지진해일에 대한 조적조 건축물의 안전성 평가

Safety Evaluation of Masonry Buildings for Tsunami

양원직* · 이원호**

Yang, Wonjik · Yi, Waonho

Abstract

The tsunami that hit Indonesia on December 26, 2004 took the lives of about 300,000 people and caused massive property damage amounting to more than 10 billion dollars. Another earthquake hit the northeastern coast of Japan on March 11, 2011 and triggered a tsunami that battered Japan's coast, killing 15,800 and causing property damage amounting to 25 trillion yen. Despite this trend, no feasible actions have been taken on the buildings in Korea to reduce tsunami-induced damage. Therefore, this study will present the method of building's resistance force evaluation and wave force for the building's safety for the tsunami. Then, according to the inundation depth we examined the safety evaluation of masonry buildings in the shore that occupy more than 80% in Korean buildings.

Key words : Tsunami, Wave Force, Inundation Depth, Overturning Moment

요 지

최근 전 세계적으로 지진의 발생빈도가 증가하는 경향을 보이며 일부는 지진해일을 동반한 대규모 피해가 발생하고 있다. 2004년 12월 26일 인도네시아 수마트라 지진해일은 약 30만명의 인명피해와 100억 달러 이상의 재산피해가 발생하였으며, 2011년 3월 11일 일본 동북지방 태평양 연안 지진해일은 15,800여명의 인명피해와 25조엔 이상의 재산피해가 발생했다. 이러한 추세에도 불구하고 국내에서는 지진해일에 대한 국내 건축물의 대비책은 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 해일에 의한 건축물의 안전성 평가를 위하여 해일의 파력 및 건축물의 내력 평가방법을 소개한다. 또한 국내 건축물에 80%이상을 차지하고 있는 연안가 조적조 건축물에 대한 안전성을 침수심 깊이에 따라 평가하였다.

핵심용어 : 지진해일, 해일파력, 침수심 깊이, 전도모멘트

1. 서 론

일본 서해안을 따라 지진이 발생할 확률이 매우 높은 6개의 지진 공백역(seismic gap)이 존재할 뿐만 아니라 지진발생 확률이 증가하고 있다. 이로 인해 일본 서해안에 지진해일이 수반되면 국내의 동해안과 남해안이 직접적인 영향권에 들어간다. 실제로 1983년 5월에 발생한 아키타지진(M7.7)과 1993년 7월에 발생한 오키시리지진(M7.8)의 영향으로 국내 동해안 일대에 피해가 발생하였다. 당시 동해안 일대에 해일 도달시간은 두 지진 모두 100분정도이며, 피해규모는 아키타지진의 경우 인명피해가 5명, 재산피해액이 약 3억7천만원, 오키시리지진은 인명피해 0명, 재산피해액이 약 3억9천만원 정도 발생하였다. 이상과 같이 국내의 동해안일대는 해일에 대해 더 이상 안전지대라 할 수 없으며 그에 대한 대비책이

시급한 상황이다.

국내의 건축구조물에 대한 내진설계법은 1988년 구체적으로 정리하였으며, 2005년에는 적용범위를 확대하여 3층 이상 연면적 1,000 m²이상으로 개정하는 등 지속적인 내진기준 설계법의 개정작업을 진행하고 있으나, 해일에 대한 대책은 전무한 실정이다. 그러나 해저에서의 지진은 해일을 동반하며 해일에 대한 건축물의 저항 시스템은 지진력과는 다르다는 것이 최근 2004년 인도네시아 수마트라지진 및 2011년 일본 동북지방 태평양연안 지진에서 입증되었다. 이상 두 해저지진의 사례만 보더라도 건축물의 해일에 대한 저항 시스템은 지진과는 다르다는 것을 알 수 있다. 예를 들어 지진력에 대해서 취약한 것으로 알려져 있는 피로티 구조는 해일에 대해서는 강하다는 것이 2011년 일본 동북지방 태평양연안 지진의 사례에서 찾아볼 수 있다.

