

진동대 시험을 이용한 중공블록 보강 기초의 내진성능분석

Analysis on Seismic Resistance Capacity of Hollow Concrete Block Reinforced Foundation Ground by Using Shaking Table Test

신은철^{1*}, 이연정², 양태철³

Eun-Chul Shin^{1*}, Yeun-Jeung Lee², Tae Chul Yang³

¹Member, Emeritus Professor, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

²Ph. D. Candidate, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

³President of ACEall Co., Ltd., 775-5, Yeonksan-dong, Gangnam-gu, Seoul 06227, Republic of Korea

ABSTRACT

The seventy percentage of Korean Peninsular is covered by the mountainous area, and the depth of west sea and south sea is relatively shallow. Therefore, a large scale land reclamation from the sea has been implemented for the construction of industrial complex, residential area, and port and airport facilities. The common problem of reclaimed land is consisted of soft ground, and hence it has low load bearing capacity as well as excessive settlement upon loading on the ground surface. The hollow concrete block has been used to reinforce the loose and soft foundation soil where the medium-high apartment or one-story industrial building is being planned to be built. Recently the earthquakes with the magnitude of 4.0~5.0 have been occurred in the west coastal and southeast coastal areas. Lee (2019) reported the advantages of hollow concrete block reinforced shallow foundation through the static laboratory bearing capacity tests. In this study, the dynamic behavior of hollow concrete block reinforced sandy ground with filling the crushed stone in the hollow space has been investigated by the means of shaking table test with the size of shaking table 1000 mm x 1000 mm. Three types of seismic wave, that is, Ofunato, Hachinohe, Artificial, and two different accelerations (0.154 g, 0.22 g) were applied in the shaking table tests. The horizontal displacement of structure which is situated right above the hollow concrete block reinforced ground was measured by using the LVDT. The relative density of soil ground are varied with 45%, 65%, and 85%, respectively, to investigate the effectiveness of reinforcement by hollow block and measured the magnitude of lateral movement, and compared with the limit value of 0.015h (Building Earthquake Code, 2019). Based on the results of shaking table test for hollow concrete block reinforced sandy ground, honeycell type hollow block gives a large interlocking force due to the filling of crushed stone in the hollow space as well as a great interface friction force by the confining pressure and punching resistance along the inside and outside of hollow concrete block. All these factors are contributed to reduce the great amount of horizontal displacement during the shaking table test. Finally, hollow concrete block reinforced sandy ground for shallow foundation is provided an outstanding reinforced method for medium-high building irrespective of seismic wave and moderate accelerations.

요 지

한반도의 70%는 산지로 구성되어 있으며, 서해와 남해의 수심은 상대적으로 얇은 편이다. 따라서, 공업단지, 주거단지, 항만 및 공항 부지를 위한 대규모 간척사업이 시행되고 있다. 매립지역의 일반적인 문제는 지반이 연약하여 지지력이 부족할 뿐만 아니라 상당한 침하가 발생된다는 것이다. 중공블록은 중·저층 아파트 또는 단층의 공장건물을 건설하기 위해 계획된 느슨한 연약기초 지반보강을 위해 사용된다. 최근 4.0~5.0의 강도를 가진 지진이 서쪽과 남동쪽 해안지역을 따라 발생하고 있다.

Received 26 Aug. 2021, Revised 8 Oct. 2021, Accepted 8 Dec. 2021

*Corresponding author

Tel: +82-32-765-6551; Fax: +82-32-765-6551

E-mail address: ecshin@inu.ac.kr (E.-C. Shin)

Lee (2019)는 정적 지지력시험을 통해 얇은 기초보강 중공블록의 장점에 대하여 연구하였다. 이 연구에서 블록 내부에 쇄석으로 채워진 보강된 모래지반의 중공블록 동적거동은 진동대 1000 mm x 1000 mm 시험을 통해 연구하였다. 3가지 지진파인 Ofunato, Hachinohe, Artificial 지진파와 2가지 가속도(0.154g, 0.22g)를 진동대 시험에 적용하였다. 중공블록으로 보강된 지반 위의 구조물 수평변위는 LVDT를 사용하여 측정하였다. 중공블록에 의한 지반보강 효율을 평가하기 위하여 지반의 상대밀도를 45%, 65%, 85%로 각각 구성하였으며, 수평변위를 측정하고 한계수평변위 0.015h(건축물 내진등급기준, 2019)와 비교하였다. 중공블록으로 보강된 모래지반에 대한 진동대 시험 결과에 기반해서 벌집 모양의 중공블록은 블록내부에 쇄석 채움으로서 큰 구속력을 가지며, 중공블록의 내부 및 외부를 따라 발생하는 관입저항력으로 인한 큰 주면마찰력을 갖는 것으로 평가되었다. 이러한 모든 요소들은 진동대 시험 중에 수평변위를 상당히 줄이는 것으로 나타났다. 마지막으로, 중공블록 보강 지반은 지진파와 가속도에 상관없이 중·저층 건물의 얇은기초 보강공법으로 매우 우수함이 입증되었다.

