

모래다짐말뚝의 모래대체재로서 동슬래그의 활용

Application of Copper Slag as a Substitute for Sand in Sand Compaction Pile

천 병 식^{*1} Chun, Byung-Sik

정 헌 철^{*2} Jung, Hun-Chul

Abstract

The domestic, quantity of copper slag as a by-product at copper smelting process reaches 700,000 tons annually while its application is limited. Therefore, the secure disposal plan of copper slag is urgently required. For this reason, in this study, copper slag was used as a substitute for sand in Sand Compaction Pile that is one of the improvement methods of soft ground because the particle size distribution of copper slag ranges from 0.15mm to 5mm(coarse state) and it maintains stable glassy state environmentally. The geotechnical characteristics of copper slag were evaluated through laboratory model tests and the field application of copper slag was compared with generally used sand by pilot tests. From these experimental results, copper slag's material characteristics, bearing capacity, settlement reduction and improvement effects of surrounding ground were found to be superior to generally used sand. The copper slag can be used as a substitute for sand in the Sand Compaction Pile method and as recycling material of industrial by-product with high economical and environmental value when natural resources are being exhausted.

요 지

동제련 과정에서 부산되는 동슬래그는 국내에서 연간 70여만톤에 이르나, 그 활용분야가 제한되어 사용량이 미약하여 그 처리방안이 시급히 요청되고 있는 실정이다. 이에 본 연구는 동슬래그의 입도가 0.15~5mm의 조립상태로 분포하여 환경적으로도 안정된 유리질이라는 점에 착안하여 연약지반개량공법 중의 하나인 모래다짐말뚝의 모래대체재로서의 활용방안을 모색하였다. 실내 물리·역학시험 및 모형토조시험에 의한 동슬래그의 지반공학적 재료특성을 파악하고 현장시험시공을 통해 동슬래그의 모래다짐말뚝의 모래대체재로서의 현장 적용 가능성을 일반모래와 비교·검토하였다. 그 결과 동슬래그의 재료특성이 양호하고 지지력, 침하저감효과 그리고 주변지반 개량효과면에서 동슬래그 또는 동슬래그다짐말뚝이 우수한 것으로 나타나, 모래다짐말뚝의 모래대체재로 동슬래그를 적용할 경우 천연골재의 고갈에 따른 대체골재원으로서 산업부산물의 재활용이라는 측면에서 경제적·환경적으로 활용가치가 높으리라 판단된다.

Keywords : Copper slag, Sand compaction pile, Substitute for sand

1. 서 론

건설골재난 및 환경에 대한 관심이 높아지면서 국내에서도 석탄회, 광재, 제강슬래그, 동슬래그 등 각종 부

산물의 재활용과 그에 따른 기술개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 동제련 과정에서 발생하는 동슬래그는 국내에서 연간 70여만톤에 이르고 있으며 시멘트 제조용 가철재로서 철제 및 수리 조선소에서 선

*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Civil Engrg., Institute of Technology, Hanyang Univ., hengdang@Unitel.co.kr)

*2 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

박의 녹을 제거하는 샌드블라스팅용 등으로 주로 사용되고 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 재료로써 일본, 독일 등 해외에서는 항만공사, 호안공사 및 해양구조물의 제작 등에 널리 활용되고 있다(한국건설기술연구원, 2000). 또한, 국내에서도 콘크리트 골재용으로 사용하기 위한 동슬래그의 품질제정안을 마련한 상태이나, 지반공학분야에 대한 적용성 연구는 미흡한 상태이다.

국내에서도 천연골재의 고갈에 따라 골재 공급이 석산골재(부순골재)나 해사(세척사)에 대한 사용 비중이 증가하고 있으나 그 한계성이 점차적으로 나타나고 있어 천연골재의 고갈에 따른 대체 골재원으로서 동슬래그와 같은 부산물의 활용 가능성은 높을 것으로 판단된다. 그러나 이러한 부산물의 재활용을 위한 실용화 단계에는 많은 어려움이 따르기 때문에 실질적 활용을 위해서는 충분한 기술적 자료 및 검토가 뒷받침되어야 하고, 그에 따라 실용화 및 실질적 활용이 결정되어야 할 것이다. 이에 본 연구는 국내에서 부산되고 있는 동슬래그의 지반공학적 재료특성을 규명하고 연약지반개량재로서의 활용방안 검토 및 사용목적에 따른 요소별 적합성을 평가하는 데에 그 목적이 있다. 특히, 실내토질시험 및 모형토조시험에 의한 동슬래그의 지반공학적 재료특성을 파악하고, 현장시험시공을 통해 모래다짐말뚝의 모래대체재로서 동슬래그의 적용성과 Sand Drain 등의 연직배수재 및 일반적인 배수·필터재로서의 적용성을 평가하고자 한다.

2. 동슬래그의 환경적 특성

2.1 폐기물 공정시험법에 의한 용출시험 결과

동슬래그의 환경에 유해한 용출특성 평가를 위하여 국내에서 일반적으로 적용되고 있는 폐기물 공정 시험법에 의한 용출시험을 실시하였다. 폐기물은 “폐기물관리법” 시행규칙 제2조에서 정하고 있는 폐기물 허용기준에 따라 일반 폐기물과 특정 폐기물로 구분할 수 있다. 용출시험결과에 의하면 동슬래그는 Cu가 각각 0.39, 0.68ppm으로 나타났으며 나머지 항목은 검출되지 않았다. 따라서 동슬래그는 모든 유해항목에서 기준 이

하로 판명되었으며 환경적으로 안정적인 것으로 나타났다(한국건설기술연구원, 2000).

2.2 EPT법에 의한 용출시험 결과

미국에서 환경유해성 평가를 위하여 실시하는 EP Toxicity Test(Methods 1310)는 고형화된 폐기물의 잠재 용출성 평가와 유해폐기물의 여부를 판단하기 위하여 실시한다.

동슬래그를 대상으로 미국의 EPT법에 의한 용출시험 결과, 규제물질로 규정하고 있는 Pb, Ag, As, Hg, Cd, Cr, Se, Ba 중에서 Hg, Cd, Cr 등은 전혀 검출이 없었으며, Ag와 Se는 0.03ppm 이하로 거의 검출이 없는 것과 마찬가지로 나타났으며, 나머지 물질도 허용기준에 비하여 매우 낮은 용출을 나타내었다(한국건설기술연구원, 2000).

3. 동슬래그의 지반공학적 재료특성

3.1 물리적 특성

3.1.1 비중 및 흡수율

동슬래그의 비중은 실내시험용의 경우 3.78, 현장시험용의 경우 3.58로서 2.6~2.7을 나타내는 모래 또는 화강풍화토와 비교하여 매우 큰 것으로 나타났다. 시험에 따라 비중이 다른 것은 실내시험 및 현장시험시공 수행일차차이로 인해 부산공정시기가 달라서, 즉 공정 오차에 의한 비중의 차이가 발생하였기 때문이다. 흡수율은 천연 모래 0.9%에 비하여 훨씬 낮은 0.2~0.5%로 물에 대한 안전성이 매우 우수한 것으로 나타났다. 이와 같은 높은 비중은 Sand Drain 또는 다짐말뚝 시공 시 흔히 발생될 수 있는 수직방향에 대한 말뚝재료의 불연속 시공에 대처할 수 있는 유리한 특성이라 할 수 있다.

