

제강슬래그를 이용한 샌드매트 대체재료의 적용성 연구

Application of Sand Mat Substitute using Steel Slag

박 중 범¹ Park, Jong-Beom
주 재 우³ Ju, Jae-Woo

이 병 찬^{2*} Lee, Byung-Chan
나 현 호⁴ Na, Hyun-Ho

ABSTRACT

Steel slag has the nature to hydrate and expand when in contact with non-reacting CaO and water, and thus can be used only in limited scope for landfill disposal as well as for recycling as civil construction aggregates. In order to use such steel slags more efficiently, the applicability of steel slag as sand mat alternative material was reviewed. In general, sand mat is used in soft ground surface reinforcement method and horizontal drain method, and is installed simultaneously with soft ground vertical drain method. Therefore in this study steel slag designing method and application standard etc were examined to recycle steel slag as sand mat alternative material, and laboratory soil test and model test were done. Test results indicated that the designing method and application standard meet various environment and quality standards, meaning that steel slag can be utilized as sand mat alternative material, and analysis of slag mat bearing capacity also indicated that use of steel slag produces double or more bearing capacity compared with existing sand mat.

요 지

제강슬래그는 미반응 CaO와 물과 접촉에 의해 수화, 팽창하는 성질을 가지고 있기 때문에 토목용 골재로서 재활용율이 매우 낮을 뿐만 아니라 매립처리 및 재활용 용도가 제한적이다. 이러한 제강슬래그를 보다 효율적으로 활용하기 위하여 샌드매트 대체재료로서 적용 가능성을 검토하였다. 일반적으로 샌드매트는 연약지반의 표층처리공법과 수평배수공법으로 적용되고 있으며, 대부분 연약지반의 연직배수공법과 병행하여 시공되고 있다. 따라서 본 연구에서는 제강슬래그를 샌드매트 대체재료로서 재활용하고자 설계방법과 적용기준 등을 고찰하였으며, 실내토질시험 및 모형실험을 실시하였다. 시험결과로부터 환경 및 각종 품질기준에 만족하는 것으로 평가되어 샌드매트 대체재료로 활용 가능한 것으로 판단하였으며, 모형재하실험을 통한 슬래그매트의 지지력 분석결과에서도 기존 샌드매트와 비교하여 2배이상 지지력이 증가하는 것으로 나타났다.

Keywords : Steel slag, Slag mat, Sand mat

1. 서 론

국가 산업발전과 국민경제 활성화에 따른 도로, 철도, 항만 및 단지조성 등 개발면적은 나날히 증가되고 있는 추세이다. 특히 단지조성에는 많은 토공량이 요구되고 있으며, 이에 따른 토취장 난개발로 인하여 국토는 몸살을 앓고 있다. 또한 대부분의 단지조성현장은 연약지반 현상으

로 연직배수공법의 효율을 높이고, 장비 진입의 주행성을 확보하기 위해 일반적으로 샌드매트를 시공하고 있다.

지금까지 슬래그에 대한 연구는 많이 진행되어 왔으나 샌드매트 대체재료로서 제강슬래그의 활용성에 대한 연구는 매우 부진한 실정이다. 송성섭(2003)은 제강슬래그의 연약지반 개량시 수평배수재료의 시험시공결과 13~40mm 입도조건일 경우 시공성과 투수성이 좋은 것으로 나타났

¹정회원, (주)신명건설기술공사 기술연구소 소장 (Member, Chief, Shinmyeong Construction Engrg., Co., LTD, E-mail: bankgeo@hanmail.net)

²비회원, 순천제일대학 토목공학과 교수 (Non-Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Suncheon First)

³정회원, 순천대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Suncheon National)

⁴정회원, (주)신명건설기술공사 기술연구소 연구원 (Member, Researcher, Shinmyeong Construction Engrg., Co., LTD)

표 1. 샌드매트용 모래의 입도분포

기준치수 (mm)	10	4.75 (No.4)	1.19 (No.16)	0.42 (No.40)	0.15 (No.100)	0.075 (No.200)
중량비(%)	100	84~100	30~100	0~88	0~42	0~15

