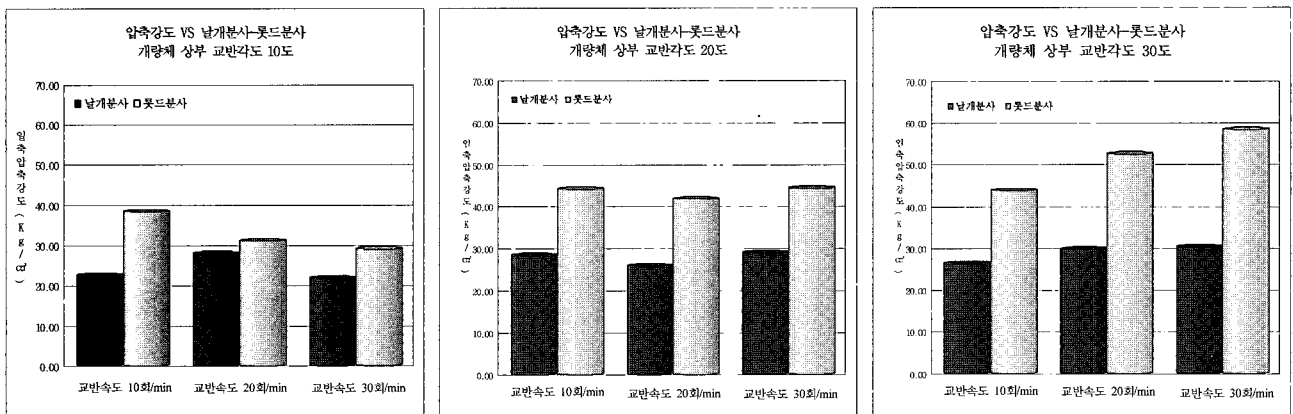


그림 4. 개량체 상부 교반각도와 교반속도에 따른 일축압축강도 비교

표 2. 교반날개분사형식 개량체의 지반개량 효율성

날개각도	교반속도 (min)	상단부			중간부			하단부		
		일축 압축강도 (kg/cm ²)	단면적 (cm ²)	Pe (kg)	일축 압축강도 (kg/cm ²)	단면적 (cm ²)	Pe (kg)	일축 압축강도 (kg/cm ²)	단면적 (cm ²)	Pe (kg)
10	10회	22.56	210.95	4,759.03	32.41	174.21	5,646.14	34.35	190.97	0
	20회	27.88	142.31	3,967.60	38.22	158.21	6,046.78	35.37	228.51	0
	30회	21.85	206.07	4,502.62	34.77	209.32	7,278.05	50.60	213.42	0
20	10회	28.40	198.84	5,647.05	30.50	187.09	5,706.24	32.17	223.42	0
	20회	25.91	165.39	4,285.25	42.57	129.18	5,499.19	34.80	202.84	0
	30회	28.95	215.07	6,226.27	35.71	149.12	5,325.07	45.32	253.90	0
30	10회	26.44	208.50	5,512.74	38.98	198.84	7,750.78	43.54	222.58	0
	20회	29.86	187.09	5,586.50	45.38	194.89	8,844.10	48.28	220.90	0
	30회	30.42	197.26	6,000.64	41.22	189.41	7,807.48	54.20	205.26	0
전체평균		23.76	192.39	4,571.19	33.39	176.70	5,900.01	36.27	217.98	0

표 3. 릿드측면분사형식 개량체의 지반개량 효율성

날개각도	교반속도 (min)	상단부			중간부			하단부		
		일축 압축강도 (kg/cm ²)	단면적 (cm ²)	Pe (kg)	일축 압축강도 (kg/cm ²)	단면적 (cm ²)	Pe (kg)	일축 압축강도 (kg/cm ²)	단면적 (cm ²)	Pe (kg)
10	10회	38.36	53.77	38.36	43.24	66.89	53.77	50.61	108.89	38.36
	20회	31.06	101.94	31.06	48.34	130.46	101.94	56.75	140.30	31.06
	30회	29.07	135.01	29.07	50.25	135.67	135.01	58.02	158.21	29.07
20	10회	44.17	125.36	44.17	43.24	133.70	125.36	51.64	142.31	44.17
	20회	41.84	71.58	41.84	48.34	152.59	71.58	62.29	156.09	41.84
	30회	44.27	65.51	44.27	50.25	79.42	65.51	66.34	112.45	44.27
30	10회	43.78	73.99	43.78	59.27	71.58	73.99	53.47	99.11	43.78
	20회	52.47	69.22	52.47	65.21	76.44	69.22	65.21	117.89	52.47
	30회	58.46	63.70	58.46	61.34	73.99	63.7	63.39	130.46	58.46
전체평균		0.00	84.45	0	0.00	102.30	84.45	0.00	129.52	0

