

대형압밀시험기를 이용한 동슬래그 다짐말뚝의 배수 특성

Drainage Characteristics of Copper Slag Compaction Pile Installed in Clay Based on the Laboratory Consolidation Model Test

천병식* 정헌철** 김경민** 조한영***
Chun, Byung Sik Jung, Hun Chul Kim, Kyung Min Cho, Han Young

ABSTRACT

Copper slag is the by-producted material on the proceeding of refining the copper. To verify applications of copper slag to vertical drain material can substitute for the sands in ground improvement, laboratory soil tests and consolidation model tests were conducted.

The results of consolidation model test was analyzed as the hyperbolic method. The hyperbolic method assumes that the settlement(s) versus time(t) behavior approaches a straight line describes a hyperbolic reaction. The inverse of the slope of the line would then yield the ultimate settlement.

Through in this study, copper slag is compatible with vertical drain material as like sands. Copper slag compaction pile promote the consolidation settlement.

1. 서 론

SCP(모래다짐말뚝) 공법은 연약지반에 모래를 다지면서 압입하여 비교적 지름이 큰 모래말뚝을 지중에 형성시켜 지반을 개량하는 공법으로서, 모래지반인 경우 밀도증대와 액상화 방지, 수평저항력 등을 증가시키고 점토지반에서는 원지반과 다져진 모래말뚝으로 이루어진 복합지반을 형성함으로써 지반의 압밀침하저감 및 압밀 촉진, 전단강도 및 지지력 증대, 측방변위억제 등의 효과를 목적으로 한다. 사용되는 모래는 모래다짐말뚝 시공기준에 맞는 양질의 것을 사용하여야 하며, 현재 국내에서 석산골재, 바다모래(세척사) 등을 사용하고 있으나 사용한계 및 환경문제로 골재의 수급이 원활하지 않은 상태이다. 우리나라에서는 동제련 과정에서 동슬래그가 연간 70만톤 정도 생산되고 있으며, 동슬래그 입도범위가 0.15~5mm로 모래 대용으로 사용될 수 있으며, 특히 모래에 비해 높은 비중이 특징이다. 또한 안정된 유리질 상태이므로 환경적으로도 안정한 재료로 일본, 독일 등 해외에서는 항만공사, 호안공사 및 해양구조물 제작 등에 널리 활용되고 있다^{1),2)}.

따라서, 본 연구에서는 동슬래그의 압밀배수특성을 파악하기 위해, 점토지반을 대상으로 하여 원지반+모래다짐말뚝, 원지반+동슬래그다짐말뚝을 형성하여 압밀 침하량을 계측함으로써 동슬래

* 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수·공학박사, 정회원

** 한양대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, 비회원

*** LG-Nikko 동제련(주) 건설연구팀 팀장, 비회원

그말뚝이 설치된 모형토조지반의 압밀배수효과를 비교·분석하였다.

2. SCP(모래다짐말뚝)에 사용되는 모래와 동슬래그의 재료특성

모래 대체재료로서의 동슬래그의 적합성을 평가하기 위하여, 각종 기본 특성시험들의 결과를 토대로 물리적·역학적 특성을 분석하였다.

