

고로 수쇄슬래그의 경화가 액상화 강도에 미치는 영향

Effects of Hardening of Granulated Blast Furnace Slag on the Liquefaction Strength

백 원 진¹ Baek, Won-Jin

Abstract

In the present study, in order to clarify the effects of latent hydraulic property of granulated blast furnace slag (GBF slag) on the liquefaction, GBF slag was cured in the high temperature alkali water (adding the calcium hydroxide, pH=12, water temperature is about 80°C), and then the cyclic and the static tri-axial compression tests were carried out. Then the results were compared with those for Japanese standard sand of Toyoura sand and natural sand of Genkai sand. From the test results, it is clarified that the liquefaction strength of the GBF slag increases with the increase of the curing period by the hardening due to the latent hydraulic property. It is also shown that GBF slag with $D_r=50\%$ and 80% which was cured for 189 days in the fresh-water shows cohesion due to developing of latent hydraulic property. In addition, as for the liquefaction strength of GBFS during the hardening process, a linear relation between the cyclic stress ratio R_{20} at the number of stress cycles $N_c=20$ and cohesion C_d was observed. It is also clarified that the liquefaction strength for cured GBF slag in the high temperature alkali water is predicted by the cohesive strength or the unconfined compressive strength.

요 지

본 연구는 액상화에 대한 고로 수쇄슬래그의 잠재수경성의 영향을 명확히 조사하기 위해 고로 수쇄슬래그를 고온알칼리 수(수산화칼슘 첨가, pH=12, 수온 약 80°C)로 양생한 후에 반복 및 정적 삼축압축시험을 실시하였다. 삼축시험을 통해 얻어진 결과는 일본의 표준사인 Toyoura sand와 천연사인 Genkai sand의 결과와 비교하였다. 시험결과 고로 수쇄슬래그의 액상화 강도는 양생기간의 증가와 더불어 잠재수경성에 의한 경화에 의해 증가함을 알았다. 또한, 담수 조건에서 189일간 양생한 상대밀도 50% 및 80%의 고로 수쇄슬래그에서 잠재수경성의 발현에 의해 점착력이 나타난다. 더욱이 경화과정에 있어서 고로 수쇄슬래그의 액상화 강도는 반복전단횟수 $n=20$ 회에서의 반복응력비 R_{20} 과 점착력 C_d 사이에 선형 관계가 관찰되었다. 또한, 고온 알칼리 수로 양생된 고로 수쇄슬래그에 대한 액상화 강도는 점착력이나 일축압축강도에 의해 예측이 가능함을 알았다.

Keywords : Granulated blast furnace slag, Hardening process, Latent hydraulic property, Liquefaction strength

1. 서 론

고로 수쇄슬래그(Granulated Blast Furnace Slag, GBFS)는 제철생산과정에서 생성된 용융슬래그에 고압수를

분사하여 생산된다. 용융상태(약 1500°C)의 고로슬래그를 서서히 냉각시킨 것을 고로수냉슬래그, 고압수에 의해서 급랭시킨 것이 고로 수쇄슬래그이다. 이러한 고로 수쇄슬래그는 형상·입도분포가 천연모래와 극히 유사

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

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

하며, 인공적인 공장생산에 의해 입도, 비중 등 물리정수가 안정되어 있으며 투수성이 뛰어나고 단위체적중량이 적으며 입자가 각진 형상에 기인하여 큰 내부마찰각을 가진다. 또한, 수화반응에 의해 시간경과와 더불어 경화하는 “잠재수경성”을 가지고 있다(佐藤勝久 1978; 松田博 2000). 그러나 이와 같은 고로 수쇄슬래그가 일본에 있어서 토목용 재료로서 이용된 예는 그리 많지 않다. 그림 1은 2004년 일본에서의 고로 수쇄슬래그의 이용현황을 나타낸 것이다. 그러나 이와 같은 재료는 최근 들어 도로의 노반재료, 성토나 구조물의 뒷채움 재료, 기초지반의 압밀침하나 토압 경감대책 등에도 이용이 증가하고 있으며, 토목용 재료로서의 확대이용이 기대되고 재활용 자원으로서 주목을 받고 있다. 반봉찬(1996)에 의하면, 고로 슬래그의 국내이용에 대해 시멘트용 41%, 도로용 28%, 토목용으로 27%가 이용되며, 비료용 및 기타에 4%가 이용되어진다고 보고하였다. 또한, 유남재 등(2005)은 제강슬래그를 이용한 모래다짐말뚝의 대체재로서의 이용에 대한 실험을 행하고 적용가능성을 나타내었다.