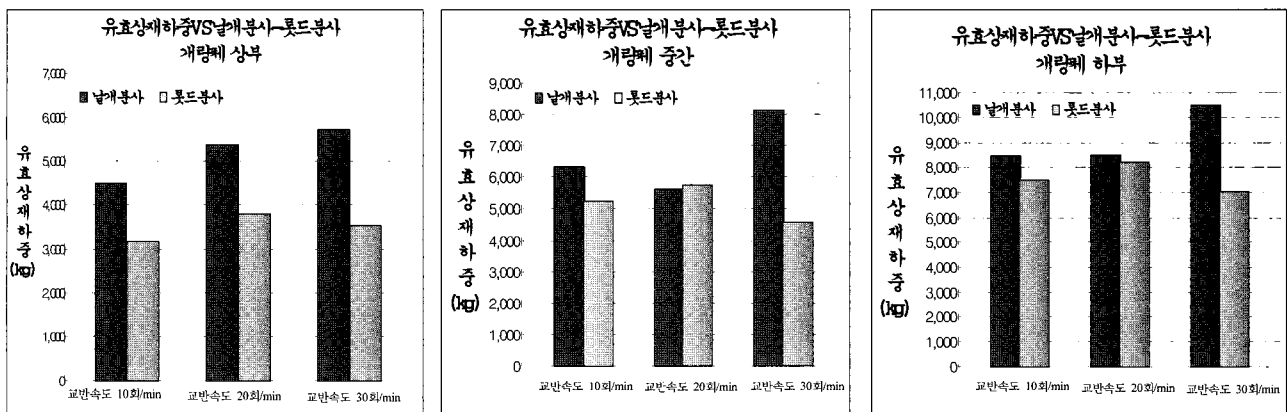


그림 5. 개량체 위치별 교반속도에 따른 유효상재하중 비교

수록 개량체의 직경이 증가하는 것으로 나타났으나, 교반날개각도가 30도일 때는 교반속도가 증가할수록 개량체의 직경이 작아지는 것으로 나타났다. 릿드측면분사의 경우에는 교반날개각도 10도에서는 교반속도가 증가할수록 개량체의 직경 역시 증가하는 것으로 나타났으나,

교반날개각도 20도, 30도에서는 교반날개속도가 증가할수록 개량체의 직경이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 교반날개각도가 증가한다고 해서 개량체의 단면적이 증가하지 않음을 나타낸다. 교반에 따른 저항을 고려한 교반효율은 교반날개 각도가 작을수록 양호하기 때문에 개

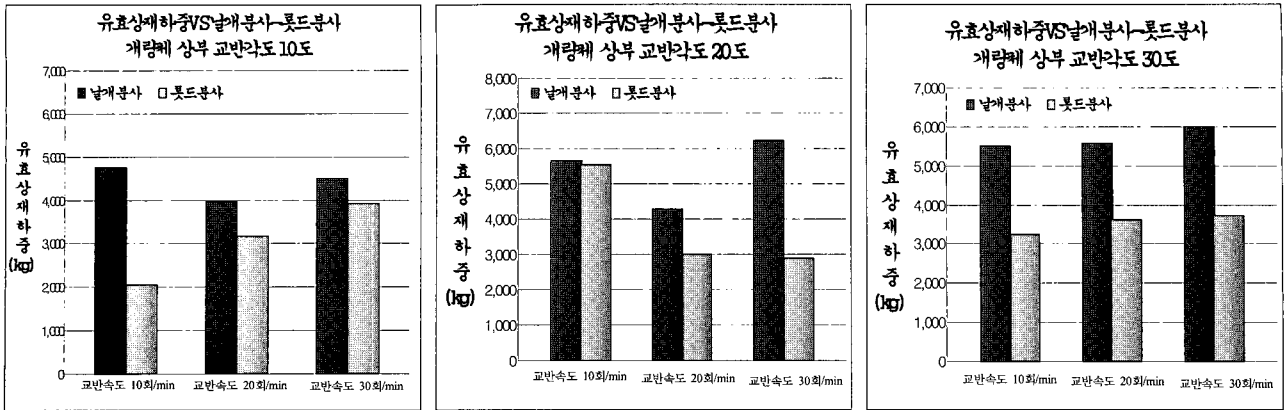


그림 6. 개량체 상부 교반각도와 교반속도에 따른 유효상재하중 비교

량체 설계강도의 확보 가능한 범위에서 작은 각도의 교반날개각도를 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

