

SCP 현장시험시공을 통한 동슬래그의 모래대체재로서의 적용성 연구 Application of Copper Slag as Sand Substitute in SCP Pilot tests

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 정현철²⁾, Hun-Chul Jung, 김경민²⁾, Kyung-Min Kim,

¹⁾ 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

²⁾ 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

SYNOPSIS : Sand Compaction Pile(SCP) is a soil improvement method that a sand charge is introduced into the pipe, and the pipe is withdrawn part away while the sand pile is compacted and its diameter is enlarged. The sand used in this method should be of good quality. In Korea, crushed stone and washed sea sand are used frequently in SCP. However, use of these materials is restricted because of environmental problem and deficiency of supply. In the copper smelting process, about 0.7 million tons of copper slag are produced in Korea. The range of particle size distribution of copper slag is from 0.15mm to 5mm, so it can be a substitute for sand, and the relatively high specific gravity compared with the sand, is its characteristic. Copper slag is hyaline and so stable environmentally that in foreign country, such as Japan, Germany etc., it is widely used in harbor, revetment and offshore structure construction works. Therefore, in this study, the several laboratory tests were performed to evaluate the applicability of copper slag as a substitute for sand of SCP. From the mechanical property test, the characteristics of sand and copper slag were compared and analyzed, and from laboratory model test, the strength of composite ground was compared and analyzed by monitoring the stress and ground settlement of clay, SCP and copper slag compaction pile. Specially, this study focused on the application of copper slag as sand substitute in SCP pilot tests based on laboratory tests results.

Key words: Sand compaction pile, Copper slag, Specific gravity, Strength of composite ground

1. 서 론

건설골재 난 및 환경에 대한 관심이 높아지면서 국내에서도 석탄회, 광재, 제강슬래그, 동슬래그 등 각종 부산물의 재활용과 그에 따른 기술개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 동제련 과정에서 발생하는 동슬래그는 국내에서 연간 70여만톤에 이르고 있으며 시멘트제조용 가철제 및 수리 조선소에서 선박의 녹을 제거하는 샌드블라스팅용 등으로 주로 사용되고 있으며, 이외에도 벽돌, 경계석, 인터로킹 블럭, 적벽돌, 레미콘용 골재 등으로 한정되어 쓰이고 있다. 우리나라에서 생산되는 동슬래그는 조립상태로 생산되며 입도범위가 0.15~5mm로 건설공사의 세골재로 이용할 수 있다. 특히 동슬래그는 모래에 비해 높은 비중이 특징이며 안정된 유리질 상태로 환경적으로도 매우 안정된 재료로 일본, 독일 등 해외에서는 항만공사, 호안공사 및 해양구조물의 제작 등에 널리 활용되고 있다(건기연 2000, LG-Nikko 2000). 또한, 국내에서도 콘크리트 골재용으로 사용하기 위한 동슬래그의 품질제정안을 마련한 상태이나, 지반공학분야에 대한 적용성 연구는 미흡한 상태이다.

본 연구는 동슬래그의 재료적 특성을 파악하기 위한 실내 물리·역학적 시험은 물론, 소규모의 모형 복합지반을 활용한 실내모형시험을 통해 동슬래그 다짐말뚝과 모래다짐말뚝 복합지반의 거동 특성을 비교·분석하였다. 그 결과, 다짐말뚝의 재료로서 동슬래그의 적용이 가능하리라고 판단하였으나, 모형시험에서 실물과 모형의 기하학적·역학적인 상사관계에 대한 정량적인 파악이 모호하고, 실내시험 결과만을 근거로 실제 연약지반개량을 위한 모래다짐말뚝의 모래 대체재로 동슬래그를 적용한다는 것에는 그 한계가 있다. 이와 같은 이유로 본 연구는 다음과 같은 모래다짐말뚝 시공현장을 채택하여 동슬래그를 모래 대체재로 적용함으로써, 보다 확실한 근거자료 및 시공사례를 제시하고자 한다.

2. 실내시험을 통한 SCP에 사용되는 모래와 동슬래그의 재료특성분석

모래 대체재료로서의 동슬래그의 적합성을 평가하기 위하여, 각종 실내 기본 특성시험들의 결과를 토대로 물리적·역학적 특성을 분석하였다(천, 2001; 천 등 2001a, b, c; 천 등 2002).

표 1. SCP에 사용되는 모래기준, 동슬래그 재료특성 요약

구 분	모래기준 (한국도로공사, 도로설계요령 토공편)	동 슬래그	
		자용로	연속로
함수비(%)		1.52	0.30
통일분류		SP	SP
유효입경, D ₁₀ (mm)		0.4	0.73
D ₁₅ (mm)	0.1~0.9	0.45	0.83
D ₈₅ (mm)	1~8	1.3	1.9
균등계수, C _u		2.5	2.0
곡률계수, C _g		1.0	1.39
No. 200체 통과량(%)	3%이하	0.58	0.33
비 중		3.778	3.443
최대건조밀도 (t/m ³)		2.392	2.168
투수계수 (cm/sec)	1×10 ⁻³ 이상	2.91 ₋₁ ×10	1.47

을 만족하는 적합한 것으로 평가되었다.

