

## 뒷채움재로 이용한 고로 수쇄슬래그의 토압특성에 관한 실험적 연구

### A Study on Earth Pressure Properties of Granulated Blast Furnace Slag Used as Back-fill Material

백 원 진<sup>1</sup> Baek, Won-Jin

이 강 일<sup>2</sup> Lee, Kang-Il

#### Abstract

Granulated Blast Furnace Slag (GBFS) is produced in the manufacture process of pig-iron and shows a similar particle formation to that of natural sea sand and also shows light weight, high shear strength, well permeability, and especially has a latent hydraulic property by which GBFS is solidified with time. Therefore, when GBFS is used as a backfill material of quay or retaining walls, the increase of shear strength induced by the hardening is presumed to reduce the earth pressure and consequently the construction cost of harbor structures decreases. In this study, using the model sand box (50 cm×50 cm×100 cm), the model wall tests were carried out on GBFS and Toyoura standard sand, in which the resultant earth pressure, a wall friction and the earth pressure distribution at the movable wall surface were measured. In the tests, the relative density was set as  $D_r=25, 55$  and  $70\%$  and the wall was rotated at the bottom to the active earth pressure side and followed by the passive side. The maximum horizontal displacement at the top of the wall was set as  $\pm 2$  mm. By these model test results, it is clarified that the resultant earth pressure obtained by using GBFS is smaller than that of Toyoura sand, especially in the active-earth pressure.

#### 요 지

고로 수쇄슬래그는 선철의 제철과정에서 생산되는 부산물로서 자연 해성모래와 유사한 입자형상을 가지고 경량이며 큰 전단강도와 투수성을 나타낸다. 특히, 고로 수쇄슬래그는 시간경과와 더불어 경화하는 잠재수경성을 가진다. 따라서 고로 수쇄슬래그가 안벽이나 옹벽의 뒷채움 재료로 사용 되어졌을 때, 경화에 의한 전단강도의 증가로 토압감소가 기대되며, 결과적으로 항만구조물의 건설비용이 감소하게 된다. 본 연구에서는 모형토조를 이용하여 고로 수쇄슬래그와 Toyoura sand에 대해 토압, 벽 마찰력, 가동벽체 표면에서의 토압분포를 측정하는 모형실험을 실시하였다. 실험에서 상대밀도는 25%, 55% 및 70%로 설정하였으며 벽체는 저점을 중심으로 주동 및 수동토압측으로 회전시켰다. 벽체 상부에서의 최대 수평변위는  $\pm 2$ mm로 설정하였다. 모형실험 결과, 고로 수쇄슬래그에서 얻어진 주동토압이 Toyoura sand보다 작음을 알았다.

**Keywords :** Earth pressure, Granulated blast furnace slag, Latent hydraulic property

#### 1. 서 론

고로 수쇄슬래그(Granulated Blast Furnace Slag, GBFS)

는 선철의 제철과정에서 생성된 용융슬래그에 고압의 압력수(100~350kPa)를 분사하여 생산되는 부산물로서, 형상 및 입도분포가 천연모래와 극히 유사하다. 또

1 정희원, 일본 야마구치대학 공학부 사회건설공학과 조수 (Member, Research Associate, Faculty of Eng., Yamaguchi Univ., bwj215@yamaguchi-u.ac.jp)

2 정희원, 대전대학교 공과대학 건설시스템공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Daejin Univ., kilee@daejin.ac.kr)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

한, 인공적인 공장생산에 의해 안정적으로 대량 공급 (1,750만톤/년, 일본 슬래그협회 2004년 통계)이 가능하며, 고압수에 의한 급랭 과정에서 입자 내부에 형성된 기포와 입자형상에 의해 투수성이 뛰어나고 경량이며, 큰 내부마찰각을 가지고 있다. 더욱이, 수화 반응에 의해 시간경과와 더불어 경화하는 “잠재수경성”을 가지고 있다. 그러나 고로 수쇄슬래그가 일본 국내에서 토목용 재료로서 이용된 예는 많지 않다. 최근에 도로의 노반재료, 성토나 구조물의 뒷채움 재료, 기초지반의 압밀침하나 토압 경감대책 등에 이용이 증가하고 있으며, 토목용 재료로서의 확대 이용이 기대되는 재활용 자원으로서 주목받고 있다. 국내의 연구로서는 이광찬과 이문수(1999)에 의해 전로슬래그에 대한 투수성 고찰을 통해 재활용에의 적용성이 제안되었고, 천병식과 정현철(2002)에 의한 모래다짐말뚝의 모래대체재로서의 동슬래그의 활용에 대한 실내시험 및 현장시험을 통해 대체재로서의 적용이 가능함을 알았다. 유남재 등(2005)은 제강슬래그를 모래다짐말뚝의 대체재로 사용하여 지반공학적 거동을 조사하기 위해 원심모형시험을 행하였다. 또한, 반봉찬(1996)에 의하면 고로슬래그의 국내사용에 있어서 약 40%가 시멘트용, 약 55%가 도로용 및 토목용으로 사용되며, 그 외에 소량이 비료용으로 재활용 되어진다고 보고하였다. 또한, 일본 재단법인 “연안개발기술연구 센터 및 철강슬래그 협회(1989)”의 공동조사에서 항만공사용 수쇄슬래그의 이용지침이 제안되어졌다. Matsuda 등(2003a, b)은 샌드컴팩션 파일공법에의 고로 수쇄슬래그의 적용성 및 슬래그의 경량성을 이용한 경량 성토재료로서의 적용성에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 뒷채움 재료로서의 적용 예에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 상황이다.

또한, 고로 수쇄슬래그가 갖는 특성 중의 하나인 잠재수경성(佐藤勝久 1978; 松田博 2000)을 최대한으로 이

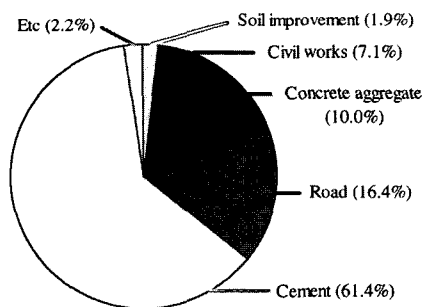


Fig. 1. Current state of use of granulated blast furnace slag (Nippon Slag Association, 2004)

용할 수 있는 방법으로서 항만구조물의 안벽이나 옹벽의 뒷채움 재료로서 적용할 경우, 고로 수쇄슬래그의 고강도, 경량성 및 큰 투수성과 시간경과에 따른 잠재수경성의 발현은 토압의 경감, 지진시의 액상화 저항 및 구조물의 안정성 증대에 크게 기여할 것으로 기대된다. Fig. 1에 2004년 일본 국내의 고로 수쇄슬래그 이용현황을 나타내었다.

