

해일표류물의 충돌에 의한 철근콘크리트 건축물의 응답특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Response Characteristics of Reinforced Concrete Buildings Due to Waterborne Debris Impact Loads

최호*

Ho Choi*

(Received November 21, 2020 / Revised November 24, 2020 / Accepted November 24, 2020)

In this study, the small-scale collision experiments using a pendulum principle were carried out to evaluate the safety of the reinforced concrete building selected as a tsunami evacuation building due to the collision of the waterborne debris represented by ships. The experimental parameters were set as impact velocity, mass and length of the drifted ship. In this paper, the maximum impact force, impact duration, impact waveform and restitution coefficient affecting building response were investigated in detail. As a result, the impact force waveforms were distributed as a triangle in most of the experimental results, but became closer to a trapezoid as the length of the collision specimen increased. This is the very important result in calculating the momentum (impact waveform area) affecting building response. Furthermore, the restitution coefficients were constant regardless of the impact velocity, but they varied depending on the mass and length of the waterborne debris. However, the restitution coefficient for the mass per unit length of the waterborne debris can be evaluated.

키워드 : 해일표류물, 철근콘크리트 건축물, 충돌실험, 충돌력, 충돌속도, 반발계수

Keywords : Tsunami debris, Reinforced concrete building, Collision test, Impact force, Impact velocity, Restitution coefficient

1. 서론

2011년 일본 동북지방 태평양연안 지진(The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake)에 의해 발생한 해일은 일본 동북지방을 중심으로 건축물에 막대한 피해를 입혔다. 한편 일본의 토목분야에서는 해일 하중이 토목구조물에 미치는 영향에 대해서 연구가 진행되어 왔으나(Arikawa et al. 2007), 건축분야에서는 해일이 건축물에 미치는 영향에 대한 연구가 미비한 실정이다. 이러한 상황에서 필자를 포함하여 필자가 소속되어 있던 연구실에서 2011년 해일에 의해 피해를 입은 건축물의 상세조사결과를 바탕으로 건축물에 대한 해일 하중 평가식을 포함한 지침을 제안하였고(Asai et al. 2012; Nakano 2014), 이 지침이 일본의 해일 피난건물 설계 및 선정 시 사용되고 있다.

한편 2011년 일본 동북지방 태평양연안 지진 시 발생한 해일은 무수한 표류물을 동반하였고, Photo 1 및 Photo 2에 나타난 바와 같이 대형 선박이 건축물에 충돌하여 피해를 입은 사례가 다수 확인되었다. 그러나 상기의 지침에는 해일과 더불어 발생하는 표류물이 건축물과 충돌하였을 시에 대한 내용은 고려되어 있지 않다. 기존 건물을 해일 피난건물로 지정할 시, 혹은 해일 피난건물을 신축할 시에는 해일 하중뿐만 아니라 표류물의 충돌에 의한 건축물의 안전성을 확인할 필요가 있기 때문에, 표류물의 충돌에 의한 건축물의 거동에 관한 연구가 시급한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 표류선박의 충돌이 철근콘크리트 건축물에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 충돌속도, 선박의 질량 및 선박의 길이를 변수로 한 진자를 이용한 축소 충돌실험을 통하여, 건축물의 응답에 영향을 미치는 최대 충돌력, 충돌시간 및 반발계수 등에 대한 기본적인 물리량 변동추이를 상세히 평가하고자 한다.

* Corresponding author E-mail: choi.ho@sist.ac.jp

¹일본 시즈오카 이공과대학 건축학과 부교수 (Department of Architecture, Shizuoka Institute of Science and Technology, Shizuoka, 4378555, Japan)



Photo 1. Drifted ship



Photo 2. Damaged building due to the ship collision

2. 진자를 이용한 축소 충돌실험계획

2.1 충격량 및 반발계수의 이론해

본 연구에서는 해일에 의한 표류선박과 철근콘크리트 건축물의 충돌현상을 상정한다. 먼저 식 (1)에 나타난 바와 같이 외력이 작용하지 않는 경우에는 충돌 전후의 운동량은 일정하게 유지된다. 한편 역학적 에너지는 충돌에 의한 재료 소성 등의 에너지 손실을 동반하기 때문에 충돌 전후에 일정하지 않고 손실 에너지 ΔE 를 사용하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 또한 충돌 전후의 상대속도의 비로부터 구해지는 식 (3)에 나타난 반발계수 e 와 운동량 변화가 충격량 I 와 같다는 관계 (식 (4)), 충돌 전의 건축물의 속도 v_b 는 0이기 때문에 이로부터 충격량 및 반발계수는 각각 식 (5) 및 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_s v_s + m_b v_b = m_s v'_s + m_b v'_b \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} m_s v_s^2 + \frac{1}{2} m_b v_b^2 = \frac{1}{2} m_s v_s'^2 + \frac{1}{2} m_b v_b'^2 + \Delta E \quad (2)$$