표 2. 샌드매트에 사용되는 설계기준과 제강슬래그의 재료특성

항 목	모래기준	쇄석기준	제강슬래그
D ₁₅	0.075~0.9mm	-	1.3mm
D ₈₅	0.4~8.0mm	-	17.5mm
No.200체 통과량	15%이하	15%이하	1.04%
투수계수	1.0×10 ⁻³ cm/sec이상	5×10 ⁻² cm/s 이상	6.5×10 ⁻² cm/sec이상

으나, 환경적인 측면에서 중화처리가 가능한 지역에서의 적용성을 강조하였다. 그리고 신은철(2009) 등은 풍쇄슬래그를 이용한 샌드매트 대체재 개발연구에서 환경적인 측면과 통수능력에는 큰 문제가 없는 것으로 판단하였다.

이와 같이 제철소 부산물인 제강슬래그를 사용함으로써 대형 공사현장의 토취장 허자자연에 따른 문제, 토취장 매입비용, 토취장 절취 비용절감 등 자원의 재활용뿐만 아니라 공사비의 절감은 당연한 것으로 이에 대한 연구는 지속적으로 진행하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 제강슬래그를 샌드매트 대체 재료로 활용하기 위해 실내토질시험과 모형재하실험 및 용출시험을 실시하였다. 이와 같은 시험결과로부터 제강슬래그의 대체 재료로서의 적용성을 평가하는데 그 목적이 있다.

2. Sand mat 설계기준

연약지반 상에 포설되는 샌드매트는 성토작업을 하기 위한 작업차량의 주행성(trafficability)과 지지력을 확보하

고, 지하배수 및 연약층 상부의 배수를 원활히 할 목적으로 모래 등의 재료를 포설하는 공사에 적용한다. 표 1은 한국도로공사에서 제시한 입도분포기준을 나타낸 것이며, 표 2는 포설용 모래 및 쇄석의 품질기준과 제강슬래그의 재료특성을 같이 나타낸 것이다.

3. 제강슬래그의 재료 및 환경특성

3.1 제강슬래그의 재료특성

본 연구에서 사용된 제강슬래그의 입도시험(KS F 2302)을 통한 입도분포곡선은 그림 1과 같다. 그림에서와 같이 유효입경(D₁₀)은 0.92mm이며, 균등계수 7.72이고, 곡률계수는 1.05이다.

또한 통일분류법에 의한 제강슬래그를 분류하면, 입도분포가 양호한 모래(SW)로 분류되며, 액·소성한계시험(KS F 2303)결과는 비소성(NP)으로 나타났다. 그리고 다짐시험(E다짐 : KS F 2312)결과 그림 2와 같이 최대건조밀도 25.09kN/m³이고, 최적함수비 11.0%이다. 그리고 대