본 연구에서는 미경화 상태의 고로 수쇄슬래그와 일본의 표준모래인 Toyoura sand에 대해 정적 및 지진시의 토압 및 습윤상태에서의 정적토압과 벽체변위의 관계를 명확히 밝히고자 한다. 이를 위해 실험으로 정적 및 지진시의 주동토압을 측정하기 위해 저점을 힌지리한 벽체의 상부를 주동 및 수동 측으로 ±2mm 변위시의 토압 및 벽면 마찰력의 변화를 4회 반복하여 측정하였다(-부호가 주동, +부호가 수동 측). 또한 이들 실험결과를 Toyoura sand를 이용한 실험결과와 비교하여 옹벽이나 안벽의 뒷채움 재료로서 고로 수쇄슬래그를 이용한 경우의 토압경감 효과에 대한 실험을 실시하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 실험재료

본 연구에서 사용한 시료는 입도를 조정한 고로 수쇄슬래그(건조 상태에서 2mm 체를 통과한 시료, 2004년 출하)와 Toyoura sand이며, 밀도시험(JIS A1202:1999), 최대·최소 간극비 시험(JIS A1224:2000) 및 정적 삼축 압축시험의 결과를 Table 1에 나타내었다. 표에서 고로 수쇄슬래그가 Toyoura sand와 토립자 밀도는 거의 유사하나, 최대 및 최소 간극비는 큰 값의 차를 나타낸다. 또한, 고로 수쇄슬래그의 상대밀도 25%에서의 내부마찰각이 Toyoura sand와 유사한 값을 나타내며, 상대밀도 50% 및 70%에서는 큰 값을 나타내고 있다. 이는 제철과정에서 생성된 용융상태의 고로슬래그를 고압의

Table 1. Physical properties and internal friction angle of test samples

	Specific gravity $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Maximum void ratio $e_{max}$	Minimum void ratio $e_{min}$	Internal friction angle $\phi$ (°)
GBF slag	2.643	1.510	1.033	37.0 (Dr=25%)
				39.5 (Dr=50%)
				41.5 (Dr=70%)
Toyoura sand	2.640	0.991	0.630	37.4 (Dr=50%)

압력수(100~350kPa)로 급랭할 때 고로 수쇄슬래그의 입자내부에 형성된 다수의 기포와 각이 진 입자형상에 기인한다(Photo 1 참조).

Fig. 2는 사용시료의 입도분포 곡선을 나타내었다. 그림에는 입도 조성의 비교를 위하여 일본의 천연사인 Gengkai sand의 결과도 함께 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 고로 수쇄슬래그는 전체적으로 입경이 균등한 Toyoura sand보다 입도가 조립분을 많이 포함하고 있으며, 천연사인 Gengkai sand와 유사한 입도 분포를 하고 있다.

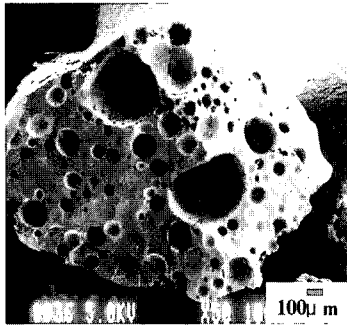


Photo 1. Micro-photograph of GBF slag

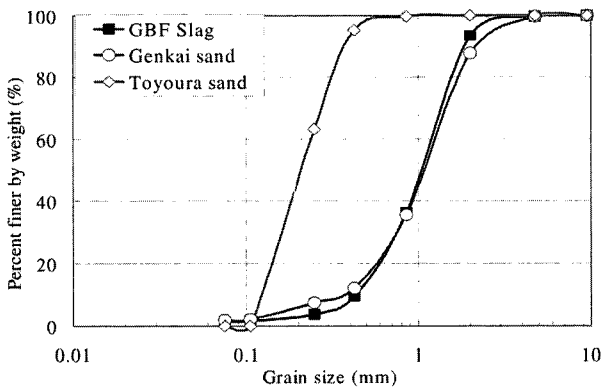


Fig. 2. Grain size distribution curves

## 2.2 모형실험장치

본 실험에서 사용한 모형토조 실험장치는 Fig. 3과 같다. 모형토조는 높이 50cm, 폭 50cm, 길이 100cm의 경금속의 상자 형으로 제작되었으며, 수직벽체는 좌·우 모두 저점을 힌지로 한 가동 벽체로 되어 있다. Fig. 3에서 나타낸 것처럼 전면의 벽체는 저점의 힌지에 의해 수평 및 수직방향의 좌우에 설치된 로드셀로 지지되어 있으며, 상부의 지점도 수평방향에 로드셀로 지지되어 벽체에 작용하는 토압 합력의 수평성분 및 수직성분(벽면 마찰력)을 측정 가능한 구조이다. 또한, 이 벽체에는 토조의 상부로부터 10, 25, 45cm의 깊이 방향에 토압계를 설치하여 깊이 방향의 토압분포의 측정도 가능하다. 가동 벽체는 상부의 핸들을 회전시켜서 벽체저부를 지점으로 한 벽체를 주동 및 수동 측으로의 변위가 가능하다.

## 2.3 실험방법

본 연구에서 수행한 건조상태의 정적 및 지진시 토압 실험의 시험조건은 Table 2와 같다. 공기건조 상태의 고

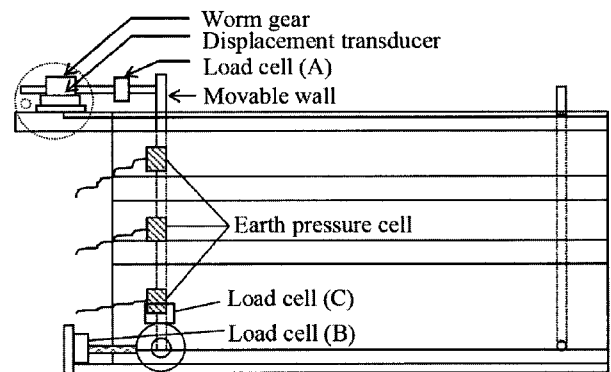


Fig. 3. Schematic diagram of model sand box

Table 2. Model sand box test conditions (dry condition)

Material	Relative density (%) <sup>*</sup>	Amount of material (kg)	Seismic coefficient kh					
			0.0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30
GBF slag	15	268.26	○	○	○	-	-	-
	25	273.61	○	○	○	○	-	-
	55	291.03	○	○	○	○	○	○
	70	300.60	○	-	-	-	-	-
Toyouira sand	25	347.38	○	○	○	○	-	-
	55	368.12	○	○	○	○	○	○

\* 각 실험조건은 상대밀도는 표기 값에 대해 ±3%범위 이내이다.