Keywords : Shaking table test, Hollow concrete block, Shallow foundation, Seismic wave, Relative density, Acceleration

1. 서론

우리나라는 국토의 70%가 산악지역으로 구성되어 있어, 서해안과 남해안의 수심이 얇은 지역을 매립하여 산업단지, 주거단지, 항만 및 공항 부지로 활용하고 있다. 이러한 해안 매립지역의 공통점은 지반이 연약하여 상당한 침하가 발생되며, 또한 지지력도 부족한 상태이다. 지난 40년 동안 이러한 해안 매립지역에 저층빌라등 주택단지와 공장업단지가 건설되었다. 따라서, 이러한 지역에 건물기초는 지반보강을 하거나 말뚝기초를 하는 것이 일반적인 시공방법이다. 그러나, 이와 같은 지반에서의 말뚝기초 타입으로 인한 진동은 지반교란 및 인접한 중·저층구조물 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 Lee et al. (2019)은 벌집형 콘크리트 중공블록을 압석으로 채워 연약한 기초지반을 보강하여 중·저층 건물과 산업용 공장 건물을 축조할 수 있는 얇은 기초보강공법에 대하여 연구하였다.

최근에 한반도에 군산(규모 4.0, 2021), 경주(규모 4.0, 2018), 포항(규모 4.6, 2018)등에서 지진의 규모가 5.0에 근접하여 발생되어 가옥이 일부 파괴되는 사례가 발생하였다. 디지털 관측 이후 지진의 발생 수는 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따른 연약지반에 시공된 중·저층건물에 피해가 예상된다.

콘크리트 중공블록보강공법의 장점은 밀집된 주택가에 일부주택 신축시 말뚝 타입으로 인한 진동과 소음의 문제점을 해결하고, 백호와 간단한 소형 다짐장비를 이용하여 연약점토 및 사질토 지반을 치환 보강하여 중·저층 건물이나 공장형 건물을 안전하고 저렴하게 시공할 수 있다는 것이다. 벌집 모양의 콘크리트 중공블록(허니셀)으로 지반을 보강함으로써 중공블록과의 결합효과로 지지력이 증대된

다. 또한, 인위적으로 층상지반을 형성하여 상재하중을 균형 있게 배분하는 안정적인 구조를 가지고 있으며, 기초의 침하량 감소와 지지력을 증대시키는 공법이다(Lee, 2019).

국내의 진동대 실험을 이용한 내진성능 평가는 Jeon et al. (2006)의 축소 비율에 따른 토목구조물의 거동특성, Hwang et al. (2005)는 콘크리트 댐의 구조적 안정성을 평가, Park et al. (2006)은 건물의 내진성능에 대한 고찰하였다. Jang et al. (2008)은 해안 매립지역인 송도의 지하철가시설 중 강널말뚝 인발시 진동에 따른 문제점을 진동대 실험을 통하여 연구하였다. Shin et al. (2017)은 해안 방수제 구조물 기초와 송전탑기초의 내진 안정성(2017)에 대하여 진동대 실험을 통해 각각 연구하였다.

본 연구에서는 실내 진동대 실험을 실시하여 콘크리트 중공블록으로 얇은기초를 보강하였을 때 내진에 대한 저항능력을 분석하였다. 콘크리트 중공블록으로 보강된 사질토 지반의 내진성을 분석하기 위하여 3가지 지진파인 Ofunato, Hachinohe, 인공지진파를 적용하였다. 지진하중 발생 시 축소모형의 가속도 증폭을 계측하고 지진하중에 대한 대상구조물의 수평 변위를 계측하여 각 지진파에 따른 안정성을 분석하였다.

2. 중공블록 보강기초의 내진보강 메카니즘

지진과 같은 외력이 중공블록 보강 지반에 작용되었을 때 수평저항력은 기초하부지반을 보강한 중공블록의 형상, 중공블록 내부 구속응력, 중공블록의 자중, 중공블록의 근입깊이, 지반의 견고성, 그리고 외력의 크기와 밀접한 관계를 갖고 있다.

중공블록 내부 구속응력은 중공블록 내부 벽체면의 횡방향 구속과 같이 중공블록 상단부에 설치되는 얇은기초

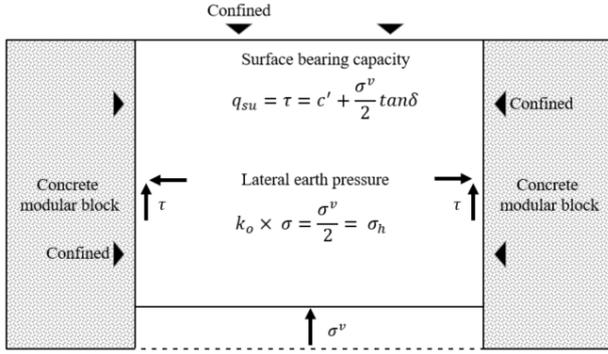


Fig. 1. Confined stress of concrete modular block

로 인한 축하중이 구속되어 발생한다. 이는 중공블록 내부 채움재와 블록벽체 면적과의 접촉마찰이 유발됨으로써 수평저항력이 증가됨과 동시에 상부구조물의 수평변위를 감소시키는 효과를 유발 한다(Fig. 1).

