

다짐말뚝 채움재로서 슬래그의 적용성 연구

A Study on the Applicability of Slag as Compaction Pile Material

이미혜¹⁾, Mee-Hye Lee, 이상익²⁾, Sang-Ik, Lee, 박용원³⁾, Yong - Won Park

¹⁾ 명지대학교 토목공학과 석사, Master, Dept. of Civil Eng., Myongji University.

²⁾ 명지대학교 토목공학과 박사과정, Graduate student, Dept. of Civil Eng., Myongji University.

³⁾ 명지대학교 SOC 공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Myongji University

SYNOPSIS : Sand Compaction Pile method is one of the widely used ground improvement techniques at loose sand or soft clay ground in Asian countries. However, due to environmental and economical problems concerning shortage of sand resources alternative materials are needed to substitute sand for SCP.

This study is on the applicability of slag as an alternative material SCP. Consolidation and direct shear test are performed for the slag-clay composite specimens to find out the positive effects of consolidation rate and shear resistance of slag reinforced ground.

The result shows that slag has similar effects with sand in consolidation and shear resistance behavior in composite ground, which says slag can be used as alternative material of sand for SCP.

Key words : Sand Compaction Pile, slag, composite ground, slag reinforced ground

1. 서론

모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile, 이하 SCP) 공법은 아시아지역에서 느슨한 사질토나 연약한 점토지반의 보강 기술에 폭넓게 사용하는 공법이다. 우리나라에서는 채움재로 쓰이는 모래자원의 고갈에 따른 환경적, 경제적인 문제 때문에 이용할 수 있는 대체재의 필요성이 절실하다.

이 연구는 모래다짐말뚝 공법에서 모래 대신 재활용 골재인 슬래그의 적용성에 대한 것으로 슬래그-점토의 복합시료에 대해 압밀시험과 직접전단시험을 수행하여 압밀축진, 침하저감, 그리고 전단저항강도 강화 등의 효과를 파악하고 모래 대체재로서 슬래그의 적용성을 판단하고자 한다.

특히 슬래그를 대체재로 선정한 이유로는

① 고로슬래그 활용에 대한 지침이 1986년 대한토목학회의 고로슬래그 활용에 대한 자료로 배수재 및 채움재에 대한 특성이 시공지침에 수록되어 있는데 고로슬래그는 조립률(fineness modulus : FM) 3 전후의 굵은 모래로 배수재로서 막힘이 일어나지 않으며 투수계수가 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ cm/sec 정도이고 품질의 변동이 적고 균일한 재료라는 것.

② '새로운 건설재료 제강슬래그'라는 주제로 1997년 자원 리사이클링 학회 주최로 제강슬래그의 각종 활용에 대해 연구되는 등 각 분야에서 슬래그에 대한 연구가 활발하다는 것이다.

2. SCP 공법 개요

2.1 기본개념

점성토 지반에 시공된 모래다짐말뚝은 그림 1과 같이 등간격으로 타설된 모래말뚝과 원지반이 상재하중을 분담하며 하나의 말뚝이 분담하는 하중을 단일 등가원주모형(unit cell model) 개념으로 해석한다 (GIT, 1983). SCP 복합지반의 거동에 영향을 주는 요소로는 말뚝의 직경과 간격(치환율), 지반의 비배수 전단강도, 지반의 방사방향 응력-변형률 특성과 말뚝재료의 응력-변형률 특성과 전단저항각 등을 들 수 있다.

이때, 치환율(a_s)은 원지반 면적과 모래말뚝이 차지하는 부분의 면적 비이며, 다짐말뚝 사이의 타설 간격에 의해 결정된다.