Table 3. Model sand box test conditions (wet condition)

Material	Relative density (%)	Water content (%)	Moist unit weight $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	Dry unit weight $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )
GBF slag	25(±3)	5	11.38	10.838
		10	11.92	10.836
		15	12.46	10.834

로 수쇄슬래그 및 Toyoura sand의 모형지반의 조성은 전체 토조높이가 50cm이므로 층 당 5cm씩 총 10층으로 나누어 각 층에 대하여 실험 조건에서 설정한 소정의 상대밀도가 얻어지도록 양을 조절하여 다짐을 행하였다. 모형지반 조성을 위한 다짐은, 시험전에 토조의 50cm 높이를 10층으로 분할하여 Table 2에 나타난 재료 투입량을 10으로 나누어 상대밀도가 낮은 고로 수쇄슬래그의 15%, 25% 및 Toyoura sand의 25%에 대해서는 공중낙하법에 의해 각각 5cm 마다 소정의 투입량을 확인하고, 상대밀도가 높은 조건에 대해서는 170mm×124.7mm(2.512kg)의 사각형 중추를 이용하여 다짐을 행하고, 각 층마다 투입량을 확인하여 소정의 상대밀도로 조성하였다. Toyoura sand의 다짐 후의 평균 건조단위체적중량은 상대밀도 25, 55%에 대해서 각각  $\gamma_d=13.78, 14.51\text{kN/m}^3$ 이며, 고로 수쇄슬래그의 평균 건조단위체적중량은 상대밀도 15, 25, 55, 70%에 대해서  $\gamma_d=10.62, 10.82, 11.48, 11.96\text{kN/m}^3$ 이다. 또한, 고로 수쇄슬래그를 대상으로 수행한 수습상태의 정적 토압실험(白元珍 등 2006)의 시험조건을 Table 3에 나타내었다. 표에 나타난 함수비 상태를 유지하기 위하여 상대밀도 25%에 해당하는 슬래그량(273.61kg)을 10 등분으로 분할한 각 고로 수쇄슬래그에 대해 표에 나타난 함수비에 해당하는 증류수량을 10으로 나누어 각 분할 슬래그시료에 투입하여 일정하게 되도록 섞은 후, 젖은 천으로 증발을 방지한 상태로 4시간이상 방치 후, 건조상태와 같은 방법으로 토조를 조성하였다. 지진시의 토압시험은 Mononobe(1952)와 Okabe(1924)가 제안한 옹벽 벽체와 뒷 채움재가 중력과 지진력에 의해서 발생하는 합성력에 대한 경사  $\alpha$ 만큼 옹벽의 전면으로 기울어진 상태를 고려하여 수평진도  $kh=0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3$ 에 대해서 수행하였다. 본 연구에서 수직진도  $kv$ 는 고려하지 않았으며 지진시의 토압 개념도를 Fig. 4에 나타내었다. 모형토조 안에 소정의 상대밀도가 되도록 다짐이 완료되면 가동 벽의 상부지점(슬래그 표면으로부터 6.6cm)을 0.01mm/s의 속도로 주동 측으로 2mm (1/1000 rad; 주동 측의 모형지반이 주동상태를 유지하

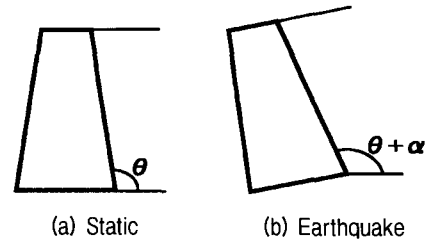


Fig. 4. Conceptual diagram to measure the static and the seismic earth pressure

는데 충분한 변위량, 大原資生 1985)까지 변위 시킨 후, 같은 속도로 수동 측으로 변위가 4mm(원점으로부터 변위는 2mm)까지 변위 시키고, 다시 주동 측으로 2mm(원점)가 될 때까지를 1사이클로 하여 동일한 조작을 4사이클 반복해서 수행한다. 지진시의 토압을 측정하기 위해서는 앞서 설명한 개념에 근거하여 시료의 다짐이 완료된 후에 모형토조를 실험 조건에서 설정한 수평진도가 되도록 경사를 준 상태에서 정적 토압시험과 같은 수순으로 행하였다(白元珍 등 2005).

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 정적 토압 실험결과

Fig. 5는 Toyoura sand의 상대밀도에 따른 수평토압의 합력과 벽체 상부변위와의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 원점(벽체변위=0.0mm)에서 주동 측으로 0.8mm 벽체가 변위를 일으킨 후에 토압은 거의 일정한 값을 나타내고 있으며, 벽체가 주동상태로 고려되어지는 토압이 얻어졌다. 또한, 주동토압은 변위 사이클의 증가에 따른 차이는 극히 적으며, 변위 사이클 제1사이클에서의 상대밀도에 따른 차이는  $Dr=28\%$ 에서  $0.326\text{kN/m}$ ,  $Dr=54\%$ 에서  $0.334\text{kN/m}$ 로서 미소하며, 이는 상대밀도의 증가(제1사이클 종료후의 토조 상부표면의 가동벽체 근방에서의 침하로부터 확인)에 따른 내부마찰각의 증가에 기인한 것으로 사료된다. 또한, 수동 측의 토압은 변위 사이클의 증가와 더불어 증가함을 알 수 있다. 본 연구에서는 토압계 용량의 제한으로 극한 상태에 도달한 후의 수동토압은 계측이 불가능하였으나 수동 측으로 변위를 증가시키면 일정한 값의 수동토압이 얻어지리라 판단된다.

