

## 슬래그 다짐말뚝의 원심모델링 Centrifuge Modelling of Slag Compaction Pile

유 남 재\*      박 병 수\*\*      정 길 수\*\*\*      이 명 욱\*\*\*\*  
Yoo, Nam-Jae    Park, Byung-Soo    Jeong, Gil-Soo    Lee, Myung-Woog

### Abstract

This paper is experimental and numerical research results of performing centrifuge model tests to investigate the geotechnical engineering behavior of slag compaction pile as a substitute of sand compaction pile.

In order to find the geotechnical engineering characteristics of the soft clay and the slag used in centrifuge model experiments, basic soil property tests, consolidation test, permeability tests and triaxial compression tests were performed.

For centrifuge model tests, slags with changing relative density were used and their bearing capacity, stress concentrations in between pile and soft clay, settlement characteristics, and failure modes were investigated.

As a results of centrifuge model tests, it was found that the bearing capacity of model was increased with increasing density of slag pile and general shear failures were occurred.

Miniature soil pressure gauges were installed on model pile and soft ground respectively and thus vertical stresses acting on them were measured. Stress concentration ratio was found to be in the range of 2.0~3.0.

Bearing capacity obtained from the model test with slag was greater than that from the model test with a sand having the identical layout to each other. Thus it was confirmed the slag was an appropriate substitution of pile for sand.

키워드 : 슬래그다짐말뚝, 복합지반, 응력분담비, 치환율

Keywords : *Slag Compaction Pile, Composite Ground, Stress Concentration ratio, Area Replacement Ratio*

### 1. 서 론

샌드컴팩션파일 공법은 큰 지름을 가진 모래다짐말뚝을 지중에 조성하여 느슨한 사질토 지반이나 연약 점성토 지반을 개량하는 공법이다. 사질토 지반에서 사용하는 경우 지진이나 진동시의 액상화

방지, 다져진 모래기둥과 함께 지반의 강도를 증가시켜 기초의 지지력을 향상 시키며, 축조물에 생기는 전침하량을 억제하고 불균질한 지반을 균일하게 하여 부등침하를 감소시킬 수 있다. 또한, 연약 점성토 지반에서는 압입된 모래기둥에 의해 연약층이 치환되고 조성된 모래기둥군과 점성토를 포함한 복합지반이 형성되므로 지반의 전단강도 증가 및 지지력 증가, 활동과괴의 방지, 전침하량, 부등침하량의 감소 등의 효과를 목적으로 한다.

SCP공법이 하나의 지반개량공법으로 발전된 것은 1955년 일본에서 특허권을 등록한 일에서 시작되며(Miyake 등, 1991), 모래다짐말뚝이 적극적으로 활용된 것은 1957년 충격식 모래다짐말뚝이며 이후,

\* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사  
\*\* 강원대학교 토목공학과 연구원 공학박사  
\*\*\* 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정  
\*\*\*\* 동해대학교 건설공학부 전임강사, 공학박사

1959년 진동기의 개발로 바이브로식 모래다짐말뚝 공법이 개발되어 시공능률과 모래말뚝 조성의 자동 관리로 인하여 수중시공이 가능하게 되었고, 진동식을 이용하는 현재공법의 기초가 확립되었다(Mikasa 등, 1984). 이후, 1966년 일본운수성에서 강제치환공법이 개발되어 해상시공에도 적용되기 시작하였다(Matsuo, 1967). 국내의 경우 1984년 광양제철소 기초지반 조성시 샌드드레인과 SCP공법을 병용하여 연약지반개량을 실시한 이래 최근의 경우 모래다짐말뚝공법이 호안 안벽 시설물의 효과적인 기초 처리 공법으로 제시되고 있다(해양수산부, 1999). 국내에서 적용 가능성이 증가할 것으로 예상되는 SCP공법은 국외, 특히 일본의 시공 실적이나 미국 및 유럽의 쇄석공법 사용 실적에 비하여 시공 실적이 매우 적은 편이며, 대부분의 시공이 육상 시공에 한하여 수행된 반면에 해상의 연약 점성토 지반에서 그 적용 사례는 매우 적은 실정이다.

