

반복전단 방향의 영향에 따른 GBFS의 지진후 침하 거동

The Effect of Shear Direction on the Behavior of the Post-earthquake Settlement of GBFS

백 원 진¹ Back, Won-Jin

松田 博² Matsuda Hiroshi

박 경 환³ Park, Kyung-Hwan

김 진 영⁴ Kim, Jin-Young

Abstract

In this study, in order to clarify the effect of the direction of cyclic shear on the post-earthquake settlement the multi-directional shear tests were carried out for Toyoura Japan standard sand, Genkai natural sand, Kaolinite and the Granulated Blast Furnace Slag (GBFS). The diameter and the height of the specimen are 75 mm and 20 mm, respectively. In a series of tests, the number of strain cycles was adjusted as $n=5, 20, 30, 100, 200$ and the shear strain amplitudes were varied from 0.1% to 1.0%. The relative densities of each samples were also adjusted as $D_r=50, 60$ and 70%. From the test results for Toyoura sand and GBFS, it is clarified that the post-earthquake settlement is relatively large at the small relative density and becomes large with the shear strain amplitude. When the influence of difference on the direction of cyclic shear decreases, the post-earthquake settlement strain for Toyoura sand is converged to a constant value, but the GBFS increases with the number of strain cycles. In addition, the post-earthquake settlement is in the order of Kaolinite > Toyoura sand > Genkai sand > GBFS.

요 지

본 연구에서는 지진후의 침하에 미치는 반복 전단방향의 영향을 명확히 하기 위해, 일본의 표준사인 Toyoura sand와 천연모래인 Genkai sand 및 고로수쇄슬래그(GBFS)에 대해서 다축(다방향) 전단실험을 수행하였다. 공시체는 높이 75mm, 직경 20mm이다. 일련의 실험에서, 변형률 반복 재하회수 $n=5, 20, 30, 100, 200$ 회로 변화시켜 행하였으며, 전단변형률 진폭은 0.1%에서 1.0%까지 변화시켰다. 각 공시체의 상대밀도는 50, 60, 70%를 대상으로 하였다. Toyoura sand와 고로수쇄슬래그에 대한 실험결과로부터, 반복전단후의 침하는 상대밀도가 작을수록 크게 되며, 전단변형률 진폭의 증가와 더불어 크게 나타났다. 반복전단 방향의 차이에 따른 영향이 감소한 후에 Toyoura sand의 전단후의 침하는 일정치에 수렴하지만, 고로수쇄슬래그는 반복전단회수의 증가와 더불어 증가되었다. 또한, 반복전단후의 침하는 Kaolinite > Toyoura sand > Genkai sand > GBFS의 순으로 나타났다.

Keywords : Granulated blast furnace slag, Multi-directional shear, Post-earthquake settlement, Shear strain amplitude

1 정회원, 전남대학교 지역·바이오시스템공학과 조교수 (Member, Associate Prof., Chonnam National Univ., bwj215@jnu.ac.kr, 교신저자)

2 일본지반공학회 정회원, 야마구치대학 공학부 사회건설공학과 교수 (Member of JGSE, Prof., Faculty of Eng., Yamaguchi Univ.)

3 순천제일대학교 토목공학과 겸임교수 (Adjunct Prof., Suncheon First College.)

4 전남대학교 지역·바이오시스템공학과, 석사과정 (Graduate Student of Master Courses, Chonnam National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지진에 의해서 단기간에 충격파가 모래지반에 전달되어 발생된 과잉간극수압에 의해 지반은 액상화 현상을 일으키며, 간극수압의 소산과 더불어 지반침하가 발생된다. 이러한 침하문제는 지진에 의한 직접적인 지반피해로 알려져 있으며, 오랜 기간 동안 많은 연구가 행해져 왔다. 이와 같은 지진후의 지반침하에 관한 연구로부터 포화상태에 있는 지반이 지진 등에 의해 교란되어지면 지반내에 축적된 과잉간극수압의 소산과 더불어 지반침하가 일어나며, 지진과 같은 불규칙한 전단이력에 의한 지반의 침하특성에 대해서도 많은 연구가 행해져 왔다. 그러나 이들 연구의 대부분이 일방향 전단시의 조건을 대상으로 한 것들이다(Seed, H. B. and Silver M. L. (1972), Tatsuoka et. al. (1984), Ohara, S. and Matsuda, H. (1998)).

Fig. 1은 Hyogo-ken Nambu 지진시에 측정된 가속도 파형에 근거하여 얻어진 지반내부의 전단변형률 이력곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼, 전단변형률의 방향성은 명백하게 일방향이 아닌 복잡한 거동을 나타내고 있다. 즉, 지진에 의해 발생하는 지반침하를 추정함에 있어서 지진가속도가 다방향으로 작용하는 경우에 대해서도 명확히 할 필요성이 요구되어진다.