$$e = -\frac{v'_s - v'_b}{v_s - v_b} \quad (3)$$

$$I = \int F \cdot dt = m_s v_s - m_b v'_b \quad (4)$$

$$\int F \cdot dt = (1+e) \cdot \frac{m_s m_b}{m_s + m_b} \cdot v_s \quad (5)$$

$$e = \sqrt{1 - \frac{m_s + m_b}{m_b} \cdot \frac{\Delta E}{\frac{1}{2} m_s v_s^2}} \quad (6)$$

여기서, m_s 및 m_b 는 선박 및 건축물의 질량(ton), v_s 및 v'_s 는 선박의 충돌 전후의 속도(m/s), v_b 및 v'_b 는 건축물의 충돌 전후의 속도(m/s), F 는 충돌력(kN), dt 는 충돌시간(s)이다.

2.2 실험체 상세 및 가력계획

축소 실험체는 실험실 여건을 종합적으로 고려하여 1/40 스케일로 계획되었고, 축소 충돌실험은 건축물의 응답에 영향을 미치는 최대 충돌력, 충돌시간, 충격량의 특성 및 반발계수를 파악하기 위해 실시되었다. 축소실험 계획 시, 반발계수의 속도 의존 가능성을 고려하여 속도는 축소하지 않고 실스케일로, 즉 속도의 목표상 사율을 1로 설정하여 각 물리량의 상사율을 설정하였다. 본 연구에서 설정한 각 물리량의 상사율을 Table 1에 나타낸다.

Table 1. Similarity law of each parameter

Velocity	Displacement	Time	Acceleration	Mass	Force
1	1/40	1/40	40	1/40 ³	1/40 ²

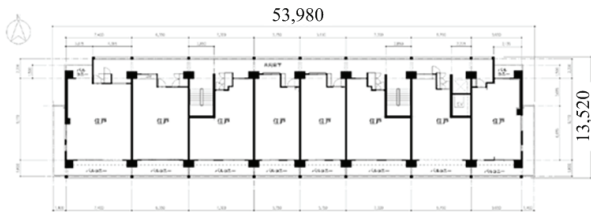
대상 선박은 강철제의 배수량(질량) 300t으로 상정하였다. 선박의 길이 및 선수 곡률반경은 각각 40m 및 2.5m로 상정하였다 (Shoji and Takabayashi 1999). 충돌 실험체(선박)의 질량 및 길이가 최대 충돌력, 충돌시간 및 반발계수 등에 어떤 영향을 미치는가를 조사하기 위하여 질량 4.8kg(300t×1/40³), 길이 1000mm(40m×1/40)의 실험체를 기본으로, 질량 및 길이를 변화시킨 Photo 3에 나타난 총 5개의 충돌 실험체를 제작하였다. 또한 충돌 현상을 재현하기 위하여 각 실험체의 충돌면에는 동일한 곡률을 상정하였다.

대상건물은 일본의 해일 피난건물의 설계지침을 토대로 설계된 총질량 5,356t(단위 바닥면적당 중량: 12kN/m²)의 6층 철근콘크리트 공동주택의 설계 예를 참고하였다(NILIM 2012). 대상건물의 평

면도 및 입면도를 Fig. 1에 나타내었다. 단, 실험에 사용한 피충돌 실험체(건축물)은 반력바닥에 완전고정한 질량 무한대 ($m_s/m_b \approx 0$) 로 가정할 수 있는 압축강도 28.8N/mm²의 콘크리트 슬래브로 간



Photo 3. Tsunami debris specimens



(a) Floor plan



(b) Elevation

Fig. 1. Reference building(unit: mm)

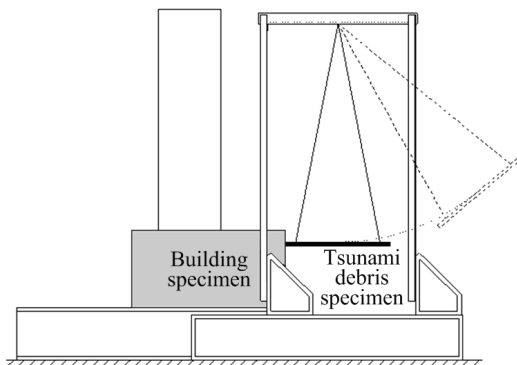


Fig. 2. Test setup for collision tests

략화하였고, 실제 질량에 의한 영향이 거의 없음을 별도 검토에 의해 확인하였다.