$$\text{즉, } a_s = \frac{A_s}{A} \quad (2.1)$$

여기서, A ; 등가원주의 단면적
 A_s ; 모래기둥의 단면적

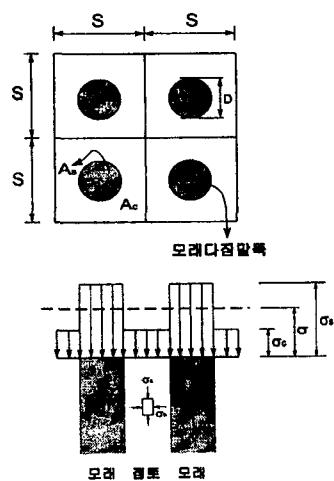


그림 1. 복합지반의 기본개념

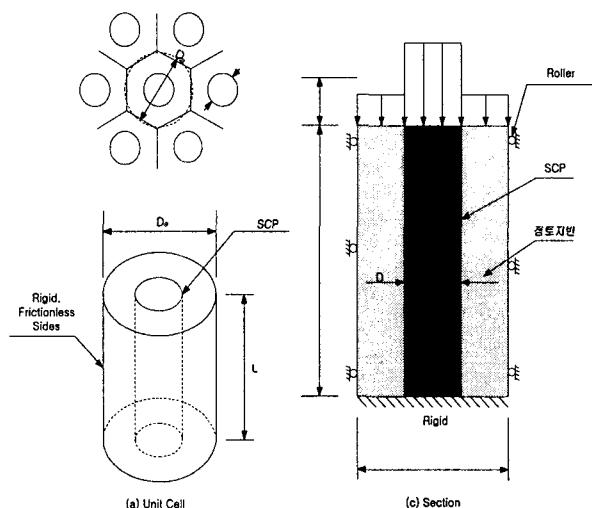


그림 2. SCP의 등가원주 개념도(GIT, 1983)

복합지반은 그림 2.1과 같이 복합지반 위에 평균응력(σ)이 재하되어 지반 반력으로 말뚝에 σ_s , 점성토에 σ_c 의 응력이 발생하고, 각각의 면적 A_s , A_c 의 범위 내에서 응력이 일정하다면 다음 식이 얻어진다.

$$\sigma A = \sigma_s A_s + \sigma_c A_c \quad (2.2)$$

응력분담비($m = \sigma_s / \sigma_c$)를 이용하여 이 식을 변형하면

$$\sigma A = m \sigma_c A_s + \sigma_c A_c = \sigma_c (m A_s + A_c) \quad (2.3)$$

$$\text{이것으로, } \frac{\sigma_c}{\sigma} = \frac{A}{mA_s + A_c} = \frac{1}{(m-1)a_s + 1} = \mu_c \quad (2.4)$$

$$\frac{\sigma_s}{\sigma} = \frac{mA}{mA_s + A_c} = \frac{m}{(m-1)a_s + 1} = \mu_s \quad (2.5)$$

여기서, μ_c 와 μ_s 는 상재압에 의해 각각 점토층과 모래말뚝에 발생하는 응력비이다.

$$\text{따라서, } \mu_s a_s + \mu_c (1 - a_s) = 1 \quad (2.6)$$

식 (2.4), (2.5), (2.6)은 복합지반에 대한 기본적인 식이 된다(神田; 寺師, 1990).

2.2 침하 저감효과

복합지반의 압밀계산에서 침하에 대한 문제는 현장에서 시공결과 및 경험에 의해 어느 정도 정략적으로 파악되고 있으며 무처리 지반에 비해 1/3~2/3정도 감소되는 것으로 알려져 있는데, 그 이유는 원지반의 개량효과와 복합지반으로서의 특성에 의한 것으로 볼 수 있다. 이러한 복합지반의 침하량은 점성토에 걸리는 연직응력에 의해 정해지고 계산된다.

Aboshi et. al(1979)과 Barksdale(1981) 등에 의해 제시된 방법으로서 응력분담비(m)를 이용하여 복합지반의 침하량을 계산하며 그 가정에는,

- ① 등가유효원주 개념이 전 지반에 적용
- ② 등가유효원주에 가해진 상재하중은 점토와 모래말뚝에 발생한 응력의 합과 동일(평형상태유지)
- ③ 모래말뚝과 점토의 침하량은 동일
- ④ 상재압에 의해 모래말뚝에 유발된 응력은 말뚝 전길이에 걸쳐 일정하거나 압축지층을 몇 개의 요소로 분할했을 때 요소 내에서 일정하다.

는 것이다.

$$\text{일차원 압밀침하량은 } S_f = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot H \cdot \log_{10}\left(\frac{\sigma'_0 + \mu_c \sigma}{\sigma'_0}\right) \quad (2.7)$$

무처리 점토지반 침하량에 대한 복합지반 침하량의 비는

$$\beta = \frac{S_f}{S} = \log_{10}\left(\frac{\sigma'_0 + \mu_c \sigma}{\sigma'_0}\right) / \log_{10}\left(\frac{\sigma'_0 + \sigma}{\sigma'_0}\right) \quad (2.8)$$