(4) 실내모형시험 및 결과분석

실내모형시험은 모래다짐말뚝의 대체재로서의 동슬래그다짐말뚝이 설치된 지반의 지지력 특성을 파악하기 위하여 하중재하시험으로 실시하였다.

평판크기는 직경 15cm를 사용하였으며 하중재하장치는 유압재를 사용하도록 고안되었으나, 소형 배인 전단 시험기를 이용하여 재성형된 점토지반의 비배수전단강도를 측정된 결과 약 0.08 kg/cm²로 매우 연약하여 무게추에 의한 정재하시험을 실시하였다. 직경은 6cm, 길이는 50cm의 모래다짐말뚝과 동슬래그다짐말뚝을 설치하기 위하여 직경 6cm관을 미리 모형토조에 설치하고, 관을 조금씩 인발하는 동시에 모래 또는 동슬래그를 넣고 진동을 가하면서 설치하여 타설된 모래 또는 동슬래그가 조밀해지도록 하였다.

또한 복합지반의 해석·설계에 중요한 요소로 작용하는 점토지반과 모래다짐말뚝, 동슬래그다짐말뚝에 작용하는 응력분담비를 구하기 위하여 토압계를 설치하였고, 하중단계는 약 0.25 kg/cm²정도씩 30분 단위로 증가시켰다.

모형지반의 파괴양상은 모두 연약한 지반에서 발생하는 파괴인 관입전단파괴가 발생하였고, 전체적인 침하량은 연속로 제조과정에서 발생한 동슬래그를 모형점토지반에 설치한 경우가 침하량이 가장 낮게 나타났고, 자용로, 모래다짐말뚝의 경우로 나타나, 동슬래그의 모래대체재로서의 역할은 우수하다고 판단된다.

복합지반의 지지력증대 효과를 비교할 수 있도록 점토원지반, 모래다짐말뚝, 동슬래그다짐말뚝이 설치된 모형지반의 하중-침하량 관계를 살펴보면, 모형시험에서 평가된 지지력은 침하량 15mm(재하평판 직경의 10%)를 기준으로 할 때 점토 원지반은 약 0.08kg/cm², 모래말뚝 약0.13kg/cm², 동슬래그 자용로 약 0.17kg/cm², 동슬래그 연속로 약 0.19kg/cm²로 나타나 동슬래그 말뚝의 원지반에 대한 지지력 증대 효과는 모래다짐말뚝보다 약 50%정도 우수한 것으로 판단된다.

하중에 따른 각 지반의 복합지반에서 측정된 점토지반과 모래, 동슬래그다짐말뚝의 응력분담비를 살펴보면, 하중단계가 증가할수록 응력분담비는 감소하는 경향을 보인다. 응력분담비는 모두 2~7정도의 값을 나타내었으며, 각 하중단계별로 보면 모래다짐말뚝의 동슬래그다짐말뚝보다 응력분담비가 약 1정도 낮게 측정되었고 동슬래그의 경우 연속로, 자용로 두 가지 경우 비슷한 값을 보였다.

(1) 다짐특성

A다짐시험 결과 자용로인 경우 최대건조밀도 2.39g/cm³, 최적함수비 7.46%, 연속로인 경우 최대건조밀도 2.17g/cm³, 최적함수비 6.11%로 나타났다. 일반성토재료인 화강풍화토의 경우 최대건조밀도 1.34~1.78g/cm³, 최적함수비 11.9~33.2%를 나타낸다.

(2) 전단특성

직접전단시험을 실시한 결과, 동슬래그의 강도정수는 자용로인 경우 $\phi=43^\circ$, $C=0$ 으로 나타났으며, 연속로인 경우 $\phi=46^\circ$, $C=0$ 으로 측정되어 실내시험에서 사용한 모래의 경우($\phi=36^\circ$, $C=0$)보다 내부마찰각이 크게 나타났으며, 일반 성토재인 화강풍화토(SC)의 강도정수가 내부마찰각 $\phi=20^\circ$, 점착력은 $C=0.44\text{kg/cm}^2$ 인 것을 감안하면 강도특성은 매우 양호한 것으로 판단된다.