가력은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 충돌실험체를 매단 간이 진자를 이용하였고, 목표 충돌속도에 상응하는 높이에서 충돌실험체를 낙하시켜 충돌시켰다.

2.3 계측계획

Photo 4에 나타난 바와 같이 고속 카메라를 충돌 상황이 파악 가능한 위치에 설치하여, 10000 프레임/s의 촬영속도로 충돌 직전부터 직후까지의 양상을 촬영하였다. 이때 Photo 5에 나타난 바와 같이 충돌 실험체에 추적 마크를 부착하여, 화상해석으로부터 변위력파형을 얻었다. 단, 이 파형에는 화상해석 정도에 기인한 추적오차에 의한 노이즈를 포함하고 있기 때문에, 1000Hz의 로패스 필터(Low pass filter)로 평활화하였다. 본 논문에 나타난 실험 결과는 모두 파형처리 후의 데이터에 의한 결과이다. 또한 변위를 1회 및 2회 적분하여 속도 및 가속도를 산출하여, 가속도에 충돌 실험체의 질량을 곱한 값이 환산 충돌력이라고 정의하였다. 여기서 최대 충돌력은 충돌력 파형의 피크값이라고 정의하였고, 그 피

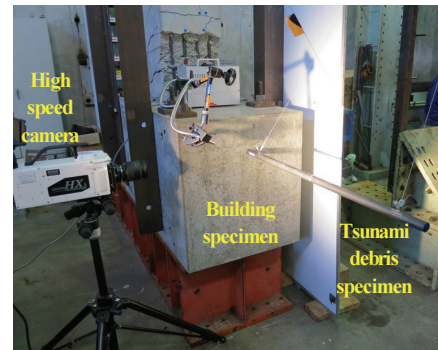
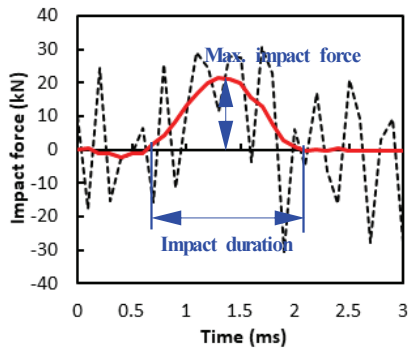


Photo 4. Photographing using high speed camera

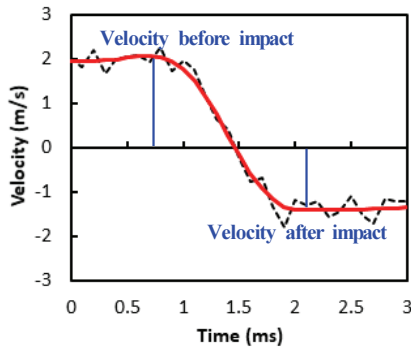


Photo 5. Tracing mark attached on tsunami debris specimen

크값 전후에서 처음으로 0kN이 된 시각을 충돌개시 시각 및 충돌 종료 시각으로 설정하여, 그 구간을 충돌시간이라고 정의하였다 (Fig. 3(a) 참조). 또한 충돌개시 시각 및 충돌종료 시각에 대한 속도를 충돌직전 속도 및 충돌직후 속도로 정의하여 반발계수를 산출하였다(Fig. 3(b) 참조).



(a) Impact force vs. impact duration



(b) Velocity curve before and after impacts

Fig. 3. Definitions of measurement data

실험변수는 Table 2에 나타난 세 개의 케이스로 설정하여, 각 계측 케이스에 대한 충격량의 대소 및 반발계수가 어느 정도 변화하는지 검토하였다. Table 2에 나타난 바와 같이, Case 1은 4,762g의 질량 및 1,000mm의 길이를 갖는 충돌실험체를 대상으로 충돌속도를 변수로 한 경우이다. 충돌속도는 기존의 문헌(NILIM 2012)을 참조하여 1.0~6.0m/s를 대상으로 하였다. Case 2는 충돌속도는 3m/s로 고정하고 1,000mm 길이를 갖는 질량이 다른 3종류의 충돌실험체를 대상으로 한 경우이다. Case 3은 충돌속도는 3m/s로 고정하고 질량이 같도록 길이를 변화시킨 (직경도 변화) 3종류의 충돌실험체를 대상으로 한 경우이다. 실험은 각 변수에 대해서 3회씩 실시하였다.