이상과 같이 해일에 대해 무방비 상태인 국내 건축물에 대

*교신저자. 정회원. 광운대학교 에센스구조연구센터 연구교수(Tel: +82-2-940-5195, Fax: +82-2-917-3578, E-mail: yangwj@nate.com)

Corresponding Author: Member, Research Professor, Ph.D. ESnS Structure Center, Kwangwoon University

**광운대학교 건축공학과 교수

Ph.D, Department of Architectural Engineering, Kwangwoon University

한 안전성은 보장할 수 없다. 특히 국내 연안가 건축물의 80%이상을 차지하고 있는 조적조 건축물에 대한 안전성검토는 시급할 것으로 사료된다. 이에 본 연구에서는 동해안일대 건축물에 대한 실측 데이터를 토대로 조적조 건축물의 수평 저항 성능을 산정하였으며, 침수심 깊이에 따른 해일 파력을 산정하여 조적조 건축물의 안전성 여부를 검토하고자 한다.

2. 건축물에 작용하는 해일하중

해일의 상류에 의해 건축물에 작용하는 외력은 크게 수평 하중과 수직하중으로 구분되며, 수평하중은 초기단계와 침수 단계의 2단계로 구분된다. 또한 각각의 단계에 대해서 개구부의 유·무를 고려하여 산정한다. 이상의 각 하중에 대해 하기에 상세히 기술한다.

2.1 수평하중

수평하중은 해일 상류의 선단이 건축물에 충돌하는 초기단계와 건축물의 주위 및 내부가 침수하는 침수단계의 2단계로 구분되며, 각각의 단계에 대하여 개구부가 있는 경우와 없는 경우로 나뉘어 산정된다. 초기단계와 침수단계에 대한 모식도를 Fig. 1, 2에 나타낸다.

(1) 초기단계에서의 해일파력 평가

초기단계의 해일파력 평가는 개구부가 없는 경우와 있는 경우로 구분하여 기술한다.

· 개구부가 없는 경우

해당부분의 해일 파압 qz 는 식 (1)에 나타낸바와 같이 해

Fig. 1. Preliminary Level

Fig. 2. Inundation Level

Fig. 3. Hydrostatic Force of Non Opening Case

수의 밀도에 중력가속도를 곱하고 해당부분에서 침수심 최대 높이까지의 길이를 곱하여 산정한다. 이상과 같이 산정한 해일 파압에 침수면적을 곱하면 해당 건축물에 작용하는 해일 파력을 산정한다. 개구부 없는 경우의 해일파압산정에 대한 모식도를 Fig. 3에 나타낸다.

$$q_z = \rho g(ah - z) \quad (1)$$

여기서, ρ : 해수의 밀도, g : 중력가속도, h : 침수심, a : 침수심 계수, z : 해당부분의 지반에서의 높이 ($0 \leq z \leq 3h$)

· 개구부가 있는 경우

개구부 있는 경우의 해일파력 산정은 식 (2)에 의해 산정 가능하다. 식 (1)에서 산정한 파압에 개구부의 면적을 제거한 나머지 면적을 곱하여 산정한다.

$$F_i = \rho g \int B(ah - z)(1 - \epsilon) dz \quad (2)$$

여기서, B : 건물폭(수류에 직교하는 방향), ρ : 해수의 밀도, g : 중력가속도, h : 침수심, ϵ : 폭 방향의 개구부율, a : 침수심 계수

Fig. 4. Hydrostatic Force of Opening Case

(2) 침수단계에서의 해일파력 평가

침수단계에서의 해일파력에 의한 수평하중 F_c 는 Morison식을 참고하여 식 (3)으로 평가할 수 있다.

$$F_c = \frac{C}{2} \rho \int B(1 - \epsilon) v^2 dz \quad (3)$$

여기서, C : 항력계수(2.0), ρ : 해수의 밀도, B : 건물 폭, ϵ :

Fig. 5. Hydrodynamic Force

폭 방향의 개구부율, v : 육상에서의 해일유속

식 (3)에서 육상에서의 유속 v 의 추정이 곤란한 경우에 단파의 파속 산정식 식 (4)을 참고하여 근이적으로 평가하는 것이 가능하다. 단 근이법에서는 유속의 연직분포는 일정하다는 가정이 필요하다.

$$v = \sqrt{gh} \quad (4)$$

식 (4)을 식 (3)에 대입하여 침수심 단계에서의 수평하중 평가식을 도출하면 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$F_c = \frac{C}{2} \rho g h \int B(1-\varepsilon) dz \quad (5)$$