고로 수쇄슬래그의 항만구조물에의 적용성에 대해서, 일본 재단법인 “연안개발기술 연구센터 및 철강슬래그 협회”의 공동조사에서 항만공사용 수쇄슬래그의 이용지침이 1997에 제안되었으며, 이 지침서에서는 지진시에 있어서 고로 수쇄슬래그의 강도특성에 대해 “고로 수쇄슬래그는 잠재수경성을 가지기 때문에 일반적으로 액상화에 대한 검토를 행할 필요성은 없다”라고 기술되어 있다. 그러나 이 지침서에는 고로 수쇄슬래그의 경화기간 중 및 경화후의 액상화 강도특성에 대해서는 충분한 조사가 이루어지지 않았다. 최근에는 Matsuda 등(2003a, b)에 의한 고로 수쇄슬래그의 역학적특성중의 하나인 큰 투수성을 이용한 샌드콤팩션 파일공법에의 적용성에 관한 연구와 경량성을 이용한 경량성토재료로서

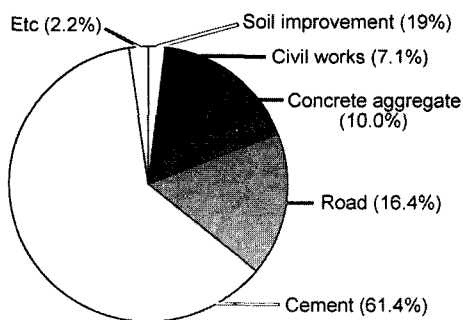


그림 1. 고로 수쇄슬래그의 이용 현황(일본 슬래그 협회, 2004)

의 이용성과 관련한 실내실험 및 시험시공에 관한 연구가 수행되었다. 또한, Shinozaki 등(2003)에 의한 고로 수쇄슬래그의 지반개량재료로서의 이용을 위한 현장시험으로부터 경화메카니즘에 관한 연구가 현재까지도 진행중이다.

따라서, 본 연구에서는 고로 수쇄슬래그의 경화과정 및 경화 후에 있어서의 액상화 강도를 파악 할 목적으로 고로 수쇄슬래그를 고온알칼리 수(수산화칼슘 첨가, pH=12, 수온 약 80°C)로 양생하여 각 양생기간에 따른 반복 및 정적 비배수 삼축압축시험과 일축압축시험을 수행하고 이에 따른 전단강도 및 액상화 강도의 관계에 대하여 조사하였다.

2. 시료 및 실험방법

본 연구는 고로 수쇄슬래그를 고온알칼리 수로 소정의 양생일수까지 양생하고, 각각의 양생단계에 있어서 반복 및 정적 삼축압축시험과 일축압축시험을 수행하여 동적 및 정적강도의 관계를 조사하였다. 사용한 시료는 新日本製鐵 大分製鐵所에서 제조되어진 고로 수쇄슬래그와 비교를 위해 일본의 표준사인 Toyoura sand 및 Genkai sand를 이용하여 비교·검토하였다.

2.1 시료의 기본성질

시험에 사용한 시료에 대한 밀도시험(JIS A1202:1999) 및 최대·최소 간극비 시험(JIS A1224:2000)의 결과는 표 1과 같다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 고로 수쇄슬래그는 천연사인 Genkai sand 및 Toyoura sand와 토립자 밀도는 거의 유사하나, 최대 및 최소 간극비는 큰 값을 나타낸다. 이는 고로 수쇄슬래그가 제철과정에서 생성된 용융상태의 고로슬래그를 고압의 압력수(100~350kPa)로 급랭할 때 입자내부에 형성된 다수의 기포를 포함하고 있기 때문이다(사진 1 참조).

본 연구에서 시험에 사용한 재료에 대한 입도시험

표 1. 시험시료의 비중 및 최대/최소 간극비

	Specific gravity ρ_s (g/cm ³)	Maximum void ratio e_{max}	Minimum void ratio e_{min}
GBF slag	2.702	1.413	0.904
Genkai sand	2.678	0.827	0.516
Toyouura sand	2.637	0.991	0.630

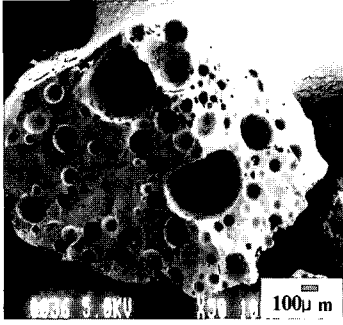


사진 1. 고로 수쇄슬래그의 전자현미경 사진(×50배)