위 식에서, 복합지반의 압밀침하량 저감효과의 영향요소는 응력분담비(m), 점토층 초기유효응력(σ'_0), 상재압(σ)의 크기이다. 유효응력 σ'_0 가 매우 크고(모래말뚝이 길고), 상재압 σ 가 작으면 $\beta = \frac{S_f}{S}$ 값은 μ_c 값에 수렴한다.

$$\text{즉, } \beta = \mu_c = \frac{1}{1 + (m-1)a_s} \quad (2.9)$$

이 식은 체적압축계수 m_v 를 사용하고 복합지반의 최종 침하량을 S_f , 무처리지반의 최종 침하량을 S_{of} 로 하면 각각 다음 식으로 표시된다.

$$S_f = \varepsilon_z \cdot H = m_v \mu_c \Delta\sigma H \quad (2.10)$$

$$S_{of} = m_v \cdot \Delta\sigma \cdot H \quad (2.11)$$

복합지반의 침하량과 무처리지반의 침하량 비를 침하감소 계수 β 라고 정의하면

$$\beta = \frac{S_f}{S_{of}} = \frac{m_v \mu_c \Delta\sigma H}{m_v \Delta\sigma H} = \mu_c \quad (2.12)$$

$$\therefore S_f = S_{of} \cdot \mu_c \text{ (or } S_{of} \cdot \beta) \quad (2.13)$$

2.3 복합지반 전단강도

복합지반의 전단강도를 채움재와 점토지반의 치환율에 비례하여 각각의 전단강도를 가중 평균하여 사용하는 방법으로서, 모래와 점토에 발생하는 응력(응력분담비)을 고려하는지 또는 암밀진행에 따라 발생하는 점토의 전단강도 증가를 고려하는지의 여부에 따라 몇 가지 공식이 제안되어 있다. 복합지반의 전단강도 가중평균은 다음과 같이 계산된다(神田; 寺師, 1990).

$$\begin{aligned} \bar{\tau} &= (1 - a_s) \cdot (c_u + \Delta c) + (\gamma_s' \cdot z + \mu_s \cdot \sigma) \cdot a_s \cdot \tan \phi_s \cdot \cos^2 \theta \\ \Delta c &= (c'/p') \cdot \mu_c \sigma \cdot U \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\bar{\tau} = (1 - a_s) \cdot (c_u + \Delta c) + (\gamma_m' \cdot z + \sigma) \cdot \mu_s \cdot a_s \cdot \tan \phi_s \cdot \cos^2 \theta \quad (2.15)$$

$$\bar{\tau} = (\gamma_m' \cdot z + \sigma) \cdot \mu_s \cdot a_s \cdot \tan \phi_s \cdot \cos^2 \theta \quad (2.16)$$

$$\bar{\tau} = (\gamma_m' \cdot z + \sigma) \cdot \tan \phi_m \cdot \cos^2 \theta \quad (2.17)$$

위 식에서 응력분담과 점토층 강도증가를 고려하여 다시 나타낸 것이 식 (2.14) 및 (2.15)이며, 응력분담만을 고려한 것이 식 (2.16), 응력분담을 고려하지 않은 것이 식 (2.17)이다.

3. 실험 및 결과 분석

3.1 복합시료 형성을 위한 점토와 슬래그의 특성

형성된 시료를 구성하고 있는 점토와 슬래그의 특성은 표1, 표2와 같다.

표 1. 점토(서해안 아산지역의 해안점토)의 특성

비중 (G_s)	액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수 (PI)	암밀계수, c_v (cm ³ /sec)
2.68	37.50	20.0	17.5	0.44×10^{-3}

표 2. 슬래그(광양 슬래그 골재회사에서 생산한 HMS25)의 특성

비중 (G_s)	건조단위중량, γ_d (t/m^3)	투수계수, k (cm/sec)	전단저항각, ϕ (°)
2.89	1.48~1.52	$\alpha \times 10^{-2} cm/sec$ 전후 (고로슬래그의 설계·시공지침에서 인용)	53

그림 3은 채움재로 사용한 슬래그의 입도분포곡선을 나타낸 것으로 HMS25 원상태 슬래그를 체분석한 결과를 곡선 A에 나타내었으며, 실내실험 사용에 적합하도록 슬래그를 파쇄한 후 5mm 이상의 입자를 제거하였다.