(3) 투수특성

정수위투수시험 결과 자용로인 경우 $2.91 \times 10^{-1}\text{cm/sec}$, 연속로인 경우 1.47cm/sec 로서 비교적 큰 값을 나타냄으로써, 배수재로서의 적용기준

3. 현장시험시공

3.1 현장 개요

본 시험시공현장은 경남 밀양시 삼랑진읍 미전리 46-6번지에 위치한 경부선 ○○-○○간 선로개량 노반공사 현장으로서 연약지반개량을 위한 모래다짐말뚝 시공구간(3-1구간)의 일부구간(1km 640~650)에 총 9개소

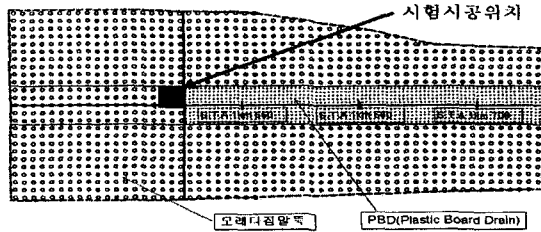


그림 1. 현장시험시공 위치

에 대해 정방형의 형태로 모래다짐말뚝 대신에 동슬래그 다짐말뚝을 시공하였다. 시공 전·후의 대상지반의 공학적 특성 및 지지력, 침하, 압밀특성을 파악하여 모래다짐말뚝과 비교·분석함으로써 모래 대체재로서의 동슬래그의 적용성을 평가하였다.

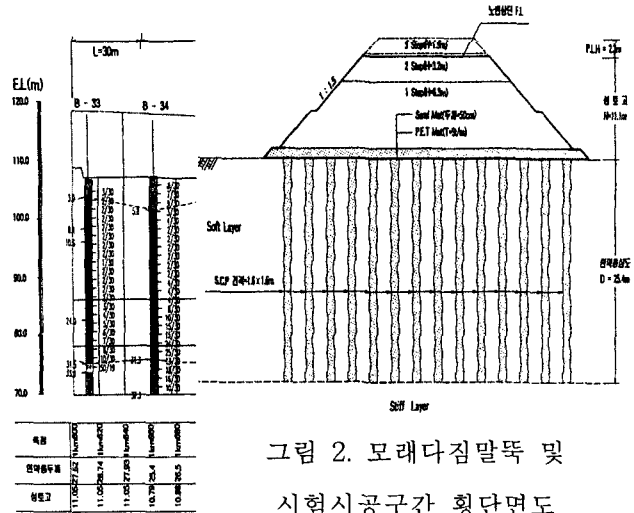


그림 2. 모래다짐말뚝 및 시험시공구간 횡단면도

3.2 시험시공지반 및 말뚝재료의 특성

3.2.1 시험시공지반의 특성

(1) 매립층

본 조사지역 최상부에 위치한 매립층은 상부는 실트질 모래로, 하부로 갈수록 중립~조립의 모래로 느슨한 상태로 구성되어 있으며, 1.3m 정도의 두께로 분포하고 있다. 또한 표준관입시험에 의한 N치 7/30(회/cm)을 나타낸다.

(2) 모래층

모래층은 상부에는 세립~중립의 실트질 모래이며, 하부로 갈수록 모래가 협재해 있다. 두께는 3m정도이고, 표준관입시험에 의한 N치 11/30(회/cm)을 나타낸다.

(3) 층적층

층적층은 실트질 점토로 구성되어 있으며, 상부에는 유기물과 모래층이 박층으로 분포되어 있고 하부로 갈수록 점토질 실트가 우세하다. 표준관입시험에 의한 N치는 0/30~8/30(회/cm)를 보이는 초연약 또는 연약층이 분포하고 있다. 이 연약층은 표 2. 시험시공지반 및 말뚝재료의 특성

#200체 통과율이 98%이상의 세립토로 구성되어 있으며 함수비는 50% 내외, 통일분류상 소성이 낮은 점토 즉, CL로 분류된다.

3.2.2 말뚝재료의 특성

현장시험시공에 적용된 모래다짐말뚝재료 및 상부 매트층으로는 낙동강 모래가 사용되었으며, 동슬래그 다짐말뚝재료로 사용된 동슬래그는 동제련 과정에서 생성되는 그대로 운반하여 사용하였으며, 대상 연약지반 및 말뚝재료의 물리·역학적 특성을 요약하면 표 2과 같다.

구분	대상연약지반	동슬래그	모래 (낙동강사)
함수비(%)	40.5~54.5	1.1	11.2
통일분류	CL	SP	SP
유효입경, D ₁₀ (mm)	6.1×10 ⁻⁴	0.48	0.19
D ₁₅ (mm)	1.1×10 ⁻³	0.6	0.23
D ₈₅ (mm)	4.3×10 ⁻²	1.5	0.62
균등계수, C _u	27.5	2.2	2.11
곡률계수, C _g	2.35	1.31	1.18
#200체 통과량(%)	98.13	0.42	1.68
비중(G _s)	2.66	3.58	2.67
투수계수(cm/sec)	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁶	1.5×10 ⁻¹	3.9×10 ⁻²
시공후 건조단위중량(t/m ³)	-	2.25 t/m ³	1.64 t/m ³

여기서, 시공후 건조단위중량은 각각의 말뚝이 완전히 형성된 후 현장들밀도시험에 의해 도출된 결과이다.