그러나, 각종 토목공사로 인해 천연 골재량이 점점 고갈되어 감에 따라 이를 대체할 새로운 재료가 필요하게 되었다. 말뚝재료인 양질의 모래를 구하기 어렵거나 개량말뚝 자체에 큰 강도를 얻기 위해 자갈 또는 쇄석을 사용하기도 한다. 최근, 자원의 재활용에 대한 연구중, 슬래그의 건설용 골재활용에 관한 연구가 활발히 진행중에 있다. 한편, 슬래그는 고로슬래그와 제강슬래그로 분류되는데, 고로슬래그는 현재 국내에서 가장 많이 발생되고 있으나 거의 전량이 활용되고 있고, 제강 슬래그는 60% 정도는 재활용되고 있으나 나머지 40%정도는 매립되고 있는 실정이다(제강슬래그협회, 2000).

따라서, 본 연구에서는 연약지반개량을 위해 말뚝의 재료로 모래 대신 제강슬래그를 사용한 제강슬래그 다짐말뚝에 대한 원심모형실험을 실시하여 동일한 치환율에서 적절한 상대밀도에 따른 지지력 및 응력분담특성, 변형·파괴모드를 알아보고자 하였다.

## 2. 치환율 및 응력분담비

치환율( $a_s$ )이란 그림 1에 나타난 바와같이 원지반 면적을 1.0으로 한 모래말뚝의 단면적 비율로써 원지반 면적과 모래말뚝이 차지하는 부분의 면적비로 정의된다. 일반적으로 모래나 육상의 점성토 지반을 개량할때는 0.4이하, 해상의 점성토 지반을 개량할때는 0.15~0.8의 범위로 하는 경우가 많다. SCP공법은 연약지반에 모래다짐말뚝을 타설하여 원지반과 모래말뚝의 복합작용에 의한 지반의 지지력증대, 침하의 감소를 기대하는 공법으로서 복합지반에서 상재하중이 재하되는 경우 모래말뚝과 원지반의 변형특성으로 모래말뚝 사이에 아칭(arching) 현상이 발생하게 된다. 즉, 그림 2와 같이 변형이

작은 모래말뚝에 원지반보다 큰 응력이 집중하게 되고, 연약층이 그 나머지를 분담하게되며 이 응력의 비를 응력분담비( $n$ )라 한다.

$$n = \frac{\sigma_s}{\sigma_c} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_s$  = 상재하중에 의한 모래말뚝에 발생하는 연직응력

$\sigma_c$  = 상재하중에 의한 점토에 발생하는 연직응력

복합지반은 하중재하시 전단응력과 압축응력이 작용하게 되고, 전단변형과 압밀변형으로 인한 응력집중이 복합하여 연약층의 압밀이 진행됨에 따라 응력분담이 달라지며, 응력분담에 미치는 영향 인자가 불명확하게 된다. 그러므로 응력분담비는 실제 현장경험에 의존하여 2~6(보통 3)범위 안에서 결정하고 있다.