실내 진동대 실험을 실시한 중공블록의 복합보강 기초의 수평변위에 대한 저항특성은 Fig. 2와 같이 나타내었다. 중공블록의 수평변위에 대한 역지력은 중공블록 내부에서 발생하는 주면마찰력(R_s)과 층상지반 기초의 폭과 보강지반에서 발생하는 관입저항력 (R_k)의 산정식으로 나타내었다. 또한, 중공블록과 쇠석치환 보강지반과의 결합효과로 인한 복합기초의 관입저항지지력을 (R_{ks})와 쇠석치환 보강지반의 하단에서 발생하는 전반전단저항력을 R_b 로 나타내었다. Lee (2019)는 전체 수평저항력(R_{total})을 실내모형실험을 통해 분석한 지지거동 특성을 토대로 식 (1)을 제안하였다.

$$R_{total} = R_s + R_k + R_{ks} + R_b \quad (1)$$

중공블록 내부 구속응력에 의한 전단저항력(R_s)은 중공블록과 채움재(쇄석)와의 주면마찰력에 따른 전단강도 식을 이용하여 식 (2)과 같이 표현하였다. 중공블록 콘크리트부에서 발생하는 관입저항력(R_k)은 Meyerhof and Hanna (1978)가 제안한 층상지반에서의 극한지지력 이론을 중공블록의 특성에 맞게 식 (3)으로 수정하였다. 지반개량효과를 고려한 층상지반의 관입저항력은 Frigaszy et al. (1986)에 의한 산정식을 적용하였다.

관입저항계수는 전단파괴 계수에 해당하며, 저항계수는 기초의 둘레에 보강지반 깊이에 따라 발생하는 것으로 가정하였다. 복합기초 보강지반의 거동으로 중공블록을 연약지반상에 관입할 경우 보강지반과 연약지반의 수직둘레

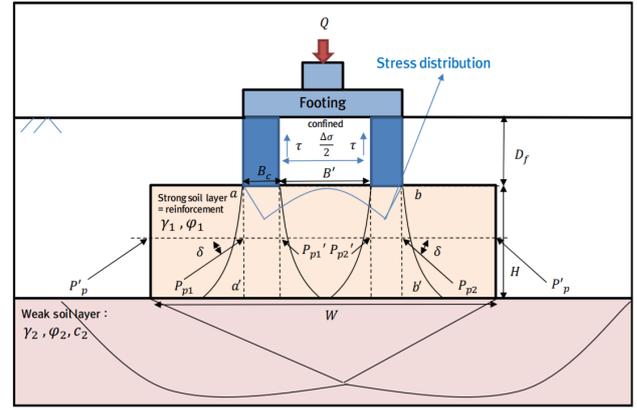


Fig. 1. Concept of hollow modular concrete block reinforced shallow foundation (Lee, 2019)

를 따라 관입저항이 발생한다. 이에 대한 관입저항력(R_{ks})을 식 (4)와 같이 산출하고, 수평분력(P_h)은 관입전단계수와 보강지반의 깊이에 따라 발생하므로 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$R_s = \tau = c' + \frac{\Delta\sigma_v}{2} \tan \delta \quad (2)$$

$$R_k = \frac{pP_h \tan \phi_1 + pHc_1 - W_{pz}}{A_f} \quad (3)$$

$$R_{ks} = \frac{pP_h \tan \phi_2 + pHc_2 - W_{rz}}{A_{rz}} \quad (4)$$

$$P_h = K_s (r_2 D_f H + 0.5 r_1 H^2) \quad (5)$$

$$R_b = \frac{A_f}{A_{rz}} [c_2 N_{q2} S_{q2} D_{q2} + r_2 (D_f + H) N_{q2} S_{q2} D_{q2} + 0.5 r_2 W N_{r2} S_{r2} D_{r2}] \quad (6)$$

여기서, τ 는 전단강도(kN/m^2), c' 는 겉보기점착력(kN/m^2), $\Delta\sigma_v$ 는 연직응력, δ 는 전단저항각 ($^\circ$), p 는 중공블록 콘크리트부의 관입 둘레(m), K_s 는 관입전단계수, W_{pz} 는 재료의 무게, A_f 는 중공블록 콘크리트 면적(m^2), P_h 는 관입시 발생하는 수평응력 ($\int_0^H K_s \sigma_v dH$), K_s 는 관입전단계수, A_{rz} 는 쇠석치환 보강지반의 면적(m^2), N_{q2} , N_{q2} , N_{r2} 는 연약지반의 내부마찰각(ϕ_2)에 지지력 계수, S_{q2} , S_{q2} , S_{r2} 는 연약지반 내부마찰각(ϕ_2) 형상계수, D_{q2} , D_{q2} , D_{r2} 는 연약지반 내부마찰각(ϕ_2)에 대한 깊이계수를 나타낸다. Fig. 2에 나

탄산 쇠석 보강기초지반 하부의 연약지반에서 발생하는 전반전단지지력(R_b)는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

3. 진동대 실험을 이용한 내진성능 평가

3.1 중공블록 및 채움재료의 특성

중공블록은 공장에서 콘크리트로 제작된 기성품으로 Fig. 3은 실험에 적용한 중공블록이며, 블록두께 (T) 50 mm, 높이 (H) 150 mm, 폭 (W) 150 mm이며, 압축강도는 약 27 MPa이다. 중공블록 보강시 치환폭은 중공블록의 설치 폭과 기초의 폭을 고려하여 결정한다. 치환깊이는 약 300 mm이며, 일반적으로 사용되는 쇠석의 입경은 25 mm ~ 40 mm이다.