3.3 실험방법

3.3.1 시험시공규모

(1) 설치규모(모래다짐말뚝과 동일심도 및 동일간격)

- 설치심도 : 28m
- 타입공수 : 9개소
- 설치연장 : 252m

(2) 시공간격 및 직경

(모래다짐말뚝과 동일간격 및 동일직경)

- 정사각형 1.6m×1.6m 간격
- 직경 : ø700 mm

(3) 시공장비(모래다짐말뚝 시공장비와 동일, 표 3 참조)

표 3. 장비의 조항

구분	단위	소요량	규격	
			ℓ=20m 이하	ℓ=21m~25m
진동햄머	대	1	90kw	90kw
무한케도크레인	"	1	30~40ton	50ton
Leader	개	1	31m	35m
Casing	"	1	22m	27m
Skip Bucket	"	1	10m ³	10m ³
공기압축기	대	1	10.3m ³	17m ³
발전기	"	1	250kw	250kw
공기탱크	개	1	3m ³	5m ³
로우터	대	1	1.34m ³	1.34m ³
자동기록장치	식	1	250m/m형	250m/m형

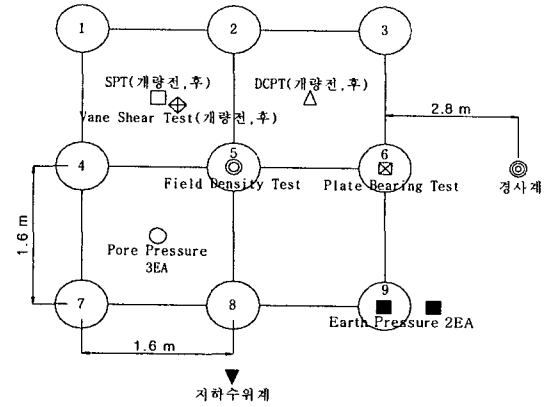


그림 3. 시험시공 및 계측 현황도

표 4. 물리·역학시험(비교란 시료)

구분	시험항목
물리시험	- 함수비시험
	- 비중시험
	- 액성한계시험
	- 소성한계시험
역학시험 (개랑 전·후)	- 압밀시험
	- 일축압축시험
	- 입도분포시험
	- 체분석시험
	- #200체가름시험
	- 비중계분석시험
	- 삼축압축시험

2.3.2 개랑효과 확인을 위한 실험 및 계측

모래다짐말뚝과 동슬래그 다짐말뚝에 의한 연약지반개랑효과의 확인 및 비교·검증을 위해 물리·역학실험 및 현장계측이 수행되었다. 현장에 적용된 동슬래그 및 모래, 대상지반(비교란시료)에 대한 사전조사를 위한 실내 물리·역학적 시험, 현장계측의 목적에 대해서 설명하면 표 4, 5와 같다.

표 5. 현장계측항목

구분	계측심도, GL(-)	설치목적	설치지반
표준관입시험	전 심도	Split Sampler 관입저항치 측정	대상지반
베인전단시험(1)	7m	비배수 전단강도(c_u)의 측정	대상지반
베인전단시험(2)	12.5m		
베인전단시험(3)	20m		
평판재하시험(1)	0.3m	지반반력계수 및 지지력 측정	각 말뚝
평판재하시험(2)	0.3m		
경사계	전 심도	말뚝의 횡방향 변위 확인	대상지반
토압계(1)	0.5m	하중재하시 응력집중비 확인	각 말뚝 및 주변지반
토압계(2)	0.5m		
토압계(3)	0.5m		
토압계(4)	0.5m		
간극수압계(1)	7m	성토하중에 의한 과잉간극수압 소산속도 확인	대상지반
간극수압계(2)	13m		
간극수압계(3)	20m		
지하수위계	-	지하수위의 변화 측정	대상지반
현장들밀도시험(1)	0.3m	현장 단위중량 측정	각 말뚝
현장들밀도시험(1)	0.3m		

3. 분석 및 고찰

3.1 지지력 측면

3.1.1 평판재하시험

평판재하시험은 성토부의 노상 및 노반 또는 구조물의 기초가 설치될 지반을 대상으로 직접 하중을 가하여 시험대상 부지의 허용지지력, 예상침하량 및 지반반력계수를 측정하기 위해 실시하며, 허용지지력을 추정하고 이에 대해 재하판의 크기를 고려하여 실제구조물을

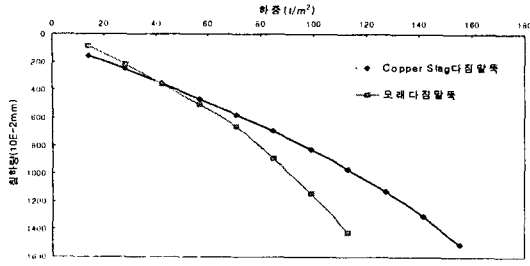


그림 4. 평판재하시험 결과

모래다짐말뚝이 $75.5t/m^2$, 동슬래그다짐말뚝이 $126.5t/m^2$ 으로 나타남으로써 동슬래그다짐말뚝이 모래다짐말뚝에 비해 168%의 상대적으로 큰 항복지지력을 보였다. 이 결과는 각 복합지반에서 말뚝이 분담할 수 있는 응력 축, 응력분담비에 대한 중요한 근거라 할 수 있으며, 같은 하중단계에서 상대적으로 적은 침하량을 보인 동슬래그 다짐말뚝이 지표면침하판에 의한 결과에서도 언급되었지만 복합지반의 침하역제 효과면에도 우수하다는 것이 입증되었다.