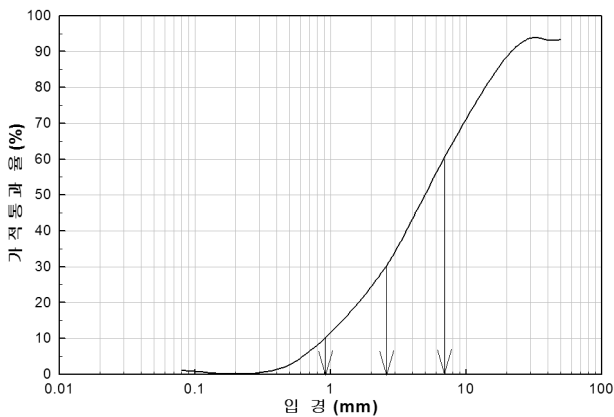


그림 1. 제강슬래그의 입도분포곡선

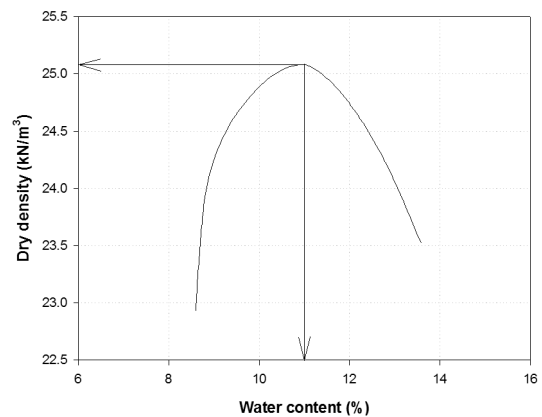


그림 2. 제강슬래그의 다짐곡선

표 3. 용출시험결과

물질 (단위 : mg/kg)	토양환경보전법시행규칙 [별표3][가지역] ^{*2}	폐기물관리법 (폐기물공정시험법)	미국EPA (TCLP방법)	순환골재품질기준 (복토용) ^{*2}	제강슬래그 40mm이하	판정
pH	-	-	-	-	-	-
유기물	-	-	-	1.0	검출안됨	○
구리(Cu)	50	3.0	-	50	검출안됨	○
카드뮴(Cd)	1.5	0.3	1.0	1.5	검출안됨	○
납(Pb)	100	3.0	5.0	100	검출안됨	○
수은(Hg)	4	0.005	0.2	4	검출안됨	○
6가크롬(Cr ⁶⁺)	4	1.5	5.0	4	검출안됨	○
테트라클로로에틸렌(PCE)	4	0.1	-	4	검출안됨	○
시안(CN ⁻)	2	1.0	-	2	검출안됨	○
트리클로로에틸렌(TCE)	8	0.3	-	8	검출안됨	○
비소(As)	6	1.5	-	6	검출안됨	○
유기인화합물	10	1.0	-	10	검출안됨	○
아연(Zn)	300	-	-	300	-	-
니켈(Ni)	40	-	-	40	-	-
불소(F)	400	-	-	400	-	-

*1택지개발지구의 특성을 감안하여 가지역을 기준으로 함. *2건설교통부(2005).

형직접전단시험결과, 제강슬래그의 강도정수는 $\phi=43.26^\circ$ 이고, $c=34.32kPa$ 이다.

정수위투시험(KS F 2322)결과, 제강슬래그는 $3.0 \times 10^2 cm^2/sec$ 로서 일반적인 모래와 비교하여 보다 큰 값을 나타내고 있으며, 표 2에서와 같이 제강슬래그의 입도는 샌드매트(쇄석)재료의 설계기준을 만족한 것으로 평가되었다.

3.2 제강슬래그의 환경특성

제강슬래그는 물과 접촉시 화학반응에 의해 유해물질이 검출될 수 있다. 따라서 샌드매트 대체 재료로서 활용하기 위해서는 유해물질의 용출이 되지 않아야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 용출시험을 실시하였으며, 시험결과는 표 3과 같다. 용출시험결과 국내외 각종 기준을 만족하는 것으로 샌드매트 대체 재료로 활용할 경우 주변 환경피해는 미미할 것으로 판단된다.

4. 실내모형실험 및 결과분석

4.1 실험장치 및 재료

모형실험장치는 그림 3과 같이 모형토조, 재하대, 재하장치, 다중체낙하장치, Data Logger 등으로 구분할 수 있으며, 평면변형조건으로 실험할 수 있는 장치이다. 토조크

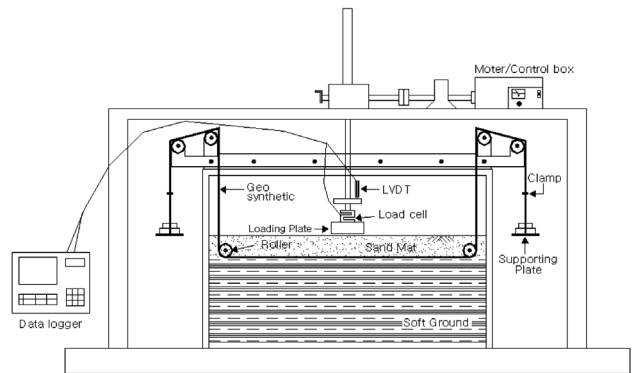


그림 3. 모형재하실험장치

기는 폭 120cm, 길이 30cm, 최대높이 70cm이며, 토조의 양 측벽은 2cm두께의 투명아크릴을 사용하여 제작하였으며, 실험 중 측면에서 발생하는 마찰저항을 없애기 위하여 실리콘 그리스를 사용하였다. 그리고 인위적으로 토목섬유에 인장력을 가해 줄 수 있는 장치를 부착하여 미리 토목섬유에 소정의 인장력이 가해진 상태에서의 재하실험을 할 수 있도록 하였다. 재하판의 규격은 10×29cm(가로×세로)를 사용하였고, 재하실험은 재하하중 및 침하를 동시에 측정하였으며, 하중재하속도는 약 1mm/min으로 하였다.