2.2 수직하중

침수단계에서 작용하는 수직하중은 일반적으로 부력만을 고려한 식이 제시되고 있다. 그러나 실제 건축물에 작용하는 수직하중은 (i) 건물내부의 천정부근에 발생하는 공기층에 의한 부력, (ii) 건축물 내부에 침입한 해수에 의한 바닥면적으로의 하중(해수중량), (iii) 개구부로 유입된 해수가 천정면과 바닥면에 충돌하여 발생하는 동적인 하중의 3가지가 고려된다. 이중 (iii)의 동적인 하중에 대해서는 간단한 산정이 곤란하기 때문에 수치해석을 통하여 고려하여 한다. 따라서 본 연구에서는 (i)과 (ii)의 정적인 하중만을 고려하여 산정하는 식을 소개한다. 부력산정은 식 (6)에 의해 산정 가능하다.

$$F_B = \rho g \sum_{n=1}^{N-1} V_n - \rho g h A \quad (6)$$

여기서, V_n : n 층 천정부의 공기층의 체적, A : 1층의 바닥면적

Fig. 6에 정적인 수직하중의 평가방법에 대한 모식도를 나타낸다. 침수심 깊이가 어떤 층의 허리벽보다 낮은 경우에는

Fig. 6. Buoyant Force

그 층의 내부로의 침수가 발생하지 않으므로 허리벽의 높이를 넘은 경우만 침수한 것으로 고려한다.

3. 조적조 건축물의 평균 전단응력도

조적조 건축물의 수평저항성능 즉 평균 전단응력도는 “기존 건축물의 구조 내진 성능 평가에 관한 기술지침(안)”에 의하면 개구부가 없는 경우와 있는 경우의 두 가지 경우로 나누어 평가된다. 조적조 건축물의 경우 대부분이 2층 이하의 저층 건축물로 내진설계기준의 3층 이상에 대한 구조제한을 적용하지 않기 때문에 수평력에 대한 저항성능은 고려되어 있지 않다. 즉 조적벽체가 중력하중에 대하여 저항하도록 설계되어지기 때문에 보 기둥과 같은 구조체가 없는 경우가 대부분이다. 따라서 조적조 건축물의 평균 전단응력도는 순수 조적벽체에 대한 실험결과 및 기존의 연구 자료를 토대로 산정된 “기존 건축물의 구조 내진 성능 평가에 관한 기술지침(안)”의 평균전단응력도를 소개하고 수평저항성능 산정시 활용하고자 한다. Table 1에 개구부가 있는 경우와 없는 경우의 평균 전단응력도를 나타낸다.

4. 조적조 건축물의 수평저항 성능

해일의 상륙시 해수의 유속 및 부유물의 충격하중을 고려

Table 1. Shear Stress of Masonry Wall

벽체의 종류	입면도	전단 응력도
개구부가 없는 경우		$\tau_{bw} = 0.4(\text{MPa})$ $A_w = t \cdot L_w$
개구부가 있는 경우		$\tau_{bw} = 0.15(\text{MPa})$ $A_w = t \cdot L_w$

한 피해를 산정은 정확한 유속 및 부유물과의 충격여부에 대한 확률론적 가정을 필요로 하여 피해율에 대한 신뢰성 평가에 어려움이 있다. 따라서 본 장에서는 침수심 깊이에 의한 조적조 건축물에 대한 수평저항 성능을 평가한다.

4.1 실측조사 건축물의 개요

조적조 건축물에 대한 실측조사는 과거 해일피해를 경험한 삼척시의 임원항 일대의 조적조 건축물을 대상으로 한다. Table 2에 조사대상 건축물에 대한 일람을 나타낸다. Fig. 7은 조사대상 건축물의 예로 전경 및 평면의 실측데이터를 나타낸다.

실측조사는 건축물의 수평내력을 산정할 수 있도록 내부의 평면과 벽체의 길이 및 두께, 재질, 방위, 해발고도 등에 조사하였으며, 해일하중 산정을 위하여 4면의 입면에 대해 조사하였다.