3.1.2 입도분포와 연경도

시험에 사용된 동슬래그의 입도분포곡선은 그림 1과 같다. 그림 1에서와 같이 유효입경(D_{10})은 실내시험용의 경우 0.40mm, 현장시험용의 경우 0.48mm, 균등계수(C_u)는 실내시험용의 경우 2.5, 현장시험용의 경우 2.2, 곡률계수(C_g)는 실내시험용의 경우 1.0, 현장시험용의 경우 1.31로 나타나 대체로 입도분포가 균등한 것으로 나타났으며 No. 200체 통과중량백분율이 거의 0%로서 압밀 축진을 위한 배수재로서의 적합한 입도분포특성

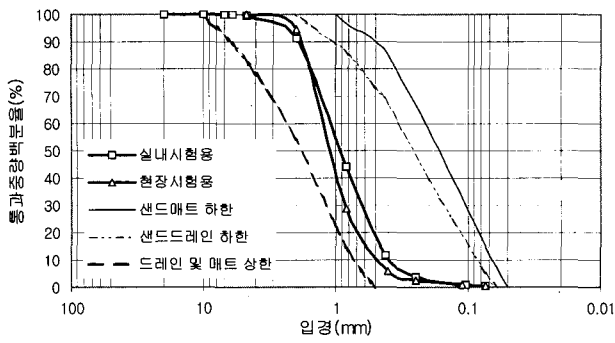


그림 1. 모래 및 동슬래그 종류별 입도분포곡선

을 가지고 있다(藤田圭一, 1995). 또한, 통일분류법에 의해 동슬래그를 분류하면 입도분포가 균등한 SP로 분류되며, 액·소성한계 시험 결과는 모든 시료가 비소성(NP)으로 나타나 재료적 특성은 양호한 것으로 평가된다.

3.2 역학적 특성

3.2.1 전단특성

직접전단시험을 실시한 결과, 동슬래그의 강도정수는 실내시험용의 경우 $\phi=43^\circ$, $c=0$ 으로 나타났으며, 현장시험용의 경우 $\phi=43.2^\circ$, $c=0$ 으로 측정되어 실내시험에서 사용한 모래의 경우($\phi=36\sim38^\circ$, $c=0$)보다 내부마찰각이 크게 나타났다.

3.2.2 다짐특성

표준 A다짐시험결과, 실내시험용의 경우 최대건조밀도가 23.4kN/m^3 , 현장시험용의 경우 21.5kN/m^3 으로 나타났으며 최적함수비는 대략적으로 3~8%의 값을 보였다. 일반 성토재료인 화강풍화토의 경우 최대건조밀

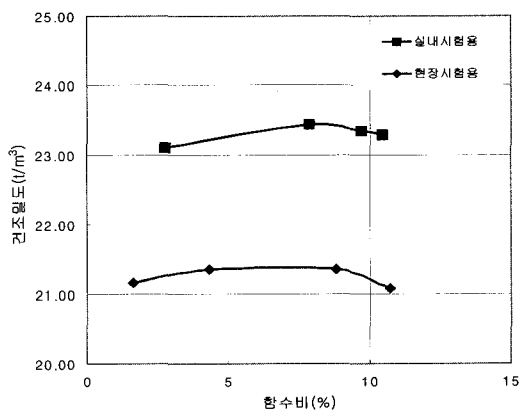


그림 2. 동슬래그의 다짐곡선

도 $13.2\sim17.4\text{kN/m}^3$, 최적함수비 $11.9\sim33.2\%$ 를 나타낸다는 것과 비교해 볼 때 동슬래그로 성토시 토피하중의 영향이 증가할 것이며, 그림 2의 다짐곡선에서 보는 바와 같이 밀도가 완만한 경향을 나타내어 다짐시공시 함수비의 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

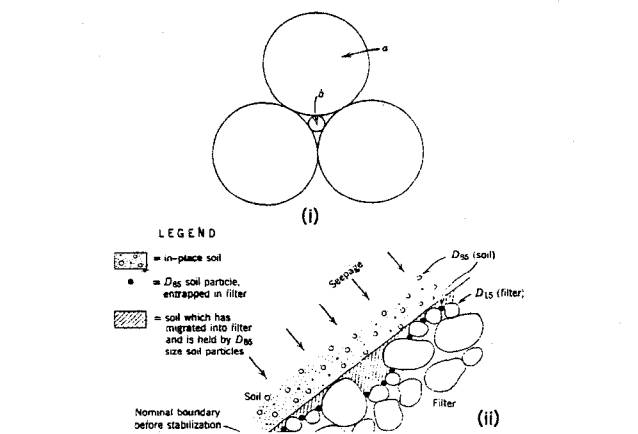
본 연구는 위와 같은 다짐시험의 결과로부터 실내모형시험을 비롯한 직접전단시험, 정수위투수시험 등에 있어서의 동슬래그의 단위중량을 결정하였다.

3.2.3 투수특성

정수위투수시험 결과, 실내시험용의 경우 투수계수 $k=0.24\text{cm/sec}$, 현장시험용의 경우 $k=0.15\text{cm/sec}$ 로서 일반적인 모래($k=10^{-2}\text{cm/sec}$)에 비하여 상대적으로 큰 값을 나타냄으로써 배수재로서의 적용기준에 적합한 것으로 평가되었다.

3.2.4 배수재로서 내적안정성

일반적으로 배수재의 투수성은 모래, 쇄석 등의 입상체를 사용할 경우에는 주로 입경에 의해서, 인공재료(토목섬유)를 사용하는 경우에는 주로 구멍크기(Opening size)에 의해 지배된다. 투수성을 높일 경우에는 입경 혹은 Opening size를 크게 해주면 되지만 너무 클 경우에는 막힘현상(Clogging)에 의해 투수성이 저하되어 배수재의 기능이 상실될 수 있다. 따라서 사용 배수재는 주변지반에 대하여 적절한 배수기능을 유지할 수 있는 입도조건을 갖추어야 한다(Cedergren, 1977). 그러나 동슬래그의 경우 입도가 균등한 성질을 갖고 있어 배수재로



(i) 세 개의 토립자 a사이를 통과하기 위한 토립자 b의 입경은 $0.15a$ (Taylor, 1948)

(ii) 필터재와 지반과의 경계조건

그림 3. 배수재에 의한 입자유실 방지형태 (Cedergren, 1977)

사용시 Clogging에 대한 적절한 검토가 필요하다.

배수재의 Clogging의 가능성은 배수재 주변지반 토사의 입경과 배수재의 입경 혹은 Opening size의 관계에 의해서 추정할 수 있다. Clogging을 방지하기 위한 배수재의 선정기준에는 Terzaghi의 기준이나 일본대담회의의 기준이 사용될 수 있다.

$$\frac{D_{15(G)}}{D_{85(S)}} \leq 4(\text{Terzaghi, 1926}) \quad (1)$$

$$\frac{D_{15(G)}}{D_{85(S)}} \leq 5(\text{일본대담회의}) \quad (2)$$

$$\frac{D_{15(G)}}{D_{15(S)}} \geq 4 \sim 5 \quad (3)$$

여기서, $D_{15(G)}$: 배수층 재료의 15% 통과하는 직경
 $D_{15(S)}$: 보호대상인 흙의 15% 통과하는 직경
 $D_{85(S)}$: 보호대상인 흙의 85% 통과하는 직경

그림 3에서는 침투류가 배수층을 통과할 때 입자유출을 방지하기 위해서 보호대상층의 입경이 배수층 재료 입경의 0.15배 정도가 되어야 함을 나타내고 있다.

우리나라의 대표적인 충적연약지반인 진해, 울산, 비인, 목포, 군산 다섯 곳의 채취시료의 입도분석결과를 식 2와 3에 적용하여 Clogging 방지를 위한 배수재 선정기준에 적합한지를 파악하여 표 1과 같이 정리하였다. 진해, 울산, 비인 지역 시료의 경우 실내시험용과 현장시험용 모두 선정기준을 만족하였으나, 서·남해안의 군산과 목포의 경우에는 Clogging이 발생할 수 있는 것으로 나타났다.