일방향 및 다방향 진동을 받는 모래층의 재압밀 시험결과의 비교는 설계시에 진동의 영향을 고려할 때, 반드시 필요한 과정이다. 또한, 최근 인공적으로 산출되는 산업부산물인 재순환재료를 토목/지반재료에 이용하기

위하여 천연모래의 대체 재료로서 적용하는 경우가 늘어나고 있다. 이는 환경문제에 의한 천연모래의 채취가 곤란한 상황이며, 대체 재료의 필요성이 대두되고 있는 현실을 고려하여 재순환재료에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며(반봉찬, 1996; 이광찬 등 1999, 천병식 등 2002, 유남재 등 2005, 백원진, 이강일, 2006(a, b)), 앞으로도 재순환재료를 매립재료, 옹벽의 뒤채움재, 성토재 및 지반개량재로 적용하는 사례가 증가될 것으로 예상된다. 따라서 일본 표준사인 Toyoura sand, 재순환재료(Granulated Blast Furnace Slag : 이하 GBFS로 표기)에 대한 다방향 진동을 고려하고, 그 시험결과를 천연모래와 비교하여 지진후의 지반침하특성에 대해서 검토할 필요가 있다.

한편, 반복전단방향이 모래지반의 침하에 미치는 영향에 관해서 명확히 규명되지 않은 점이 많다. 종래의 연구로서, Pyke 등(1975)의 연구결과에서는 수평직각 2방향으로부터 반복재하를 동시에 행할 때 발생하는 침하는 각 방향으로부터 독립적으로 반복재하를 행해서 얻어진 침하의 합과 같음을 나타내었다. 또한, Nagase 등(1998)은 반복전단후에 발생하는 모래층의 침하에 미치는 재하 방향성의 영향은 없다고 보고하였다.

따라서, 본 연구에서는 다방향으로 발생하는 지진파에 근거한 반복전단을 재현할 수 있도록 수평면상에서 직각 2방향에서 재하가 가능한 다축 단순전단 시험기를 이용하여, 다방향전단과 등가인 일방향 전단진폭의 검토와 교란을 받은 시료의 침하특성에 대해서 천연모래 및 일본의 표준사인 Toyoura sand와 재순환재료의 하나인 고로수쇄슬래그의 결과를 비교하고자 한다.

2. 고로수쇄슬래그의 기본성질

고로수쇄슬래그는 제철과정에서 생성된 용융상태의 고로슬래그를 고압의 압력수(100~350kPa)로 급랭 입상화시킨 것으로, 선철 1ton당 약 300kg정도가 생산되어진다. 고로수쇄슬래그의 성분은, Table 1에 나타낸 것처럼 산화칼슘(CaO), 실리카(SiO₂), 알루미늄(Al₂O₃), 산화마그네슘(MgO) 외에 소량의 유황(S), 망간(Mn), 산화철(FeO)을 함유하고 있다. Fig. 2에 전자현미경으로 촬영한 입자의 사진을 나타낸다. 그림에 나타난 것처럼 고로수쇄슬래그의 입자내부에는 다수의 기포를 가지고 있으며, 각이진 형상을 하고 있음을 알 수 있다. 또한, 고로수쇄슬래그는 수침상태에서 시간경과와 더불어 스

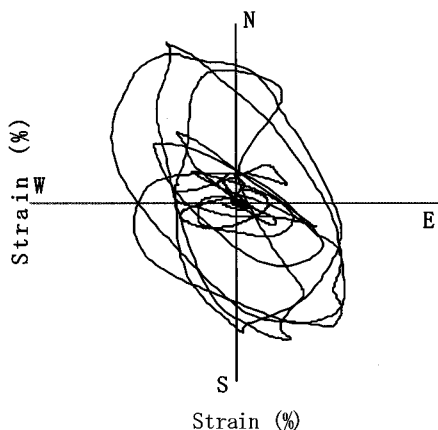


Fig. 1. Orbit of shear strain recorded during 1996 Hyogo-Ken Nambu Earthquake

Table 1. Chemical properties of materials (%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	MnO	FeO
GBFS	33.4	14.5	41.0	6.0	1.0	0.7	0.4
Portland cement	22.0	5.5	65.0	1.4	1.0	-	3.0
Natural sand	60.0	22.0	0.5	0.8	0.1	0.1	-
Andesite	60.0	17.0	6.0	3.0	0.2	1.0	-
Weathered soil	59.6	22.0	0.4	0.8	0.01	0.1	-

스로 고결되는 잠재수경성을 가지고 있다(佐藤勝久, 1978; 松田博, 2000).

제조시기와 장소가 서로 다른 고로수쇄슬래그의 물리특성을 비교하고자 여섯 곳의 제철소에서 생산된 고로수쇄슬래그와 Genkai sand에 대한 각 시료에 대한 입도분포곡선을 나타낸 것이 Fig. 3이다. 또한 대표적인 GBFS ①, ②, ③과 Genkai sand에 대한 토립자 밀도, 최대/최소 간극비를 비교하여 나타낸 것이 Table 2이다.