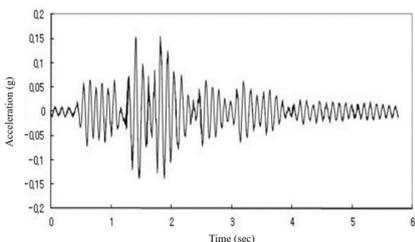
본 연구에서는 기초지반을 표준사로 조성하고 쇠석을 사용하였다. Table 1은 실내실험에 사용된 흙시료의 물리적 특성을 나타낸 것이다. 표준사에 대한 표준다짐시험 결과 최대 건조단위중량(γ_{dmax}) 16.9kN/m³, 최적함수비(w_{opt})



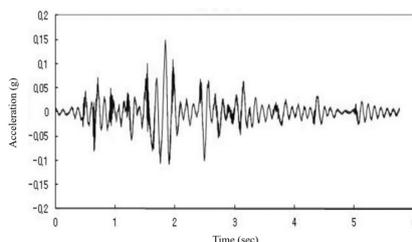
Fig. 3. A set of hollow concrete modular block

Table 1. Properties of foundation soil and fill materials

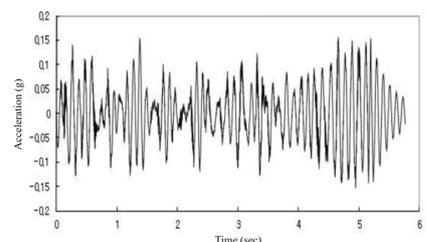
Materials	Specific gravity (Gs)	Optimum moisture content (w_{opt} , %)	Maximum dry unit weight, (γ_{dmax} , kN/m ³)	Apparent cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Uniformity coefficient, (C_u)	USCS
Jumunjin sand	2,65	9,4	16,9	4,92	33,44	1,91	SP
Crushed rock	2,31	8,2	20,9	20,79	43,56	1,79	GP



(a) Ofunato



(b) Hachinohe



(c) Artificial wave

Fig. 4. In-input seismic waves

는 9.4%, 쇠석의 최대건조단위중량(γ_{dmax}) 20.9kN/m³, 최적함수비 15.2%으로 나타났다. 표준사에 대한 겉보기점착력은 4.92kPa, 내부마찰각은 33.44°로 평가되었으며, 쇠석은 20.79kPa, 내부마찰각은 43.56°의 나타내었다.

3.2 진동대 실험 조건

3.2.1 입력지진파

진동대 실험시 지진응답해석의 입력지진은 계획 지점에서 기록된 지진기록을 이용하는 것이 가장 적합 하지만, 국내의 경우 부합되는 입력지진으로서 사용가능한 지진기록이 거의 없는 상태이다. 본 연구에는 일본의 지진 기록 중 단주기 Ofunato, 장주기 Hachinohe, 그리고 인공지진파를 사용하였다(Fig. 4). 인공지진파 생성위해서 가속도 시간이력 데이터를 생성하는 Eqmaker 프로그램을 사용하였으며, 응답스펙트럼을 포괄하는 지진운동을 추계학적 방법으로 산정하였다. 강진특성 및 지속시간을 결정하기 위한 진도포락함수는 Exponential (지수형), Compound (복합형), Trapezoidal (사다리꼴형) 등이 있으며, 본 연구에는 Trapezoidal (사다리꼴형)을 사용하였다.

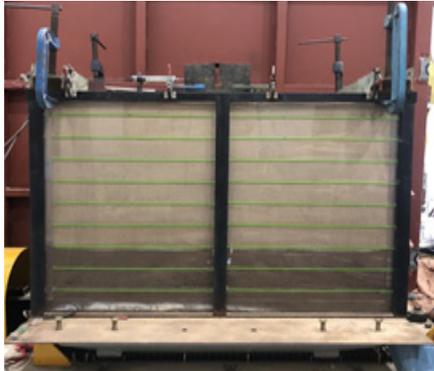
3.2.2 실험방법

Kagawa(1978)는 모형시험과 원형시험 관계에 대한 연구를 수행하였으며, 동적하중을 받는 지반구조물에 대해 힘의 비를 이용해서 상사법칙을 제시하였다. 본 연구에서는 상사비를 적용하여 1/100 크기로 모델링하였다.

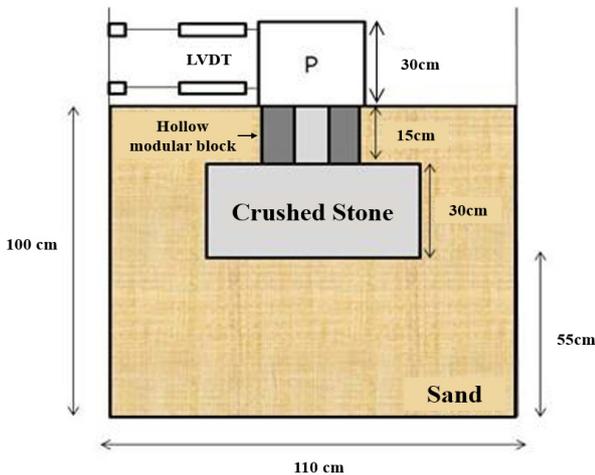
진동 모형실험을 위한 진동판의 크기는 1000 mm x 1000 mm

Table 2. The conditions of shaking table test

Relative density of foundation soil (D_r , %)	Friction angle ($^\circ$)	Seismic wave	Input acceleration (g)
45	36.25	Ofunato Hachinohe Artificial wave	0.154 0.220
65	39.25		
85	42.25		