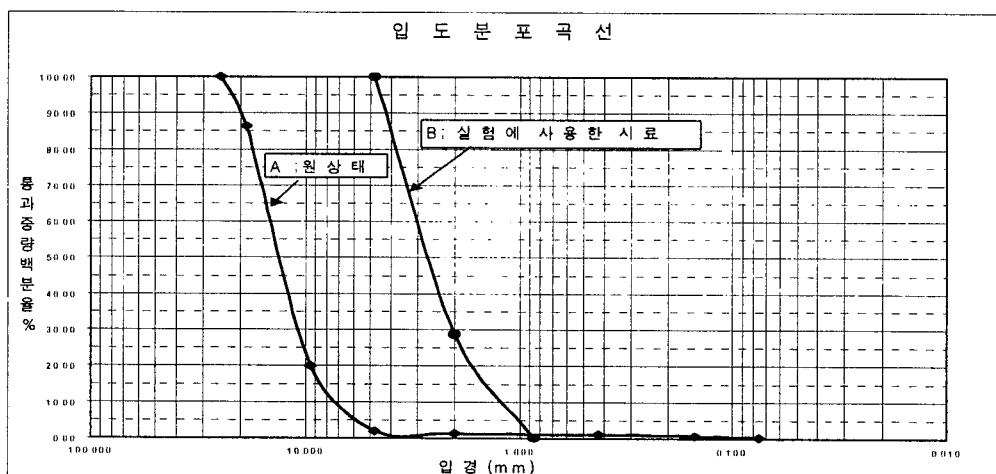


그림 3. 실험에 사용된 HMS25의 입도분포곡선

3.2 복합지반 시료의 압밀시험 및 결과

압밀상자와 유사한 형태의 실험장치를 제작하여 복합지반을 조성하였다. 사진 1은 모형 압밀링과 슬래그 케이싱을 보인 것으로, 케이싱 직경에 따라 20%, 40%, 60%의 슬래그 말뚝을 형성하였고, 그 제원은 다음과 같다.

- 지름 100mm의 원형 압밀상자(상·하 다공질판)
- 슬래그 치환 직경 ; $d_{20} = 46.5mm$, $d_{40} = 64.0mm$, $d_{60} = 76.5mm$
- 시료크기 ; 100mm × 37mm

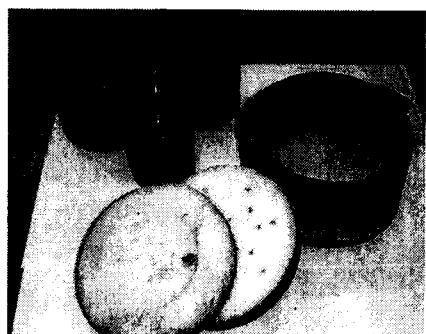


사진 1. 압밀링과 케이싱

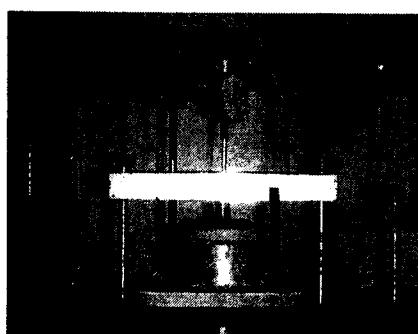


사진 2. 설치 후 하중재하

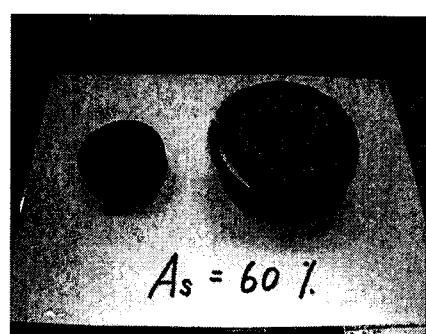


사진 3. $a_s=60\%$ 압밀종료 후

사진 2와 사진3은 압밀시험을 위해 하중을 재하한 상태와 시험 종료후의 시료에 대한 그림이며, 재하 압력은 $0.2 \rightarrow 0.4 \rightarrow 0.8 \rightarrow 1.6 \rightarrow 3.2 \text{kg/cm}^2$ 의 단계별로 재하하였다.