모형지반 제작 시 사용한 재료는 여수시 울촌 공단 현장 내에서 채취한 준설패립토를 사용하였다. 모형실험은 매번 같은 실험조건을 만들기 위해 동일한 조건의 연약지반을 조성해야 한다. 모형지반제작은 준설패토를 이용하였으

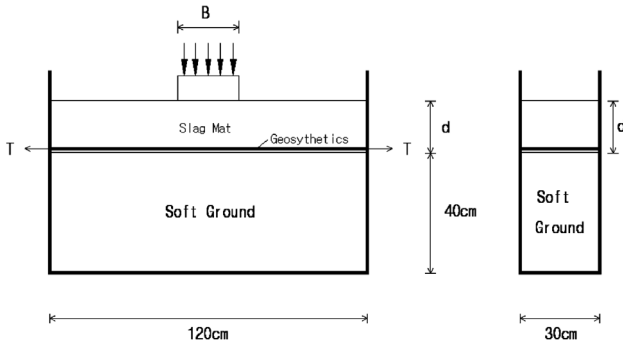


그림 4. 실험조건 모식도

며, 모형지반은 100% 함수비가 되도록 물을 첨가 또는 자연건조시킨 후 교반기를 이용하여 시료가 슬러리상태가 되도록 1시간정도 교반시켜 제작하였다. 그리고 인위적으로 조제된 시료를 모형토조에 투입하여, 모형토조내에 연약지반을 40cm의 높이로 제작한 후 약 3일정도 안정화시킨 후 실험조건에 따라 재하실험을 실시하였다. 이때 모형토조내 수분증발을 방지하기 위해 토조상부에는 비닐덮개를

를 이용하였다. 토목섬유 보강재는 직포 5kN/m를 이용하였으며, 샌드매트는 주문진 표준사와 제강슬래그를 이용하였다. 준설매립토의 물리적 특성과 토목섬유의 제품특성 및 주문진 표준사의 특성은 다음 표 4, 표 5, 표 6과 같다. 특히 샌드매트는 모형지반의 상대밀도를 90%로 조성하였으며, 제강슬래그의 경우 현장매립특성을 고려하여 80%로 모형지반을 제작하였다.

4.2 실험내용 및 조건

실내모형토조 실험은 재하판의 폭, 샌드매트와 슬래그 층의 두께, 토목섬유의 구속인장력, 토목섬유 보강 유·무 등을 변수로 하여 실내실험을 실시하였다. 모형실험은 표 7과 같이 크게 5가지 종류로 분류할 수 있다. 연약지반 상 재하조건과 연약지반 상 토목섬유를 포설한 후 재하 하는 조건 그리고 샌드매트와 슬래그매트를 포설한 후 재하 하는 조건 등 총 5가지의 경우로 구분하여 실시하였다.

표 4. 준설토의 물리적 특징

구분	비중	액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수 (%)	# 200번 체통과량(%)	흙의 분류 (USCS)
준설토	2.69	39.2	17.0	22.2	98	CL

표 5. 토목섬유의 물리적 특성

종류	특성	중량 (g/m ²)	재질	비중	인장강도 (kN/m)	인장신도 (%)	투수계수 (cm/s)
직포		150	Polyester	1.36	50	10~30	10~4

표 6. 주문진 표준사의 물리적 특성

시료종류	물리적특성	비중	최대밀도 γ_{dmax} (kN/m ³)	최소밀도 γ_{dmin} (kN/m ³)	흙의 분류 (USCS)	모형지반 상대밀도 (%)
주문진 표준사		2.67	16.54	13.98	SP	90

표 7. 모형실험조건

실험종류	매트종류	재하폭(cm)	매트두께(cm)	상대밀도(%)
Test 1	무보강			
Test 2	Sand	B=10cm	d=5cm	90
Test 3	Sand	B=10cm	d=10cm	90
Test 4	Sand	B=10cm	d=15cm	90
Test 5	Sand	B=10cm	d=20cm	90
Test 6	Slag	B=10cm	d=5cm	90
Test 7	Slag	B=10cm	d=10cm	90
Test 8	Slag	B=10cm	d=15cm	90
Test 9	Slag	B=10cm	d=20cm	90