Fig. 6은 고로 수쇄슬래그의 상대밀도의 차이에 따른 수평토압의 합력과 벽체의 상부변위와의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Fig. 5에서 나

타낸 Toyoura sand의 실험 결과와 유사한 경향을 나타내며, 고로 수쇄슬래그에 대해서도 주동 측으로 0.8mm 정도 벽체 변위가 일어난 후에 토압은 거의 일정한 값을 나타내고 있으며, 벽체가 주동 상태로 고려되어지는 토압이 얻어졌다. 또한, 주동토압은 변위 사이클의 증가에 따른 차이는 극히 적으며, 변위 사이클 제1사이클에서의 상대밀도에 따른 차이는  $Dr=28\%$ 에서 0.224kN/m,  $Dr=54\%$ 에서 0.228kN/m로서 미소하며, 이는 상대밀도의 증가에 따른 내부마찰각의 증가에 기인한 것으로 사료된다. 또한, 주동토압이 상대밀도의 변화에 따른 단위 체적중량의 증가에도 불구하고 토압의 차이가 미소한 이유로서는 상대밀도가 증가함에 따른 내부마찰각의 증가로 토압이 감소되었기 때문으로 판단된다. 수동 측의 토압은 변위 사이클의 증가와 더불어 증가함을 알 수 있다.

Fig. 7은 고로 수쇄슬래그에 대한 정적 상태에서의 벽체의 벽면 마찰력과 상부변위와의 관계를 나타낸 것이

다(-부호가 벽체 아래쪽으로 작용하는 마찰력). 그림으로부터 벽면 마찰력은 벽체의 변위 및 변위 사이클의 증가와 더불어 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 정지 상태에서 벽체 저부를 한지 지점으로 하여 회전하는 변위에 따라 파괴면의 형성으로 벽체에 작용하는 마찰력이 감소하였기 때문으로 판단된다. 천연사인 Toyoura sand에 대해서도 유사한 경향이 얻어졌다.

Fig. 8은 Fig. 5와 Fig. 6의 결과에서 변위 사이클의 제1사이클에 대한 수평토압의 합력과 벽체 변위와의 관계를 양 시료에 대해서 정리한 것이다. 고로 수쇄슬래그의 상대밀도가 70%인 경우를 제외하고 양 시료 모두에서 시료를 모형토조에 다져 넣은 직후의 정지 상태에서부터 -2mm(1/1000rad)까지의 주동 영역에서는 상대밀도의 차이에 따른 토압의 차이는 거의 나타나지 않고 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같다. 그러나 주동영역에서 수동영역으로의 토압은 상대밀도의 증가와 더불어 크게 증가하고 있다. 이는 벽체 근방의 토립자가 수동영역

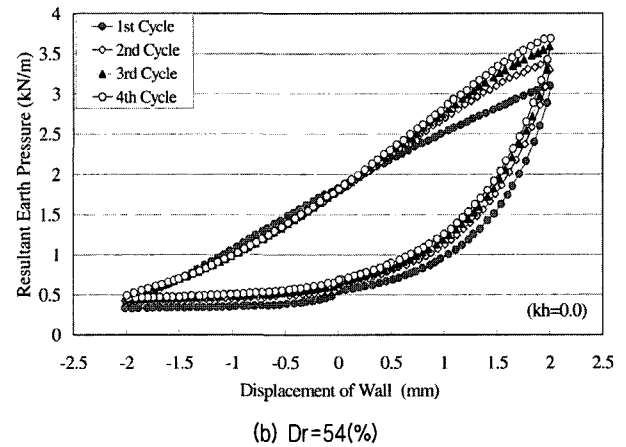
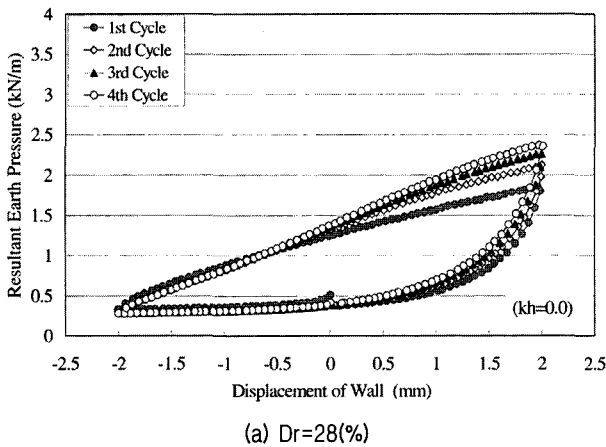


Fig. 5. Relations between resultant earth pressure and displacement of wall (Toyoura sand)

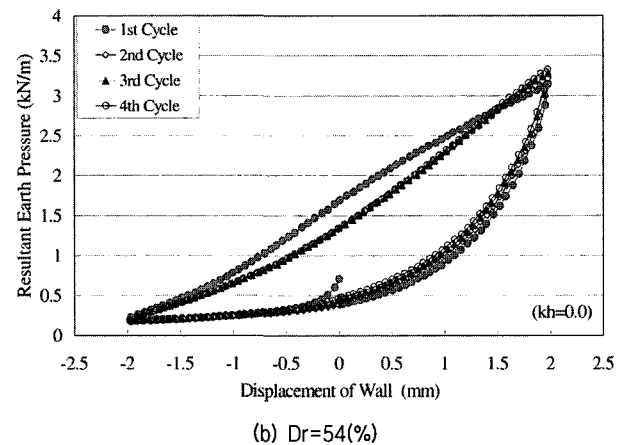
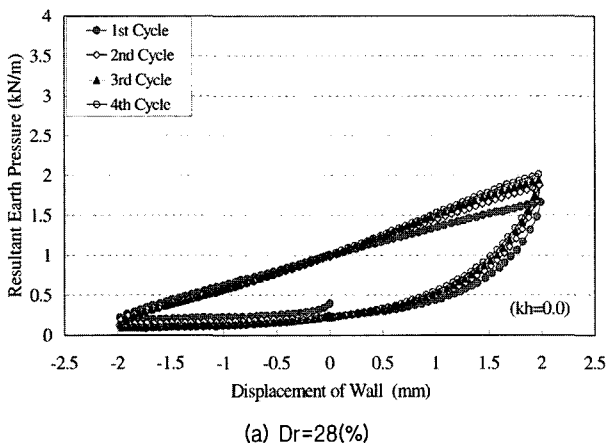


