

## **횡하중을 받는 말뚝의 Beam-Column 해석** **A Beam-Column Analysis of Laterally Loaded Piles**

백원진<sup>1)</sup>, Won-Jin Baek, 이강일<sup>2)</sup>, Kang-Il Lee, 이진수<sup>3)</sup>, Jin-Soo, Lee, 김주현<sup>4)</sup>, Ju-Hyun, Kim, 송병관<sup>5)</sup>, Byung-Gwan Song

1) 전남대학교 생물산업공학과 조교수,

Assistant Professor, Dept. of Bio-systems & Agricultural Eng., Chonnam National University.

2) 대진대학교 건설시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Daejin University.

3) 동신대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Dongshin University.

4) 알지오 이엔씨 기술연구소 책임연구원,

Chief Researcher, Institute of Eng. Research, R-geo E & C Co. Ltd.

5) 전남대학교 지역·바이오시스템 공학과 박사과정,

Graduate Student, Dept. of Bio Systems & Rural Eng., Chonnam National University.

**SYNOPSIS** : 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 and the Granulated Blast Furnace Slag (GBFS). In a series of tests, number of strain cycles was changed as  $n=5-200$  and the shear strain amplitude varied from 0.1% to 1.0%. The relative density was also changed as  $Dr=50, 60$  and 70%. From the test results for Toyoura sand and GBFS, it is clarified that the post cyclic settlement is relatively large at the small relative density and becomes large with the shear strain amplitude. When the influence of the direction of cyclic shear is decreases, the post cyclic settlement strain for Toyoura sand is converged to a constant value, but the GBFS is increased with the number of strain cycles.

**Key words** : cyclic shear, multi-direction, relative density, post-earthquake settlement, strain cycles.

### **1. 서 론**

지진 및 교통하중 등의 반복하중에 의해 진동하중을 받는 지반에 대한 지진후의 침하에 대한 연구는 많은 연구가 행해져 왔다(Nagase et. al, 1998, Pyke et. al., 1975). 그러한 지진 후의 지반침하에 관한 종래의 연구로부터 포화상태에 있는 지반이 지진 등의 반복하중에 의해서 교란을 받으면 지반내에는 과잉간극수압이 축적되고 그 소산과 더불어 지반은 침하하게 되는 것, 지반과와 같은 불규칙한 전단이력을 증가인 일방향 전단이력으로 변환함으로써 지반 침하량의 추정이 가능하다는 연구결과가 보고되어져 있다. 그러나 이러한 연구결과의 대부분은 일방향만의 전단을 대상으로 하고 있는 것이다. 그림 1은 Hyogo-Ken 남부지진에서 측정된 가속도 파형을 이용하여 얻어진 지반내의 전단변형률의 이력곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 지진시의 전단변형률의 방향성은 일정하지 않은 복잡한 거동을 나타내고 있다. 즉, 지진에 의해서 발생된 지반침하를 추정하는데 지진가속도가 다방향으로 작용하는 경우에 대해서도 명확히 할 필요가 있다. 이 다방향 진동을 고려하지 않으면 현시점에서의 침하예측은 과소평가하게 된다. 일방향 및 다방향 진동을 받는 모래층의 재압밀시험결과의 비교는 설계시의 진

동의 영향을 고려함에 있어서 중요한 자료가 될 것이다. 또한, 최근 인공적으로 산출되는 재순환재료를 토목/지반재료에 이용하기 위하여 천연모래의 대체재료로 적용하는 경우가 증가하고 있다. 따라서, 천연모래와 재순환재료에 대해 다방향 진동을 고려하고, 그 시험결과를 천연모래와 비교하여 지진후의 지반침하특성에 대해서 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 다방향으로 발생하는 지진파에 근거한 반복전단에 대해 다방향 전단과 등가인 일방향 전단 진폭의 검토와 교란을 받은 시료의 침하 및 강도특성에 대해서 천연모래와 재순환재료의 하나인 고로수쇄슬래그의 결과를 비교하였다.