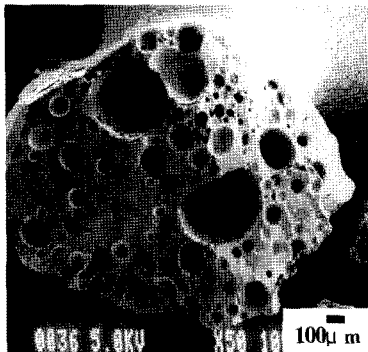


Fig. 2. Micro-photograph of GBFS

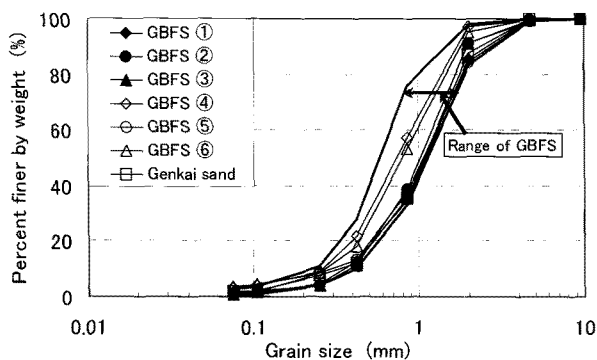


Fig. 3. Grain size distribution curves of GBFS and natural sand

Table 2. Particle density, maximum and minimum void ratios

	ρ_s (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}
GBFS ①	2.694	1.396	1.014
GBFS ②	2.695	1.302	0.844
GBFS ③	2.702	1.413	0.904
Genkai sand	2.661	0.802	0.493

고로수쇄슬래그와 Genkai sand는 토립자 밀도는 거의 동일하지만, 고로수쇄슬래그의 최대/최소간극비가 큰 값을 나타내고 있다. 이는 용융상태의 슬래그를 고압력수를 이용하여 급랭시키는 과정에 입자내부에 다수의 기포를 함유하기 때문이다. Fig. 3에서 알 수 있는 것처럼, 고로수쇄슬래그의 균등계수는 2.5-4.2의 범위에 있으며, 대부분의 고로수쇄슬래그의 입도분포곡선이 Genkai sand의 입도분포와 유사한 범위에 있음을 알 수 있다.

3. 실내모형실험

3.1 다축단순전단 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치는 다축 단순전단실험기로 그 개요도를 Fig. 4에 나타내었다. 이 실험장치는 수평면상의 직각 2방향에서 독립된 반복전단변형을 공시체에 부가할 수 있는 특징을 가지고 있다. 전단 링내의 공시체는 직경 75mm, 높이 20mm이다. 전단력은 직각 2방향에 설치된 전기유압식 서보시스템에 의해서 가해지며, 각 서보시스템은 독립적으로 제어 가능하므로, 공시체에는 임의의 방향에 대해서 임의의 파형의 반복전단변형을 가하는 것도 가능하다. 또한, 연직응력은 공기압 서보시스템에 의해서 재하하도록 되어있다(Matsuda et al., 2004).

3.2 실험방법 및 재료

본 연구에서는, 일본 Toyoura에서 생산되는 표준사인 Tououra sand와 자연하천모래인 Genkai sand 및 GBFS를 이용한 일련의 반복전단 시험을 수행하고, 기존에 수행된 Kaolin 점토와의 반복전단후의 침하량의 크기를 비교/분석하였다. 또한 실험조건으로서는 수중에서 포화시켜 공기를 제거한 각시료를 수중낙하법에 의해 예압밀후의 해당 상대밀도(50, 60, 70%)로 되도록 다지고, 상대밀도의 허용오차를 ± 3%로 하였다. 또한 예압밀 시

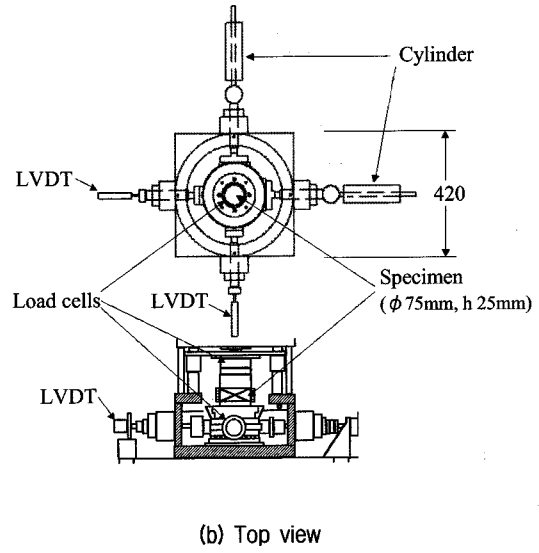
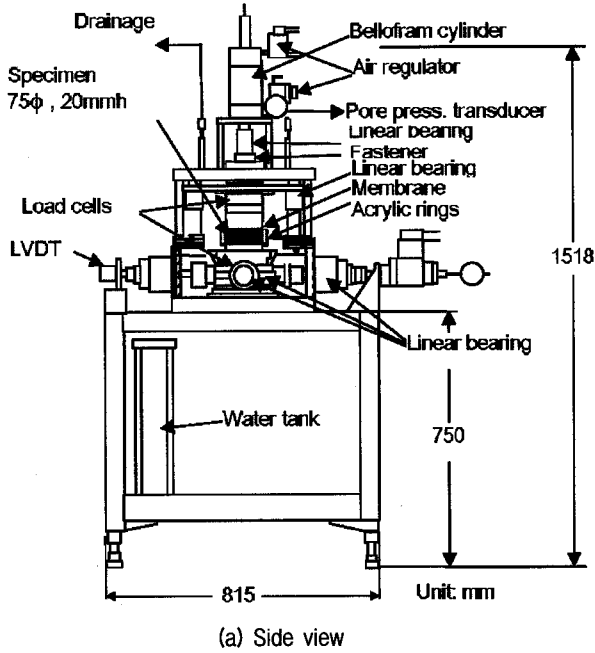