Kenny T. C 와 Lau D.(1985, 1986)는 작은 흡입자가 내부 간극 속에서 유출되지 않고, 구속할 수 있는 입자의 크기는 약 4배의 입자크기를 가진다고 하였다. 이것을 바탕으로 배수필터재의 내적안정성을 평가하기 위하여 아래와 같은 조건을 제안을 하였고 입도분포가 양

표 1. Clogging 방지를 위한 배수재 선정기준 평가

구분	실내시험용			현장시험용		
	$D_{15(G)}/D_{85(S)}$	$D_{15(G)}/D_{15(S)}$	적합성 여부	$D_{15(G)}/D_{85(S)}$	$D_{15(G)}/D_{15(S)}$	적합성 여부
진해	0.8	49.5	O.K	1.1	63.4	O.K
울산	1.8	86.8	O.K	2.3	111.3	O.K
비인	3.8	353.8	O.K	4.9	453.8	O.K
목포	10.7	287.5	N.G	13.7	368.8	N.G
군산	13.9	191.7	N.G	17.9	245.8	N.G

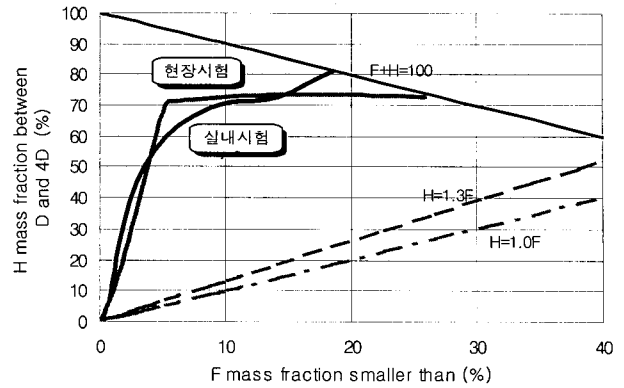


그림 4. 동슬래그의 내적안정성평가

호(균등계수, $C_u > 3$)할 경우 통과 백분율, $F < 20\%$ 범위에서 적용하며, 입도분포가 불량(균등계수, $C_u < 3$)할 경우 통과백분율, $F < 30\%$ 에 대해서 고려한다.

$$\text{느슨한 경우 } H = 1.3F \quad (4a)$$

$$\text{촉촉한 경우 } H = 1.0F \quad (4b)$$

여기서, H : 입경 D 와 $4D$ 사이의 백분율

F : 입경 D 의 통과백분율

위 조건을 동슬래그에 적용한 결과, 그림 4와 같이 H/F 기준선 위로 나타나 동슬래그가 배수재로서 내적안정조건을 만족하는 것으로 나타났다.

3.2.5 분사현상에 대한 안정성

사질토 지반에서 물이 상향 혹은 수평방향으로 일정하게 흐를 경우, 지반의 유효응력을 0으로 만들어 분사현상이 발생하게 되며, 이 때의 동수경사를 한계동수경사, i_c 라고 하며 식 (5)로 결정한다.

$$i_c = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (5)$$

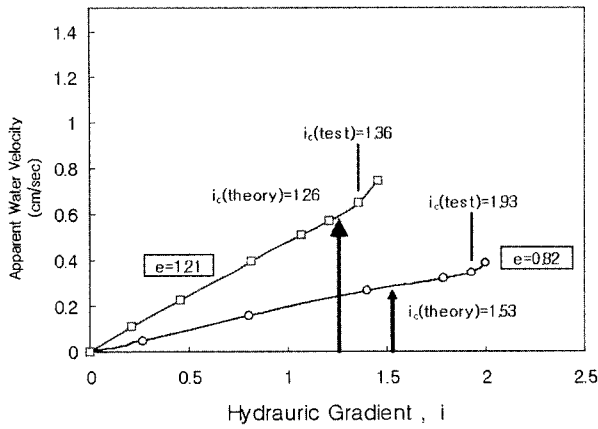
여기서, γ_{sub} : 흙의 수중단위중량

γ_w : 물의 단위중량

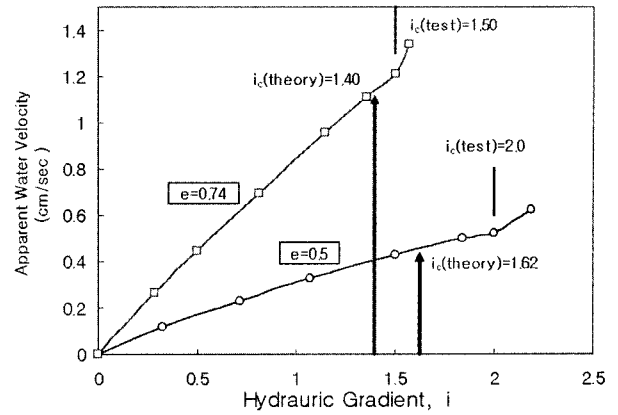
G_s : 입자의 비중

e : 간극비

본 연구에서는 정수위투수시험기를 이용하여 동수경사에 따른 투수계수 산정과 분사현상발생 여부를 육안으로 확인하였다. 시험은 동슬래그를 진동을 가하며 조밀하게 다짐하였고, 한번 분사현상이 발생되고 느슨해



(a) 실내시험용



(b) 현장시험용

그림 5. 분사현상 실험결과

진 상태에서 다시 분사현상시험을 실시하였다.

Skempton과 Brogan(1994)는 사질토에 대한 분사현상 시험을 통하여, 한계동수경사값이 수평, 상향 침투인 경우 각각 1.0, 0.7 정도로 나타난다고 하였으며, 배수재의 내적안정성이 확보되지 않을 경우 상향침투가 발생하는 곳에서의 한계동수값이 0.3 정도로 낮아진다고 하였다.

시험결과, 그림 5에 나타난 것처럼 느슨한 상태에서 한계동수경사값이 실내시험용의 경우 1.36, 현장시험용의 경우 1.50으로 나타나 일반적인 안정한 상태의 사질토의 한계동수경사값이 1인 것보다 크게 나타났다. 동슬래그는 한계동수경사, i_c 값이 이론식에 의한 값보다 크게 나타나며 조밀한 경우에 더욱 크게 나타난다. 이는 동슬래그 입자간의 엮물림(inter-locking)과 시험 몰드의 직경이 6cm로 작아 Scale effect로 인한 현상으로 판단된다.

표 2. 모래다짐말뚝에 사용되는 모래기준, 동슬래그 재료특성 요약

구 분	모래기준 (한국도로공사 토공편)	동슬래그	
		실내시험용	현장시험용
함수비 (%)		1.52	1.1
통일분류		SP	SP
유효입경, D_{10} (mm)		0.4	0.48
D_{15} (mm)	0.1~0.9	0.46	0.59
D_{85} (mm)	1~8	1.3	1.5
균등계수, C_u		2.5	2.2
곡률계수, C_g		1.0	1.31
No.200체 통과율 (%)	3%이하	0.58	0.42
비 중		3.78	3.58
최대건조밀도(kN/m^3)		23.4	21.5
투수계수(cm/sec)	1×10^{-3} 이상	0.24	0.15

4. Granular Pile공법의 이론적 배경

4.1 개요

4.1.1 등가원주(Unit Cell)개념

일반적으로 Granular pile과 같은 원주형의 구성물은 지지력의 증가와 침하량의 감소, 압밀도의 증가, 연약하거나 느슨한 퇴적지반에서의 액상화 방지로 지반을 보강하기 위하여 사용되며 연약점토층, 실트층 혹은 느슨한 조립 퇴적지반에 이상적으로 적합하다. Granular pile을 다루는 분야의 확대로 여러 가지 이론적인 모델은 Unit cell 이론(Balaam et al., 1977, Van Impe and Madhav, 1992)에 근거한 보강지반의 거동을 평가하기 위하여 발전되었다.

그림 6의 등가원주에서는 ① 원지반과 Granular pile은 같이 침하한다 ② 원주 윤변에서 수평방향 변위는 구속되고 연직방향으로만 변위가 발생한다 ③ 원주저

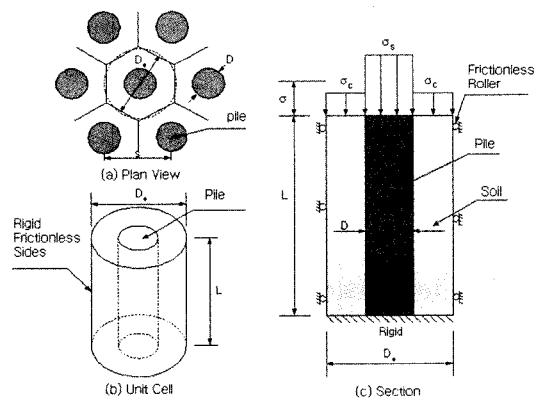


그림 6. Unit Cell 개념도

면은 강성지반에 놓여 있다고 가정되며, 따라서 강성이 상대적으로 큰 Granular pile에 상재압보다 큰 응력이 발생하고 이 응력은 Pile길이에 따라 균등하게 분포한다고 가정된다. 이러한 응력분담은 Granular pile의 복합지반 거동(지지력, 안정해석, 침하)에 매우 중요한 요소이다 (Barksdale and Bachus, 1983).