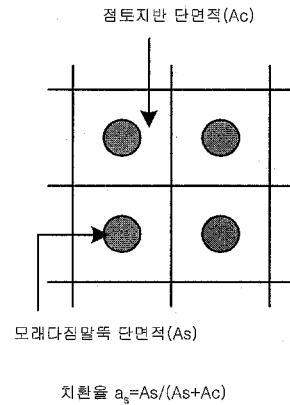


그림 1. 치환율

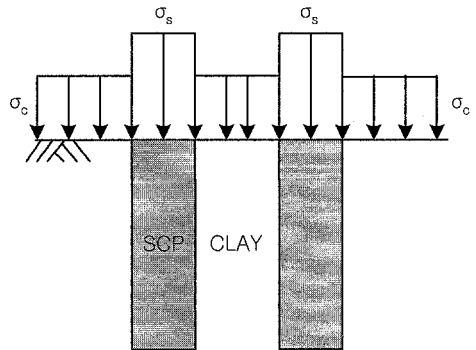


그림 2. 응력분담비

### 3. 실내실험

슬래그다짐말뚝의 지지력 특성 및 응력분담특성, 파괴메카니즘등을 규명하기 위하여 점토와 슬래그의 기본물성실험과 역학시험등의 기초시험과 상대밀도를 변화시킨 원심모형실험을 실시하였다.

모형 점토지반을 모사하기 위하여 남해안과 서해안일대 3개 지역에서 채취한 시료를 혼합하여 사용하였고, 해성점토와 슬래그의 기본물성실험결과를 표 1에 나타내었다.

표 1. 슬래그와 점토의 기본물성

Test		Slag	Clay
Specific Gravity (Gs)		3.49	2.72
Results of Consistency Test	LL, %	NP	43.0
	PL, %	NP	23.6
	PI, %	NP	20.6
Grain Size Distribution	Cu	21	12.5
	Cc	2.8	3.6
	USCE	SW	CL

한편, 슬래그다짐말뚝의 상대밀도를 결정하기 위하여 최대, 최소단위중량시험을 실시하였다. 최대 단위중량시험은 그림 3에 나타낸 바와같이 직경 15cm, 높이 35cm의 몰드에 일정중량의 시료를 넣고 10 kN/m<sup>2</sup>의 상재하중을 올려놓은후 진동대를 이용하여 50Hz 조건으로 8분이상 진동을 가한다음 체적을 측정하여 최대단위중량을 계산하였다.

최대, 최소단위중량시험결과를 표 2에 나타내었다.

SCP공법은 점토와 슬래그말뚝의 복합지반으로 형성되어 있기 때문에 슬래그말뚝의 강도, 치환율( $a_s$ ), 개량폭비(W/B), 기초와 개량범위의 위치관계, 모래말뚝의 착저조건, 원지반의 강도분포, 외력조건, 압밀조건, 하중의 재하속도, 대상구조물의 종류와 기하학적 형상 등 다양한 요인에 의해 영향을 받으나 본 연구에서는 상기의 제 요인중에서 슬래그말뚝의 상대밀도를 50, 70, 90%로 달리하여 원심모형 실험을 실시하였다.

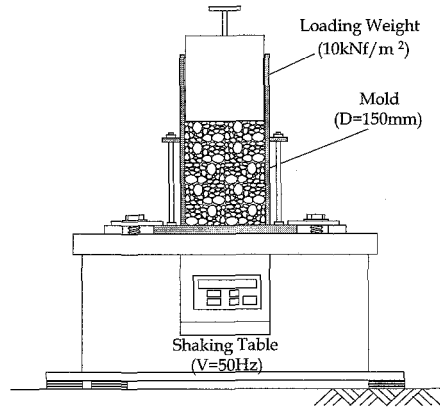


그림 3. 최대 단위중량시험 개요

표 2. 슬래그의 건조단위중량

시 험	상대밀도(%)		
	50	70	90
최대 건조단위중량 $r_{dmax}$ (gf/cm <sup>3</sup> )	2.301		
최소건조단위중량 $r_{dmin}$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1.769		
건조단위중량 $r_d$ (gf/cm <sup>3</sup> )	2.0	2.11	2.23
최대간극비 $e_{max}$	0.973		
최소간극비 $e_{min}$	0.517		

#### 3.1 원지반 성형

모형지반에 사용된 시료는 부산인근에서 채취한 해성점토로서 시료를 액성한계 2배의 함수비로 교반시켜 압밀토조(폭 20mm, 길이 450mm, 높이 400mm)에 투기한후, 압밀토조 상부에 0.05, 0.1, 0.2 kgf/cm<sup>2</sup>의 공기압력을 단계적으로 가하여 7일 정도 예비압밀을 실시하여 예비압밀완료후 20cm 높이의 원지반을 조성하였다.