Fig. 4. Multi-directional cyclic simple shear test apparatus

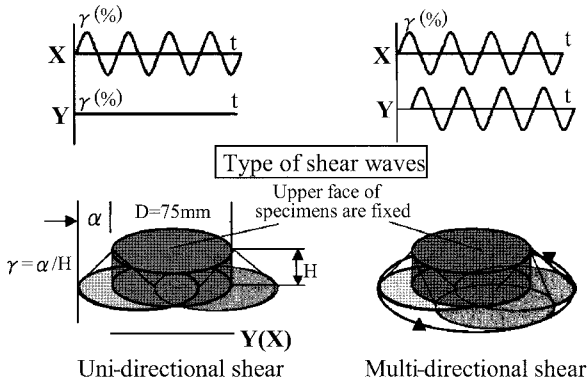


Fig. 5. Shear patterns and a typical deformation of specimens

간은 입상재료인 점을 고려하여 15분~30분을 행하고, 구속압 49kPa를 계속해서 가하고 있는 상태로 비배수 상태에서 반복전단을 수행하고, 반복 전단이 끝난 후 바로 배수를 시켜 과잉간극수압의 소산에 따른 압밀침하량을 측정하였다. 반복전단파형은 sine파로서 Fig. 5(반복 전단중의 공시체 저면의 궤적을 병기 : 본 연구에서는 일방향 전단시의 변형률 진폭 γ 는 sine파의 편진폭을 공시체의 높이로 나눈 값으로, Gyrotary shear에서는 궤적의 원의 반경을 공시체의 높이로 나눈 값으로 정의하였음)에 나타내었으며, 일방향 및 다방향 전단시험의 재하방법은 다음과 같다.

- 1) X방향으로만 반복전단을 행하는 일방향 전단시험
- 2) 직각 2방향으로부터 90°의 위상차를 부가하여 반복전단을 행하는 다방향 전단시험(Gyrotary shear)

또한, 공시체의 상대밀도는 $Dr=70(\pm 3)\%$, $60(\pm 3)\%$, $50(\pm 3)\%$ 로 조정하였으며, 일반적으로 지진관련한 문제를 취급할 때 반복전단 변형률의 파형은 Sine파를 적용하며, 주기는 0.1초~5초가 적용되어지나, 본 연구에서는 중간정도의 반복주기를 고려하여 반복전단의 주기는 2초로 하였다(입상재료를 사용한 반복전단주기의 영향은 그다지 크지 않다는 연구결과(백원진 2006 a)를 참고). 그러나 사용재료, 시험조건 등에 따라 이와 같은 동적 시험의 경우, 가진 주파수의 영향이 반복전단중의 침하 및 전단후의 침하에도 영향을 미칠것으로 판단되므로 이에 대한 고려가 필요할 것이다. 전단변형률 진폭은 $\gamma=0.1, 0.3, 1.0\%$ 의 3 경우에 대해 행하고, 반복전단횟수 $n=5, 20, 30, 100, 200$ 회로 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

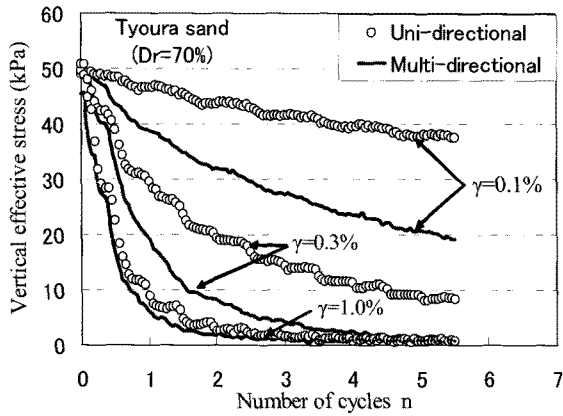
4.1 반복전단중의 유효응력 감소

Fig. 6 (a), (b)에 Toyoura sand 및 고로수쇄슬래그의 연직유효응력과 전단횟수와의 관계를 일방향전단과 다축방향전단에 대해 전단변형률 진폭별로 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전단변형률 진폭의 증가와 더불어 양 시료 모두 유효응력 감소량이 증가하고, 동일 전단변형률 진폭에서 전단방향의 영향을 받는 다축방향 전단이 일방향 전단에 비해 유효응력 감소량이

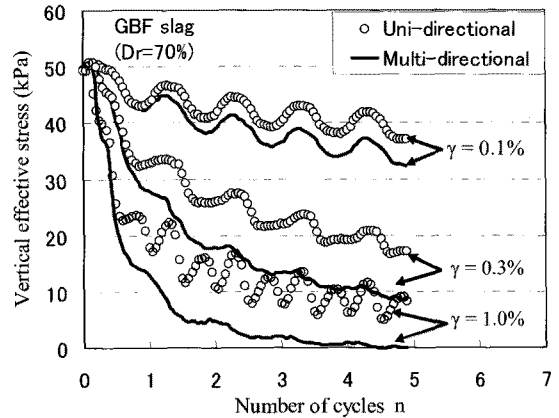
크게 나타났다. 또한, 고로수쇄슬래그의 유효응력 감소량이 Toyoura sand보다 작은 이유로서는 입도분포의 차이와 각진 입자형상에 의해 반복전단 중에 입자사이의 맞물림 현상(interlocking 현상)에 기인되는 것으로 판단

된다.