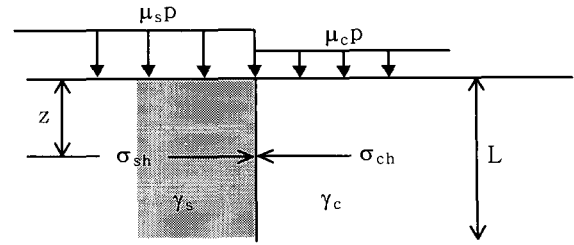


그림 7. Granular pile과 점토지반의 평형상태 모식도

4.1.2 응력분담비

Granular pile공법은 연약지반상에 Pile을 타설하여 원지반과 Granular pile의 복합작용에 의한 복합강도 발현으로 지지력 증대 및 침하 감소를 기대하는 공법이다. 그러나 복합지반의 복합강도는 Granular pile과 원지반의 응력분담비($m = \sigma_s / \sigma_c$)에 의존한다. 복합지반에서 Pile은 연약지반보다 상대적으로 강성이 크므로, 상재하중이 재하되는 경우에 Granular pile과 원지반의 변형특성이 달라서 Granular pile사이에 아칭현상이 발생하게 된다. 이때 변형이 작은 Granular pile은 더 큰 연직 응력을 분담하게 되고 연약층이 나머지를 분담하게 되며 이 응력의 비를 응력분담비(m)라 한다.

응력분담비 m 은

$$m = \frac{\sigma_s}{\sigma_c} \quad (6)$$

여기서, σ_s : 상재압에 의해 Pile에 발생하는 응력

σ_c : 상재압에 의해 원지반에 발생하는 응력

$$\sigma_s = \mu_s \sigma, \quad \sigma_c = \mu_c \sigma \text{이므로 } m = \frac{\mu_s}{\mu_c} \text{가 되고}$$

$$\sigma_c = \mu_c \sigma = \frac{\sigma}{1 + (m-1) a_s} \quad (7)$$

$$\sigma_s = \mu_s \sigma = \frac{m \sigma}{1 + (m-1) a_s} \quad (8)$$

여기서, μ_s : 말뚝의 응력집중계수(≥ 1)

μ_c : 점성토의 응력저감계수(< 1)

村山(1962)는 2차원 평면변형 평형조건으로부터 응력분담비(m)를 유도하였다. 그림 7의 평형조건으로부터 다음과 같이 응력분담비(m)를 유도하면,

$$\sigma_{sh} = K_a (\mu_s p + \gamma_s z), \quad \sigma_{ch} = \mu_c + 2 c_u + \gamma_c z \text{이 된다. 그리고, } \mu_s = \frac{m}{1 + (m-1) a_s}, \quad \mu_c = \frac{1}{1 + (m-1) a_s}$$

이로부터 식 (9)와 같이 구해진다.

$$m = \frac{1 + \frac{2 c_u + (\gamma_c - K_a) z}{b} (1 - a_s)}{K_a - \frac{2 c_u + (\gamma_c - K_a \gamma_s) z}{b} a_s} \quad (9)$$

$$\text{여기서, } K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$$

$z = 0$ 에서는

$$m = \frac{1 + \frac{2 c_u (1 - a_s)}{b}}{K_a - \frac{2 c_u}{b} a_s} \quad (10)$$

4.2 파괴 거동 Mechanism

Granular pile의 일반적인 파괴형상은 실내시험과 현장시험을 통해 팽창파괴, 관입파괴, 전단파괴와 같이 크게 세 가지의 형상으로 구분할 수 있다(Hughes et al., 1975, Madhav and Vitkar, 1978).

- (a) 견고한 지지층에 놓인 긴 Granular pile : 말뚝의 길이가 말뚝직경의 약 3배 이상 되는 길이가 긴 Granular pile의 경우는 말뚝의 상단부(직경의 2~3배 정도의 길이)가 블록해지면서 파괴되는 팽창파괴가 발생한다.
- (b) 견고한 지지층에 놓인 짧은 Granular pile : 견고한 지지층에 지지된 길이가 짧은 Granular pile은 지표면 부근에서 전반전단파괴가 발생한다.
- (c) 짧은 마찰 Granular pile : 지지층까지 도달하지 않고 선단이 연약층 내에 있고 길이가 직경의 2~3배보다 적은 경우에는 활동 또는 관입파괴가 발생한다.

여기서 말한 전단파괴는 길이가 짧은 기둥 즉, 연약층 심도가 낮아 길이에 대한 직경비가 상대적으로 큰 경우에 있을 수 있으나, 실제로 적용성이 결여된 예로서 단지 파괴형태를 구분하기 위한 것이다. 보통 점성토 지반의 상층부분은 일반적으로 높은 강도를 갖고 있기 때문

에, Granular pile의 파괴형태는 지반의 전단강도가 최소가 되는 지점에서 팽창파괴가 발생한다(Hansbo, 1994). 실제 시공시 Granular pile은 대부분 Pile 지름의 2배 이상의 깊이로 시공되고 있으므로 팽창파괴의 형태를 보이며, 이는 Granular pile의 지지형식에 관계없이 주로 발생하는 파괴형태이다.

5. 실내모형시험

5.1 대상지반의 특성

시험에 사용된 점토는 교란 형태로 채취하여 사용하였다. 액성한계 83%, 소성지수 52%, No. 200체 통과량이 약 93%로써 통일분류상 CH로 판정되었으며 연약지반 조성시 현장함수비(약 85%)상태에서 재성형하여 24시간 동안 자중압밀시켰다. 이때 삼축압축시험(UU Test)과 소형 베인 전단시험기로 측정된 비배수전단강도는 잘 일치하여 약 5kN/m^2 를 보였으며 매우 연약한 상태이다.

5.2 하중재하시험

본 시험에서는 단일말뚝에 대한 동슬래그다짐말뚝과 모래다짐말뚝의 지지력 특성을 비교해 보기 위하여 Unit cell 이론에 근거하여 점성토와 Pile의 침하를 동일하다고 보고 강성재하조건을 적용하였다. 시험장치는 그림 8과 같이 재하판 크기는 직경 15cm를 사용하였으며 하중재하장치는 유압액을 사용하도록 고안되었으나, 소형 베인전단시험기를 이용하여 재성형된 점토지반의 비배수전단강도를 측정된 결과 약 5kN/m^2 로 매우 연약하여 무게추에 의한 정재하시험을 실시하였다.

직경은 6cm(토압계의 지름과 동일), 길이는 50cm의

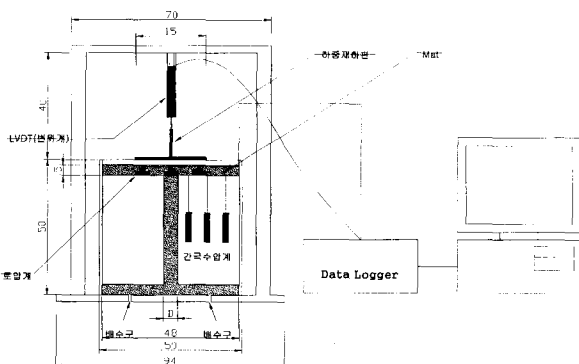


그림 8. 모형시험장치 모식도

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 2.5kN/m^2 씩 30분단위로 증가시켰다.

모형지반의 파괴양상은 모두 연약한 지반에서 발생하는 파괴인 관입전단파괴가 발생하였고, 전체적인 침하량은 동슬래그다짐말뚝 복합지반이 모래다짐말뚝 복합지반보다 적게 나타났으며 침하양상을 비교해 보면 3단계까지는 침하양상이 비슷하나 4단계 이후부터 모래다짐말뚝 복합지반의 침하량이 증가하는 것으로 나타났다.