평판재하시험에서 구한 지지력의 유의심도(significant depth)는 재하판 직경의 2배이다. 따라서, 기초의 지지력이나 침하 해석에 이용할 경우에는 기초 폭의 영향을 받는 심도의 지층의 구성 상태를 충분히 고려해야 하는 단점을 내포하고 있지만, 본 시험시공현장의 말뚝은 길이방향에 대해 선단까지 균질한 재료로 구성되어 있으므로 이와 같은 재하폭과 기초폭의 차이에 의한 평판재하시험의 불확실성은 배제될 수 있을 것으로 사료된다.

4.1.2 토압계 분석

동슬래그다짐말뚝과 모래다짐말뚝 복합지반에서 각 말뚝이 분담하는 응력비를 산출하기 위해 GL (-)0.5m 심도의 총 4개소에 대해 각 복합지반의 말뚝중심과 주변지반에 토압계가 매설되었으며 계측자료는 그림 5, 6과 같다. 경과일수 160~210일 정도의 지점에서 불규칙한 변화를 보이는 것은 성토하중의 급작스런 변화에 기인한 것이며, 점차적으로 안정화되어 가는 추세를 보이고 있다.

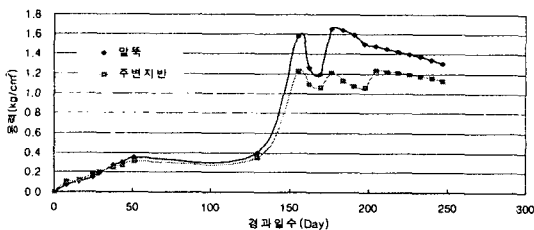


그림 5. 동슬래그 다짐말뚝 복합지반

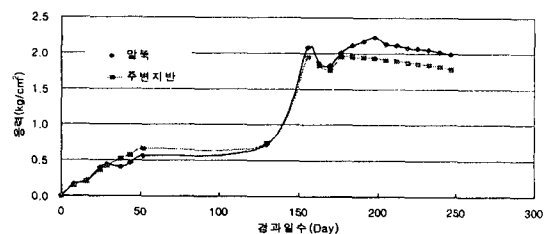


그림 6. 모래다짐말뚝 복합지반

각 말뚝의 응력분담비를 산출한 결과, 동슬래그 다짐말뚝이 1.154, 모래다짐말뚝이 1.117로 매우 낮은 결과치를 보였다(표 6 참조). 이와 같은 응력분담비를 보인 원인으로는 토압계가 GL (-)4.5m 심도에 위치한 연약층에 매설되지 못하고 상부지반 즉, 지층이 양호한 매립층에 위치함으로써 나타난 결과라 할 수 있다. 그러나 동일한 조건 하에서 계측이 수행되어졌다는 것을 감안하면, 각 복합지반의 비교·분석을 위한 자료로 활용이 가능하리라 본다.

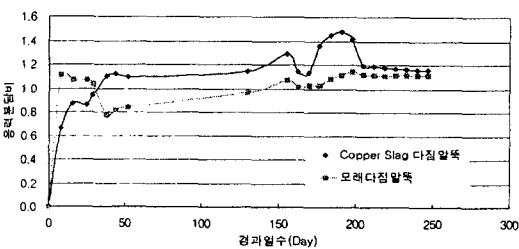


그림 7. 각 복합지반의 응력분담비 비교

표 6. 응력분담비 비교

구 분	동슬래그다짐말뚝	모래다짐말뚝	비 고
응력분담비	1.154	1.117	모래다짐말뚝 대비 103.3%

4.1.3 침하저감효과

지표면침하관은 성토하중에 따른 침하양상을 분석하기 위해 각 복합지반에 설치되었으며, 연약지반개

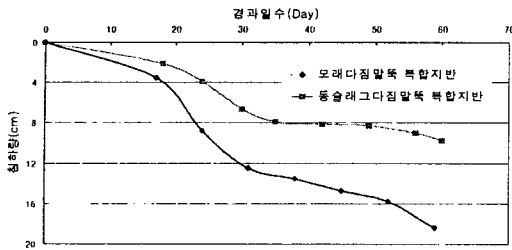


그림 8. 지표면침하관 계측결과

표준관입시험은 스플리트 스푼이라고 하는 샘플러를 시추공 속에 넣고, 동일한 에너지로 타격을 가하여 흙의 저항력을 측정하는 시험이다. 스플리트 스푼은 두꺼운 철판으로 만들어져 있는데, 가운데가 갈라져 있으며 스푼의 하단은 슈우가 연결되어 있고, 상단은 드릴 로드와 연결하게 되어 있다. 드릴로드에 달린 샘플러를 보링 구멍에 넣고 처음 15cm는 교란되지 않은 원지반에 도달하도록 관입을 시킨 후 63.5kg의 해머로 76cm의 높이에서 타격을 가한다. 샘플러가 30cm 관입할 때까지 요구되는 타격횟수를 표준관입시험치 또는 N치라고 한다.