(1) 물리적 특성

① 입도분포와 연경도

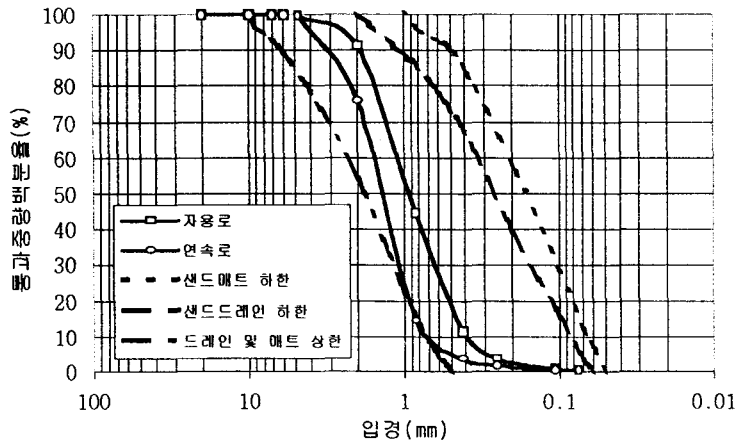


그림 1. 동 슬래그 종류별 입도분포곡선

시험에 사용된 동슬래그의 입도분포곡선은 그림 1과 같다. 그림 1에서와 같이 유효입경(D_{10})은 자용로인 경우 0.4mm, 연속로인 경우 0.73mm이며, 균등계수(C_u)는 자용로인 경우 2.5, 연속로인 경우 2, 곡률계수(C_g)는 자용로인 경우 1.0, 연속로인 경우 1.39로 나타나 대체로 입도분포가 균등한 것을 알 수 있다. No. 200체 통과분이 거의 0%로서 압밀축진을 위한 배수재료로서의 적합한 입도분포특성을 가지고 있다³⁾. 또한, 통일분류법에 의해 동슬래그를 분류하면, 입도분포가 균등한 SP로 분류되며, 액·소성 시험 결과는 모든 시료가 비소성(NP)으로 나타나 재료적 특성은 양호한 것으로 평가된다.

② 비중

동슬래그의 비중은 자용로인 경우 3.78, 연속로인 경우 3.44로서 화강풍화토 2.67~2.68과 비교하여 매우 큰 것으로 나타났다. 이는 동슬래그에 포함되어 있는 산화철 등의 금속성분에 의한 것이다.

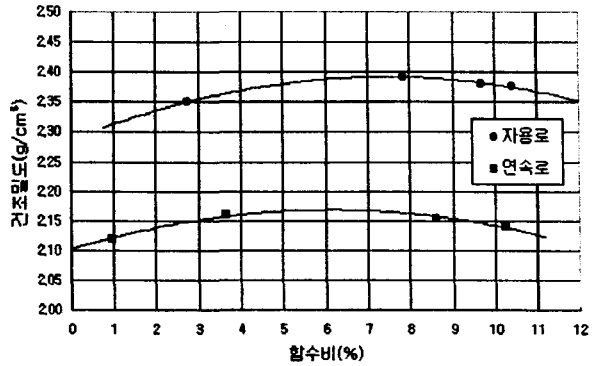
(2) 전단특성

직접전단시험을 실시한 결과, 동슬래그 강도정수는 자용로인 경우 $\phi=43^\circ$, $C=0$ 로 나타났으며, 연속로인 경우 $\phi=46^\circ$, $C=0$ 로 측정되어 실내시험에서 사용한 모래의 경우($\phi=36^\circ$, $C=0$)보다 내부마찰각이 크게 나타났으며, 일반 성토제인 화강풍화토(SC)의 강도정수가 내부마찰각 $\phi=20^\circ$, 점착력은 $C=43$ kPa인 것을 감안하면 강도특성은 매우 양호한 것으로 판단된다.

(3) 다짐특성

A다짐시험결과 자용로인 경우 최대건조밀도 23.5 kN/m³ 최적함수비 7.46%, 연속로인 경우 최대건조

밀도 21.3 kN/m³, 최적함수비 6.11%로 나타났다. 일반성토재료인 화강풍화토의 경우 최대건조밀도 13.1~17.5 kN/m³, 최적함수비 11.9~33.2%를 나타낸다. 동슬래그로 성토시 토피하중의 영향이 증가할 것이며, 그림 2의 다짐곡선에서 보는 바와 같이 밀도가 완만한 경향을 나타내어 다짐시공시 함수비의 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.



(4) 투수특성

정수위투수시험결과 자용로인 경우 0.29cm/sec, 연속로인 경우 1.47cm/sec로서 비교적 큰 값을 나타냄으로써, 배수재료로서의 적용기준을 만족하는 적합한 것으로 평가되었다.

도표 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 (kN/m ³)		23.5	21.3
투수계수 (cm/sec)	1×10 ⁻³ 이상	2.91×10 ⁻¹	1.47

3. 실내모형시험 및 결과분석

실내모형시험은 모래다짐말뚝의 대체재료써의 동슬래그다짐말뚝이 설치된 지반의 배수특성을 파악하기 위하여 모형토조를 이용한 압밀시험으로 실시하였다.