Fig. 7 (a), (b), (c)는 Toyoura sand에 대한 반복전단중의 유효응력감소비($\Delta\sigma_v'/\sigma_{v0}'$; $\Delta\sigma_v'$ 는 유효응력 증분, σ_{v0}' 는 초기유효응력)와 전단변형률 진폭과의 관계를 반복전

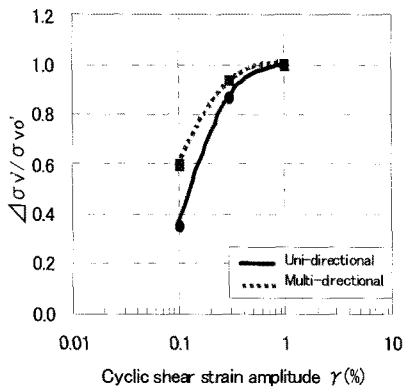


(a) Toyoura sand (Dr=70%)

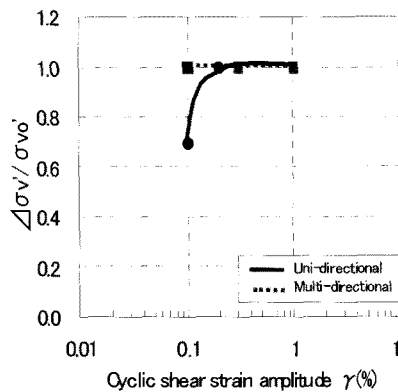


(b) GBFS (Dr=70%)

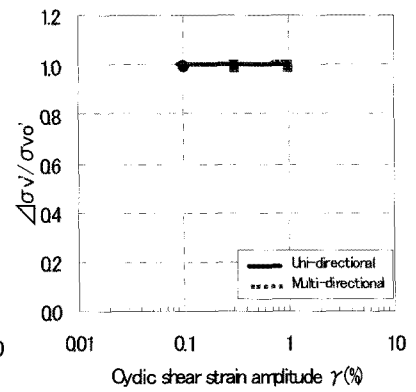
Fig. 6. Changes in vertical effective stress



(a) n=5

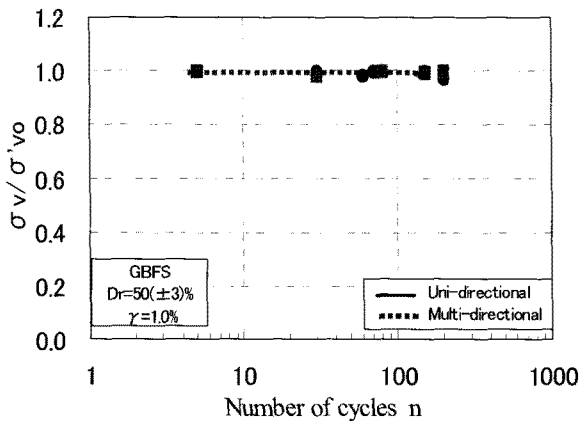


(b) n=30

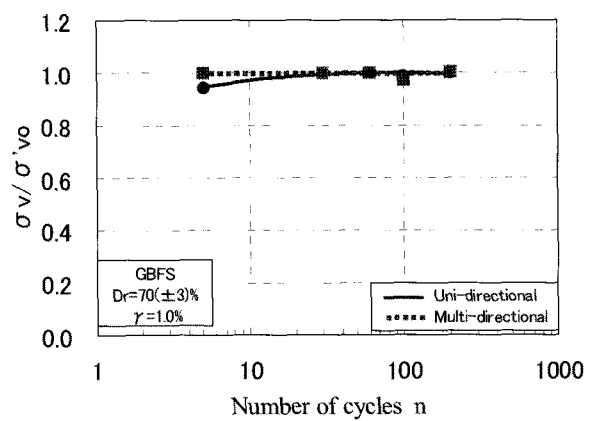


(c) n=200

Fig. 7. Relations between ($\Delta\sigma_v'/\sigma_{v0}'$) and γ for Toyoura sand



(a) Dr=50(±3%)



(b) Dr=70(±3%)

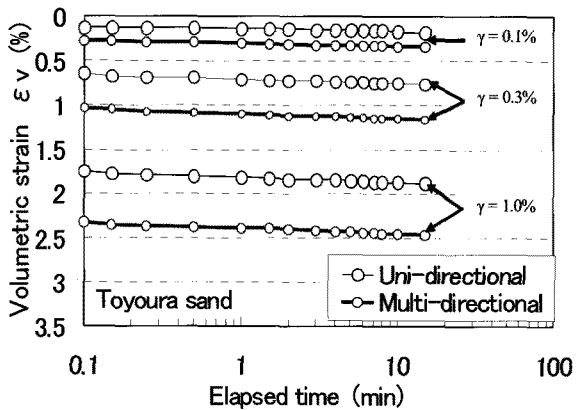
Fig. 8. Relations between ($\Delta\sigma_v'/\sigma_{v0}'$) and n for GBFS

단횟수 $n=5, 30, 200$ 회에 대해서 나타낸 것이다. 반복횟수 $n=5$ 의 경우, 전단변형률 진폭 1.0%만이 액상화하고 있으며, $n=30$ 의 경우에는 0.2~1.0%에서 액상화 되었고, $n=200$ 에서는 전단변형률 진폭과 관계없이 액상화가 일어났음을 알 수 있다.