(a) Side view of model test box



(b) Schematic diagram of test detail

Fig. 5. Shaking table test set-up for hollow concrete block reinforced sandy ground

로 구성되어 있으며, 110cm×60cm×100cm의 토조에 모래의 상대밀도에 따라 느슨한 지반 (45%), 보통지반 (65%), 조밀한 지반 (85%)로 지반을 구성하였다. 또한, 내진 등급은 1등급 수준의 구조물로 가정하고 보강된 지반에 Ofunato, Hachinohe, 인공지진파를 입력하여 각각의 실험조건에 대한 내진성능을 평가하였다. Fig. 5와 Table 2는 진동대 실험 모식도와 실험 조건을 각각 나타낸 것이다.

구성 지반내 쇄석을 30 cm 깊이로 치환하여 보강지반을 형성하였으며, 중공블록에 쇄석채움으로 기초를 형성하고, Fig. 5 (a)와 같이 40 kg의 철재로 만든 상부구조물을 보강기초위에 설치하였다. 입력가속도의 조건에 대한

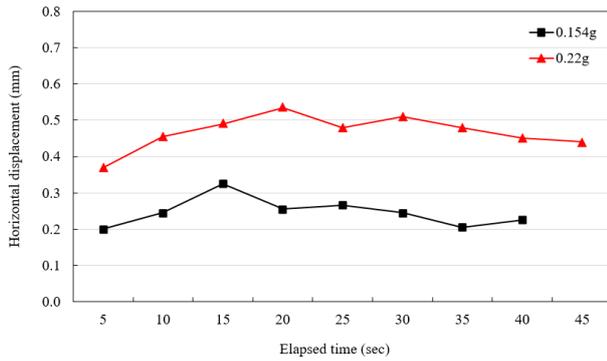
응답스펙트럼을 확인하기 위하여 가속도계를 상하부에 고정하였으며, 상부구조물에 대한 수평 변위(δ)를 측정하기 위하여 측면에 LVDT를 Fig. 5 (b)와 같이 설치하고 Data Logger를 이용하여 데이터를 자동으로 수집하였다.

4. 실험결과

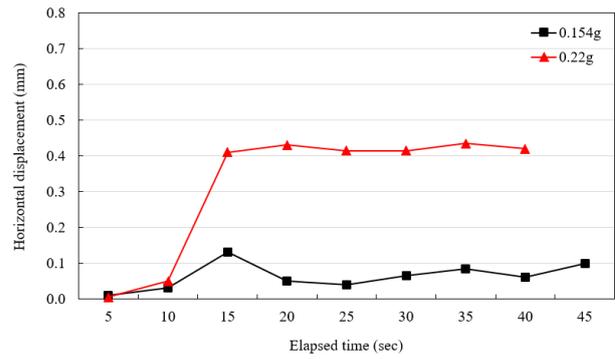
중공블록 설치에 따른 내진안정성을 평가하기 위하여 지반을 상대밀도에 따라 45%, 65%, 85%로 조성하였으며, 각각의 지반에 지진파를 Ofunato, Hachinohe, 인공지진파를 입력하고 내진안정성을 평가하였다. 국내의 경우, 지진 발생 시 내진설계기준에 의하면 지상 구조물의 한계수평 변위 δ/h 는 0.015로 규정하고 있다 (Ministry of Land and Transportation, 2019). 따라서, 모형구조물의 지상 높이에 대한 수평변위량을 측정하여 한계수평변위를 기준으로 내진안정성을 평가하였다.

Fig. 6은 주어진 상대밀도로 조성된 지반에서 Ofunato 지진파를 가진하였을 때, 시간경과에 대한 상부구조물의 수평변위를 그래프를 나타낸 것이다. 가진에 따른 수평변위량은 상대밀도와 지진파의 종류에 따라 크게 영향을 받는 것으로 평가되었다. 진동대 실험결과 상대밀도가 가장 낮은 45%의 지반조건에서는 0.154g의 Ofunato 지진파를 가진 할 경우 0.325 mm의 수평변위량을 나타내었으며, 0.22g의 가진에서는 최대 0.535 mm의 수평변위량을 나타냈다. 상대밀도 85%의 지반에서 0.154g의 지진파(Ofunato)를 가진할 경우 최대수평변위량 0.085 mm, 0.22g 가진의 경우 0.26 mm의 최대수평변위량을 나타냈다. 상대밀도 45% 대비 85%의 지반에서 0.154g 가진에 대해 73.85%, 0.22g의 가진에 대해 51.4%의 수평변위량 감소를 나타내었다.