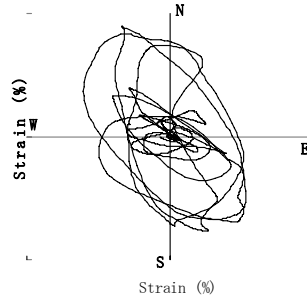
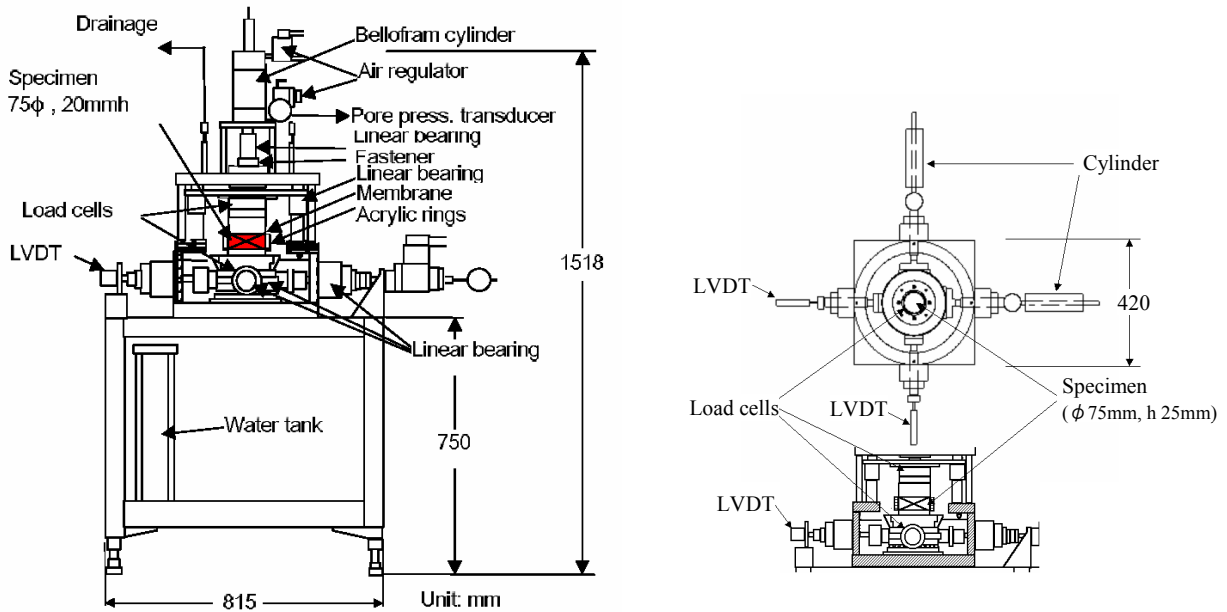


그림 1. 1995년 Hyogo-Ken 남부지진시의 전단변형률 이력곡선

## 2. 실내모형시험

### 2.1 다축 단순전단 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치는 다축 단순전단실험기로 그 개요도를 그림-2에 나타낸다. 이 장치는, 수평면상의 직각 2방향으로부터 독립한 반복전단변형을 공시체에 부가할 수 있다. 공시체는 직경 75mm, 높이 20mm이다. 전단력은 직각 2방향에 설치한 전기유압식 서보시스템에 의해서 가해진다. 각 서보시스템은 독립적으로 가능하므로, 공시체에는 임의의 방향에 대해서 임의의 파형의 반복전단변형을 가하는 것도 가능하다. 또한, 연직응력은 공기압 서보시스템에 의해서 재하한다(Matsuda et. al., 2001).



(a) Side view

(b) Top view

그림 2. 다축 단순전단 실험장치 모식도

## 2.2 재료 및 실험방법

실험은, 포화시료를 전단상자에 소정의 상대밀도로 다져넣고, 압밀압력 49kPa로 압밀한 후에 일정체 적조건하에서 반복전단을 행하였다. 또한, 반복전단 후에 압밀압력 49kPa로 재압밀을 행하고 역상화 후의 침하량을 측정하였다. 반복전단파형은 그림 3에 나타낸 바와 같이 sine파로, 전단방법은 다음과 같다.