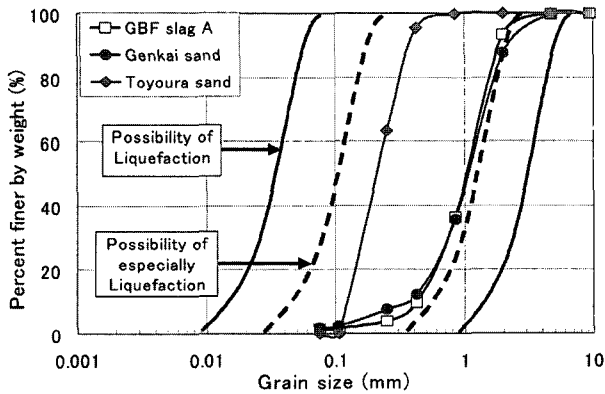


그림 2. 입도분포곡선

(JIS A1204)으로부터 얻어진 입도분포곡선을 그림 2에 나타내었으며, 그림에는 일본의 운수성 항만국 [항만시설의 내진설계에 있어서 당면의 조치(1996년 8월)]의 제안서에 따른 “액상화의 가능성이 있는 입도분포의 범위”를 함께 나타내었다. 고로 수쇄슬래그와 Toyoura sand는 액상화의 가능성이 큰 입도분포 범위에 포함되지만, 천연모래인 Genkai sand는 2mm 이상의 조립분이 약 12%정도 함유되어 있어 액상화를 일으킬 가능성이 있는 입도분포의 범위에 포함되어 있으며 고로 수쇄슬래그와 유사한 입도분포를 보이고 있다. 고로 수쇄슬래그 및 Genkai sand는 입경이 균등한 Toyoura sand보다 액상화의 가능성이 낮음을 알 수 있다.

2.2 실험장치

본 연구에서 사용한 삼축압축시험 장치의 배관경로도 및 외관사진은 그림 3과 사진 2와 같다. 본 실험장치는 응력제어 및 변위제어 실험이 가능하며, 전기신호를 서보밸브(전기-유압서보식 Actuator를 통해 전달된 전기신호 조절장치)에 전달하여 소정의 압력 및 변위를 공시체에 부여하는 것이 가능하다. 본 연구에서 정적 삼축압축시험은 변형률제어 조건하에서, 반복 삼축압축시험

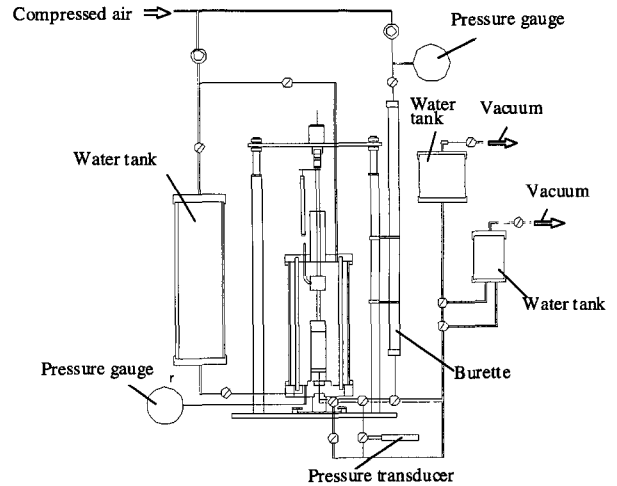


그림 3. 반복 삼축압축시험기

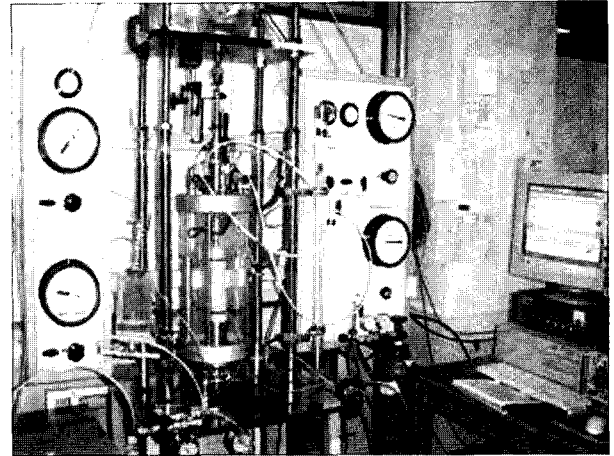


사진 2. 삼축압축시험기의 외관 사진

은 응력제어 조건으로 수행하였다. 또한, 연직하중을 측정하기 위한 하중계는 삼축 셀 내부에 설치하여 재하축 로드에서의 마찰을 최소화하도록 하였으며, 측면위 측정 장치는 공시체의 미소변위를 측정하기 위해 비접촉형 변위계를 사용하였다.

2.3 실험방법

공시체는 사전에 12~15시간 동안 진공 탈기한 시료를 이용하여 직경 5cm, 높이 10cm의 공시체로 상대밀도 50%와 80%가 되도록 수중낙하법에 의해 작성하였다. 반복 삼축압축시험은 비배수 조건하에서 정현파 반복재하(0.1Hz, 0.3Hz)를 행하고, 반복하중은 아래에 나타난 일본지반공학회 기준에 준하여 전단을 행하였다.

- 1) 등방응력상태에서 압축하중의 진폭 P_c 와 신장 P_e 의 합 (P_c+P_e)의 변동이 10%이하 일 것.
- 2) $0.9 \leq P_c/P_e \leq 1.1$ 일 것.