Fig. 6. Relations between resultant earth pressure and displacement of wall (GBFS)

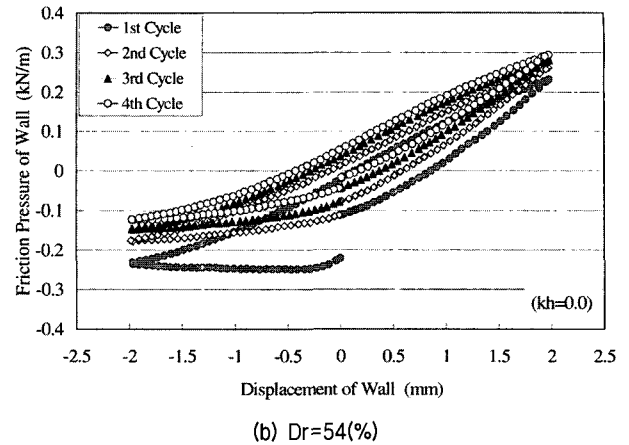
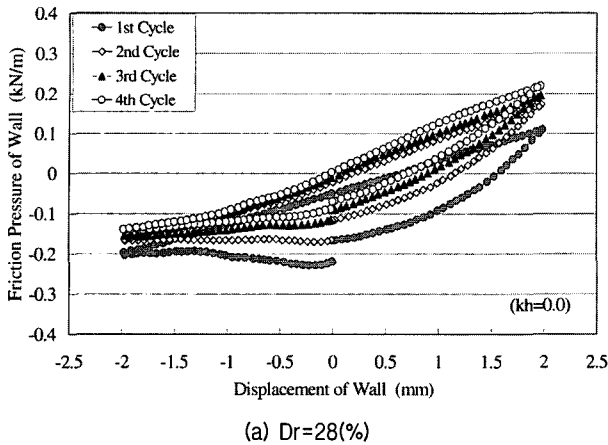


Fig. 7. Relations between friction pressure and displacement of wall (GBFS)

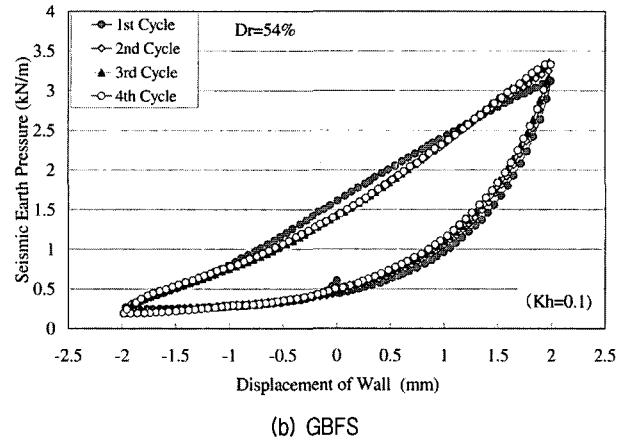
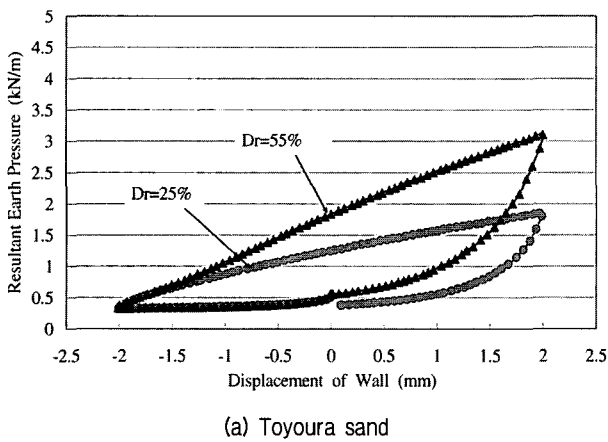


Fig. 8. Relations between resultant earth pressure and displacement of wall (1st cycle)

으로의 변위와 더불어 다짐효과(실험종료 후, 가동벽체 근방의 모형토조 상부표면이 약간 침하한 사실에 근거)를 받았기 때문으로 생각된다.

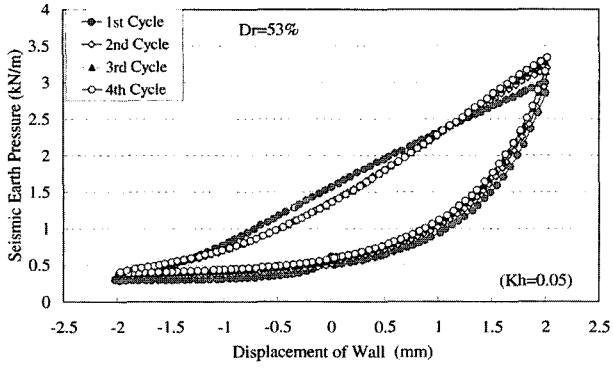
### 3.2 지진시 토압 실험결과

다음으로 지진시 토압과 벽체변위와의 관계를 알아보기 위하여 모형토조에 시료를 다져 넣은 후, 소정의 수평진도가 얻어지도록 토조를 경사시킨 후에 모형실험을 실시한 결과를 나타낸다. Fig. 9는 이에 대한 일례로서 고로 수쇄슬래그에 대한 상대밀도가 55(±2)%인 경우 지진시의 실험결과를 나타낸 것이다. 본 토조시험 결과로부터 수평진도의 증가와 더불어 큰 주동토압이 얻어짐을 알 수 있다. 이는 토조에 작용하는 관성력의 증가에 의한 수평력의 증가에 기인한다. 또한, 수평진도  $kh=0.2$ 와  $0.3$ 에 대해서는 변위 사이클에 관계없이 일정한 루프를 형성하고 있음을 알 수 있으며, Toyoura sand

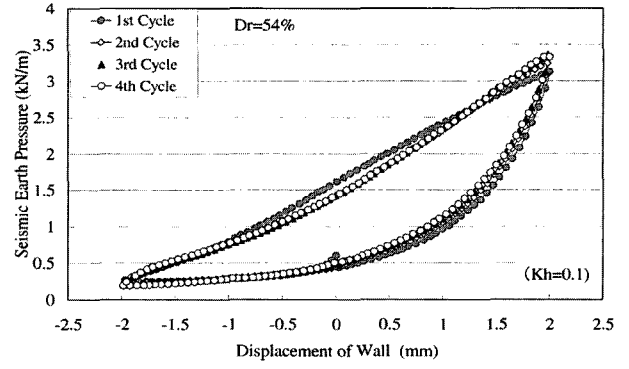
에 대해서도 동일한 결과가 얻어졌다.