복합지반의 지지력증대 효과를 비교할 수 있도록 점토원지반, 모래다짐말뚝, 동슬래그다짐말뚝이 설치된 모형지반의 하중-침하량 관계 곡선을 그림 9에 나타내었다. 하중재하시험에서 평가된 지지력은 침하량 15mm(재하판 직경의 10%)를 기준으로 할 때 점토원지반은 약 4.9kN/m^2 로 나타나 모형점토지반의 비배수전단강도

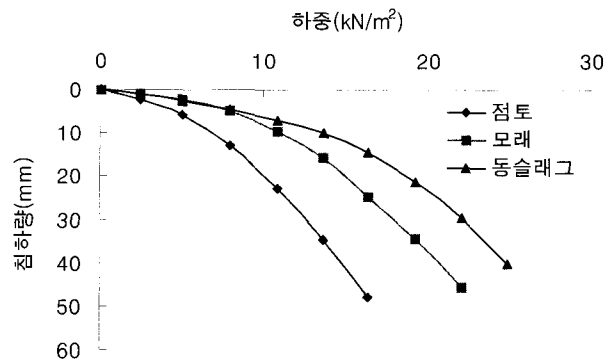


그림 9. 복합지반의 하중-침하량 관계곡선

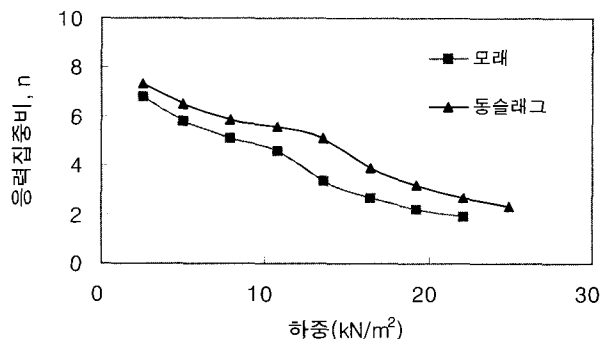


그림 10. 응력집중비

와 동일하고, 모래말뚝 약 12.8kN/m^2 , 동슬래그다짐말뚝 약 16.7kN/m^2 으로 나타나 동슬래그다짐말뚝의 원지반에 대한 지지력 증대 효과는 모래다짐말뚝보다 다소 우수한 것으로 판단된다.

그림 10은 하중에 따른 각 복합지반에서 측정된 응력분담비를 나타낸 것이며, 하중단계가 증가할수록 응력분담비는 감소하는 경향을 보인다. 응력분담비는 모두 2~7정도의 값을 나타내었으며, 각 하중단계별로 보면 동슬래그다짐말뚝 복합지반의 응력분담비가 모래다짐말뚝 복합지반보다 약 1정도 높게 측정되었다.

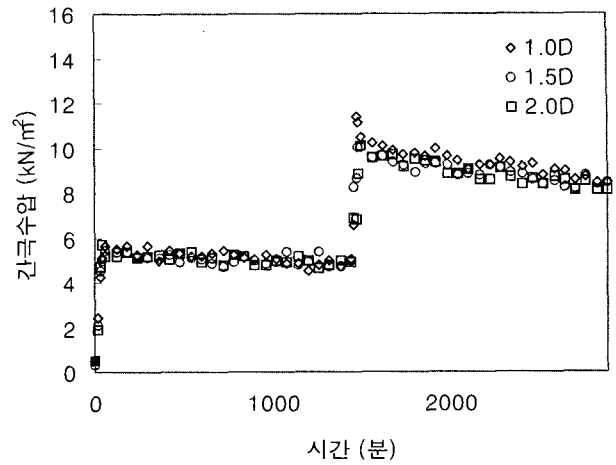
5.3 압밀시험

모형토조의 조성방법은 하중재하시험과 동일하나, 구속조건을 만족하기 위하여 토조의 내경과 동일한 재하판을 사용하였다. 토조 바닥면에 직경 3mm 배수구멍 8개소를 만들고 원지반 상·하부에 수평배수층(동슬래그, 모래)을 두께 50mm로 포설하여 양면배수조건을 적용하였다. 하중재하방법은 재성형된 점토지반의 비배수 전단강도를 측정된 결과 약 5kN/m^2 으로 매우 연약하게 나타나 무게추에 의한 정재하시험을 실시하였고 압밀 하중은 5kN/m^2 , 10kN/m^2 을 적용하였다.

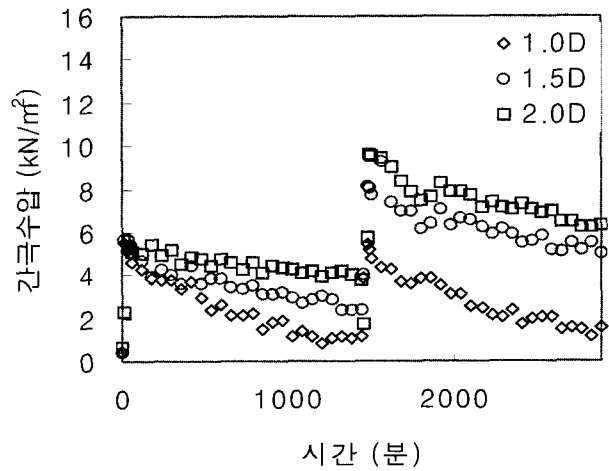
압밀침하량의 측정결과, 그림 11과 같이 전체 침하량은 점토 < 모래 ≤ 동슬래그 순으로 나타났으며, 모래다짐말뚝과 동슬래그다짐말뚝의 침하경향은 매우 유사한 양상을 나타냈다.

Pile 직경의 설치심도 중심으로부터 1.0D, 1.5D, 2.0D 간격에 진동현식 간극수압계를 설치하였다. 간극수압을 측정된 결과 그림 12와 같이 나타났다. 점토만으로 구성된 모형지반에서는 간극수압 소산이 느리게 나타나는

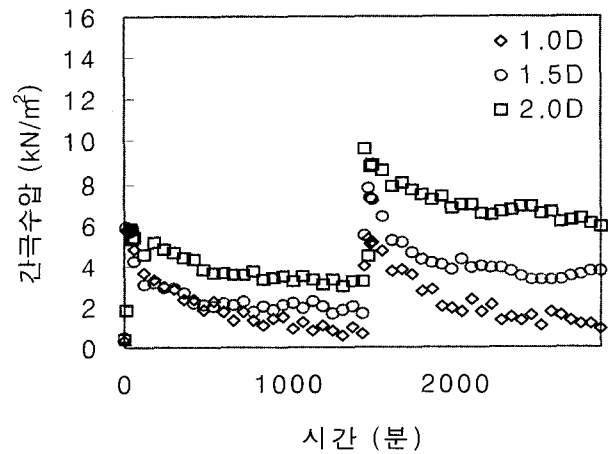
반면 모래, 동슬래그가 설치된 모형지반에서는 유사한 소산형태를 보이며, 1.0D, 1.5D, 2.0D 순으로 간극수압이 빨리 소산되는 것으로 나타났다. 1.0D에서 측정된 간



(a) 점토지반



(b) 모래말뚝



(c) 동슬래그 말뚝

그림 12. 간극수압 측정결과

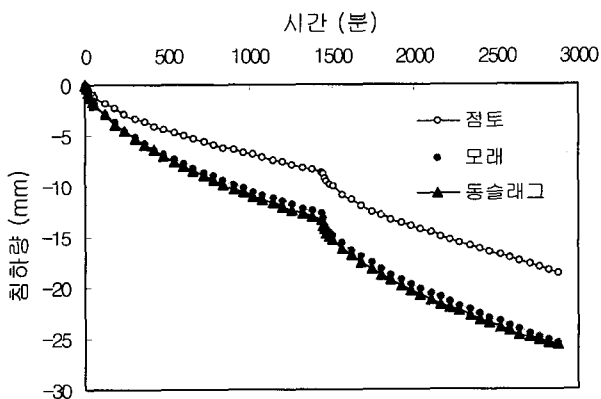


그림 11. 시간-침하량 관계곡선

극수압은 24시간 동안 거의 모든 과잉간극수압이 소산되는 반면, 2.0D에서는 24시간동안 약 30%의 과잉간극수압이 소산되었다.