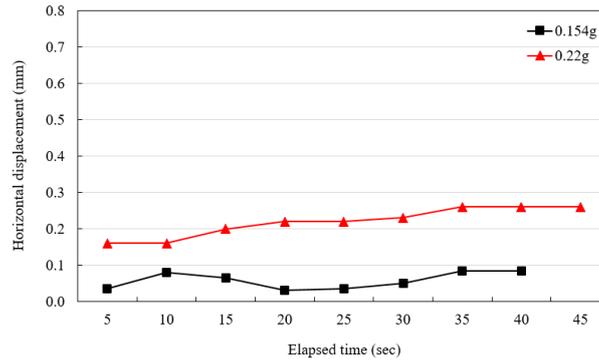
상대밀도에 따른 Ofunato 지진파의 가진 결과 국내 1등급(MW=6.5, 규모=0.154g)건축물에 대한 한계수평변위는 건축물 내진등급기준 이내에서 발생하는 것으로 나타났다. 따라서, 상대밀도가 비교적 낮은 지반에 중공블록을 이용하여 보강할 경우 1등급 건축물에서 내진에 대해 한



(a) Ofunato (Dr = 45%)



(b) Ofunato (Dr = 65%)



(c) Ofunato (Dr = 85%)

Fig. 6. Variation of horizontal displacement with elapsed time

계수평변위를 만족하는 것으로 평가되었다.

일반적으로 우리나라에서는 지진규모를 0.154g를 적용하고 있으나, 원자력발전소와 장대교 등 주요구조물의 경우, 지진규모를 최대 0.22g 적용하고 있다. 이 연구에서는 Fig. 7과 같이 Ofunato, Hachinohe, 인공 지진파를 중공블록 보강 기초지반(상대밀도= 45%, 65%, 85%)에 가하였을 때, 상부구조물에 대한 최대수평변위량을 평가하였다. 단주기 지진파인 Ofunato의 경우 지진가속도가 높아짐에 따라 구조물의 수평변위 경사도가 크게 나타났으며, Hachinohe파, 인공지진파 순으로 경사도는 완만해졌다. 실험에 사용된 3개의 지진파에서 가속도가 증가함에 따라 수평변위량이 증가하였으며, 지진파의 종류에 따른 가속도 증가에 대한 결과는 아래와 같다.

단주기 (Ofunato)가 가진될 경우 상대밀도 45%, 가속도 0.22g 조건에서 0.154g의 약 1.5배, 상대밀도 65%, 가속도 0.22g의 조건에서 0.154g의 약 1.7배 수평변위가 증가하였다. 단, 상대밀도가 낮은 지반일수록 총 수평변위는 더 크게 발생하였다.

장주기 (Hachinohe)가 가진될 경우, 가속도에 따른 수평변위량은 3가지 상대밀도 조건에서 단주기 (Ofunato)의

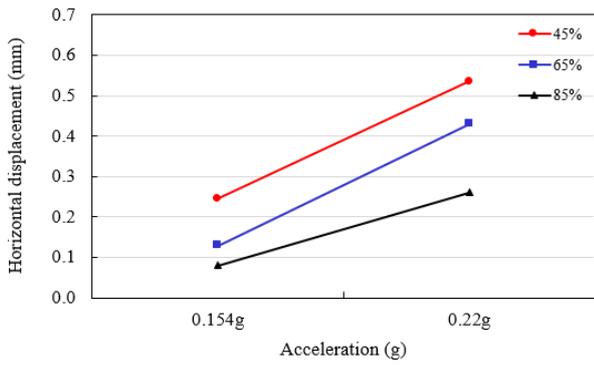
수평변위량보다 크게 나타났다. 상대밀도 45%, 가속도 0.154g 조건에서 단주기 (Ofunato) 수평변위의 56.46%, 상대밀도 65%, 가속도 0.154g 조건에서 단주기 (Ofunato) 수평변위의 68.3%, 상대밀도 85%, 가속도 0.154g 조건에서 단주기 (Ofunato) 수평변위의 71.43% 증가하였다.

가속도 0.22g 조건에서 수평변위량 증가는 상대밀도 45%, 65%, 85%에서 각각 11.3%, 12.8%, 11.11%로 유사한 값을 나타내었다.

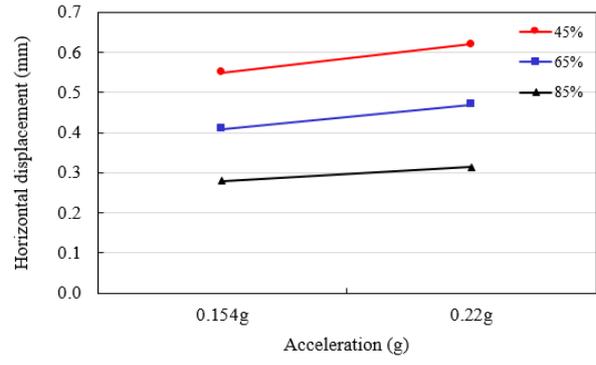
인공지진파 (Artificial wave)가 가진될 경우, 가속도 0.22g 조건에서, 수평변위량 증가는 상대밀도가 증가함에 따라 각각 0.154g의 5%, 23.89%, 28.03% 증가하였다.