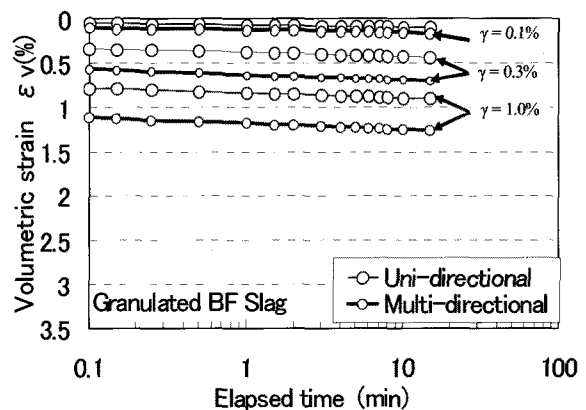
Fig. 8은 고로수쇄슬래그의 반복전단중의 유효응력감소비와 반복횟수의 관계를 전단변형률진폭 1.0%에서의 상대밀도 $Dr=50\%$ 및 70% 에 대해 나타낸 것이다. $Dr=70\%$ 에 있어서는 일방향전단의 반복횟수 5회를 제외하고는 액상화를 일으켰으며, $Dr=50\%$ 에서는 모든 조건에 대해서 액상화 되었음을 알 수 있다.

4.2 반복전단중의 침하특성

Fig. 9 (a), (b)에 Toyoura sand 및 고로수쇄슬래그의 반복전단후의 제압밀 과정중의 연직변형률과 경과시간과의 관계를 각 전단변형률의 변화에 대한 일방향 및



(a) Toyoura sand



(b) GBFS

Fig. 9. Relationship between volumetric strain and elapsed time at post cyclic shear test

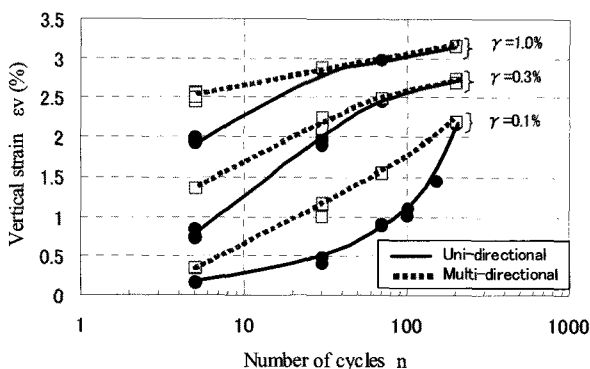


Fig. 10. Relations between ϵ_v and n for Toyoura sand ($\gamma=0.1\sim 1.0\%$)

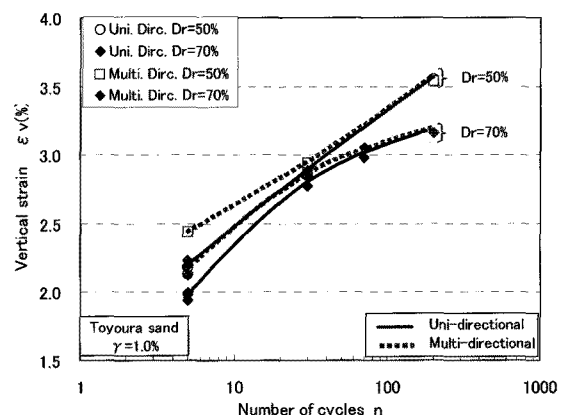


Fig. 11. Relations between ϵ_v and n for Toyoura sand ($Dr=50\%, 70\%$)

다축방향전단실험의 결과를 나타낸다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 침하는 초기에 일시적으로 탄성침하를 일으킨 후 서서히 증가하고 있으며, 두 시료 모두 반복전단시의 전단변형률이 클수록 액상화후의 침하가 크게 됨을 알 수 있다. 또한, 고로수쇄슬래그의 침하가 적게 나타나고 있다. 이는 앞에서 언급한 것처럼 각이진 입자형상과 큰 내부 마찰각에 기인한다.