6. 현장시험시공

6.1 현장개요

현장시험을 위해 선정된 부지는 경부선 ○○-○○간 선로개량 노반공사 현장의 연약지반개량 공사구간으로써 원지반의 상태는 GL(-)4.5m까지는 표준관입시험치(이하 N치)가 7에서 11정도의 느슨한 사질층과 매립층이 존재하며 GL(-)4.5m~(-)30m까지는 N치가 0에서 8을 보이는 초연약 또는 연약층이 분포하고 있다. 본 시험시공구간은 단계별 성토를 실시하여 1단계 성토고 8.3m, 2단계 성토고 11.5m, 3단계 성토고 13.4m으로 계획되어 있으며 지반개량기간은 24개월, 성토속도는 2.0m/1개월이다. 설계시 하중조건은 노반(1.9t/m² × 성토고)하중이외에 자갈도상(0.5t/m²), 궤도하중(0.99t/m²) 및 열차하중(LS=22, 3.0t/m²)등이 노반상단에 등분포하중으로 작용하는 것을 기준으로 하였다. 연약지반 개량공법으로는

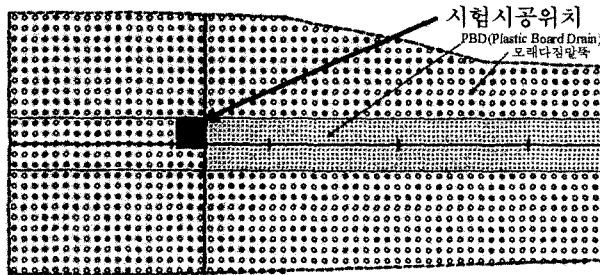


그림 13. 시험시공 위치

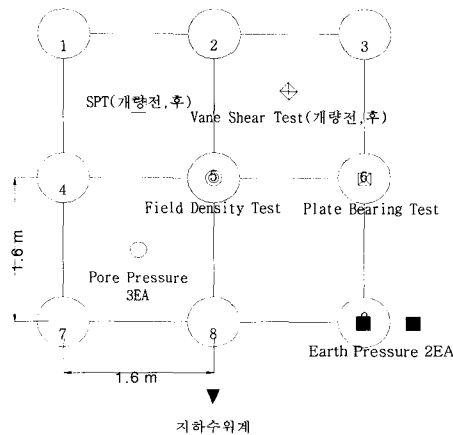


그림 14. 시험시공 및 계측 현황도

표 3. 대상지반 및 말뚝재료의 특성

구분	대상지반	모래
함수비(%)	40.5~54.5	11.2
통일분류	CL	SP
유효입경, D ₁₀ (mm)	6.1 × 10 ⁻⁴	0.19
D ₁₅ (mm)	1.1 × 10 ⁻³	0.23
D ₈₅ (mm)	4.3 × 10 ⁻²	0.62
균등계수, C _u	27.5	2.11
곡률계수, C _w	2.35	1.18
# 200체 통과율(%)	98.13	1.68
비중(G _s)	2.66	2.67
투수계수(cm/sec)	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁶	3.9 × 10 ⁻²
시공후 건조단위중량(kN/m ³)	-	16.1

모래다짐말뚝과 PBD(Plastic Board Drain)공법이 그림 13과 같이 병행으로 채택되었다.

시험시공규모는 연약지반심도 28m까지 3m × 3m 정사각형 배열로 설치하였고 다짐말뚝시공간격은 C.T.C 1.6m × 1.6m 간격, 말뚝직경은 ø 700mm으로 시공하였다.

6.2 개량효과 확인을 위한 실험 및 계측

모래다짐말뚝과 동슬래그다짐말뚝에 의한 연약지반 개량효과의 확인 및 비교·검증을 위해 개량 전·후 물리·역학시험 및 현장계측이 수행되었으며, 시험항목

표 4. 물성·역학실험(비교란 시료)

구분	시험항목
물리실험	1. 함수비시험 2. 비중시험 3. 액성한계시험 4. 소성한계시험 5. 입도분포시험 ① 채분석시험 ② No. 200체가름시험 ③ 비중계분석시험
역학실험	1. 일축압축시험(개량 전·후) 2. 삼축압축시험(개량 전·후)

표 5. 현장 원위치 시험 및 계측항목

구분	계측심도 GL(-)m	설치목적
표준관입시험	전 심도	Split Sampler 관입저항치 측정
베인전단시험	7, 12.5, 20	비배수 전단강도(c _u)의 측정
평판재하시험	0.3	지반반력계수 및 지지력 측정
토압계	0.5	하중재하시험 응력집중비 확인
지하수위계	-	지하수위의 변화 측정
현장들밀도시험	0.3	현장 단위중량 측정

및 계측항목은 표 4와 표 5와 같다.

6.3 분석 및 고찰

6.3.1 지지력 측면

(1) 평판재하시험

동슬래그다짐말뚝과 모래다짐말뚝이 대상지반에 복합지반으로 완전히 형성된 후, 각 말뚝이 발휘할 수 있는 지지력을 산정하기 위한 수단으로 평판재하시험을 적용하였다.

시험방법은 직경 30cm의 재하판에 대해 1ton(예상 항복지지력의 1/6~1/5)의 하중을 한 단계로 침하량이 분당 0.01mm 이하가 될 때 다음단계의 하중을 재하하는 방식으로 시행하였으며, 각 말뚝의 항복지지력은 그림 15와 같이 모래다짐말뚝이 740kN/m², 동슬래그다짐말뚝이 1240kN/m²으로 나타나 동슬래그다짐말뚝이 모래다짐말뚝에 비해 168%의 상대적으로 큰 항복지지력을 보였다. 이 결과는 각 복합지반에서 말뚝이 분담할 수 있는 응력 즉, 응력분담비에 대한 중요한 근거라 할 수 있으며, 같은 하중단계에서 상대적으로 적은 침하량을 보인 동슬래그다짐말뚝이 복합지반의 침하억제효과면

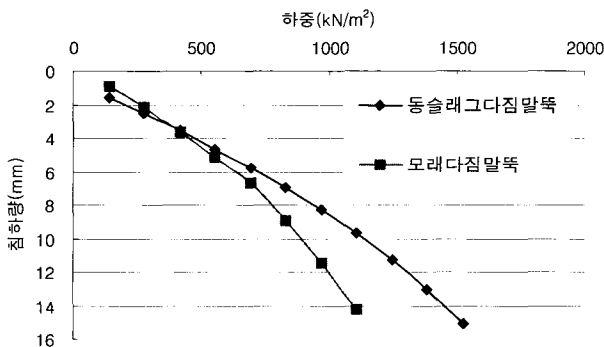


그림 15. 평판재하시험 결과

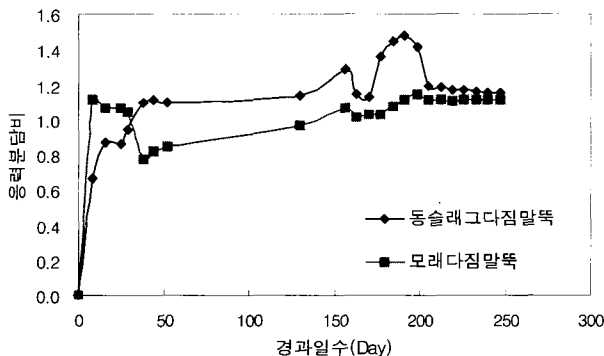


그림 16. 각 복합지반의 응력분담비 비교

에도 우수할 것으로 판단된다.

평판재하시험에서 구한 지지력의 유의심도는 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 현장시험의 말뚝은 길이방향에 대해 선단까지 균질한 재료로 구성되어 있으므로 이와 같은 재하폭과 기초폭의 차이에 의한 평판재하시험의 불확실성은 배제될 수 있을 것으로 사료된다.