표 2. 고로 수쇄슬래그의 양생기간 및 시험조건

Relative density	Test conditions	Curing period (days)				
		0	28	56	84	121
Dr=50%	Static triaxial test	○	○	-	○	○
	Cyclic triaxial test	○	○	-	○	○
	Unconfined compression test	○	○	-	○	○
Dr=80%	Static triaxial test	○	○	○	-	-
	Cyclic triaxial test	○	○	○	-	-
	Unconfined compression test	○	○	○	-	-

또한, 고로 수쇄슬래그를 조기에 경화시키기 위한 조건은 양생수의 높은 pH와 높은 양생온도가 보고 되어져 있다(佐藤勝久 등 1978). 따라서 본 연구에서는 고로 수쇄슬래그의 잠재수경성의 발현을 촉진시키기 위해 고온알칼리 수(수산화칼슘 첨가, pH≒12, 수온 약 80℃)에 수침상태로 소정의 기간 동안 양생하였다. 또한, 고로 수쇄슬래그의 잠재수경성 발현과 더불어 공시체내의 간극이 수화물에 의해 밀폐되어 공시체의 포화가 곤란하게 되므로 이중배압법 및 이산화탄소 순환법을 이용하여 공시체의 B치는 0.95 이상을 유지하였다. 본 연구에서 적용한 고로 수쇄슬래그의 양생기간 및 시험방법 및 조건을 표 2에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Toyoura sand 및 미경화 고로 수쇄슬래그

Toyouira sand를 이용한 비배수 반복 삼축시험에서의 반복응력 진폭비 $\sigma_d/2\sigma'_0$ 와 양 진폭 축변형률 DA(double amplitude of axial strain)=5%가 발생하는데 필요한 반복재하횟수 Nc(number of cycles)와의 관계를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 반복재하횟수 20회에서의 5%의 양 진폭 축변형률을 발생시키는데 필요한 응력비(반복전단강도 R_{20})는 상대밀도 50%에서 0.092, 상대밀도 80%에서 0.181로 상대밀도가 큰 경우의 동적강도가 크다는 것을 알 수 있다.

또한, 미경화 고로 수쇄슬래그를 이용한 주파수 0.1Hz 및 0.3Hz의 비배수 반복전단시험결과로부터 얻어진 반복응력 진폭비와 반복재하횟수의 관계를 그림 5와 6에 나타내었다. 그림에서 나타낸바와 같이 고로 수쇄슬래그의 반복재하횟수 $N_c=20$ 에서의 반복전단강도 R_{20} 은 주파수 0.1Hz의 경우 Dr=50%에서 0.175, Dr=80%에서 0.31정도로 상대밀도가 클수록 큰 반복전단강도가 얻어

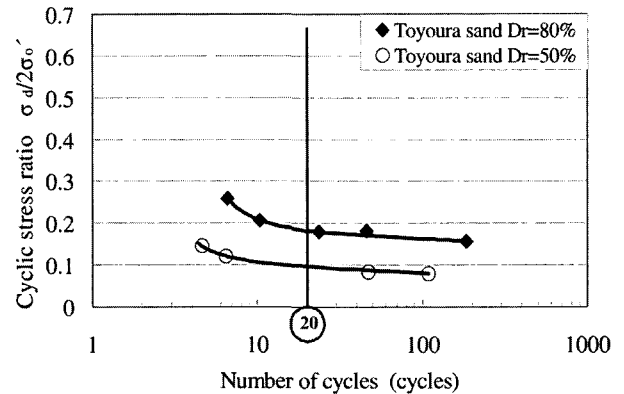


그림 4. 반복응력 진폭비 $\sigma_d/2\sigma'_0$ 와 반복재하횟수 Nc의 관계(Toyoura sand)

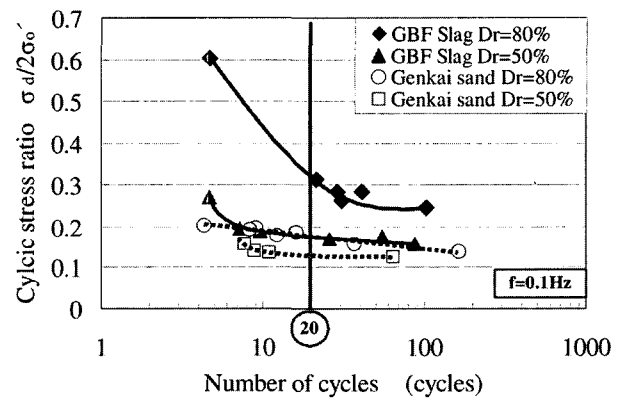


그림 5. 반복응력 진폭비 $\sigma_d/2\sigma'_0$ 와 반복재하횟수 Nc의 관계(f=0.1Hz)

졌다. 또한, 주파수 0.3Hz의 경우 Dr=50%에서 0.18, Dr=80%에서 0.31정도로 유사한 결과가 얻어졌으며 본 연구에서 적용한 주파수 범위 내에서의 차이는 나타나지 않았다. 이는 본 연구에서 적용한 주파수의 범위가 작으며, 사진 1에 나타낸 바와 같이, 고로수쇄슬래그의 각진 입자형상에 기인한 맞물림(interlocking)효과(西勝 등 1982a)로 사료된다. 그리고 그림 5에는 비교를 위해 입도분포가 극히 유사한 Genkai sand에 대한 주파수 0.1Hz에서의 비배수 반복전단시험결과도 함께 나타내었다. 그림에 나타낸 것처럼 고로 수쇄슬래그의 동적강