- ① X방향으로만 반복전단을 행하는 일방향 전단시험
- ② 직각 2방향에 대해 90°의 위상차를 부가하여 반복전단을 행하는 다방향 전단시험(Gyratory shear)

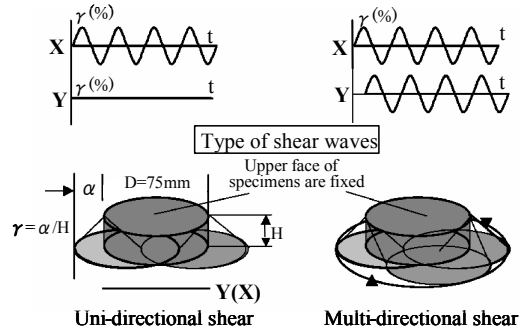


그림 3. 전단파의 형태와 공시체의 변형 형태

또한, 공시체의 상대밀도는  $dr=70(\pm 3)\%$ ,  $60(\pm 3)\%$ ,  $50(\pm 3)\%$ 로 조정하였으며, 반복전단후의 주기는 2초로 하였다. 전단변형률 진폭은  $\gamma=0.1\sim 1.0\%$ 까지 변화시키고, 반복전단횟수  $n=5\sim 200$ 회로 하였다. 전단변형률 진폭  $\gamma$ 의 정의로서는, 일방향 전단에서는 진폭의 크기를 공시체의 높이로 나눈 값으로, 다방향 전단에서는 반복전단 중에 공시체의 저면중심이 그리는 궤적의 반경을 공시체의 높이로 나눈 값으로 정의하였다. 사용한 시료의 입경가적곡선을 그림 4에 나타낸다. 그림에 나타낸 것처럼 고로수쇄슬래그는 자연모래인 Genkai sand와 매우 유사한 입도분포특성을 보임을 알 수 있다.