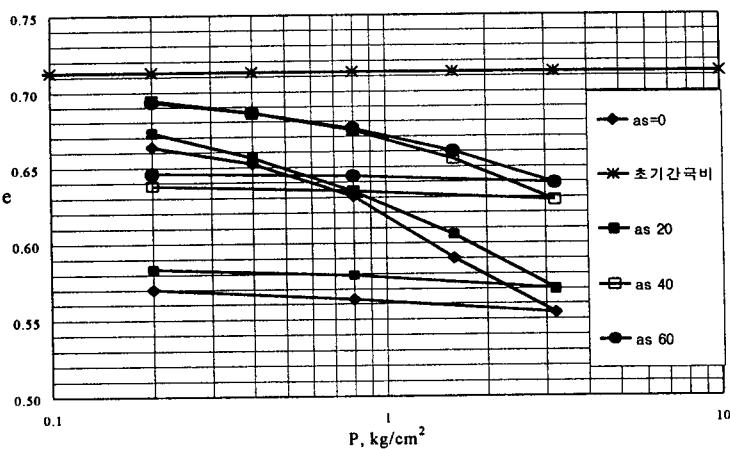


그림 4. 치환율에 따른 압밀($e - \log p$)곡선

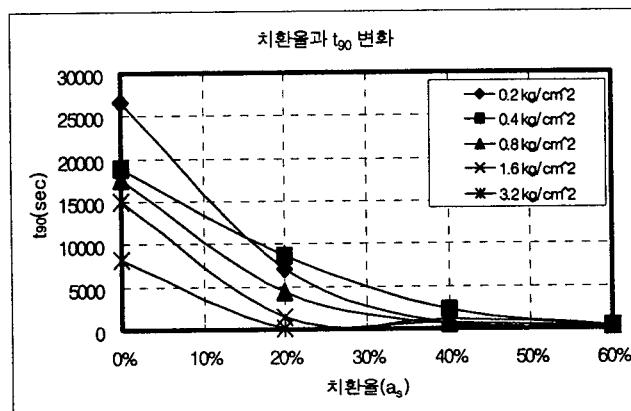
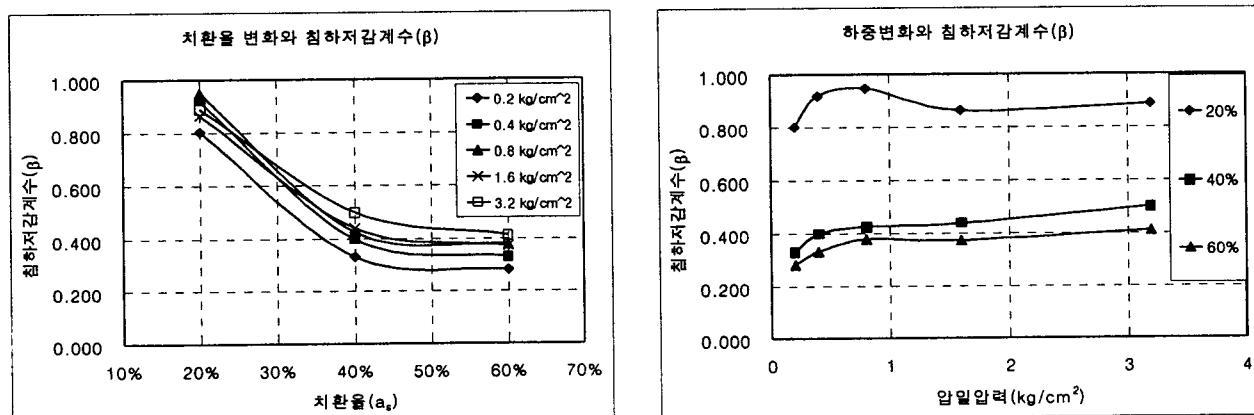


그림 5. 치환율과 t_{90} 의 관계

압밀시험 결과, 치환율에 따른 $e - \log p$ 곡선과 t_{90} 의 관계는 각각 그림 4와 그림 5와 같고, 치환율이 40% 이상인 경우 그 효과가 현저히 줄고 있음을 알 수 있다.



(a) 치환율과 침하저감계수

(b) 하중변화와 침하저감계수

그림 6. 치환율, 하중변화와 침하저감계수의 관계

그림 6은 침하저감계수 β 와 치환율 그리고 하중변화와의 관계를 나타낸 것이다. 치환율 40%를 넘으면 침하저감 효과가 크지 않음을 알 수 있고, 침하저감효과는 압밀압력에 따라 큰 차이를 보이지 않고 있다.