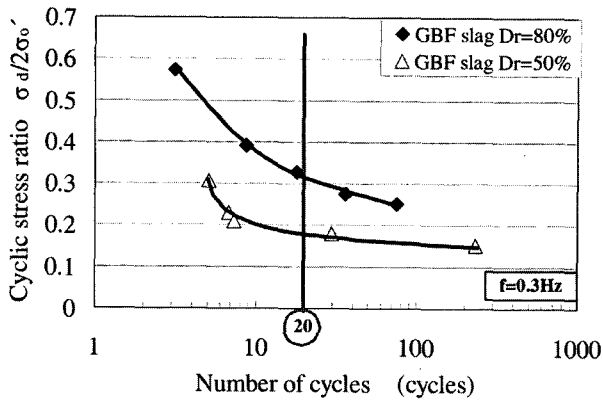


그림 6. 반복응력 진폭비 $\sigma_d/2\sigma'_0$ 와 반복재하횟수 N_c 의 관계($f=0.3\text{Hz}$)

도가 천연사인 Genkai sand에 비해 큰 이유로서는 다음과 같은 원인을 들 수 있다.

- 1) 고로 수쇄슬래그의 입자가 각진 형상을 하고 있으며, 섬유상 물질의 혼재에 의한 입자간 맞물림 효과가 발현된다.
- 2) 사진 1에 나타난 것처럼 고로 수쇄슬래그는 입자 내부에 포함된 다수의 기포에 의해 천연모래와 비교하여 높은 투수성에 의해서 과잉간극수압 상승이 억제된다(橋口大輔 등 2005).

3.2 경화과정시 고로 수쇄슬래그의 반복 삼축압축시험 결과

상대밀도 80%의 고로 수쇄슬래그를 고온 알칼리수로 28일 양생한 공시체에 대해 반복 비배수 삼축압축시험을 행한 결과로 반복응력, 축변형률, 과잉간극수압과 반복 횟수와의 관계를 그림 7에 나타내었다. 응력비 $\sigma_d/2\sigma'_0=0.407$ 에서 반복재하횟수 $N_c=22$ (회)에서 파괴에 도달하였다. 그림으로부터 반복전단중의 과잉간극수압은 재하 직후에 급격히 증가한 후에 감소하며 구속압인 100kPa에는 도달하지 않고 부의 간극수압이 발생하고 있다. 또한, 변형률은 반복횟수의 증가와 더불어 인장 측으로 점차 증가하며 최종적으로는 공시체의 단부에서 Necking 파괴(사진 3의 파괴형상 참조)가 일어났다. 또한, 상대밀도 80%의 56일 양생 공시체와 상대밀도 50%의 121일 양생 공시체에서 Necking파괴가 일어났다. 이와 같이 Necking파괴를 일으킨 공시체는 시험 후에도 자립하였으며 액상화 현상은 보이지 않았다. 이와 같은 현상은 고온 알칼리수에 의한 양생과정에서 고로 수쇄슬래그가 잠재수경성의 발현으로 점착력이 증가한데 따른 것으로 판단된다(松田博 등 2000).

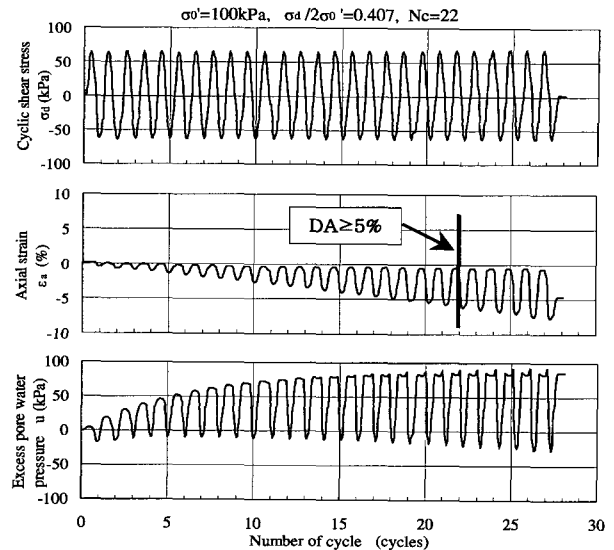


그림 7. GBF slag의 반복 비배수 삼축압축시험에서 얻어진 기록파형 (Dr=80%, 28일 양생)