시험장치는 그림 3에서 보이며 양면배수조건을 적용하였으며 하중재하장치는 유압재를 사용하도록 고안되었으나, 소형 배인 전단 시험기를 이용하여 재성형된 점토지반의 비배수전단강도를 측정된 결과 약 5kPa로 매우 연약하여 무게추에 의한 정재하시험을 실시하였고, 압밀하중은 5kPa, 10kPa를 적용하였다.

직경은 6cm, 길이는 40cm의 모래 다짐말뚝과 동슬래그 다짐말뚝을 설치하기 위하여 직경 6cm관을 미리 모형토조에 설치하고, 관을 조금씩 인발하는 동시에 모래 또는 동슬래그를 넣고 진동을 가하면서 설치하여 타설된 모래 또는 동슬래그가 조밀(A다짐 최대건조단위중량의 90~95%)해지도록 하였다.

(1) 쌍곡선법(Hyperbolic Method)

성토시공 중에 현장계측에 의하여 얻어진 침하-시간관계에서 장래침하량을 추정하는 방법 중에 "침하의 평균속도가 시간에 쌍곡선으로 변한다"는 가정 하에 제안된 방법이다. 그림과 같이

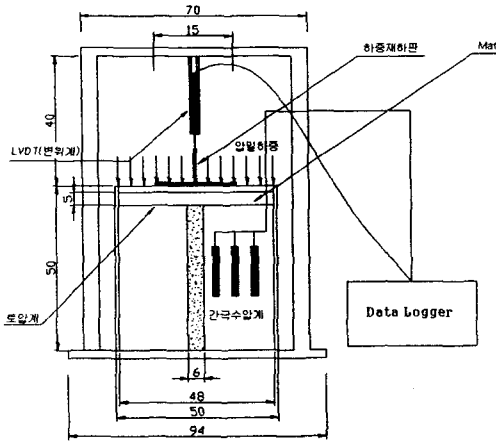


그림 3. 실내 하중재하장치

$t/(S_t - S_0)$ 을 종축에, t 를 횡축에 도시하면 종축 절편 α 와 기울기 β 를 갖는 1개의 직선으로 표시된다. 이 그림으로부터 임의의 시간 t 에서의 침하량과 시간이 무한대일 때의 최종 침하량(100% 압밀이 발생했을 때)을 다음과 같은 식으로 표시될 수 있다.

$$S_t = S_0 + t/(\alpha + \beta t) \quad (1)$$

$$S_\infty = S_0 + 1/\beta \quad (2)$$

여기서, S_t : 임의의 시간 t 에서의 침하량
 S_0 : 초기침하량, S_∞ : 최종침하량
 α : 종축절편, β : 기울기

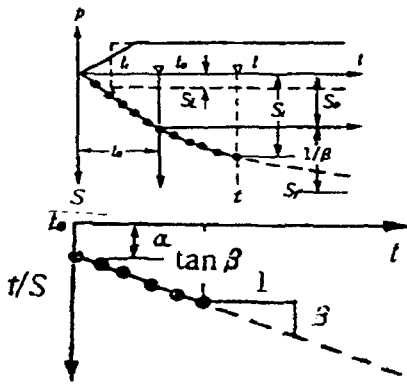


그림 4. 쌍곡선법

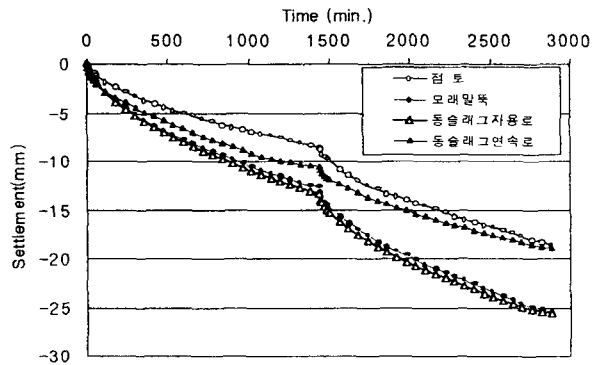


그림 5. 압밀실험 시간-침하량 곡선

이 방법을 적용하여 추정된 침하량은 초기에는 실측치에 비하여 작고 후반부의 직선부분에서는 일치하는 경향이 있으므로, 압밀도가 약 50%정도 도달해야만 어느 정도 근사치에 접근할 수 있는 것으로 알려져 있다.