4.3 실험결과 및 분석

4.3.1 모형재하실험결과

실내모형실험은 샌드매트 대체 재료로서 제강슬래그가 포설된 매트 지지력 특성을 파악하기 위해 모형재하실험을 수행하였다. 본 연구에서는 재하판 폭의 30%가 침하했을 때의 지지력을 극한지지력이라 가정하여, 실험결과를 분석하기로 하였다. 즉, $q_u = q_{0.3}$ 으로서 재하판의 크기가 10cm 경우에는 3cm의 침하가 일어날 때의 지지력을 q_u 라 칭하였다. Terzaghi(1943)에 의하면 얇은기초의 극한 지지력은 침하량이 기초폭에 대해서 4~10% 범위에서 발생되며, 이러한 조건은 지반의 전반 전단파괴가 성립한다. 그리고 연속기초 또는 띠기초(strip foundation)가 국부전단파괴나 관입전단파괴가 발생하는 경우 극한지지력은 침하량이 기초폭(B)의 15~25%범위에서 발생된다고 하였다. 일반적으로 현장에서 얇은기초의 침하량은 상기의 침하량 범위에서 발생하게 된다.

따라서 본 연구에서는 극한지지력 선정 시 침하량이 기초폭의 30%에서 발생된다고 결정한 이유는 기초가 평면변형이 발생하는 연속기초의 형태이고, 기초지반이 실내

실험용으로 실제 현장보다 기초지반의 지지력이 상당히 적게 유발된다는 가정하에 이루어진 것이다.

그림 5는 무보강조건과 샌드매트가 각각 5cm, 10cm, 15cm, 20cm일 경우, 침하에 따른 지지력을 나타낸 것이다. 초기에 약간의 곡면부가 형성되었으나 대부분 침하의 증가와 더불어 지지력도 계속 직선적으로 상승하는 경향을 보였다. 그리고, Sand-Mat 두께가 클수록 큰 지지력을 나타내어 Sand -Mat의 두께가 클수록 응력의 분산효과가 크다는 것이 잘 설명되고 있음을 알 수 있었다. 그리고 그림 6은 슬래그매트가 각각 5cm, 10cm, 15cm, 20cm일 경우, 침하에 따른 지지력을 나타낸 것이다. 슬래그 매트가 10cm까지는 샌드매트와 유사한 경향을 보이고 있으나, 샌드매트 두께가 15cm, 20cm일 경우에는 지지력이 크게 증가하였다. 이는 재하판의 폭 10cm보다 클 경우에는 즉 포설비(d/B :샌드매트 포설두께/ 재하판 폭)가 1.0보다 클 경우에는 지지력이 크게 증가하고 있다. 또한 파괴형태는 관입파괴가 아닌 전반전단파괴를 형태를 띄고 있다. 사진 1은 샌드매트 모형실험 후 지반변형이 발생한 형태를 나타내고 있으며, 사진 2는 슬래그매트 모형실험 후 지반변형이 발생한 형태를 나타내고 있다. 특히 슬래그매트에서는