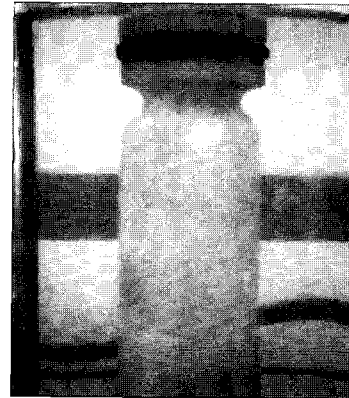


사진 3. Necking파괴 형상

고온 알칼리수로 양생한 $Dr=50\%$ 및 $Dr=80\%$ 의 양생 기간에 따른 고로 수쇄슬래그 공시체에 대한 비배수 반복 삼축압축시험결과와 반복응력비와 반복재하횟수의 관계를 그림 8과 9에 나타내었다. 그림에는 경화도중의 결과와 비교를 위해 미경화 고로 수쇄슬래그의 결과도 함께 나타내었다. 그림으로부터 $Dr=50\%$ 및 $Dr=80\%$ 의 양 조건에 있어서 반복재하횟수 20회에서의 반복강도 R_{20} 은 양생일수의 증가와 더불어 잠재수경성의 발현에 의한 동적강도가 증가하며, 상대밀도가 50%인 느슨한 조건에 비해 80%인 조밀한 조건에서 강도증가가 더 크다는 것을 알 수 있다.

그림 8과 그림 9의 결과로부터 반복재하횟수 20회에서의 반복강도 R_{20} 과 양생일수와의 관계를 그림 10에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 잠재수경성의 발현에 의해 양생일수의 경과와 더불어 고로 수쇄슬

래그의 동적강도는 증가하고 있으며, 이는 기존의 松田 등(2000)의 연구결과와도 동일한 경향을 나타내고 있다. 또한 상대밀도가 큰 쪽이 동적강도의 증가량이 더 크을 알 수 있는데 이는 다음과 같은 원인에 기인한다(高宮 晃一 2004; Shinozaki 2003).

1) 고결의 기점이 되는 토립자간의 접촉점수의 증가

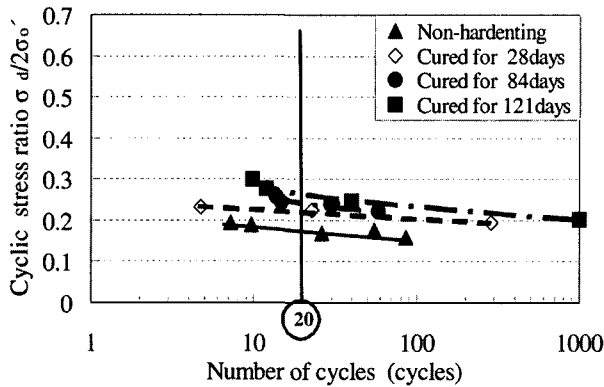


그림 8. 반복응력비 $\sigma_d/2\sigma'_0$ 와 반복재하횟수 N_c 의 관계($Dr=50\%$)

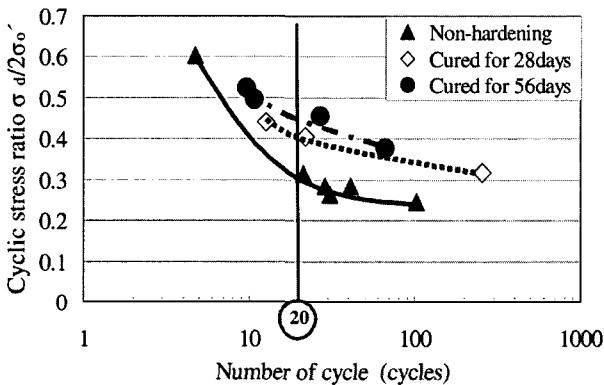


그림 9. 반복응력비 $\sigma_d/2\sigma'_0$ 와 반복재하횟수 N_c 의 관계($Dr=80\%$)

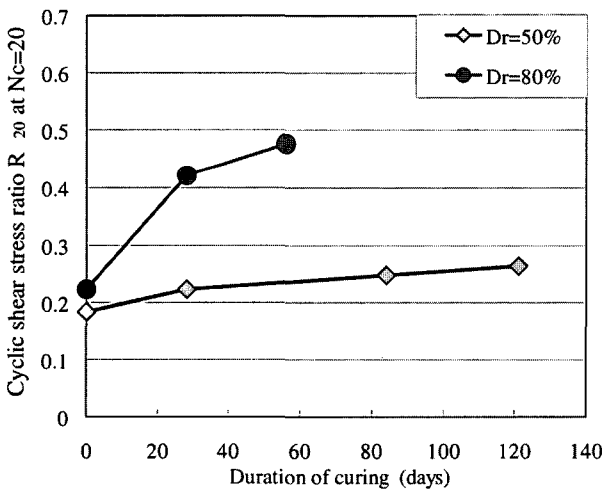


그림 10. 반복강도 R_{20} 과 양생기간의 관계

로 토립자의 골격구조가 더 안정적이다.

2) 전술한 바와 같이 어느 정도의 밀도가 유지되어지는 것이 고로 수쇄슬래그의 고결의 조건이기 때문에 초기밀도가 높은 상대밀도 80%의 경우가 더 경화하기 쉬운 상태이다.