#### 3.2 슬래그다짐말뚝의 성형

슬래그다짐말뚝은 원통형 관(내경 2cm)에 일정한 함수비의 슬래그를 투입하여 진동대위에서 소정의 상대밀도를 갖는 슬래그말뚝을 만든후 물로 포화시

켜 동결하였다.

### 3.3 복합지반의 성형 및 계측기 설치

복합지반은 예비압밀이 종료된 원지반을 탈착하여 원심모형토조에 부착한후 50G의 원심력장에서 자중압밀을 실시하여 실물규모 10m에 상당하는 높이 약 20cm의 정규압밀 점토지반을 제작하였으며 이때, 점토층 중심부에 간극수압계를 매설하여 과잉간극수압의 소산을 확인하였다.

자중압밀 종료후 1G상태에서 슬래그말뚝을 타설한후, 하중재하시 기초 및 지반에 발생하는 연직변위량 및 수평 변위량을 측정하기 위하여 변위계를 설치하였고, 슬래그말뚝과 점토지반의 응력분담비를 알아보기 위하여 슬래그다짐말뚝과 점토지반의 표면에 직경 6.5 mm의 토압계를 매설하는 한편, 점토층 중간 깊이에서 개랑지반의 외각으로부터 1cm, 4cm, 9cm위치에 간극수압계를 매설하여 위치별 과잉간극수압 변화를 측정하였다.

### 3.4 Marker

연직하중 재하에 따른 모형지반의 활동선을 관찰하기 위하여 원심모형시험기에서 자중압밀 완료후 모형토조의 전면 벽체를 탈착하여 일정 격자상에 Marker를 매설하여 활동선을 관찰하였다.

### 3.5 연직하중재하장치

연직하중의 재하는 그림 4에 도시한 바와 같이 연직하중 계측용 로드셀(Load Cell)을 매개체로 하여 하중재하 장치 로드셀에 강결하여 재하중위 재하판의 회전 및 수평변위를 구속하고 있는 하중재하 장치를 사용하여 2mm/min. 으로 하중을 재하하였다. 하중재하판은 70×200mm에서 저면을 거칠게 만들고 개랑지역 중앙의 3열의 슬래그말뚝을 재하하는 위치에 설치한다.

## 4. 결과분석

### 4.1 하중-침하 특성

슬래그 말뚝의 상대밀도 변화가 하중-침하에 미치는 영향을 알아보기 위하여 상대밀도를 50, 70, 90%로 변화시키고 치환율 40%, 개랑폭비 2의 실험 조건하에서 연직재하실험을 실시하였다.

그림 5는 모형기초의 하중-침하 곡선을 나타내고 있다. 상대밀도 변화에 따른 실험결과와 수치해석

결과를 비교 도시하였다. 그림에 나타낸 바와같이 수치해석 결과가 실험결과보다 다소 크게 나타났으나 전반적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 전반적으로 슬래그의 상대밀도 증가에 따라 하중-침하 곡선의 초기기울기와 극한지지력 값은 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 슬래그의 상대밀도증가에 따라서 강성도 및 전단강도가 증가한 것에 기인한다.