본 연구에서는 모래다짐말뚝과 동슬래그다짐말뚝의 시공으로 인한 연약지반 개량정도 확인을 위하여 표준관입시험을 도입하였으며, 시험결과는 표 7과 같이 상부매립층(심도 0~4.5m)보다는 초연약 또는 연약층(심도 6~30m)에서의 개량정도가 두드러지게 나타나고 있다. 이와 같은 결과는 함수비가 비교적 낮고 지층이 양호한 상부 매립층보다는 상대적으로 큰 함수비를 보유한 연약층에서의 횡방향 압밀과 다짐에 의한 개량효과라 할 수 있다. 또한, 연약층(심도 6~30m) 전심도에 걸친 타격횟수로 개량정도를 비교

표 7. 연약층(심도 6~30m) 개량 전·후의 표준관입시험치 비교

구 분	개량전 (타격횟수, N치)	개량후(타격횟수, N치)	
		동슬래그 다짐말뚝 주변지반	모래다짐말뚝 주변지반
타격횟수	1~15	9~18	7~17

하면 개량전이 1~15회, 개량후 동슬래그 다짐말뚝주변지반 및 모래다짐말뚝주변지반이 각각 9~18회, 7~17회로 나타나, 동슬래그 및 모래다짐말뚝에 의한 개량정도는 매우 유사한 것으로 나타났다.

4.1.5 베인 전단시험(Vane Shear Test)에 의한 개량효과 확인

본 연구에서는 베인 전단시험 장비로 기존의 Hand Vane으로부터 개량된 형태인 Geonor Vane H-10을 사용하였으며, 십자형 날개의 규격은 55 × 110mm이다.

시험결과는 그림 9와 같이 동슬래그다짐말뚝 주변지반의 비배수 전단강도가 모래다짐말뚝 주변지반에 비해 심도 7m에서는 약 19%, 12.5m에서는 약 8%의 정도의 더 높은 개량효과를 보였으나, 심도 20m지점에서는 십자형 날개가 회전할 수 없을 만큼 지반이 개량되어 계획된 시험이 불가하였다.

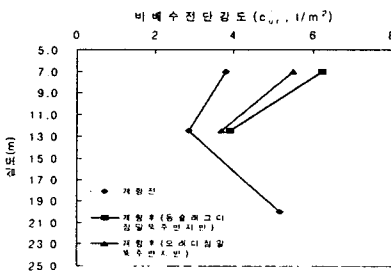


그림 9. 베인 전단시험 결과

를 측정된 결과, 그림 10과 같이 각 말뚝의 주변지반 함수비 저감효과는 매우 비슷한 양상을 보이고 있다.

5. UD sample의 실내시험에 의한 개량효과 확인

5.1 함수비 시험

개량전·후 동슬래그다짐말뚝 및 모래다짐말뚝 주변지반의 함수비를 측정하여, 그림 10과 같이 각 말뚝의 주변지반 함수비 저감효과는 매우 비슷한 양상을 보이고 있다.

5.2 일축압축시험

일축압축시험은 마치 콘크리트 공시체에 대한 압축시험처럼 축방향으로만 압축하여 흙을 파괴시키는

것이므로 $\sigma_3 = 0$ 일 때의 삼축압축시험이라 할 수 있다. 따라서, 이 시험으로부터는 Mohr원이 하나밖에 그려지지 않으므로 내부마찰각 ϕ 를 결정하지 못한다.

일축압축시험을 할 때에는 흙시료가 자체로 자립하여야 하므로 점성토에 대해서만 시험이 가능하다. 또한 배수조건을 조절할 수 없으므로 항상 비배수 조건에서의 시험결과 밖에 얻지 못한다. 시료가 파괴될 때의 축방향의 압력을 일축압축강도, q_u 라고 한다.

본 연구에서 개량전·후의 일축압축강도를 측정된 결과, 그림 11과 같이 심도별(8~8.8, 13~13.8, 25~25.8m)로 동슬래그다짐말뚝 주변지반이 각각 220, 274, 152%의 개량효과를, 모래다짐말뚝 주변지반이 각각 232, 257, 128%의 개량효과를 보였다. 심도가 깊어질수록 동슬래그다짐말뚝 주변지반의 개량효과가 우월하게 나타나고 있으며, 각 주변지반의 평균 개량정도를 비교한 결과, 동슬래그다짐말뚝 주변지반이 모래다짐말뚝 주변지반에 비해 약 9.7%만큼 높게 나타났다.