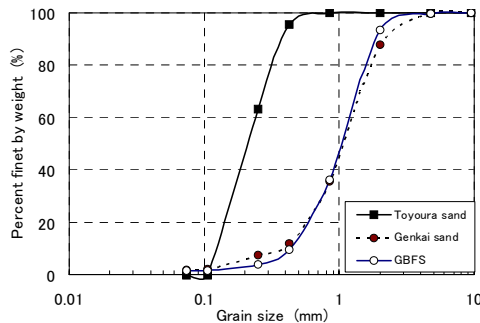


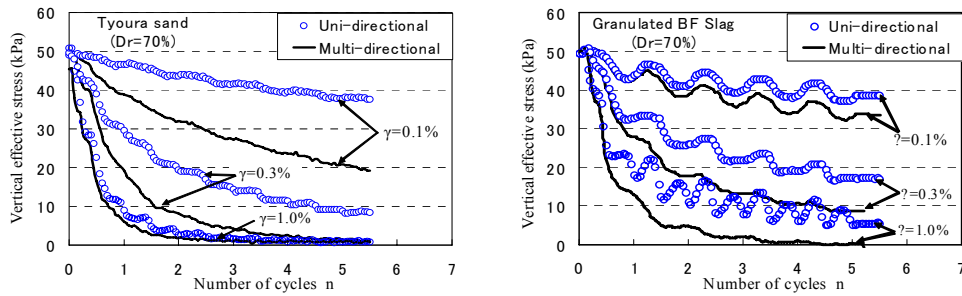
그림 4. 시험시료의 입경가적곡선

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 반복 전단 중의 유효응력 변화특성

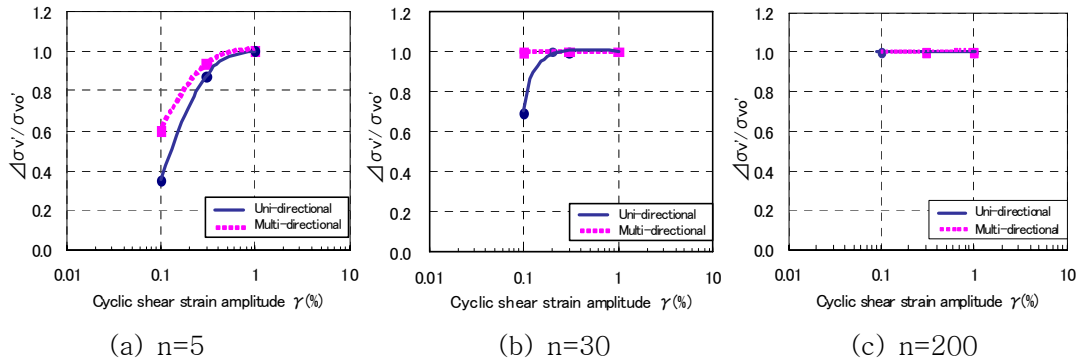
그림 5(a), (b)에 Toyoura sand 및 고로수쇄슬래그의 연직유효응력과 전단횟수와의 관계를 일방향전단과 다축방향전단에 대해서 전단변형률 진폭별로 나타내었다. 그림에서 전단변형률 진폭의 증가와 더불어 두 시료 모두 유효응력 감소량이 크게 되며, 동일 전단변형률 진폭에서 전단방향의 영향을 받는 다축방향 전단이 일방향 전단에 비해 유효응력 감소량이 크게 나타났다. 또한, 고로수쇄슬래그의 유효응력 감소량이 Toyoura 모래보다 작은 이유는 입도분포의 차이와 각진 입자형상에 의해 반복전단 중에

입자사이의 맞물림 현상(interlocking 현상)에 기인된 것으로 판단된다.



(a) Toyoura sand (b) Granulated Blast Furnace Slag  
 그림 5. 반복전단에 따른 유효응력 감소

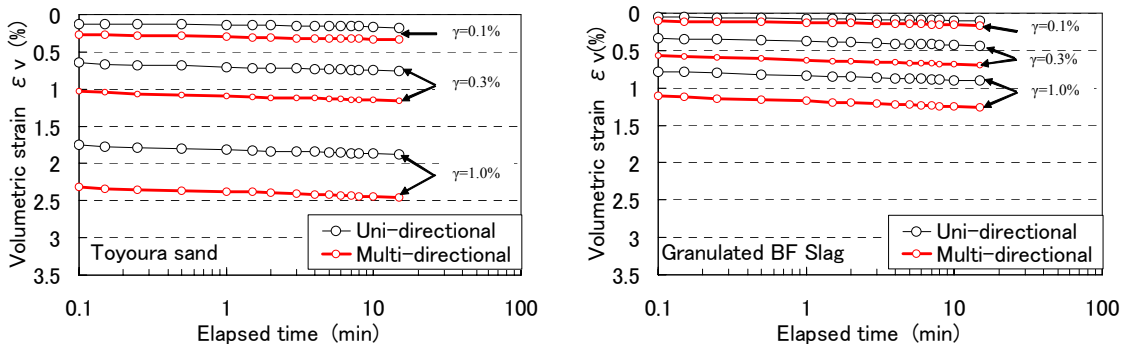
그림 6은, Toyoura sand에 대한 반복전단중의 유효응력 감소비와 전단변형률 진폭과의 관계를 반복 전단횟수 n=5, 30, 200에 대해서 나타낸 것이다. 반복횟수n=5의 경우는 전단변형률 1.0%만이 액상화 되고, n=30의 경우에는 0.2~1.0%에서 액상화 되었고, n=200에서는 전단변형률 진폭과 관계없이 액상화가 일어났음을 알 수 있다.



(a) n=5 (b) n=30 (c) n=200  
 그림 6. Toyoura sand의 유효응력 감소비 ( $\Delta\sigma_v'/\sigma_{v0}'$ )와 전단변형률 진폭  $\gamma$ 의 관계

### 3.2 반복 전단 중의 침하특성

그림 7에 Toyoura sand 및 고로수쇄슬래그의 반복전단후의 재압밀 중의 연직변형률과 경과시간과의 관계를 각 전단변형률의 변화에 대한 일방향 및 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.