Table 2. Experimental parameters

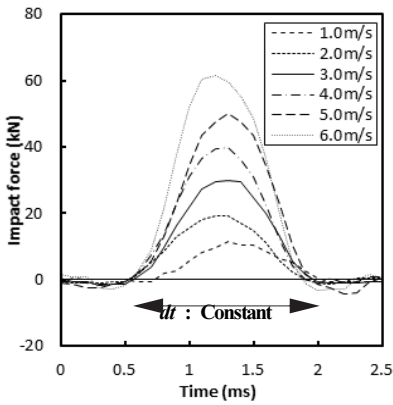
	Collision velocity v_s (m/s)	Mass m_s (g)	Length L (mm)	Diameter ϕ (mm)
Case 1	1.0	4,762	1,000	28
	2.0			
	3.0			
	4.0			
	5.0			
6.0				
Case 2	3	1,542	1,000	16
		4,762		28
		7,940		36
Case 3	3	4,662	750	32
		4,762	1,000	28
		4,740	1,250	25

3. 진자를 이용한 축소 충돌실험결과

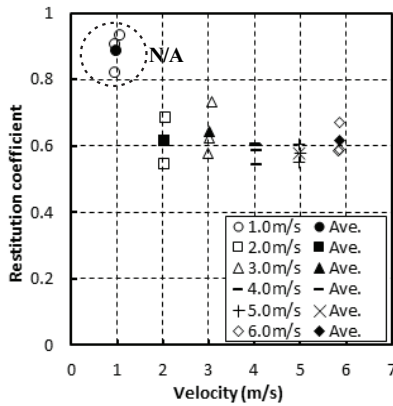
본 실험에서는 Table 2에 나타난 바와 같이 충돌실험체의 충돌속도(Case 1), 질량(Case 2) 및 길이(Case 3)의 변화에 의한 최대 충돌력, 충돌시간 및 반발계수의 변동을 조사하였다. 각 케이스에 대한 충돌력 이력파형 및 각 케이스의 변수와 반발계수와의 관계를 Fig. 4~Fig. 6에 각각 나타내었다.

Fig. 4(a), Fig. 5(a) 및 Fig. 6(a)로부터, 충돌속도(Case 1) 및 질량(Case 2)이 증가하면 최대 충돌력은 증가하나, 길이(Case 3)이 증가하면 최대 충돌력은 감소함을 알 수 있다. 한편 충돌속도와 질량이 증가하여도 충돌시간은 거의 일정한 반면, 길이가 증가하면 충돌시간도 증가하는 경향을 보였는데, 충돌시간은 길이 및 충돌에 의해 발생한 충돌실험체 내에 전파되는 응력도의 속도에 의존한다는 기존의 연구결과가 있다(Naito et al. 2015). 본 실험에서 사용한 충돌 실험체의 재질(밀도 ρ 및 영계수 E)는 동일하므로 전파속도($C_0 = \sqrt{E/\rho}$)는 동일하며, 충돌속도의 변화는 길이의 변화에 의한 것이라고 판단된다. 또한 충돌력 파형은 Case 1 및 Case 2에서는 대부분 삼각형 분포를 나타냈으나, Case 3에서는 길이가 증가함에 따라 삼각형으로부터 사다리꼴에 가깝게 변화하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4(b), Fig. 5(b) 및 Fig. 6(b)로부터, 반발계수는 충돌속도의 대소와 상관없이(1.0m/s는 제외) 0.6으로 거의 일정하였으나, 질량이 증가하면 반발계수는 감소하는 반면, 길이가 증가하면 반발계수는 증가함을 알 수 있다. 여기서 Case 1에서 충돌속도 1.0m/s 일 때의 반발계수가 큰 값을 나타낸 것은 이 경우만 본 실험 전의