(2) 토압계 분석

동슬래그다짐말뚝과 모래다짐말뚝 복합지반에서 각 말뚝이 분담하는 응력비를 산출하기 위해 GL(-)0.5m심도의 총 4개소에 대해 각 복합지반의 말뚝중심과 주변지반에 토압계가 매설되었으며 계측자료는 그림 16과 같다. 초기 측정일은 2001년 9월 4일이며 이를 기준으로 경과일수 160~210일 정도의 지점에서 불규칙한 변화를 보이는 것은 성토하중의 급작스런 변화에 기인한 것이며 점차적으로 안정화되어 가는 추세를 보이고 있다.

각 말뚝의 응력분담비를 산출한 결과, 동슬래그다짐말뚝이 1.154(모래다짐말뚝 대비 103.3%, 모래다짐말뚝이 1.117로 낮은 결과치를 보였다. 이와 같은 응력분담비를 보인 원인으로는 토압계가 GL(-)4.5m심도에 위치한 연약층에 매설되지 못하고 상부지반 즉, 지층이 양호한 매립층에 위치함으로써 나타난 결과라 할 수 있다. 그러나 동일한 조건 하에서 계측이 수행되었다는 것을 감안하면, 각 복합지반을 비교하기 위한 자료로 활용이 가능하리라 판단된다.

6.3.2 침하저감효과

지표면침하판은 성토하중에 따른 침하양상을 분석하기 위해 각 복합지반에 설치되었으며 연약지반개량을 위한 Granular pile의 목적 중에 하나인 침하저감효과면

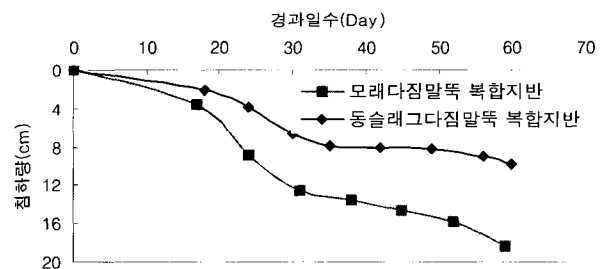


그림 17. 지표면침하판 계측결과

에서 각 복합지반의 거동특성을 비교하기 위해 성토와 동시에 계측이 수행되었다(1단계 성토실시일: 2002년 2월 4일). 계측결과는 그림 17과 같이 동슬래그다짐말뚝 복합지반이 모래다짐말뚝 복합지반의 침하량에 비해 약 55% 정도의 침하량을 보임으로써 침하저감효과면에서도 우수한 것으로 판명되었다.

6.3.3 표준관입시험(S.P.T)에 의한 개량효과 확인

모래다짐말뚝과 동슬래그다짐말뚝의 시공으로 인한 주변지반의 개량정도를 비교하기 위하여 시험시공실시 9개월이 경과한 후 표준관입시험을 실시하였으며, 시험결과는 그림 18과 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 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.

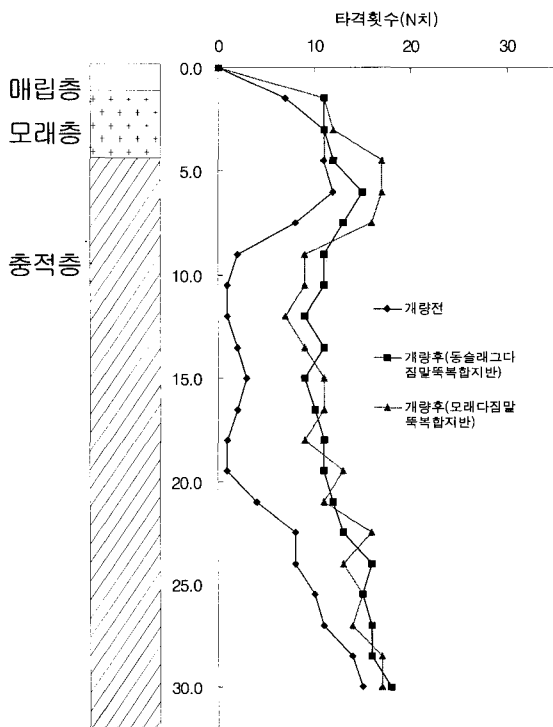


그림 18. 표준관입시험 결과

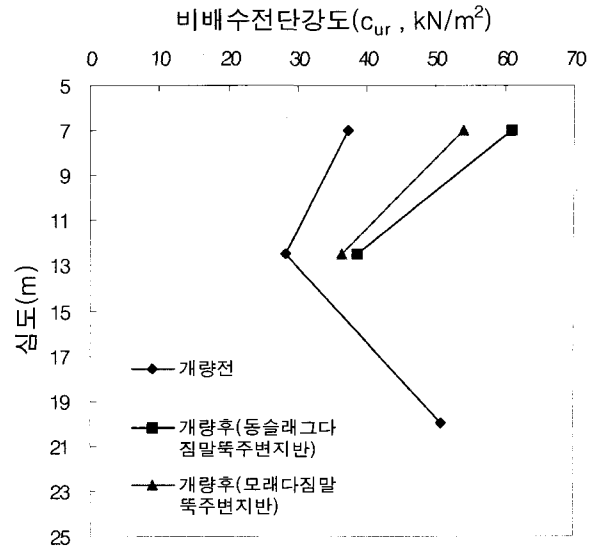


그림 19. 베인 전단시험 결과

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

베인 전단시험 장비는 기존의 Hand Vane으로부터 개량된 형태인 Geonor Vane H-10을 사용하였으며 십자형 날개의 규격은 55mm × 110mm이다. 시험결과는 그림 19와 같이 동슬래그다짐말뚝 주변지반의 비배수전단강도가 모래다짐말뚝 주변지반에 비해 심도 7m에서는 약 19%, 12.5m에서는 약 8%의 정도의 더 높은 개량효과를 보였으나, 심도 20m 지점에서는 십자형 날개가 회전할 수 없을 만큼 지반이 개량되어 계획된 시험이 불가하였다.

6.3.5 비교란 시료토의 실내시험에 의한 개량효과 확인

(1) 함수비 시험

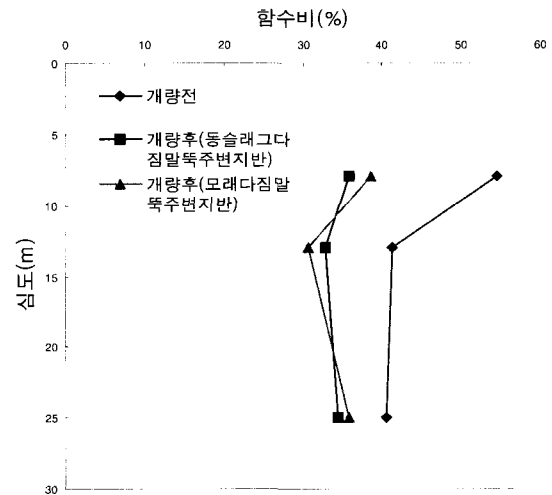


그림 20. 개량전 · 후 함수비의 변화

개량전·후 동슬래그 다짐말뚝 및 모래다짐말뚝 주변지반의 함수비를 측정된 결과, 그림 20과 같이 각 말뚝의 주변지반 함수비 저감효과는 매우 비슷한 양상을 보이고 있다.