(2) 쌍곡선법을 이용한 압밀침하량 분석

압밀침하 측정결과 전체 침하량은 점토, 동슬래그 연속토, 모래, 동슬래그 자용토 순으로 나타났으며, 모래다짐말뚝과 동슬래그 자용토의 침하경향은 매우 유사한 양상은 보인다.

침하결과분석은 현장침하분석시 널리 이용되고있는 쌍곡선법을 이용하였다. Tan등(1991)⁴⁾은 실험데이터와 현장데이터를 통해 쌍곡선 방법은 Terzaghi 1차원 압밀모델과 Barron의 연직배수압밀 모델뿐만 아니라 불균등한 점토, 모래 혼합지반에도 적용 가능하다고 하였고, Sridharan⁵⁾과 Parakash(1985)는 쌍곡선법이 Taylor의 \sqrt{t} 법과 Casagrande의 Logt 방법보다 압밀계수를 더 쉽게 추정할 수 있다는 것을 보였다.

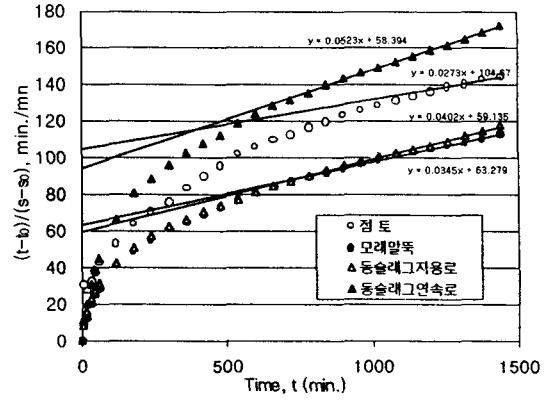
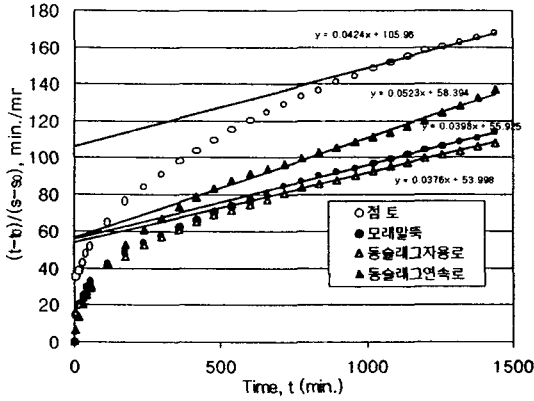


그림 6. 1단계 압밀하중(5kPa)에서의 쌍곡선 그림 7. 2단계 압밀하중(10kPa)에서의 쌍곡선

그림 6과 그림 7은 각 하중단계에 따른 쌍곡선을 나타낸 것이며, 압밀하중 5kPa일 때 직선의 기울기 β 는 점토, 모래다짐말뚝, 동슬래그 다짐말뚝 자용로, 연속로는 각각 0.0424, 0.0398, 0.0376, 0.0398 m^{-1} 으로 나타나며, 압밀하중 2단계인 10kPa일 때에는 0.0273, 0.0345, 0.0402, 0.054 m^{-1} 로 나타난다. 여기서, 직선부위의 기울기가 클수록 최종 침하량의 크기는 작아지며, 대체적으로 동슬래그 연속로 다짐말뚝에서 가장 작게 나타났다.