4.3 반복전단후의 침하특성

Fig. 10은 Toyoura sand에 대한 상대밀도 $Dr=70\%$, 전단변형률 진폭 0.1~1.0%에 대한 침하변형률과 반복횟수의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 일방향 및 다축방향전단 모두에서 전단변형률 진폭의 증가와 더불어 침하변형률이 증가하고, 전단방향의 영향이 사라진 후에 있어도 침하변형률이 증가하고 있다. 이는 종래의 연구결과인 Pyke의 제안과 Nagase

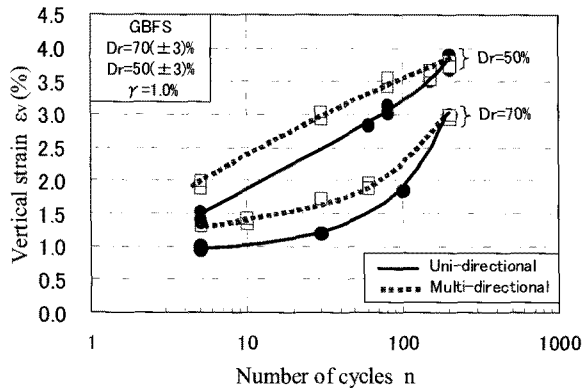


Fig. 12. Relations between ϵ_v and n for GBFS

등이 제안한 반복전단 후에 발생하는 모래층의 침하에 미치는 재하방향의 영향은 없다고 하는 것과 다른 결과이다. 이는 1방향 재하와 달리 90°의 위상차를 가진 다방향 전단의 경우에 전단변형률 진폭이 클 경우, 입자의 파쇄도가 크기 때문에 판단된다(Matsuda et. al, 2006). 또한, 전단변형률 0.3% 및 1.0%의 경우, 전단방향의 영향이 사라진 후에는 수렴함을 알 수 있다.

Toyoura sand의 상대밀도 $Dr=50\%$, 70% 에 대해 침하 변형률과 반복전단횟수와 관계를 Fig. 11에 나타낸다. 그림으로부터 상대밀도 50%에서는 반복전단횟수 5~7 회에서, 상대밀도 70%에서는 30회를 전후로 일방향전단과 다축방향전단의 침하변형률이 일치하여 전단방향의 영향이 사라졌다. 이는 반복전단중의 액상화로 인한 과잉간극수압이 모두 소산된데 따른 것으로 판단되며, 액상화가 일어나지 않은 반복회수에 대해서는 잔류과잉간극수압의 영향이 큰 것으로 판단된다. 또한 전단방향의 영향을 받고 있는 경우에는 전단전의 상대밀도가 클수록 전단후에 발생하는 침하가 감소하며, 전단방향의 영향이 사라진 후에도 상대밀도가 클수록 침하가 작게 일어난다.

Fig. 12는 상대밀도 $Dr=50\%$, 70% (전단변형률 진폭 $\gamma=1.0\%$)에서의 고로수쇄슬래그의 침하변형률 및 반복전단횟수의 관계를 나타낸다. 고로수쇄슬래그의 경우는 Toyoura sand의 결과와 달리 반복전단횟수 200회 전후에서 일방향전단과 다축방향전단의 영향이 없어짐을 알 수 있다. 이와 같이 반복전단횟수가 200회를 전후하여 전단방향의 영향이 상쇄되는 이유로서는 고로수쇄슬래그의 각진 입자형상과 큰 내부마찰각의 영향으로 반복전단중에 액상화에 대한 저항성이 증가하여 유효응력 감소비가 적은 것에 기인하는 것으로 판단된다. 또한, 상대밀도가 클수록 침하변형률이 적게 나타난다.

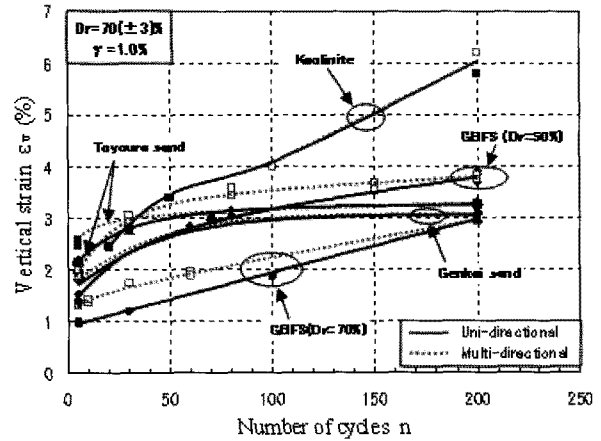


Fig. 13. Relations between ϵ_v and n for all samples ($Dr=50\%$, 70%)

Fig. 13은 각 시료에 대해서 얻어진 상대밀도 70%에 있어서의 침하변형률과 반복전단횟수의 관계를 나타낸 것으로 비교를 위해 고로수쇄슬래그 상대밀도 50%의 결과도 병기하였다. 이 그림에서는 횡축을 일반좌표를 이용하여 반복전단회수의 증가와 더불어 침하변형률이 Kaolin점토를 제외하고는 일정 값에 수렴해 감을 나타내고자 하였다. 그림에서 나타난 것처럼 전단방향의 영향이 사라진 경우에 있어서는 일방향전단과 다축방향전단에 양측에서 반복전단후의 침하변형률의 크기는 Kaolin 점토 > Toyoura sand > Genkai sand > 고로수쇄슬래그의 순서로 나타남을 알 수 있다. 이들 결과로부터 고로수쇄슬래그는 자연모래에 비해 전단방향의 영향이 사라진 후의 침하억제효과가 있음을 알 수 있다. 이는 고로수쇄슬래그가 큰 내부마찰각을 가지며, 또한 입자가 각진 형상을 하고 있어 입자간의 Inter-locking효과에 의해 액상화에 대한 저항성이 증대된데 따른 것으로 판단된다. 사질성분이 주를 이루는 Toyoura sand, Genkai sand 및 고로수쇄슬래그의 경우, 입상재료로서 체적압축계수(m_v)는 압밀시험을 수행한 결과 고로수쇄슬래그 > Genkai sand(Toyoura sand에 대한 기존의 연구는 수행되지 않음)의 순으로 나타났으나, 침하변형률이 역순으로 나타난 것은 입자형상에 따른 영향으로 판단된다(岡田尙樹, 2003).