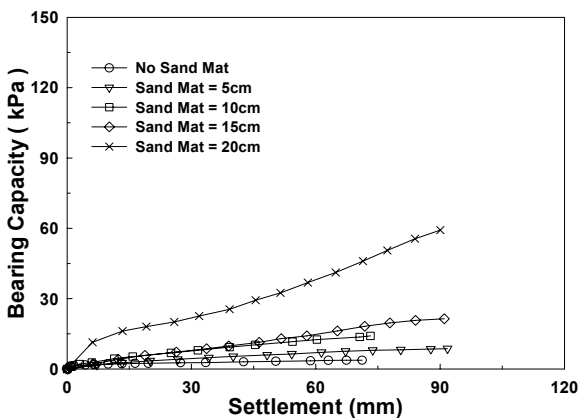


그림 5. 샌드매트 두께에 따른 지지력과 침하관계

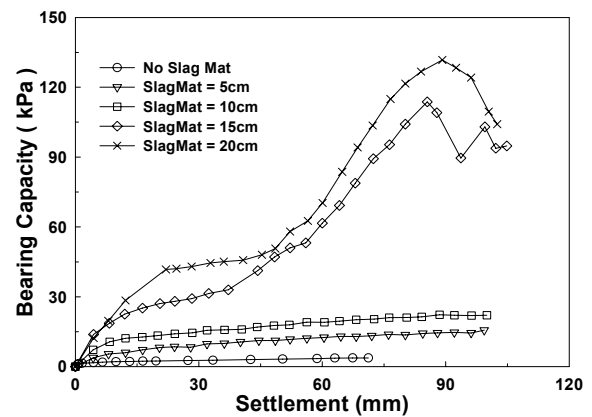


그림 6. 슬래그매트 두께에 따른 지지력과 침하관계



사진 1. 샌드매트 모형실험 후(d=15cm)



사진 2. 슬래그매트 모형실험 후(d=15cm)

샌드매트보다 파괴영역이 크게 증가한 것으로 지지력 증가됨을 알 수 있으며, 용기량 또한 크게 증가하였다.

4.3.2 슬래그매트 시스템의 지지력 증가효과

연약지반을 보강하는 방법 중에서 샌드매트 시스템은 가장 효과적인 방법에 속하며, 샌드매트 시스템이 실제 현장에서 자주 사용되고 있다. 무보강 원지반의 지지력(q_{u0})에 따른 각 단계별 지지력증가율 즉 지지력비(BCR, Bearing Capacity Ratio)를 구하였다. 앞장에서도 명시한 바와 같이 극한지지력은 재하판폭의 30%가 침하했을 때의 지지력으로 가정하였다. 즉, 샌드매트로 보강할 때의 극한지지력을 q_{u1} 이라 정의하였으며, 슬래그 매트를 보강할 때의 극한지지력을 q_{u2} 라 정의하였다. 그리고 샌드매트를 보강한 경우에 지지력비를 BCR_{sm} , 슬래그매트를 보강한 경우에 지지력비를 BCR_{ss} 로 표시하고, 다음 식과 같이 정의하였다.

$$BCR_{sm} = \frac{q_{u1}}{q_{u0}} \quad (1)$$

$$BCR_{ss} = \frac{q_{u2}}{q_{u1}} \quad (2)$$

표 8은 재하폭 B=10cm이고, 샌드매트와 슬래그매트의

두께(d)에 따라 지지력비를 분석한 것이다. 표에서와 같이 슬래그매트의 경우 포설두께가 증가할수록 지지력은 크게 증가하였다. 그리고 슬래그매트의 지지력은 무보강지반과 비교하여 지지력비가 1.179~5.743범위로 크게 증가하였으며, 샌드매트보다 슬래그매트의 지지력은 전반적으로 10%에서 90%까지 증가하였다. 특히, 매트의 포설두께가 재하폭보다 클 경우 지지력 증가현상은 더욱 뚜렷하게 증가하고 있다.

4.3.3 슬래그 매트의 지지력식 제안

그림 7과 8은 포설비(d/B : 샌드매트 포설두께/ 재하판폭)에 따른 지지력을 도시한 것이며, 그림에서와 같이 포설비가 증가할수록 지지력은 크게 증가하였다. 그리고 샌드매트와 슬래그매트 시스템의 모형실험결과로부터 포설비(d/B)에 따른 극한지지력의 관계를 회귀분석하여 도시하였다. 회귀분석결과 실내모형실험결과로부터 얻은 실험식은 식 (3), (4)와 같다. 본 실험식은 아래 식과 같이 적용범위가 제한적이지만, 샌드매트 설계시 장비의 주행성을 판단하기 위한 기초자료로 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

$$q_{u1} = 10.49 \, d/B + 3.43 \quad (0.5 \leq d/B \leq 2.0) \quad (3)$$

$$q_{u2} = 23.83 \, d/B - 5.20 \quad (0.5 \leq d/B \leq 2.0) \quad (4)$$

표 8. 샌드매트와 슬래그매트의 두께에 따른 지지력비 분석

매트두께(d)	지지력비(BCR)		비 고
	BCR_{sm}	BCR_{ss}	
5cm	1,064	1,179	q_{u0} : 무보강 토목섬유 지지력 q_{u1} : 샌드매트 보강지지력 q_{u2} : 슬래그매트 보강지지력
10cm	1,769	2,025	
15cm	2,833	3,923	
20cm	3,000	5,743	