지진파 조건에 따른 실험결과, 지반을 구성하고 있는 사질토의 상대밀도는 상부 구조물의 수평변위에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 Table 2에서 제시한 상대밀도에 따른 내부마찰각이 증가하는 것과 직접적인 관계가 있다. 상대밀도에 따른 상부구조물의 수평변위 거동은 중공블록으로 보강된 얇은기초(Fig. 2)의 지지력 보강효과를 나타내는 식 (6)으로 설명할 수 있다.

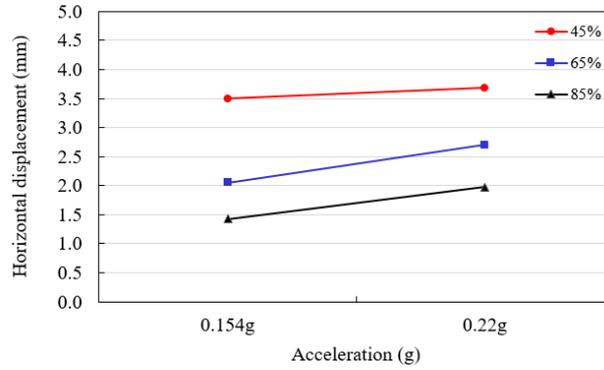
진동대 실험결과 동일한 가속도 조건에서 상대밀도가 낮을수록 상부구조물의 수평변위는 크게 발생하며, 상대



(a) Ofunato seismic wave

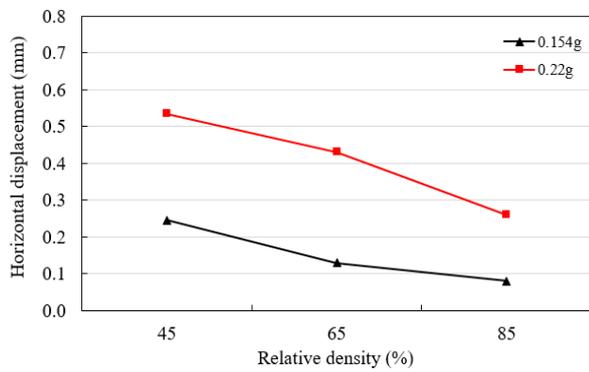


(b) Hachinohe seismic wave

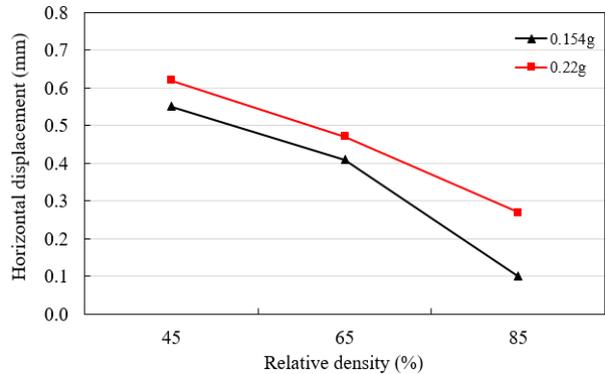


(c) Artificial seismic wave

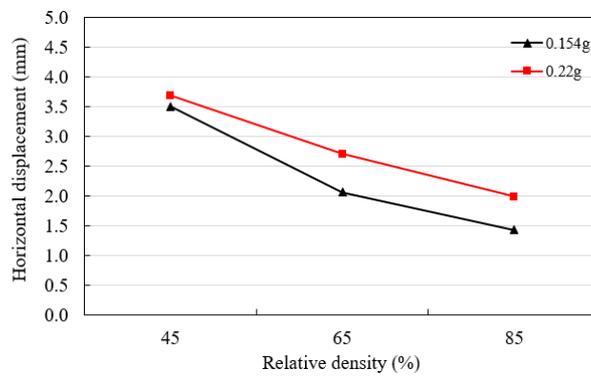
Fig. 7. Horizontal displacement with seismic wave



(a) Ofunato seismic wave



(b) Hachinohe Ofunato seismic wave



(c) Artificial Ofunato seismic wave

Fig. 8. Variation of horizontal displacement with relative density

밀도가 높을수록 상부구조물의 수평변위는 작게 발생하였다. 가속도 0.154g와 가속도 0.22g 조건에서 인공지진파, 단주기 지진파, 장주기 지진파 순으로 수평변위가 발생하였다. 가속도 0.154g의 경우, 상대밀도에 따른 수평변위량은 인공지진파에서 59.29%, Ofunato 지진파에서 67.35%, Hachinohe 지진파에서 81.81% 감소하였다. 가속도 0.22g의 경우, 인공지진파에서 46.27%, Ofunato 지진파에서 51.4%, Hachinohe 지진파에서 56.45% 감소하였다. 실험 결과는 Fig. 8과 같다.