3.3 정적 및 반복 삼축실험결과의 비교

정적 및 반복 삼축실험결과의 비교를 위해 정적 삼축 시험에서 얻어진 내부마찰각 ϕ_d 및 점착력 C_d 와 반복삼축 시험에서 얻어진 반복강도 R_{20} 의 관계를 그림 11과 그림 12에 나타내었다. 그림 11에서 알 수 있는 바와 같이 내부마찰각은 양생기간과 관계없이 $35^\circ \sim 42^\circ$ 의 범위에 있으며, 반복강도는 조밀한 시료와 느슨한 시료에서 양생일수의 증가와 더불어 증가하지만, 내부마찰각과의 직접적인 상관관계는 나타나지 않았다. 그러나 그림 12의 점착력과 반복강도와의 사이에는 상대밀도 $Dr=80\%$

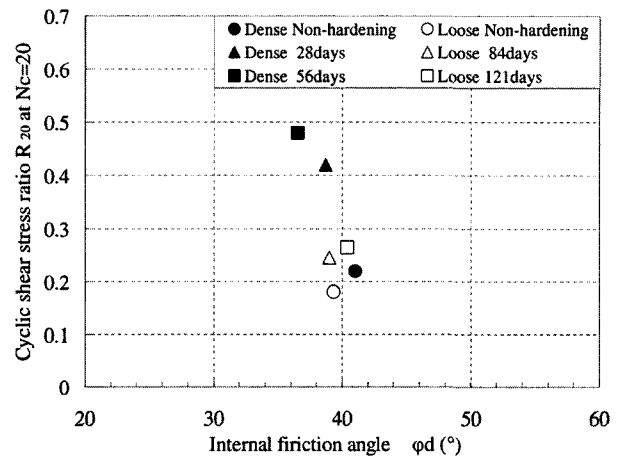


그림 11. 내부마찰각 ϕ_d 와 반복강도 R_{20} 의 관계

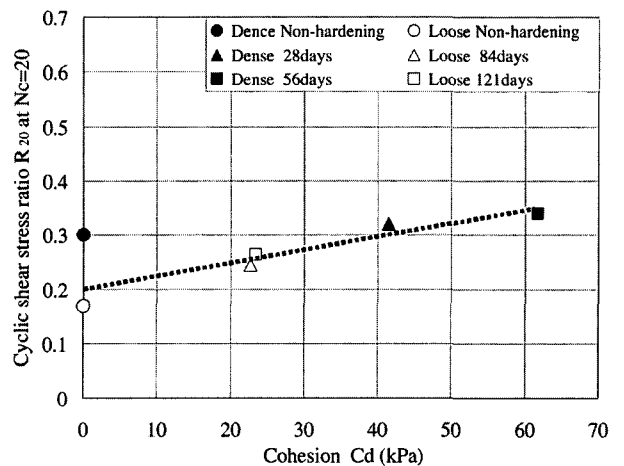


그림 12. 점착력 C_d 와 반복강도 R_{20} 의 관계

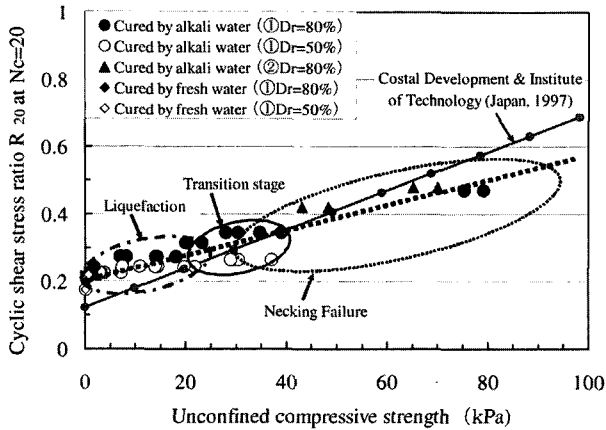


그림 13. 일축압축강도와 반복강도 R_{20} 의 관계

의 미경화 고로 수쇄슬래그의 결과를 제외하고는 선형적인 관계를 보이며, 잠재수경성의 발현으로 인한 점착력의 증가와 더불어 동적강도가 증가함을 알 수 있다.