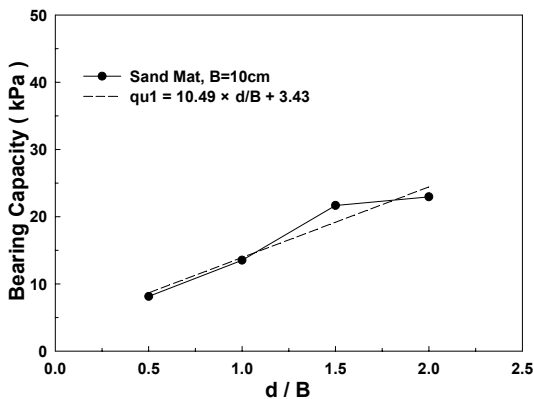


그림 7. 샌드매트의 포설비와 지지력 관계

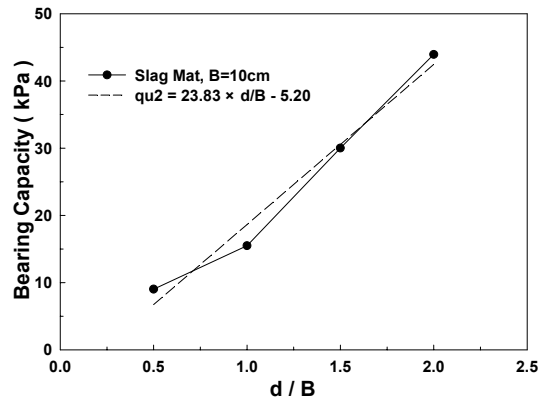


그림 8. 슬래그매트의 포설비와 지지력관계

여기서, q_{u1} : 샌드매트 시스템의 극한지지력
 q_{u2} : 슬래그매트 시스템의 극한지지력
 d/B : 샌드층의 두께를 재하판 폭 B 로 나눈 값

상기 식으로부터 샌드매트와 슬래그매트 시스템에 대한 지지력식을 제안하였으며, 이 식을 이용하여 샌드매트와 슬래그매트의 극한지지력을 구할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 연약지반 개량 시 샌드매트의 대체 재료로 제강슬래그의 사용가능 여부와 현장적용 시의 모래와의 비교를 통한 대체가능성에 대해 알아보았으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 제강슬래그는 환경 및 각종 품질기준에 적합하므로 연약지반 상 샌드매트의 대체 재료로 현장적용이 가능하다.
- (2) 슬래그매트의 지지력은 무보강지반과 비교하여 지지력비가 1.179~5.743범위로 크게 증가하였으며, 샌드매트보다 슬래그매트의 지지력은 전반적으로 10%에서 90%까지 증가하였다. 이와 같이 슬래그매트를 수평배수재로 활용할 경우 장비 효율성 증가와 재료비 절감에 따른 원가절감에 기여할 수 있다.

- (3) 샌드매트와 슬래그매트 시스템에 대한 지지력식을 제안하였으며, 샌드매트 설계시 장비의 주행성을 판단하기 위한 기초자료로 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 추후 본 연구에서 해결하지 못한 장기적인 백탁수에 대한 연구는 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 중소기업 R&D 기획지원사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 송성섭 (2003), *제강슬래그의 연약지반개량 수평배수재료의 활용성에 관한 연구*, 석사학위논문, 부산대학교.
2. 신은철, 이운현, 유정훈 (2009), “풍쇄 슬래그를 이용한 샌드매트 대체재 개발에 관한 연구”, *한국토목섬유학회 논문집*, 제8권, 제2호, pp.55-62.
3. KS F 2302 (2002), *흙의 입도 시험 방법*.
4. KS F 2303 (2000), *흙의 액성한계·소성한계 시험 방법*.
5. KS F 2312 (2001), *흙의 다짐 시험 방법*.
6. KS F 2322 (2001), *흙의 투수 시험 방법*.
7. Terzaghi (1943), *Theoretical soil mechanics*, John Wiley & Sons.

(논문접수일 2012. 1. 4, 심사완료일 2012. 3. 20)