5. 결론

본 연구는 진동대 시험을 이용한 중공블록 보강 기초의 내진성능을 평가하기 위하여 지반의 상대밀도, 지진파, 가속도의 변화 등과 같은 다양한 실험조건에서 진동대 실험을 수행하였다. 상부구조물의 수평변위에 대한 평가는 국내 건축물 내진설계를 기준으로 보강기초에 대한 안정성을 평가하였다. 연구결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 중공블록은 벌집형상의 육각형 콘크리트로 제작되었으며, 육각형 형태의 콘크리트 구조는 벽체하단부에서 상부하중을 직접 지중에 전달할 뿐 아니라 관입저항력의 증가와 동시에 내부면적에서 접촉마찰력에 의한 구속응력의 증가로 지지력이 증가된다. 또한, 벌집구조의 기초가 층상 지반을 형성하여 지진에 따른 진동시 응력을 분산시킴으로서 수평변위를 감소시키는 것으로 평가되었다.
- (2) 중공블록으로 보강된 지반에서 상대밀도에 따라 Ofunato 지진파를 가진 하였을 때 지진파의 주기 특징에 따라 시간경과에 따른 변위량 차이를 나타내는 것으로 평가되었다. 단주기파(Ofunato)의 경우, 0.154g의 가속도에서 10~20초 사이 최대 수평변위량을 나타낸 후 감소하는 경향을 나타내었으며, 0.22g의 가속도에서는 0.154g와 같은 시간대 최대 수평변위량을 나타낸 후 일정하게 수렴하는 것으로 평가되었다.
- (3) 단주기 지진파(Ofunato)에서는 가속도가 높아짐에 따라 구조물의 수평변위가 상대밀도 45%, 65%, 85%에서 각각 56.46%, 68.3%, 85%의 증가율을 보였다. 장주기 (Hachinohe)와 인공지진파(Artificial wave)에서는 지진파의 특징에 따라 전체 변위량은 단주기

(Ofunato)와 보다 크게 나타났지만, 가속도에 변화에 따른 증가량은 Hachinohe 지진파에서 각 상대밀도 (45%, 65%, 85%)에 따라 각각 11.3%, 12.8%, 11.11%의 수평변위 증가, 인공지진파에서 각 상대밀도(45%, 65%, 85%)에서 5%, 23.89%, 28.03%의 수평변위 증가율을 보임으로서 수평변위 증가율이 Ofunato에 비하여 낮게 평가되었다.

- (4) 중공블록 보강에 따른 층상지반에서 상대밀도가 증가함에 따라 전단강도 매개변수의 증가와 구속응력이 증가되어, 지반과 중공블록간의 주면마찰력(R_s), 관입저항력(R_k), 관입저항지지력(R_{ks}), 전반전단저항력(R_b)이 증가하여 전체 수평저항력(R_{total})이 증가되는 것으로 평가되었다. 따라서, 기초지반의 상대밀도가 증가함에 따라 상부구조물의 수평변위량이 감소하는 경향을 나타내었다.
- (5) 모든 요소들을 고려했을 때 중공블록으로 보강된 지반은 지진파의 종류 및 가속도의 크기에 상관없이 한계수평변위를 만족한 것으로 나타났다. 따라서, 중·저층 건물의 얇은기초 보강공법으로 우수한 것으로 평가된다.

감사의 글

이 연구는 (주) 에이스올의 연구비 지원으로 수행되었음을 알립니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Fragaszy, R. J., Higgins, J. D., Kilian, A. P., and Peters, A. J. (1986), "Review of Methods for Estimating Pile Capacity", *Transportation Research Record*, Vol.1105, No.4, pp.32-40.
2. Hwang, S. C., Oh, B. H., Sim, H. S. and Kang, B. S. (2005), "The Evaluation of Seismic Performance of Dam by Shaking Table Test", *Proceedings of Earthquake Engineering Society of Korea*, pp.110-117.
3. Jang, W. R., Park, J. J., Shin, E. C., Jeon, C. K. and Kang, H. H. (2008), "Influence on the Sheet Pile Withdrawing Influence by Using Shaking Table Test", *Korean Society of Civil Engineering Annual Conference*, pp.3891-3894.
4. Jeon, N. S., Choe, M. J., Kwon, O. K. and Kim, D. S. (2006), "A Study on Size Effect of Model Test by 1g Shaking Table Test and One-Dimensional Ground Response", *Korean Society of Civil Engineering Annual Conference*, pp.4116-4119.

5. Kagawa, T. (1978), "On the similitude in model vibration tests of earth-structures", *Proceedings of Japan Society of Civil Engineers*, No.275, pp.69-77.
6. Lee, C. H. (2019), *A Study on Bearing Characteristics of Shallow Foundation Reinforced with Hollow Concrete Block Layer*, Ph. D. Thesis, Incheon National University, Korea.
7. Lee, C. H., Kim, I. D., Kim, D. H., Shin, E. C. and Yang, T. C. (2019), "Settlement Characteristics of Shallow Foundation using Hollow Concrete Block through Laboratory Model Test", *Proceedings of 2019 Fall Geosynthetics Conference*, pp. 11-12.
8. Meyerhof, G. G. and Hanna, A. M. (1978), "Ultimate Bearing Capacity of Foundations on Layered Soils under Inclined Load", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, No.4, pp. 565-572.
9. Ministry of Land and Transportation (2019), *Seismic Design Code of Building*, Korea.
10. Park, I. J., Kim, S. W., Jang, W. H., Kim, H. T. and Yoo, C. H. (2006), "Evaluation of Seismic Performance for Reservoir Dams in Korea", *Journal of Korean Geoenvironmental Society*, Vol.7, No.6, pp 89-100.
11. Shin, E. C, Park, K. W. Shin, H. S. and Ham, K. W. (2017), "Behavior of Full Scaled Geobag Retaining Wall Structure by Field Pilot Test", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 16, No. 4, pp. 21-32.