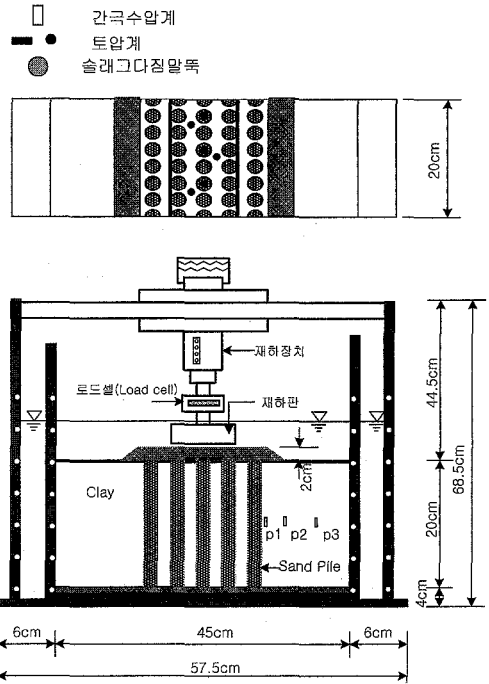


그림 4. 연직하중 재하시험 모식도

한편, 슬래그의 모래대체 재료로서의 적용성을 확인하기 위하여 동일한 조건(상대밀도 90%, 치환율 40%, 개랑폭비 2)에서 실험한 모래말뚝에 대한 하중-침하 곡선도 같이 도시하였다. 그림에 보여진 바와같이 모래말뚝의 극한값은 약 0.47 kgf/cm<sup>2</sup>로 슬래그의 약 0.61 kgf/cm<sup>2</sup>에 비교할 때 슬래그의 극한지지력이 약 30%정도 크게 나타났다. 따라서, 연약지반의 개랑공법으로 사용되는 샌드드레인, 모래다짐말뚝 공법은 압밀촉진 효과는 있으나 수평지진하중에 대한 저항력이 약하고 수직하중에 대하여 지지말뚝으로서의 역할을 할 수 없는 경우에 모래대체 재료로 사용한 슬래그 말뚝은 경제성과 시공성인 측면에서 효과가 있을 것으로 보여진다. 그러나 제강슬래그의 시간경과에 따른 투수계수가 감소하는 경향이 있으므로 그의 배수제로써 통수능 기능에 대한 적합성에 관한 연구와 환경에 미치는

영향에 대한 연구의 필요성이 요구된다.

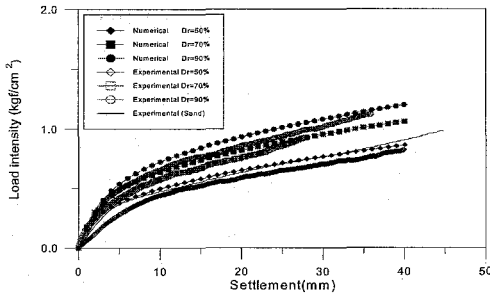


그림 5. 상대밀도 변화에 따른 하중- 침하 곡선

4.2 토압특성

그림 6은 상대밀도 50, 70, 90%의 변화에 따라 슬래그와 점토가 받는 토압을 나타낸 것이다. 그림에 보여진 바와 같이 상대밀도가 증가할수록 점토와 슬래그가 받는 토압은 증가하였으며 특히 슬래그는 강성의 증가로 인하여 점토와 비교하여 크게 증가한 것으로 나타났다. 토압분포에 의한 지반의 항복은 재하후 약 3~5mm 정도에서 항복하는 것을 볼 수 있다.

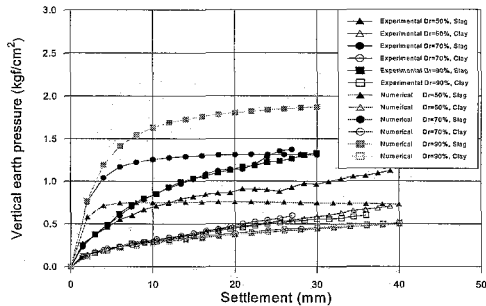


그림 6. 토압-침하 곡선

4.3 응력분담특성

그림 7은 상대밀도가 변화할 때 슬래그 말뚝과 점토지반이 받는 응력분담비의 변화를 침하량에 따라 도시하였다. 실험결과를 보면 하중을 가한 직후에는 자료의 분산이 있으나 대체적으로 응력 분담비가 2.0정도의 값에서 하중이 증가하면서 침하가 증가함에 따라 상대밀도 70%와 90%인 경우에는 응력분담비가 다소 증가하여 3.0의 값을 갖다가 감소하는 경향이 있는 반면에 상대밀도 50%인 경우에