비배수 반복 삼축시험에서 얻어진 반복재하횟수 20 회에서의 반복강도 R_{20} 과 일축압축강도의 관계를 나타낸 것이 그림 13이다. 그림에는 반복 삼축시험에 있어서의 파괴형태를 실험결과로부터 세 영역(액상화, 천이단계, 파괴)으로 분리하여 나타내었으며, 천이단계는 과잉간극수압의 기준에서는 액상화로 판단되지만 시험 종료 후의 공시체가 경화상태를 유지하여 자립 가능한 상태로 액상화의 판정이 명확하지 않은 경우로 정의하였다. 또한, 비교를 위해 그림에 함께 나타낸 일본의 연안개발기술 연구센터(1997)에서 제안한 시멘트 혼합처리의 경우와 마찬가지로 고로 수쇄슬래그에 있어서도 반복강도 R_{20} 과 일축압축강도 사이에는 선형적인 관계가 있음을 알 수 있으며, 액상화가 일어나지 않는 일축압축강도는 대략 $40 \sim 50 \text{ kN/m}^2$ 의 범위로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 잠재수경성의 발현에 의한 고로 수쇄슬래그의 동적강도의 추이를 조사하기 위해 고온알칼리 수(수산화칼슘 첨가, pH=12, 수온 약 80°C)로 양생한 공시체에 대해서 반복 삼축압축시험, 정적 삼축압축시험 및 일축압축시험을 수행하고 경화의 정도와 동적강도 및 일축압축강도의 관계로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 미경화의 고로 수쇄슬래그는 큰 투수성에 의한 과잉간극수압의 상승 억제효과와 각이진 입자형상에 의한 큰 내부마찰각 및 맞물림 효과에 의해 동적강

도가 표준사인 Toyoura sand 및 천연사인 Genkai sand보다 큰 값을 나타내므로, 액상화 대책을 위한 대체재로서의 활용성이 기대된다.

- (2) 담수조건에서 189일간 양생한 고로 수쇄슬래그는 잠재수경성의 발현으로 인하여 점착력이 나타난다.
- (3) 고로 수쇄슬래그를 고온알칼리 수로 양생하면 양생일수의 증가와 더불어 경화가 진행되어 전형적인 액상화 거동인 급격한 간극수압 및 변형률의 증가를 보이지 않고 점증하여 Necking 파괴를 나타낸다.
- (4) 고로 수쇄슬래그의 동적강도 및 일축압축강도는 양생에 의한 잠재수경성의 발현으로 인하여 증가하며 초기상대밀도가 큰 경우에는 토립자간의 접촉점의 증가로 인하여 동적강도의 증가가 크게 나타난다.
- (5) 재하횟수 $N_c=20$ 회에서의 반복응력강도 R_{20} 과 양생일수의 증가에 따른 잠재수경성의 발현에 의해 생성된 점착력 C_d 사이에는 선형적으로 동적강도가 증가한다.
- (6) 본 연구에서, 고온 알칼리 수로 양생한 고로 수쇄슬래그는 잠재수경성의 발현으로 반복응력강도 R_{20} 과 일축압축강도 사이에는 선형적인 관계가 있으며, 일축압축강도로부터 고로 수쇄슬래그의 액상화의 예측 및 판정이 가능해질 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구의 수행에 있어 논문의 작성에 대한 조언과 지도를 도와주신 일본 Yamaguchi 대학 공학부 사회건설 공학과의 Matsuda Hiroshi 교수님과 실험 및 자료정리에 함께한 동대학교 대학원 이공학연구과의 Hashiguchi Daisuke, Baba Kakeru, Muraoka Kenji에게 깊은 감사를 드린다.

참고 문헌

1. 반봉찬 (1996), “제철·제강 슬래그의 발생과 그 이용”, 폐기물, 중앙환경신문사, 39권(96. 4), pp.36-41.
2. 유남재, 박병수, 정길수, 고정환, 김지성 (2005), “슬래그 다짐말뚝으로 개량된 복합지반의 지지력 및 파괴메카니즘에 관한 원심모형실험”, 한국지반공학회 논문집, 제21권, 제1호, pp.59-67.
3. 高宮晃一, 松田博, 篠崎晴彦, 大平尚実, 来山尚義, 村上守 (2004), “軽量盛土材料としての高炉水砕スラグの経年変化”, 第39回地盤工学研究発表会講演論文集, pp.605-607.
4. 橋口大輔, 松田博, 白元珍, 篠崎晴彦, 馬場翔, 来山尚義, 高宮晃一 (2005), “未硬化高炉水砕スラグの液状化特性”, 第40回地盤工学研究発表会講演論文集, pp.585-586.

5. 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論文集, pp.1341-1344.
6. 西 勝, 佐藤康文, 南部光広 (1982a), “埋立地盤造成材料としての高炉水砕スラグの強度特性”, 土と基礎, Vol.30, No.12, pp.41-48.
7. 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.
8. 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>
9. 篠崎晴彦, 松田博, 白元珍, 橋口大輔, 馬場翔, 来山尚義, 高宮晃一 (2005), “高炉水砕スラグの硬化が液状化特性におよぼす影響”, 第40回地盤工学研究発表会講演論文集, pp.587-588.
10. Costal Development and Institute of Technology and Nippon Slag Association (1997), “Guideline of granulated blast furnace slag for port construction”.
11. 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.
12. 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.
13. Shinozaki, H. and Matsuda, H. (2003), “Field tests on ground improvement using granulated blast furnace slag”, *Proceedings of the international conference organized by British Geotechnical Association and held in Dundee*, pp.817-824.

(접수일자 2006. 4. 25, 심사완료일 2006. 8. 21)