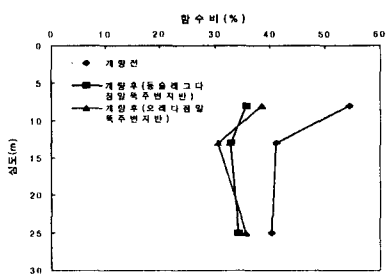


그림 10. 개량전·후 함수비의 변화

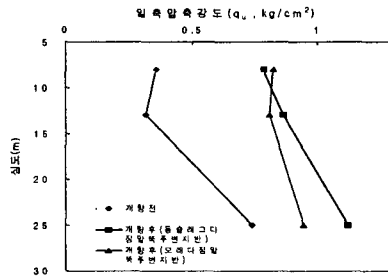


그림 11. 일축압축시험 결과

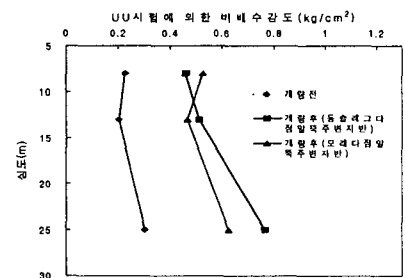


그림 12. 삼축압축시험 결과

5.3 삼축압축시험(Unconsolidated Undrained test, UU)

본 연구는 이 시험이 단기 안정해석을 위한 시험방법이기는 하지만, 각 말뚝주변지반의 개량효과를 비교하기에는 충분한 시험법이라 판단하였다.

개량전·후의 비배수 강도를 측정된 결과, 그림 12와 같이 심도별(8~8.8, 13~13.8, 25~25.8m)로 동슬래그다짐말뚝 주변지반이 각각 201, 250, 251%의 개량효과를, 모래다짐말뚝 주변지반이 각각 230, 228, 206%의 개량효과를 보였다. 일축압축시험 결과와 같은 양상으로 심도가 깊어질수록 동슬래그다짐말뚝 주변지반의 개량효과가 우월하게 나타나고 있으며, 각 주변지반의 평균 개량정도를 비교한 결과, 동슬래그다짐말뚝 주변지반이 모래다짐말뚝 주변지반에 비해 약 12.7%만큼 높게 나타났다.

5.4 압밀시험

현장시험시공에서 주변지반의 압밀에 의한 개량효과를 비교하기 위하여 본 연구는 간극수압계와 지하수위계를 지중에 매설 또는 설치하였다. 그러나, 지하수위계의 경우 계측기간 동안 G.L. (-)0.0m의 수위를 계속해서 유지하였고, 그에 따라 과잉간극수압의 소산과정을 계측하기 위한 간극수압계 역시 그 계측결과에서 변화가 발생하지 않았다.

이에 본 연구는 과잉간극수압 소산에 따른 주변지반의 개량효과를 규명하기 위하여 앞에서 설명한 것과 같은 표준관입시험 및 베인전단시험, 함수비시험, 일축압축시험, 삼축압축시험 등과 같은 원위치시험 및 실내역학시험을 통한 간접적인 방법으로 개량효과를 파악하였다. 이와 더불어 다음과 같은 표준 압밀시험을 통한 초기간극비의 변화 및 투수계수의 저감효과 등을 비교함으로써 과잉간극수압 소산에 따른 개량효과를 비교·검증하고자 한다.

표준 압밀시험결과를 정리하면, 표 8과 같이 각 주변지반의 초기간극비(e_0) 및 투수계수(k)는 감소하였고, 선형압밀하중(P_c)은 증가함으로써 다짐말뚝에 의한 개량효과를 보이고 있으나, 전체적인 수치에서 각 주변지반 간의 압밀특성이 확실한 차이를 보이고 있지 않아, 동슬래그다짐말뚝 및 모래다짐말뚝에 의한 개량효과는 유사한 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 모래다짐말뚝의 모래 대체재로서 동슬래그의 활용방안 연구를 위하여, 실내 연구에 의한 결과를 토대로 실제 모래다짐말뚝 시공 현장의 일부분에 대해 모래 대체재로서 동슬래그를 적용하였으며, 각종 실험 및 계측을 통해 도출된 결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

1) 토압계의 계측을 통한 각 말뚝의 응력분담비를 산출한 결과, 동슬래그 다짐말뚝이 1.154, 모래다짐말뚝이 1.117로 매우 낮은 결과치를 보였다. 이와 같은 응력분담비를 보인 원인으로서는 토압계가 GL (-)4.5m 심도에 위치한 연약층에 매설되지 못하고 상부지반 즉, 지층이 양호한 매립층에 위치함으로써 나타난 결과이며 동일한 조건 하에서 계측이 수행되어졌다는 것을 감안하면 비교·분석을 위한 자료로 활용이 가능하다고 판단된다. 결과적으로 동슬래그다짐말뚝 복합지반이 모래다짐말뚝 복합지반에 비해 103.3%의 약간 높은 응력분담비를 보여