는 응력분담비가 2.0의 값에서 침하가 증가하면서 점진적으로 감소하여 1.5정도의 값에 수렴함을 알 수 있다. 전반적으로 슬래그 다짐 말뚝의 상대밀도가 증가할수록 응력분담비는 증가하는 경향을 나타내며 하중이 증가할수록 침하량이 증가함에 따라 응력분담비는 감소하는 경향을 보인다. 수치해석결과를 보면 침하량이 증가함에 따라 응력분담비는 감소하는 경향을 현저히 나타내었는데, 이러한 경향성은 모래다짐말뚝에서도 나타난 것으로 침하량이 증가함에 따라 슬래그말뚝이 받고있던 응력이 점토로 전이됨에 따라 응력분담비가 감소하는 것으로 보여진다. 이와 같은 현상은 강성의 슬래그 말뚝에서 집중된 기초 하중응력이 하중 증가에 따라 말뚝의 수평변위 발생으로 강성도가 감소되면서 응력의 분산이 발생함에 따른 것으로 판단된다. 상대밀도 50%일 때 실험에서 측정된 응력분담비와 수치해석 결과가 침하량 10cm 이후 잘 일치하는 것으로 나타났으나 상대밀도 70, 90%에 대한 것은 많은 차이를 보였다.

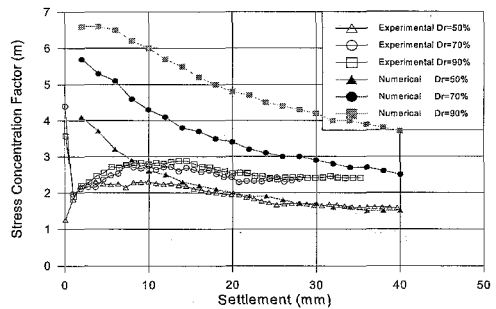


그림 7. 침하-응력분담비 곡선

4.4 응력집중계수, 응력감소계수

그림 8, 9에 응력집중계수와 응력감소계수를 나타내었다. 응력집중계수는 침하량에 따라 감소하는 경향성을 나타내어 응력분담비의 경향과 매우 유사한 경향을 나타내었고, 실험으로부터 획득한 응력감소계수는 약 0.5~0.8의 범위로 밴드형태로 일정한 값을 유지하고 있으며 수치해석에 의한 응력감소계수는 실험값보다는 다소 낮으나 0.4 ~0.5의 값사이에 분포하였다.

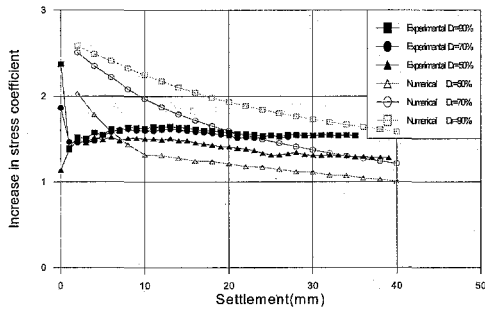


그림 8. 침하-응력집중계수

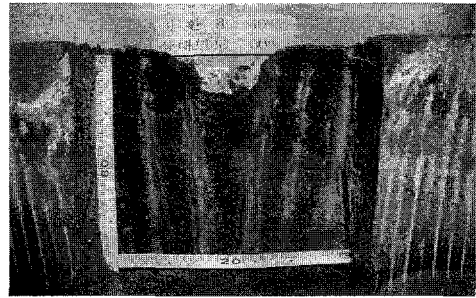


그림 10. 슬래그말뚝의 파괴형태(Dr=50%)