(a) Toyoura sand (b) Granulated Blast Furnace Slag  
 그림 7. 반복전단 후의 침하변형률 변화

### 3.3 반복 전단 후의 침하특성

그림 8은, Toyoura sand에 대해 상대밀도  $Dr=70\%$ , 전단변형률진폭 0.1~1.0%에 대한 침하변형률과 반복횟수의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼, 일방향 및 다축방향전단 모두에서 전단 변형률진폭의 증가와 더불어 침하변형률이 증가하지만, 전단방향의 영향이 사라진 후에도 침하변형률이 증가하고 있다. 또한, 전단변형률 0.3% 및 1.0%의 경우, 전단방향의 영향이 사라진 후에는 일정 값에 수렴함을 알 수 있다.

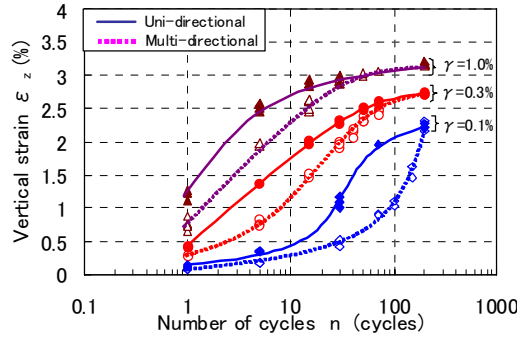
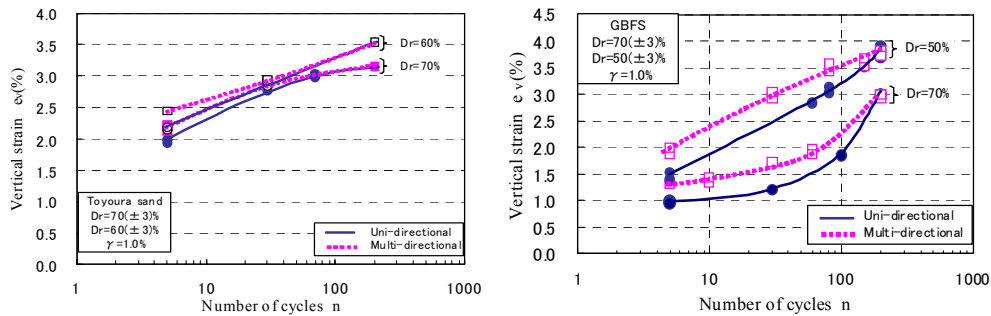


그림 8. 체적변형률과 반복전단횟수의 관계(Toyoura sand;  $\gamma=0.1\sim 1.0\%$ )

그림 9 (a), (b)에 Toyoura sand 및 고로수쇄슬래그의 반복전단 후의 재압밀 중의 연직변형률과 경과시간과의 관계를 각 전단변형률의 변화에 대한 일방향 및 다축방향전단실험의 결과를 나타낸다. 그림 9 (a)에서 알 수 있는 것처럼, 상대밀도 50%에서는 반복전단횟수 5~7회에서, 상대밀도 70%에서는 30을 전후해서 일방향전단과 다축방향전단의 침하변형률이 일치하여 전단방향의 영향이 사라졌다. 또한 전단방향의 영향을 받고 있는 경우에는 전단전의 상대밀도가 클수록 전단후에 발생하는 침하가 감소하며, 전단방향의 영향이 사라진 후에도 상대밀도가 클수록 침하가 크게 일어난다. 또한, 그림 9 (b)로부터, 고로수쇄슬래그의 경우에는 Toyoura sand의 결과와는 달리 반복전단횟수 200회 전후에서 일방향 전단과 다축방향전단의 영향이 없어짐을 알 수 있다. 또한, 상대밀도가 클수록 침하변형률이 적게 나타난 결과가 얻어졌다.