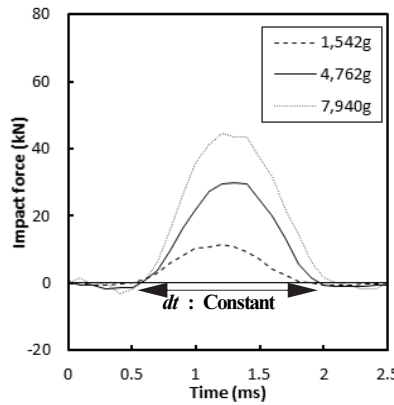


(a) Impact force

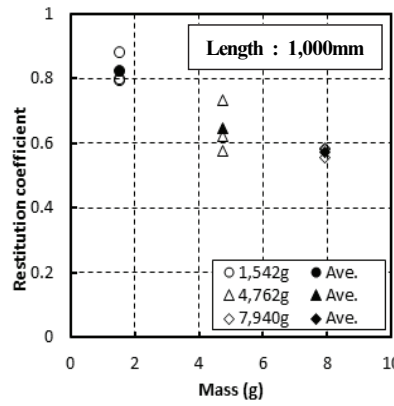


(b) Restitution coefficient vs. velocity

Fig. 4. Test results of Case 1

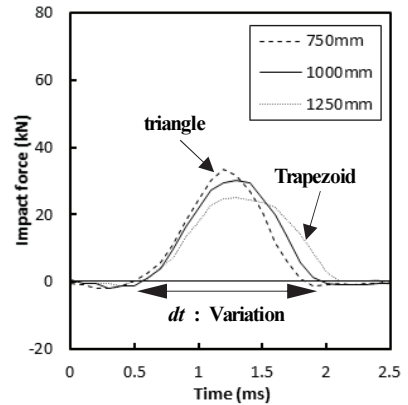


(a) Impact force

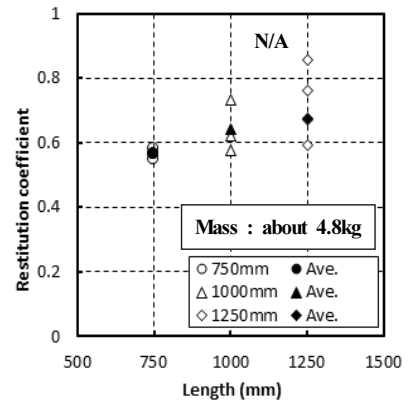


(b) Restitution coefficient vs. mass

Fig. 5. Test results of Case 2



(a) Impact force



(b) Restitution coefficient vs. length

Fig. 6. Test results of Case 3

예비실험을 포함하여 충돌위치를 변화시키지 않고 동일 위치에 충돌시켜 콘크리트 면이 압밀되었기 때문이라고 판단된다. 이에 대해서는 별도검증을 실시하여 동일 위치에 계속하여 충돌시키면 반발계수가 증가하는 것을 확인하였다(Fig. 6(b)). 또한 충돌속도와 반발계수와의 관계에 대해서, Case 2 및 Case 3의 실험체를 사용하여 충돌속도(1.0m/s 및 6.0m/s)를 변수로 한 실험을 실시하였고, 질량 또는 길이가 상이하더라도 앞서 언급한 바와 같이 반발계수는 충돌속도의 대소와는 무관하게 일정하다는 것을 확인하였다. 한편 기존의 연구에 따르면 충돌에 의한 충돌실험체의 압축응력도 σ_0 는 밀도 ρ , 전파속도 C_0 및 충돌속도 v_s 로 결정되기 때문에 ($\sigma_0 = \alpha \rho C_0 v_s$), Case 2 및 Case 3에서는 ρ , C_0 및 v_s 가 동일하므로 압축응력도가 같게 되고, 압축력은 단면적에 비례하게 된다(Naito et al. 2015). 따라서 Case 2 및 Case 3에서의 단면적(= $m/\rho L$)에 상응하는 인자로서 단위 길이당 질량(= m/L , 본 연구에서는 밀도 ρ 는 일정하다고 가정)을 변수로 하여, 단위 길이당 질량과 반발계수와의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7로부터, 단위 길이당