3.3 복합지반의 전단강도 시험 및 결과

복합시료에 대한 전단시험은 직접전단시험기로 압밀후 전단(불완전 비배수)시험을 하였으며 치환율(0%, 20%, 40%, 60%, 100%)에 따라 각각의 시료를 조성하였고, 압밀압력 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 kg/cm²을 주어 시험을 실시하였다. 그 결과 그림 7에 나타난 바와 같이 치환율 20%, 40%, 60%에서 전단저항각 ϕ_{sc} 는 $c=0$ 으로 가정했을 때 각각 31° , 38° , 40° 를 나타내었다. 즉, 치환율(a_s) 증가할수록 복합지반의 ϕ 값이 증가되는 것으로 나타났다. 표 3은 직접전단시험의 결과를 정리한 것이다.

표 3 직접전단시험 결과

치환율 a_s (%)	적용하중 (kg/cm ²)	강도정수	
		τ (kg/cm ²)	ϕ_{sc}
20	0.5	0.24	31°
	1.0	0.42	
	1.5	0.98	
	2.0	1.26	
40	0.5	0.32	38°
	1.0	0.86	
	1.5	1.09	
	2.0	1.63	
60	0.5	0.5	40°
	1.0	0.88	
	1.5	1.25	
	2.0	1.67	

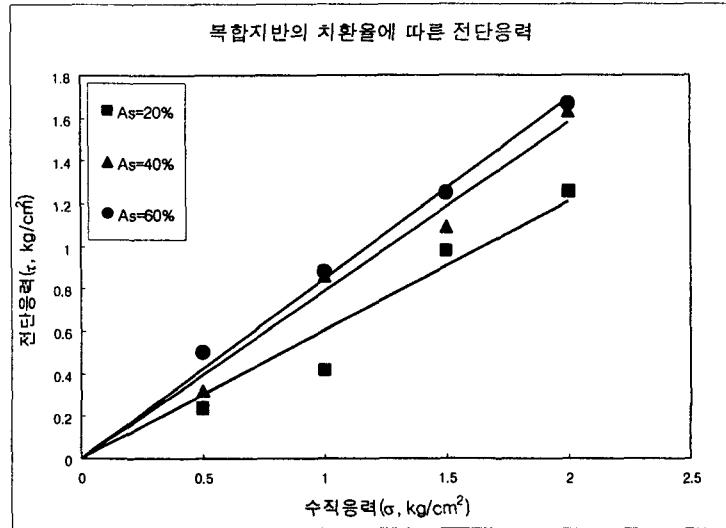


그림 7. 전단응력-수직응력의 관계

4. 결론

다짐말뚝 채움재로서 슬래그의 적용을 규명하기 위하여 슬래그-점토 복합시료에 대한 압밀시험과 직접전단시험을 수행하였다. 시험결과 슬래그는 SCP공법에서 모래와 거의 유사한 특성을 보였으며 SCP의 모래와 마찬가지로 침하저감, 전단강도 증가 등 지반개량에 효과를 보였다. 압밀특성에 있어서 압밀속도, 침하저감효과는 치환율 40%까지 치환율에 따라 증가하였으나 그 이상의 치환율(40% 이상)에서는 증가율이 크지 않았다. 또한 슬래그의 치환율에 따라 복합시료의 전단강도는 $\phi = 31^\circ$ ($a_s = 20\%$)에서 $\phi = 40^\circ$ ($a_s = 60\%$) 까지 증가하였고, 강도의 증가는 치환율 20%~40% 범위에서 가장 뚜렷하게 나타났다. 따라서, 슬래그는 SCP의 모래대신 대체재로 충분한 적용성이 있다고 할 수 있다.

참고문현

1. 광호개발주식회사(1998), 광양제철소 철강슬래그(고로, 제강슬래그)골재제품안내.
2. 황선근, 이일화, 이성혁, 최찬용(1999), “철도노반재로서 수경성입도조정고로슬래그의 동적 물성특성”, '99 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.391~398.
3. 神田勝己, 寺師昌師(1990), “粘性土地盤を對象とするSCP工法の實用設計法(感度分板と實態調査), 港満枝研資料, No.669.
4. Aboshi, H., E. Ichimoto, M. Enoki, and K. Harada(1979), "The Compozer a Method to Improve Characteristics of Soft Clays by Inclusion of Large Diameter Sand Columns", *Proceedings, International Conference on Soil Reinforcement : Reinforce Earth and Other Techniques*, Vol. I , Paris, pp. 211~216.
5. Barksdale, R. D.(1981), Site Improvement in Japan Using Sand Compaction Piles, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
6. Georgia Institute of Technology(1983), “Design and Construction of Stone Columns”, Vol.1, ASCE, Atlanta.