Fig. 10은 Fig. 9에 나타난 것과 같이 상대밀도가 25% 및 55%인 경우 Toyoura sand에 대한 변위 사이클 제1사이클에서의 수평진도에 따른 토압의 변화를 나타낸 것이다. 정적 토압에서와 마찬가지로 동일 수평진도에 있어서 상대밀도의 차이에 따른 주동토압의 차이(예를 들면;  $kh=0.1$ 에서  $Dr=25\%$ 에서  $0.453\text{kN/m}$ ,  $Dr=55\%$ 에서  $0.456\text{kN/m}$ )는 나타나지 않았으며, 수평진도의 증가와 더불어 증가함을 알 수 있다.

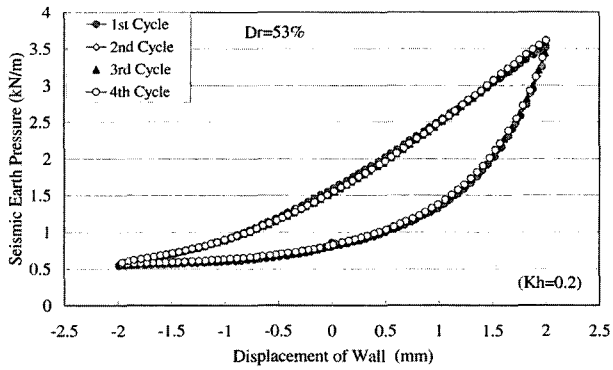
Fig. 11은 상대밀도가 25% 및 55%에서의 고로 수쇄슬래그에 대한 변위 사이클 제1사이클에서의 수평진도에 따른 토압의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 10의 Toyoura sand와 동일한 경향을 나타내고 있으나, 각 상대밀도에 대해서 고로 수쇄슬래그가 전 수평토압에 있어서는 적은 값을 나타내므로, 고로 수쇄슬래그의 큰 내부마찰각 및 경량성에 의한 토압경감효과가 기대되어진다.



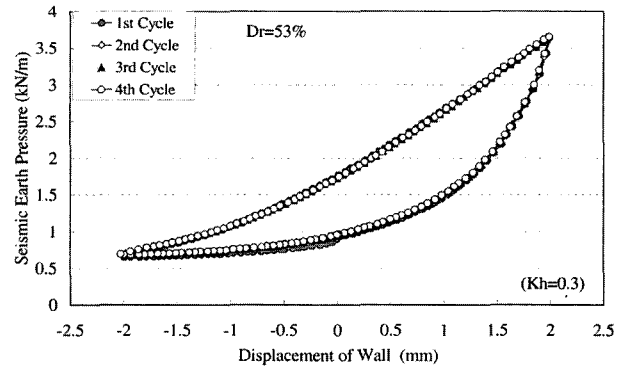
(a)  $kh=0.05$



(b)  $kh=0.1$

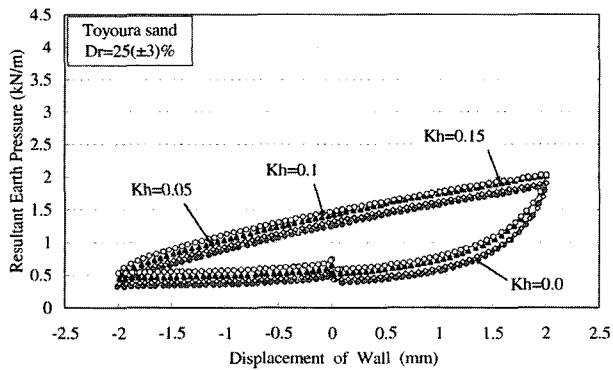


(c)  $kh=0.2$

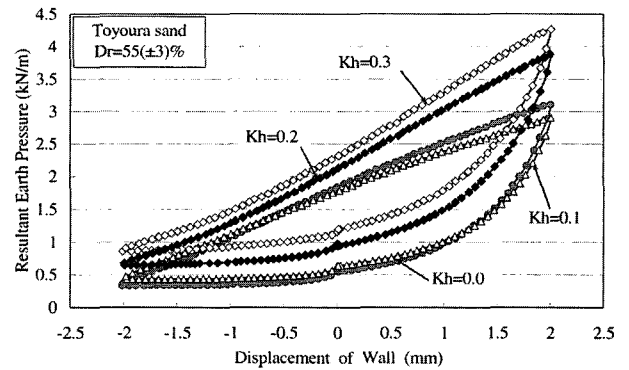


(d)  $kh=0.3$

Fig. 9. Relations between Seismic earth pressure and displacement of wall (GBFS)

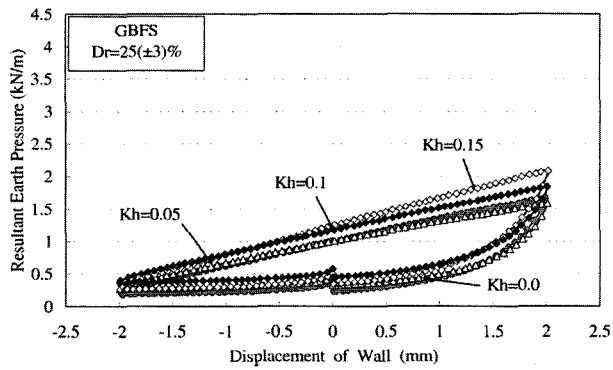


(a)  $Dr=25\%$

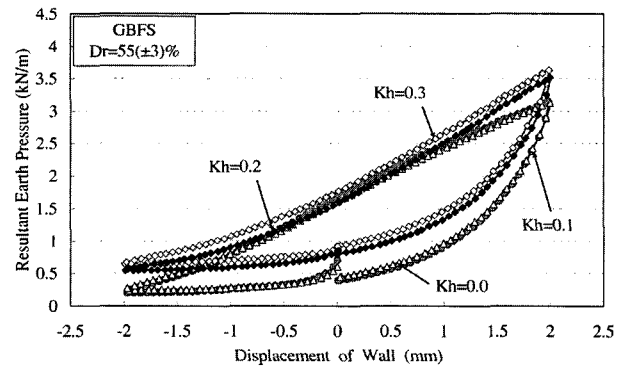


(b)  $Dr=55\%$

Fig. 10. Relations between Seismic earth pressure and displacement of wall (Toyouira sand)