4.2 조적조 건축물의 수평내력 평가

조적조 건축물의 수평내력은 3장의 순수 조적벽체의 전단 응력을 사용하여 산정하였다. 벽체의 두께는 외벽과 내벽을 구분하여 계산하였으며, 외벽의 경우는 일반적으로 단열성능 확보를 위하여 공간쌓기를 하므로 공간의 두께 70 mm를 고려하여 산정하였다. 수평내력 산정방향은 동해안을 바라보는 방향을 정면으로 설정하여 산정하였다. Table 3은 이상과 같은 방법으로 산정한 대상 조적조 건축물의 수평내력 및 전도 내력을 나타낸다.

해일의 파력은 정수압에 대한 침수심 계수를 사용하여 Nakano Yoshiaki가 2011년 3월 동일본대지진해일시의 피해 데이터를 토대로 제안한 차폐물이 없는 경우의 1.7을 사용하

Fig. 7. Photo and Floor Plans of Target Buildings

Table 2. Measurements Data of Target Buildings

번호	구조 형식	건물 규모	내벽두께		해발 고도	용도
			외벽	내벽		
1	조적조	2	300	200	7	상가+주거
2	조적조	1	350	200	7	주택
3	조적조	1	300	200	7	주거
4	조적조	1	300	150	6	상가
5	조적조	1	350	200	7	주택
6	조적조	1	300	200	10	주거
7	조적조	1	300	200	8	주거
8	조적조	1	200	100	7	주거
9	조적조	1	200	200	6	상가
10	조적조	2	350	100	7	주거

여 산정하였다. 건축물별 해일파력 산정결과를 Table 4에 나타낸다. Table 4는 건축물의 수평내력을 초과하는 시점에 대한 파력을 나타낸다. Table 4에 의하면 건물의 폭이 크고, 개구부율이 작을수록 해일파력이 크게 나타났다.

Fig. 8에는 Table 3 및 4의 결과를 종합하여 침수심 깊이에 따른 해일의 파력을 건축물별로 나타내었으며, 각각의 건

Table 3. Shear and Overturning Force of Target Buildings

번호	벽체두께 (mm)		벽체길이 (mm)		자중 (ton)	건물 깊이 (m)	수평 내력 (kN)	전도 내력 (kN.m)
	외벽	내벽	외벽	내벽				
1	230	200	13,000	0	117.20	6.5	1,196	3,733
2	280	200	10,500	5,400	100.32	5.7	1,608	2,802
3	230	200	10,800	12,400	176.04	5.4	1,986	4,658
4	230	150	7,000	4,300	90.00	5.0	902	2,205
5	230	200	11,200	5,900	171.90	4.5	1,502	3,790
6	230	200	8,300	5,100	84.60	4.5	1,172	1,865
7	230	200	14,000	9,200	167.32	8.9	2,024	7,297
8	130	100	5,000	0	35.00	2.5	260	429
9	130	200	11,400	3,000	85.50	5.7	833	2,388
10	280	100	7,200	4,600	95.88	5.4	990	2,537

Table 4. Wave Force of Target Buildings

번호	침수 깊이 (m)	건물 높이 (m)	건물 폭 (m)	개구 부율 (%)	파력작 용위치 (m)	수평 파력 (kN)	전도 모멘트 (kN.m)
1	7.1	7.0	4.5	0.37	2.5	1,196	3,347
2	4.99	4.3	8.8	0.12	1.7	1,608	2,688
3	4.89	4.8	16.3	0.39	1.7	1,986	3,464
4	3.65	3.5	9.0	0.10	1.3	902	1,441
5	4.33	4.0	11.4	0.15	1.5	1,502	2,445
6	4.13	3.8	10.0	0.17	1.5	1,172	2,091
7	5.92	4.0	9.4	0.26	2.0	2,024	4,153
8	2.23	3.7	7.0	0.10	0.8	260	272
9	4.17	5.0	7.9	0.27	1.5	833	1,453
10	3.48	7.0	10.9	0.10	1.2	990	1,167

Fig. 8. Wave Force by Inundation Depth

축물별 파력 선상에 해당 건축물의 수평내력을 “X” 마크로 나타내었다. 해일파력이 작은 8번과 개구부율이 타 건축물에 비해 큰 1번을 제외하고는 침수심 깊이 3.5 m~6.0 m이상에서 해일파력이 건축물의 내력을 상회하는 것으로 나타났다.