(a) Toyoura sand

(b) Granulated Blast Furnace Slag

그림 9. Toyoura sand와 GBFS의 체적변형률과 반복전단횟수의 관계

그림 10은 각 시료에서 얻어진 상대밀도 70%( $\gamma=1.0\%$ )에 대한 침하변형률과 반복전단횟수의 관계를 나타낸 것으로 비교를 위해 고로수쇄슬래그 상대밀도 50%의 결과도 병기하였다. 이 그림에서는 횡축을 일반좌표를 이용하여 반복전단횟수의 증가와 더불어 침하변형률이 일정 값에 수렴해 감을 나타내고자 하였다. 그림에서 알 수 있는 것처럼, 전단방향의 영향이 사라진 경우에는 일방향 전단과 다축방향 전단의 양측에서 반복전단후의 침하변형률의 크기는 고로수쇄슬래그<Genkai sand<Toyoura sand의 순서로 나타남을 알 수 있다. 이들 결과로부터 고로수쇄슬래그는 자연모래에 비해 전단방향의 영향이 사라진

후의 침하억제효과가 있음을 알 수 있다. 이는 고로수쇄슬래그가 큰 내부마찰각과 각진 입자형상에 의한 입자간의 Inter-locking효과에 의한 것으로 판단된다.

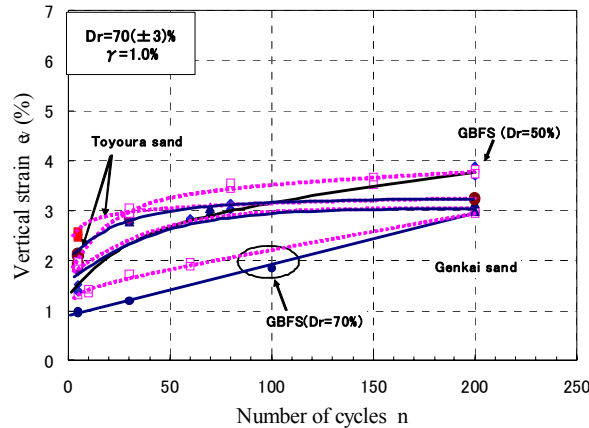


그림 10. 각 시료에 대한 변형률과 반복전단횟수의 관계 (Dr=50%, 70%)

#### 4. 결론

본 연구에서는, 실제의 지진진동과 같은 전단변형률 이력이 재현 가능한 다축 단순전단 실험기를 이용하여 일본 표준사인 Toyoura sand 및 고로수쇄슬래그에 대해 일방향 전단과 다축방향 전단조건에서의 전단방향의 영향이 사라진 후의 전단변형률 진폭 및 상대밀도에 따른 차이를 비교·검토하였다. 그 결과 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

- 1) 반복전단후의 사용시료들에 대한 침하특성은, 전단방향의 영향이 사라진 후에도 전단변형률진폭이 증가함에 따라 침하변형률도 증가한다. 또한, 반복전단전의 상대밀도가 작을수록 전단후의 침하변형률이 크게 된다.
- 2) 고로수쇄슬래그(Dr=70%)의 반복전단 중의 유효응력 감소 및 반복전단후의 재압밀시의 침하변형률이 다른 자연모래에 비해 적게 나타났다. 이는 고로수쇄슬래그가 가지는 큰 전단강도(내부마찰각) 및 입자특성에 기인한다.
- 3) 일방향 및 다축방향전단실험에서의 반복전단 후에 발생한 침하변형률은 고로수쇄슬래그 < Genkai sand < Toyoura sand의 순으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. Matsuda H., Yamamoto T. and Sakuradani K., 2001. The influence of directions of cyclic shear settlement of clay and sand layer, 26th Symposium of Earthquake Engineering in Japan, 605-608. (in Japanese)
2. 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.
3. 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.
4. Nagase H. and Ishihara K., 1998. Liquefaction-Induced compaction and settlement of sand during earthquakes, Soil and Foundations, 28(1), 65-76.