(a)  $Dr=25\%$



(b)  $Dr=55\%$

Fig. 11. Relations between Seismic earth pressure and displacement of wall (GBFS)

### 3.3 습윤상태의 고로 수쇄슬래그에 대한 시험결과

본 절에서는 옹벽이나 안벽의 뒷채움재로 고로 수쇄 슬래그를 적용하였을 경우, 습윤상태에 있어서의 벽체 변위에 따른 토압의 변화를 조사하기 위하여 상대밀도  $Dr=25(\pm 3)\%$ 에서 함수비( $w$ )를 5%, 10%, 15%까지 변화시켜 수행한 시험 결과를 나타낸다. 그림 12는 각 함수비에 대한 모형 토조실험의 변위사이클 제1사이클에서의 함수비에 따른 토압의 변화를 나타낸 것으로 비교를 위해 건조상태의 시험결과도 함께 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 함수비의 증가와 더불어 수동 측의 토압은 큰 폭으로 증가하나, 주동 측의 토압은  $w=0\%$ 가 0.183kN/m,  $w=5\%$ 때 0.174kN/m,  $w=10\%$  때 0.309kN/m,  $w=15\%$ 때 0.325kN/m으로  $w=5\%$ 를 제외하면, 함수비의 증가와 더불어 단위체적중량의 증가로 인한 토압합력이 약간 증가하는 경향을 나타낸다. Table 3에서도 알 수 있는 바와 같이, 함수상태에 따른 건조단위중량은 거의 유사한 값을 나타내고 있으므로,  $w=5\%$

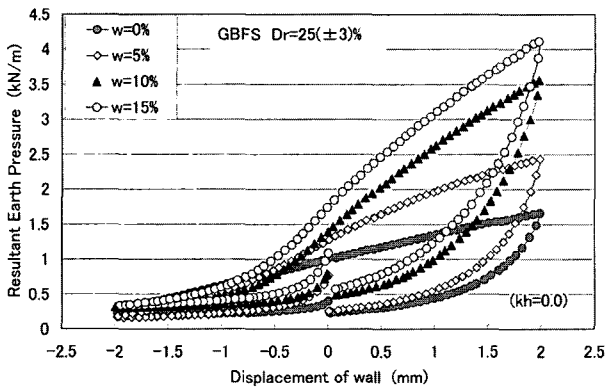


Fig. 12. Relations between resultant earth pressure and displacement of wall (wet condition)

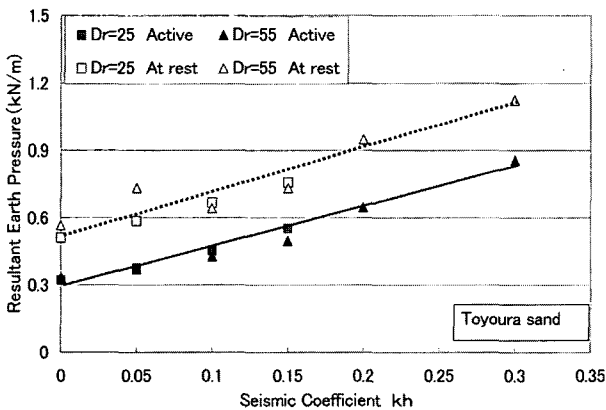
에서 건조상태에 비해 토압합력이 작은 이유로서는 입상재료인 고로 수쇄슬래그에서 겔보기 점착력의 생성으로 인한 토압의 감소로 고려되어진다.

### 3.4 종합평가

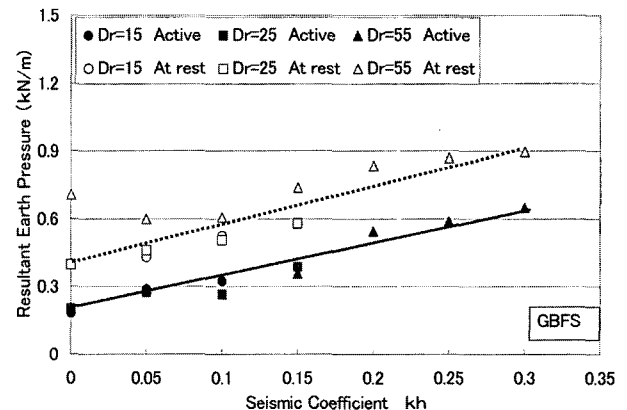
Fig. 13은 Toyoura sand와 고로 수쇄슬래그의 모형토조 실험으로부터 얻은 정지토압 및 주동토압과 수평진도와의 관계를 나타낸 것이다. 여기서, 정지토압은 시료를 모형토조에 다져 넣은 직후에 계측된 값으로부터 산정한 값이며, 주동토압은 벽체변위가 -2mm에 도달한 시점에서의 계측된 값으로부터 산정한 값이다. Toyoura sand의  $kh=0.05$  및 고로 수쇄슬래그의  $kh=0.0$ 시의 주동토압을 제외하고는 수평진도의 증가와 더불어 정지토압 및 주동토압이 선형관계를 나타내며 증가함을 알 수 있다. 또한, Fig. 12(b)로부터 직선 근사시킨 선형관계에서 수평진도에 따른 증가량이 Fig. 12(a)보다 약간 적게 나타남을 알 수 있으며 이와 같은 결과로부터 고로 수쇄슬래그가 옹벽이나 안벽의 뒷채움재로서 사용한 천연 모래에 비해 토압경감 효과를 기대할 수 있으리라 판단된다. 또한, Matsuda등(2000)의 연구결과에서도 알 수 있는 바와 같이 고로 수쇄슬래그는 시간경과와 더불어 수화반응에 의한 잠재수경성의 발현으로 경화하여 점착력이 생성되므로 뒷채움재로서 적용할 경우 시간경과와 더불어 토압경감 효과가 기대된다.