표 8. 압밀시험 결과

구 분(GL(-)m)		초기간극비 (e ₀)	선형압밀하중 (P _c)	투수계수 (cm/s)
개량전	8~8.8	1.326	1.2	3.21×10 ⁻⁶ ~2.15×10 ⁻⁴
	13~13.8	1.062	1.3	7.49×10 ⁻⁶ ~1.11×10 ⁻³
	25~25.8	1.061	3.5	9.18×10 ⁻⁶ ~7.19×10 ⁻⁵
개량 후	동슬래그 다짐말뚝 주변지반 8~8.8	1.287	1.7	2.87×10 ⁻⁶ ~5.98×10 ⁻⁵
	13~13.8	0.775	2.1	4.99×10 ⁻⁶ ~5.10×10 ⁻⁵
	25~25.8	0.794	3.8	2.97×10 ⁻⁶ ~5.50×10 ⁻⁴
모래 다짐말뚝 주변지반	8~8.8	1.262	1.6	3.06×10 ⁻⁶ ~1.52×10 ⁻⁴
	13~13.8	0.731	2.0	1.92×10 ⁻⁶ ~1.05×10 ⁻⁴
	25~25.8	0.748	4.3	7.10×10 ⁻⁶ ~1.78×10 ⁻⁴

지지력 측면에서 모래 대체재로 동슬래그의 활용은 가능하리라 판단된다.

- 2) 지표면침하판에 의한 계측결과는 동슬래그다짐말뚝 복합지반이 모래다짐말뚝 복합지반에 비해 약 55% 내외의 침하량을 보임으로써 침하억제효과면에서도 우수한 것으로 판명되었다.
- 3) 표준관입시험 결과, 지층이 양호한 상부매립층(심도 0~4.5m)보다는 초연약 또는 연약층(심도 6~30m)에서의 개량정도가 두드러지게 나타나고 있으며, 이는 함수비가 비교적 낮고 지층이 양호한 상부 매립층 보다는 상대적으로 큰 함수비를 보유한 연약층에서의 횡방향 압밀과 다짐에 의한 개량효과라 할 수 있다. 또한, 연약층(심도 6~30m) 전심도에 걸친 타격횟수로 개량정도를 비교하면 개량전이 1~15회, 개량후 동슬래그다짐말뚝 주변지반 및 모래다짐말뚝 주변지반이 각각 9~18회, 7~17회로 나타나, 동슬래그 및 모래다짐말뚝에 의한 개량정도는 매우 유사한 것으로 나타났다.
- 4) 현장 배인 전단시험 및 UD sample에 의한 실내시험(함수비시험, 일축압축시험, 삼축압축시험, 압밀시험) 결과, 동슬래그 다짐말뚝 주변지반이 모래다짐말뚝 주변지반보다 개량정도에서 약간 우수하거나 유사한 것으로 나타났다. 이는 동슬래그의 투수계수가 모래보다 월등하다는 것을 감안할 때, 말뚝의 재료적 특성보다는 원지반 즉, 주변지반의 투수계수 등의 공학적 특성이 복합지반압밀에 중요한 매개변수라는 것을 나타내는 결과이다.

감사의 글

본 논문은 2001년 LG-Nikko 동제련(주)에서 지원하는 연구인 “동슬래그의 토목공사용 재료로서의 활용성에 관한 개발 연구”의 연구수행으로 얻은 연구결과임을 밝히며, 연구비를 지원해준 LG-Nikko 동제련(주) 관계자 분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원(2000), LG-Nikko 동제련(주)(2000), “동제련 슬래그의 건설재료 활용 및 기준 개발”, pp. 168~236.
2. 천병식(2001), “동제련 슬래그 골재의 토목공사에의 활용”, 동(銅)제련 슬래그의 건설용 골재활용 심포지엄, 한국건설기술연구원, pp.VI-1~VI-13.
3. 천병식, 김경민, 이학규(2001), “연약점토지반에 수직·수평 배수재로서 동 슬래그의 활용성 연구”, 2001년도 한국지반환경공학회 학술발표회, pp. 187~192.
4. 천병식, 김경민, 조한영(2001), “동슬래그의 SCP의 모래대체재로서의 활용”, 2001년도 대한토목학회 학술발표회.
5. 천병식, 김경민, 정현철, 조한영(2001), “대형압밀시험기를 이용한 동슬래그 다짐말뚝의 압밀배수 특성”, 2001년도 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp. 552~557.
6. 천병식, 정현철, 조한영(2002), “지반개량재로서 동제련슬래그의 활용에 관한 연구”, 한국지반환경공학회 논문집, 제3권 제1호, pp. 27~36.