유효상재하중은 교반날개각도 변화와 교반속도 변화에 관계없이 교반날개분사형식이 릿드측면분사형식보다 전 구간에서 걸쳐 유효상재하중이 크게 나타났다. 또한 교반날개분사형식에서는 교반날개각도와 교반속도가 증가할수록 유효상재하중이 증가하는 것으로 나타난 반면, 릿드측면분사형식에서는 교반속도가 증가하면 유효상재하중이 증가하는 것으로 나타났으며, 교반날개각도가 10도에서 20도로 증가하면 유효상재하중이 증가하다가 교반날개각도가 30도로 증가하면 오히려 유효상재하중이 감소하는 것으로 나타나 교반날개각도의 영향보다는 교반속도의 영향이 큰 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 실내모형실험을 통하여 심층혼합공법에 대하여 다양한 시공조건이 심층혼합처리공법 개량체의 강도특성, 단면적, 유효상재하중에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

심층혼합공법의 교반기 교반속도가 증가 할수록 일축압축강도가 증가하고, 그 영향은 교반날개분사보다는 릿드측면분사의 경우에서 크게 나타났으며, 일반적으로 교반날개각도가 증가함에 따라 일축압축강도가 증가하는 것으로 분석되었다. 그러나 개량체 상단부에서는 릿드측면분사형식의 경우 교반각도가 증가함에 따라 일축압축강도가 증가하는 것으로 분석되었으나, 교반날개분사형식의 경우는 특별한 상관성이 발견되지 않았다.

교반날개분사형식과 릿드측면분사형식에서 교반날개각도와 교반속도가 증가하면 개량체의 단면적이 증가하는 것으로 나타났다. 교반날개각도의 변화에 따른

개량체의 단면적은 교반날개각도 20도에서 가장 크게 나타났다. 또한 동일한 조건하에서의 개량체의 단면적은 릿드측면분사형식보다 교반날개분사형식이 전 구간에 걸쳐 크게 나타나 개량범위가 큰 것으로 평가된다.

동일한 시공조건에서 개량체의 일축압축강도는 교반날개분사형식보다 릿드측면분사형식이 크게 나타났으나, 개량체의 단면적 및 유효상재하중은 교반날개분사형식이 릿드측면분사형식보다 크게 나타났다. 따라서 교반날개분사형식이 설계강도를 확보하는 범위 내에서 지반개량 효과가 우수한 것으로 평가된다. 보다 합리적인 개량효과 평가를 위해서는 여러 개의 개량체를 타설하여 개량체간의 간섭과 영향, 주변미찰을 고려한 지반지리학, 내구성 등을 종합적으로 검토해야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. David S. Yang (2000), Soil stabilization and liquefaction prevention using cement deep soil mixing (CDSM) and dry jet mixing method (DJM), GEO-Institute Graduate Student Society Monthly Seminar Series.
2. Simo Hoite, Thomas Dahlgren, George Fotinos (2001), Berths 57, 58 and 59 container wharf at the port of Oakland, Proceedings of the Conference American Society of Civil Engineers.
3. Stefan Larsson (2003), "Mixing Processes for Ground Improvement by Deep Mixing", Division of Soil and Rock Mechanics Royal Institute of Technology.
4. 윤중만, 홍원표, 유승경 (1996), "고압분사주입공법에 의한 개량 사례연구(I)", 한국지반공학회, 12권, 제4호, pp.33-45.
5. ESCA 공법연구회 (1995), 심층혼합처리공법을 위한 고화제(ESCA) 및 교반(혼합)장비 개발, 연구보고서 부록 I, pp.1-17.
6. 토목공법연구회 (1996), "지반개량공법", 창우출판, pp.201-203.
7. 양태선, 정경환, 여봉구, 이상수 (2000), "심층혼합처리공법에서 설계기준강도와 변형계수에 관한 연구(A Study on Design Strength and Elastic Using Deep Cement Mixing Method)", 대한토목학회 2000년 학술발표논문집.

(접수일자 2007. 5. 29, 심사완료일 2007. 7. 19)