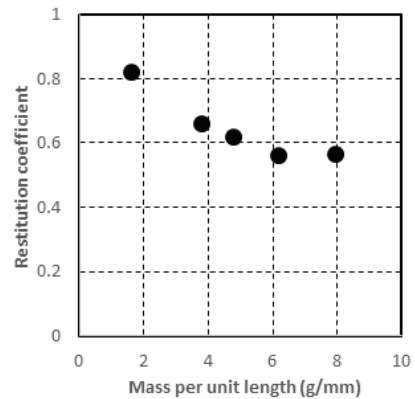


Fig. 7. Restitution coefficient due to mass per unit length

질량이 증가하면 반발계수는 감소하나 이는 충돌에 의한 피충돌면의 손상이 크게 되어 이에 따라 손실 에너지도 크게 되었기 때문이라고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 해일표류선박의 충돌이 철근콘크리트 건축물에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 진자를 이용한 축소 충돌실험을 실시하여, 최대 충돌력, 충돌시간 및 반발계수 등에 대한 기본적인 물리량 변동추이를 상세히 평가하였다. 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 1/40 스케일로 실시한 축소충돌실험으로부터, 충돌력 파형은 대략 삼각형으로 분포하였으나, 충돌실험체의 길이가 길어지면 파형의 형상은 사다리꼴에 가까워지는 것을 알았다. 또한 충돌실험체의 길이는 충돌시간에도 영향을 미치는 것을 알았다. 이 결과는 건축물의 응답에 영향을 미치는 충격량(충돌력 파형의 면적)을 구함에 있어 매우 중요한 파형 형상을 파악하였다는데 의의가 있다.
- (2) 반발계수는 충돌속도의 대소에 상관없이 일정하나, 충돌체의 질량 및 길이에 의해 변화하며, 단위길이당 질량을 변수로 설정하면 반발계수의 변동이 평가가능하다.

본 연구결과를 바탕으로, 금후에 실험결과와 실제스케일로의 환산 및 실제 충격량의 평가를 실시하여, 비선형이력응답해석을 통하여 표류선박의 충돌에 의한 철근콘크리트 건축물의 응답평가를 실시할 예정이다.

Conflicts of interest

None.

References

- Arikawa, T., Ohtsubo, D., Nakano, F., Shimosako, K., Ishikawa, N. (2007). Large model tests of drifting container force due to surge front tsunami, Proceedings of Coastal Engineering, Japan Society of Civil Engineers, **54**, 846–850.
- Asai, T., Nakano, Y., Tateno, T., Fukuyama, H., Fujima, K., Sugano, T., Haga, Y., Okada, T. (2012). Tsunami load evaluation based on field investigations of the 2011 great east Japan earthquake, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering(15 WCEE), Lisbon, Portugal.
- Naito, N., Maeda, K., Konno, H., Ushiwatari, Yiji, Suzuki, K., Kawase, R. (2015). The loading rate dependency of sand cushion focused on stress wave velocity using DEM, Journal of Japan Society of Civil Engineers, **71(2)**, 1_557–1_566.
- Nakano, Y. (2014). Structural design requirements for tsunami evacuation buildings in Japan, Proceedings of 1st ACI/JCI Joint Seminar, Hawaii.
- NILIM/National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan. (2012). Practical Guide on Requirement for Structural Design of Tsunami Evacuation Buildings, Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management, **673**, <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryuu/tnn/tnn0673pdf/ks0673.pdf>.
- Shoji, K., Takabayashi, T. (1999). Effect of ship dimensions on calculation formula for bow collision strength, The Journal of Japan Institute of Navigation, **101**, 201–209.

해일표류물의 충돌에 의한 철근콘크리트 건축물의 응답특성에 관한 실험적 연구

본 연구에서는 해일표류선박의 충돌이 해일피난건물로 선정된 철근콘크리트 건축물의 안전성에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 충돌속도, 선박의 질량 및 선박의 길이를 변수로 한 진자를 이용한 축소 충돌실험을 실시하여, 건축물의 응답에 영향을 미치는 최대 충돌력, 충돌시간, 충돌파형 형상, 반발계수 등에 대한 기본적인 물리량 변동추이를 상세히 평가하였다. 그 결과, 충돌파형 형상은 대부분의 실험결과에서 삼각형 분포가 나타났으나, 충돌실험체의 길이의 증가에 따라 사다리꼴에 가까워지는 것을 알 수 있었다. 이는 건축물의 응답에 영향을 미치는 충격량(충돌력 파형의 면적)을 산정함에 있어 매우 중요한 결과이다. 또한 반발계수는 충돌속도의 대소에 관계없이 일정하나, 충돌체의 질량 및 길이에 의해 변화하며, 단위길이당 질량으로 정리하면 반발계수의 변동이 평가가능함을 알 수 있었다.