5. 결론

본 연구에서는, 실제의 지진동과 같은 전단변형률 이력을 재현 가능한 다축단순전단 실험기를 이용하여 일본 표준사인 Toyoura sand, 자연모래인 Genkai sand 및

고로수쇄슬래그를 이용한, 전단방향의 영향이 사라진 후의 전단변형률 진폭 및 상대밀도에 따른 차이를 비교 검토하였다. 또한 Kaolrin 점토에 대한 기존의 연구결과를 이용하여 점토와의 비교로부터 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

- (1) 반복전단후의 사용시료들에 대한 침하특성은, 전단 방향의 영향이 사라진 후에도 전단변형률진폭이 증가함에 따라 침하변형률도 증가한다. 또한, 반복전단전의 상대밀도가 작을수록 전단후의 침하변형률이 크게 된다. 이는 1방향 재하와 달리 90°의 위상차를 가진 다방향 전단의 경우에 반복회수가 작을 경우, 입자의 파쇄도가 크기 때문으로 판단된다.
- (2) 고로수쇄슬래그(Dr=70%)의 반복전단 중의 유효응력 감소 및 반복전단후의 재압밀시의 침하변형률이 다른 자연모래에 비해 적게 나타났다. 이는 고로수쇄슬래그가 가지는 큰 전단강도(내부마찰각)와 입자특성 및 전단과정중의 액상화에 저항하는 능력(입자간 Inter-locking 효과)이 큰 것에 기인한다.
- (3) 일방향 및 다축방향전단시험에서의 반복전단중에 발생된 과잉간극수압의 소산과정에서의 유효응력의 감소비 및 반복전단 후에 발생한 침하변형률은 고로수쇄슬래그 < Genkai sand < Toyoura sand < Kaolrin 점토의 순으로 나타났다.

다만, 본 연구에서는 반복변형률 파형을 Sine파로 주기 2초에 대해 얻어진 결과로, 가진 주파수의 영향을 고려한 추가시험에서 얻어진 실험결과에 대해 추가로 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 반봉찬 (1996), “제철·제강 슬래그의 발생과 그 이용”, 폐기물, 중앙환경신문사, 39권, pp.36-41.
2. 백원진 (2006a), “고로수쇄슬래그의 경화가 액상화 강도에 미치는 영향”, 한국지반공학회 논문집, 제 22권 8호, pp.99-106.
3. 백원진, 이강일 (2006b), “뒤틀채움재로 이용한 고로수쇄슬래그의 토압특성에 관한 실험적 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제22권, 8호, pp.119-127.
4. 이광찬, 이문수 (1999), “재활용을 위한 전로슬래그의 투수성 고찰(1)”, 한국지반공학회 논문집, 제 15권, 제4호, pp.65-84.
5. 유남재, 박병수, 정길수, 고경환, 김지성 (2005), “슬래그 다짐말뚝으로 개량된 복합지반의 지지력 및 파괴메카니즘에 관한 원심모형실험”, 한국지반공학회 논문집, 제21권, 제5호, pp.59-67.
6. 천병식, 정현철 (2002), “모래다짐말뚝의 모래대체재로서 동슬래그의 활용”, 한국지반공학회 논문집, 제18권, 제5호, pp.195-207.
7. 岡田尚樹 (2003), “多方向繰返しせん断が沈下・強度特性に及ぼす影響に関する研究, 山口大学卒業論文.
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13回土質工学会発表会講演論文集, 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.30, No.12, pp.41-48.
10. Matsuda H., Shinozaki H., Okada N., Takamiya K. and Shinyama K. (2004), “Effects of multi-directional cyclic shear on the post-earthquake settlement of ground”, 13th World Conference on Earthquake Engineering in Vancouver, B.C., Canada.
11. Matsuda H., Baek W.J., Shinyama, K. and Kitayama, N. (2006), “Effects of particle crushing on the geotechnical properties of granulated blast furnace slag”, Proc. of the Int. Symp. On Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media (IS-Yamaguchi 06).
12. Nagase H. and Ishihara K. (1998), “Liquefaction-Induced compaction and settlement of sand during earthquakes”, *Soil and Foundations*, 38(1), 65-76.
13. Ohara S. and Matsuda H. (1988), “Study on the settlement of saturated clay layer induced by cyclic shear”, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.3, 103-118.
14. Pyke R., Seed H. B., Chan C. K. (1975), “Settlement of sands under multi-directional shaking”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 101(GT4), 379-398.
15. Seed H. B. and Silver M. L. (1972), “Settlement of dry sands during earthquakes”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.98, No.SM4, 381-397.
16. Tatsuoka F., Sasaki T. and Yamada S. (1984), “Settlement in saturated sand induced by cyclic undrained simple shear”, *8th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol.III, 95-102.

(접수일자 2009. 7. 22, 심사완료일 2010. 3. 26)