1) 수평내력 평가 결과에 대한 검토

수평내력 평가 결과에 의하면 조적조 건축물은 3.5 m~6.0 m의 범위에서 붕괴되는 것으로 나타났다. 이는 기존의 피해데이터를 종합하여 구조형식에 따른 침수심과 피해관계를 나타낸 Table 5의 조사결과와도 일치한다. Table 5는 1993년 오키시리지진해일 발생이후 구조형식별로 피해정도를 조사하여 슈토에 의해 작성된 것이다. Table 5에 의하면 본 연구결과에서의 조적조 건축물은 목조와 철근콘크리트조의 사이에 위치하는 것을 알 수 있다.

Table 5. Relationship of Inundation Depth and Damage

파고높이	1 m	2 m	4 m	8 m	16 m	32 m
목조	부분적 파괴	전체파괴				
석조	건딜정도				전체파괴	
철근콘크리트	건딜정도					전체파괴
어선		피해발생	피해율 50%	피해율 100%		
방조림	피해 경미, 표류물 저지, 해일경감		부분적 피해 표류물 방지	전반적피해 효과없음		
양식장	피해발생					

※일본 기상청 홈페이지 「해일높이와 피해정도, 슈토(1993)」

5. 결 론

지진해일 발생시 국내의 조적조 건축물의 해일 파력에 대한 안전성 검토를 위하여 연안가 조적조 건축물에 대한 실측 데이터를 토대로 조적조 건축물의 수평내력 및 전도내력을 산정하였다. 또한 조적조 건축물에 작용하는 해일의 파력을 침수심 깊이에 따라 산정하였다. 이상의 결과를 토대로 침수심 깊이에 따른 조적조 건축물의 붕괴 및 전도여부에 대하여 고찰하였다. 하기에 본 연구결과에 의한 검토사항을 정리한다.

- 1) 조사대상 조적조 건축물 모두 전도내력이 전도모멘트보다 큰 것으로 나타났다. 즉 전도이전에 해일의 수평하중에 의해 붕괴됨을 의미한다.
- 2) 조적조 건축물의 수평저항 성능은 저항방향의 벽체길이, 벽체의 두께에 비례하여 증가하고, 개구부율이 작을수록

증가하지만, 해일파력은 개구부율이 클수록 해일파력을 저감시켜 해일에 대한 저항 성능이 증가하는 것으로 나타났다.

- 3) 본 평가결과에 의해 조적조 건축물에 손상을 주는 침수심 깊이는 3.5 m이상에서 발생하고, 6.0 m이상에서 대부분의 조적조 건축물이 붕괴됨을 알았다.
- 4) 본 연구에서의 해일에 대한 조적조 건축물의 안전성 평가방법이 기존의 침수심과 피해관계 데이터 표상의 목조와 철근콘크리트조 사이에 위치하여 적절한 것으로 사료된다.

이상 침수심 깊이에 따른 조적조 건축물의 붕괴 및 전도여부를 검토하였다. 본 연구결과는 침수심 깊이에 대한 절대적인 평가방법으로 특정지역에 대한 차이를 높이 및 해발고도를 고려하여 산정하지 않았음에 유념해야한다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 지진 및 지진해일 피해저감기술 개발사업(NEMA-지진-2012-5) 및 2012년 광운대학교 교내 연구비로 수행된 연구임.

References

- FEMA P646 (2008) “Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis”.
- http://www.bousai.go.jp/oshirase/h17/tsunami_hinan.html, “Guidelines in Accordance with the Tsunami Evacuation Buildings, etc.”, Cabinet Office, Government of Japan, (2005).
- <http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=3463>, “Guidelines for Design of Structure for Vertical Evacuation from Tsunamis”, FEMA P646, (2008).
- <http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/20110311/0311report.html>.
- Kim, S.M., Lee, S.O., Choi, M.K., and Cho, Y.S. (2007) “Field survey of 1983central East Sea Tsunami: Imwon Port”, *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 7 No. 4, pp.97-105.
- Nakamura, T., Kuramitsu, Y., and Mizutani, N. (2008) “Tsunami Scour around a Square Structure”, *Coastal Engineering Journal*, Vol. 50, No. 2, pp. 209-246.
- Nakano Yoshiaki (2011) “Tsunami and Building Structure”, *Journal of Architecture and Building Science*, Vol. 126, No. 1623.

© Received November 20, 2013

© Revised November 21, 2013

© Accepted November 25, 2013