도표 2. 압밀침하량 결과분석

구 분		점토	모래	동슬래그	
				자용로	연속로
1 단계하중 (5kPa)	① 최종침하량, $1/\beta$ (mm)	23.6	25.1	26.6	19.1
	②24hr 침하량, S (mm)	8.6	12.7	13.4	10.5
	침하비, R (%)	36.5	50.5	50.3	55.1
2 단계하중 (10kPa)	최종침하량, $1/\beta$ (mm)	36.6	29.0	24.8	18.5
	24hr 침하량, S (mm)	10.0	12.7	12.2	8.4
	침하비, R (%)	27.3	43.8	49.2	45.2

* 침하비 R = ②/①×100(%)

모형토조울 이용한 압밀실험에서 나타난 침하량은 점토와 연속로, 모래와 자용로 간에 서로 비슷한 정도를 나타내고 있지만, 모래다짐말뚝이 설치된 지반에서는 하중-압밀침하관계와 하중-지지력관계가 상호 복합적으로 작용하여 나타나게 되므로, 여기서는 쌍곡선법에 의해 계산된 최종침하량과 24시간동안 실측한 침하량의 비율 구하여 동슬래그 다짐말뚝의 연직배수재로서의 성능을 평가하고 결과는 도표 2에 나타내었다.

연직배수재가 설치된 모형에서 24시간동안 측정된 침하비율은 배수재가 설치되지 않은 지반에 비하여 약 15%이상의 초기압밀침하를 촉진시키는 것으로 나타났으며, 동슬래그를 연직배수재로 사용하였을 경우 대체적으로 모래보다 우수하게 나타났다. 이는 투수성이 양호하며 모래보다 큰 내부마찰각을 가진 동슬래그를 모래 대신 지반개량을 위한 다짐말뚝에 적용함으로써 복합지반의 지지력증대 효과뿐만 아니라 연직배수재로서 우수한 성능을 기대할 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 모래다짐말뚝의 모래 대체재로써의 동슬래그 활용방안연구를 위하여, 동슬래그의 재료특성, 복합지반에서의 압밀배수 특성에 대하여 연구하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 비중과 단위중량이 크기는 하나 동슬래그의 입도분포등의 재료특성과 투수계수를 평가한 결과, 배수재로서 적합하여 내부마찰각이 모래보다 크게 나타나, 지반보강용 모래다짐말뚝의 모래 대체재로서의 적용은 충분히 가능할 것으로 판단된다.
- 2) 실내 모형실험에 의한 복합지반의 압밀배수특성을 분석하였을 때, 동슬래그를 사용한 모형지반의 연직배수효과가 모래다짐말뚝이 설치된 지반보다, 대체적으로 우수하게 나타나 동슬래그 다짐말뚝의 연직배수효과가 우수하다고 판단된다.
- 3) 동슬래그를 모래대체재로 사용하기 위하여 면적치환비에 따른 지지력 특성연구와 압밀촉진, 침하억제 등 압밀특성을 규명할 수 있는 더 많은 연구가 필요하며, 부족한 모래의 대체재로서의 활용성은 우수할 것으로 판단한다.

감 사 의 글

본 논문은 2001년 LG-Nikko 동제련(주)에서 지원하는 연구인 “동슬래그의 토목공사용 재료로서의 활용성에 관한 개발연구”의 연구수행 결과의 일부임을 밝히며, 아울러 연구비를 지원해준 LG-Nikko 동제련(주) 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. LG-Nikko 동제련(주) 제련기술연구소(2000) “토목·건설용 소재 LG-FERROSAND”. pp.3~22.
2. 한국건설기술연구원(2000), “동제련 슬래그의 건설재료 활용 및 기준 개발”, pp.168~236.
3. 勝田圭一(1995), “軟弱地盤對策工法總技術”, 日本軟弱地盤對策技術委員會, pp.749~753.
4. Tan, T. S. et al.(1991), “Hyperbolic Method for Consolidation Analysis”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 11, pp. 1723~1737
5. Sridharan, A., Parakash, K.(1985), “Improved Retangular Hyperbolar Method for the Determination of Coefficient of Consolidation.” Geotech. Testing. J. Vol 8, No. 1, pp. 37~40.