(2) 일축압축시험

개량 전·후의 일축압축강도를 측정된 결과, 그림 21과 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

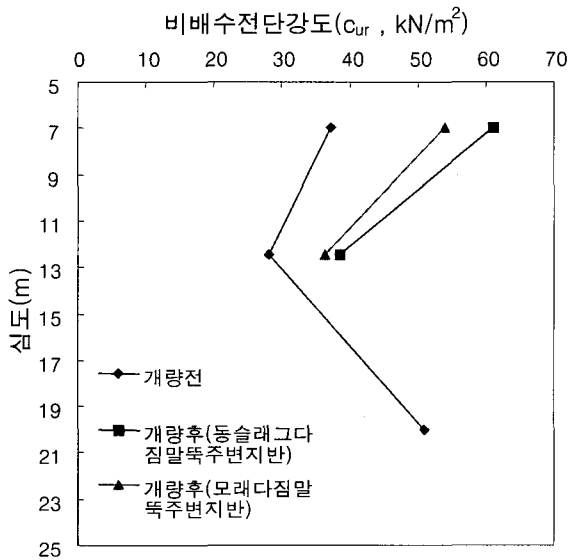


그림 21. 일축압축시험 결과

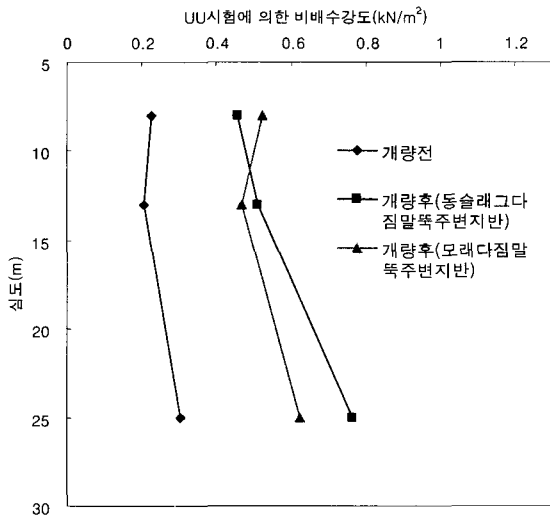


그림 22. 삼축압축시험 결과

각 주변지반의 평균 개량정도를 비교한 결과, 동슬래그다짐말뚝 주변지반이 모래다짐말뚝주변지반에 비해 약 9.7%만큼 높게 나타났다.

(3) 삼축압축시험(Unconsolidated Undrained test, UU)

개량 전·후의 비배수전단강도를 측정된 결과, 그림 22와 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, 동슬래그다짐 말뚝주변지반이 모래다짐말뚝 주변지반에 비해 약 12.7%만큼 높게 나타났다.

7. 결론

본 연구에서는 모래다짐말뚝의 모래대체재로서의 동슬래그의 활용을 위하여, 실내모형시험을 통한 동슬래그의 재료 특성, 지지력 특성, 압밀배수 특성, 배수·필터재로서의 특성 등을 파악하였고, 시험시공을 통하여 동슬래그의 현장 적용성 검토하였다. 그 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

- (1) 동슬래그는 비중 및 단위중량이 일반적으로 사용되고 있는 모래에 비해서 상대적으로 큰 수치를 보이며, 입도분포 등의 재료특성과 투수계수를 평가한 결과 배수재로서 적합하며 내부마찰각 ϕ 가 모래보다 크게 나타났다. 또한 분사현상 발생여부 및 입자 유실에 대한 내적안정성을 평가한 결과, 지반조건에 따라 배수기능을 충분히 발휘할 수 있어서, 지반보강용 모래다짐말뚝의 모래대체재로서의 적용뿐만 아니라 내적으로도 안정한 배수재로서의 사용이 가능한 것으로 판단된다.
- (2) 실내모형시험에 의한 결과, 동슬래그다짐말뚝에 의해 개량된 복합지반이 모래다짐말뚝에 의한 복합지반보다 다소 높은 지지력 증대 효과를 보였으며, 원지반에 대한 말뚝의 응력분담비도 동슬래그다짐말뚝이 모래다짐말뚝보다 크게 나타나 복합지반에서 침하량 감소 및 지지력 증대효과를 기대할 수 있다. 또한, 복합지반의 압밀배수특성을 분석하였을 때 동

슬래그를 사용한 모형지반의 연직배수효과가 모래다짐말뚝이 설치된 지반보다 대체적으로 우수하게 나타나 동슬래그다짐말뚝의 연직배수효과가 우수하다고 판단된다.

- (3) 성토하중이 재하되기 전 평판재하시험에 의한 각 말뚝의 항복지지력을 비교·평가한 결과, 동슬래그다짐말뚝이 모래다짐말뚝에 비해 높은 지지력을 보였으며, 같은 하중단계에서 상대적으로 적은 침하량을 보여 침하억제효과면에도 우수할 것으로 평가된다.
- (4) 토압계의 계측을 통한 각 말뚝의 응력분담비를 산출한 결과, 동슬래그다짐말뚝이 1.154, 모래다짐말뚝이 1.117로 동슬래그다짐말뚝 복합지반이 모래다짐말뚝 복합지반에 비해 다소 높은 응력분담비를 보였고 지표면침하판에 의한 계측결과 동슬래그다짐말뚝 복합지반이 모래다짐말뚝 복합지반에 비해 적은 침하량을 보임으로써 지지력 측면과 침하억제 효과면에서 모래대체재로 동슬래그의 활용은 가능하리라 판단된다.
- (5) 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 매립층보다는 상대적으로 큰 함수비를 보유한 연약층에서의 횡방향 압밀과 다짐에 의한 개량효과라 할 수 있다. 또한, 연약층(심도 6~30m) 전심도에 걸친 타격횟수로 개량정도를 비교하면 동슬래그 및 모래다짐말뚝에 의한 개량정도는 유사한 것으로 나타났다.
- (6) 현장 베인 전단시험 및 비교란시료토에 의한 실내시험(함수비시험, 일축압축시험, 삼축압축시험) 결과, 동슬래그 다짐말뚝 주변지반이 모래다짐말뚝 주변지반보다 개량정도에서 다소 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.

상기와 같이 나타난 결과에서 볼 수 있듯이, 동슬래그는 재료적 특성이 양호하고, 모래다짐말뚝과 비교하여 동슬래그다짐말뚝이 지지력 및 침하, 배수특성이 유사하거나 우수한 것으로 나타나 모래대체재로서의 적용성은 충분할 것으로 판단된다. 또한, 천연골재의 고갈에 따른 대체골재원으로서 산업부산물의 재활용이라는 측면에서 향후 경제적·환경적으로 활용가치가 있으리라 본다.

참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원(2000), LG-Nikko 동계련(주)(2000), “동계련 슬래그의 건설재료 활용 및 기준 개발”, pp.168-236.
2. 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.
3. 村山朔郎(1962), “粘性土に對するパイプロコンポーザー工法の考察”, 日本建設機械化協會, 建設機械化, Vol.150.
4. Balaam N. P., Poulos, H. G. and Brown, P. T.(1977), “Settlement analysis of soft clays reinforced with granular piles”, Proc Fifth Asian Regional Conf., Bangkok, Thailand Vol.1, pp.81-92.
5. Barksdale, R. D. and Bachus, R. C.(1983), Design and Construction of Stone Columns, Vol.1, Report No.FHWA/RD-83/026, National Technical Information Service, Springfield, Virginia, p.195.
6. Hansbo, S.(1994), Foundation Engineering, Developments in Geotechnical Engineering, Elsevier Press, Vol.95, pp.450-455.
7. Harry R. Cedergren(1977), Seepage, Drainage and Flownets, John Wiley and Sons, Inc., pp.179-184.
8. Hughes, J. M. O. Withers, N. J. and Greenwood, D. A.(1975), “A field of the reinforcing effect of a Stone Column in soil”, Geotechnique, pp.31-44.
9. Madhav, M. R., and Vitkar, R. P.(1978), “Strip Footing on Weak Clay Stabilized with a Granular Trench or Piles”, Canadian Geotechnical Journal, Vol.15, pp.605-609.
10. Skempton, A. W., Brogan, J. M. (1994), “Experiments on Piping in Sandy Gravels”, Géotechnique Vol.44, No.3, pp.449-460.
11. T. C. Kenney, D. Lau(1985), “Internal stability of granular filters”, Canadian Geotechcal Journal, Vol.22, pp.215-225.
12. T. C. Kenney, D. Lau(1986), Discussion on “Internal stability of granular filters”, Canadian Geotechnical Journal, Vol.23, pp.420-423.
13. Taylor, D. W.(1948), “Fundamentals of Soil Mechanics”, Wiley, New York, pp.134-135.
14. Terzaghi, K.(1954), Theoretical Soil Mechanics, McGraw Hill, pp.265-296.
15. Van Impe, W. F., and Madhav, M. R.(1992), “Analysis and settlement of dilating stone column reinforced soil”, Austrian Geomech., J., Feb-March, Vol.137, pp.114-121.

(접수일자 2002. 7. 17, 심사완료일 2002. 10. 12)