### 5. 결론

본 연구는 고로 수쇄슬래그를 옹벽이나 안벽의 뒷채움재로 사용하였을 때의 토압경감효과를 명확히 하기



(a) Toyoura sand



(b) GBFS

Fig. 13. Relations between earth pressure at rest/active earth pressure and seismic coefficient



위하여 모형토조를 이용한 정적·지진시 및 습윤상태에 대한 토압 모형실험을 수행하고, 그 결과를 일본의 표준 사인 Toyoura sand와 비교·검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 고로 수쇄슬래그는 벽체의 변위 사이클의 증가와 더불어 주동 측의 토압합력의 감소가 나타났다. 이는 벽체의 변위사이클이 주동 측(-2mm)으로 변위→원점→수동 측(+2mm)→원점으로의 사이클의 반복 과정에서 가동벽체 부근의 입자의 다짐효과에 의한 내부마찰각의 증가에 기인한 것으로 사료된다.
- (2) 고로 수쇄슬래그의 주동 및 수동토압은 Toyoura sand 보다 작게 나타났다. 이는 고로 수쇄슬래그의 큰 내부마찰각과 입자형상 및 입자내부에 포함된 기포에 의한 경량성에 의해 토압이 감소한 것으로 판단된다.
- (3) 고로 수쇄슬래그의 벽면 마찰력은 큰 내부마찰각과 입자형상에 기인한 입자사이의 인터록킹 효과에 의해 Toyoura sand 보다 큰 값을 나타낸다.
- (4) 고로 수쇄슬래그 및 Toyoura sand에서의 상대밀도의 증가에 따른 주동토압의 변화는 고로 수쇄슬래그의 상대밀도 70%를 제외하고는 거의 나타나지 않았으며, 이는 상대밀도의 증가에 의한 단위체적중량의 증가보다 내부마찰각의 증가로 인한 토압감소의 영향이 크기 때문으로 판단된다.
- (5) 수평진도의 증가와 함께 주동 측의 토압의 합력은 직선적으로 증가하며, 지진시의 주동토압에 있어서도 고로 수쇄슬래그가 Toyoura sand 보다 적게 나타난다. 이는 고로 수쇄슬래그가 토압경감효과가 충분히 있음을 나타낸다. 또한, 본 연구에서의 지진시 토압실험의 경우 벽체를 경사시킨 상태에서 행해진 결과로, 실제 지진시의 수평진도를 가한 상태의 진동대 실험에 의한 지진시 토압에 대한 연구의 필요성이 요구된다.
- (6) 습윤상태에 대한 고로 수쇄슬래그의 토압실험결과, 함수비 5%에서 겉보기 점착력의 생성으로 인해 토압합력이 감소한 것으로 판단된다.

상기와 같은 결과로부터, 고로 수쇄슬래그의 지반공학 적 재료 특성이 양호하며, 표준사에 비해 내부마찰각 및 경량성, 입자형상에 기인한 토압경감효과가 기대되므로, 안벽이나 옹벽의 천연 모래의 대체 재료로서의 적용성이 기대되어진다.

## 감사의 글

본 연구의 수행에 있어 모형토조의 작성, 실험 및 자료정리에 많은 도움을 준 일본 Yamaguchi 대학 공학부 사회건설공학과와 Matsuda Hiroshi 교수님과 대학원 이공학 연구과의 Hashiguchi Daisuke, Kondo Masahiko에게 깊은 감사를 드린다.

## 참고 문헌

1. 반봉찬 (1996), “체질·제강 슬래그의 발생과 그 이용”, *폐기물, 중앙환경신문사*, 39권(96. 4), pp.36-41.
2. 이광찬, 이문수 (1999), “재활용을 위한 전로슬래그의 투수성 고찰(1)”, *한국지반공학회 논문집*, 제15권, 제4호, pp.65-84.
3. 유남재, 박병수, 정길수, 고경환, 김지성 (2005), “슬래그 다짐말뚝으로 개량된 복합지반의 지지력 및 파괴메카니즘에 관한 원심 모형실험”, *한국지반공학회 논문집*, 제21권, 제1호, pp.59-67.
4. 천병식, 정현철 (2002), “모래다짐말뚝의 모래대체재로서 동슬래그의 활용”, *한국지반공학회 논문집*, 제18권, 제5호, pp.195-207.
5. 大原資生, 松田博 (1985), “岸壁に作用する地震時土圧の計算”, *日本土木学会論文集*, 第358号, III-3, pp.103-111.
6. 白元珍, 松田博, 篠崎晴彦, 近藤政彦, 小島磨 (2005), “未硬化高炉水砕スラグの静的および地震時土圧”, *日本土木学会第60回年次学術講演会論文集*, pp.141-142.
7. 白元珍, 松田博, 篠崎晴彦, 近藤政彦, 橋口大輔, 濱田ゆかり, 小島磨 (2006), “裏込め材料として用いた高炉水砕スラグの土圧特性について”, *第41回地盤工学研究発表会講演概要集*, pp.573-574.
8. 佐藤勝久, 福手勉, 佐藤峰夫 (1978), “潜在水硬性材料の空港舗装路盤としての評価”, *第3回土質工学研究発表会講演概要集*, pp.1341-1344.
9. 松田博, 来山尚義, 安藤義樹, 中野恭夫 (2000), “地盤工学において用いられる水砕スラグの特性”, *土と基礎*, Vol.48, No.6, pp.22-24.
10. 日本鉄鋼スラグ協会 (2004), “鉄鋼スラグ統計年報”, <http://www.slg/statistics-e.htm>
11. (財)沿岸開発技術センター, 鉄鋼スラグ協会. (1989), “港湾工事に水砕スラグ利用手引書”.
12. Matsuda, H., Kitayama, N., Shinozaki, H. and Takamiya, K. (2003a), “Application of granulated blast furnace slag in the sand compaction pile method”, *Proceedings of the international conference organized by British Geotechnical Association and held in Dundee*, pp.593-601.
13. Matsuda, H., Ohira, N., Takamiya, K., Shinozaki, H., Kitayama, N. and Murakami, M. (2003b), “Application of granulated blast furnace slag to light weight embankment”, *Proceedings of the international conference organized by British Geotechnical Association and held in Dundee*, pp.603-611.
14. Mononobe, O. (1952), “Earthquake resistant design of civil engineering structures”, *Riko, Reserved Edition*.
15. Okabe, S. (1924), “General theory on earthquake and seismic stability of retaining walls and dams”, *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.10, pp.1277-1327.

(접수일자 2006. 5. 4, 심사완료일 2006. 8. 21)