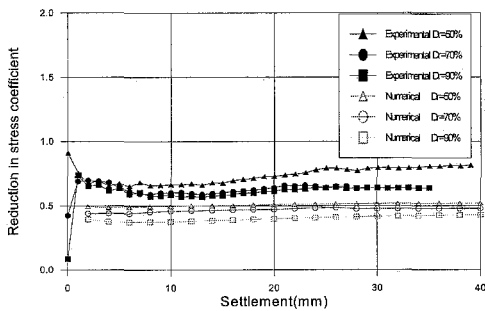


그림 9. 침하-응력감소계수

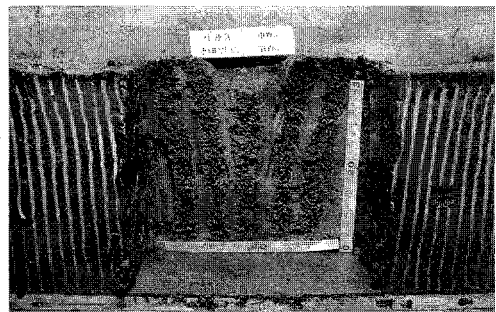


그림 11. 슬래그말뚝의 파괴형태(Dr=70%)

#### 4.5 변형특성 및 파괴메카니즘

그림 10 ~ 12는 상대밀도 50, 70, 90%에 대한 슬래그말뚝의 연직재하시험 종료후 모형지반을 해체하여 촬영한 지반의 변형상태이다.

하중재하로 인하여 기초판이 복합지반에 관입됨에 따라 지표부근의 말뚝이 좌, 우 수평력이 발생하여 하부지반과 비교할 때 좌, 우로 지반의 수평변위가 발생하였음을 관측할수 있다. 또한, 재하판 아래 슬래그말뚝 상부로부터 약 2D~3D깊이에서 말뚝의 전단활동선이 명료하게 나타났다.

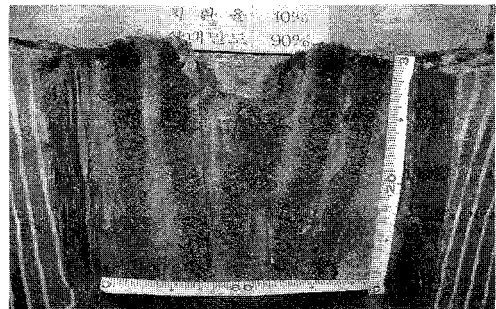


그림 12. 슬래그말뚝의 파괴형태(Dr=90%)

#### 5. 결론

- 1) 슬래그 말뚝의 상대밀도가 50, 70, 90%로 증가할수록 항복하중강도는 각각 0.44, 0.48, 0.61 kgf/cm<sup>2</sup>으로 증가하였다.
- 2) 상대밀도 90%에 대한 모래다짐말뚝과 슬래그다짐말뚝의 원심모형실험결과, 슬래그 다짐말뚝의

항복하중강도가 모래다짐말뚝보다 약 30%정도 크게 나타나 모래테체 재료로서 효과가 있을 것으로 보여진다.

- 3) 재하시험 종료후 파괴상태를 확인한 결과, 말뚝 상부로부터 2D~2.5D 깊이에서 말뚝의 명료한 전단면이 발생하였으며, Marker에 의한 활동선을 관찰한 결과 국부전단파괴가 발생하였음을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] 제강슬래그협회, “제강슬래그 항만공사용 이용 안내서”, 포항종합제철, 2000.
- [2] 해양수산부, “대수심방파제 및 연약지반 관련기술(II)”, 해양수산부, 1999.
- [3] Matsuo, M., “Stability analysis of clay improved with sand piles”, *Tsuchi to Kiso*, Vol.15, No.12, pp.27~35, 1967.
- [4] Mikasa, N., Takada, N., Ohshima, A., Kawamoto, K., and Higashi, S., “An Experimental Study on The Stability of Clay Ground Improved by Sand Compaction Piles”, *Proc. of JSSMFE Symposium on the Strength and Deformation of the composite Ground*, pp.113-118, 1984.