충돌하중을 받는 이방향 비부착 프리스트레스트 콘크리트 패널부재의 충돌저항성능에 대한 실험적 거동 평가

이나현^{1,2)} · 이상원¹⁾ · 이승재³⁾ · 김장호^{1)*}

¹⁾연세대학교 사회환경시스템공학부 ²⁾싱가포르 난양기술대학교 ³⁾국방과학연구소

Experimental Evaluation of Bi-directionally Unbonded Prestressed Concrete Panel Impact-Resistance Behavior under Impact Loading

Na-Hyun Yi,^{1,2)} Sang-Won Lee,¹⁾ Seung-Jae Lee,³⁾ and Jang-Ho Jay Kim^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²⁾School of Civil & Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore

³⁾Defense Systems Test Center-3, Agency for Defense Development, Pocheon 486-859, Korea

ABSTRACT In recent years, frequent terror or military attacks by explosion or impact accidents have occurred. Exemplary case of these attacks were World Trade Center collapse and US Department of Defense Pentagon attack on Sept. 11 of 2001. These attacks of the civil infrastructure have induced numerous casualties and property damage, which raised public concerns and anxiety of potential terrorist attacks. However, a existing design procedure for civil infrastructures do not consider a protective design for extreme loading scenario. Also, the extreme loading researches of prestressed concrete (PSC) member, which widely used for nuclear containment vessel, gas tank, bridges, and tunnel, are insufficient due to experimental limitations of loading characteristics. To protect concrete structures against extreme loading such as explosion and impact with high strain rate, understanding of the effect, characteristic, and propagation mechanism of extreme loadings on structures is needed. Therefore, in this paper, to evaluate the impact resistance capacity and its protective performance of bi-directional unbonded prestressed concrete member, impact tests were carried out on 1400 mm×1000 mm×300 mm for reinforced concrete (RC), prestressed concrete without rebar (PS), prestressed concrete with rebar (PSR, general PSC) specimens. According to test site conditions, impact tests were performed with 14 kN impactor with drop height of 10 m, 5 m, 4 m for preliminary tests and 3.5 m for main tests. Also, in this study, the procedure, layout, and measurement system of impact tests were established. The impact resistance capacity was measured using crack patterns, damage rates, measuring value such as displacement, acceleration, and residual structural strength. The results can be used as basic research references for related research areas, which include protective design and impact numerical simulation under impact loading.

Keywords : impact load, bi-directional unbonded prestressed concrete, impact resistance capacity, impact measurement system, residual structural capacity

1. 서 론

2001년 미국 세계무역센터 및 펜타곤에 발생한 9.11 테러사건 이후에 전 세계적으로 충돌 및 폭발 등에 의한 테러가 빈번하게 발생하고 있다. 또한 2009년 국가정보원에서 발표한 자료에 의하면 시설별 발생 테러사고가 국가중요시설물에서 55%이상 발생하고 있으며, 국가중요시설물에서 발생되는 극한하중에 대한 사고는 수많은 인

명 및 재산피해가 발생할 가능성이 높다. 특히, 세계에서 유일한 분단국가인 한국에서는 휴전협정을 맺은 60년 동안 무장공비 침투, 테러, 해상도발, 폭격 등의 다양한 방법에 의한 470여건의 북의 도발이 있었으며, 지난 2010년의 연평도 포격사건 이후로 테러 및 충돌에 의한 구조물의 안정성 등에 대한 관심이 증가하고 있는 실정이다. 즉, 이와 같은 지속적인 국제정세의 변화 속에서 충돌 및 폭발과 관련된 테러 발생 가능성이 항시 존재하고 있다.

최근 원전구조물 또는 가스탱크와 같이 이방향으로 구속된 프리스트레스트 콘크리트(Prestressed Concrete, PSC) 구조물에 대한 관심이 증가하고 있으며, 지난 2011년 일본의 후쿠시마 원전사고로 인해 원전 격납건물 손상 시

*Corresponding author E-mail : jjhkim@yonsei.ac.kr

Received November 23, 2012, Revised May 23, 2013,

Accepted May 30, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

발생할 수 있는 위험성에 대한 사회적 불안감은 증가되고 있는 실정이다. 그러나 지금까지의 국내에서 연구되고 있는 충돌 및 폭발하중에 대한 콘크리트 구조물의 성능은 일반 철근콘크리트(Reinforced Concrete, RC) 구조물 또는 강섬유, 복합섬유를 이용한 섬유보강 콘크리트에 대한 폭발 및 충돌하중에 대한 저항성능을 검토 하고 있는 실정이다.¹⁻⁶⁾

충돌하중에 대한 선진 해외연구로는, 1990년대 초, 미국 산디아국립연구소에서는 시속 215 m/s의 Phantom F4 GE-J79 기종의 실물 항공기와 3.66 m 두께의 철근콘크리트의 충돌실험을 수행하였으며,⁷⁻⁸⁾ 실물충돌 실험을 통해 충돌 해석 연구의 기본적인 데이터를 제공하였다.⁹⁻¹²⁾

Shahvari와 Manolis et al.은 충돌성능을 향상시키기 위하여 PVA 섬유 보강된 콘크리트 슬래브의 충돌 거동을 실험적으로 평가하였으며,¹³⁻¹⁴⁾ Zineddin은 철근콘크리트에 높이에 따른 자유낙하를 수행하여 수치해석을 함께 수행하였다.^{15,16)}

Zhang et al., Dancygier와 Yankelevsky는 고강도 콘크리트에 충돌실험을 수행하였으며,¹⁷⁻¹⁸⁾ Zhang et al.은 관통 깊이와 발생된 분화구(crater)의 지름은 압축강도가 증가할수록 감소한다고 하였으나, Dancygier와 Yankelevsky는 고강도 콘크리트에서는 충돌하중에 대하여 고강도 콘크리트의 높은 취성적 특성으로 인해 후면의 파괴 면적이 커진다고 하였다. 또한, Reidela et al.은 Phantom F4 GE-J79 항공기 엔진을 모형화하여 충돌하중에 대한 고성능 콘크리트 패널에 사용된 재료의 거동과 파괴거동에 대하여 검토하였다.¹⁹⁾

이와 같이 콘크리트 구조물에 대한 충돌하중에 대한 실험적 검토는 수많은 연구자에 의해 수행되었으나, 원전격납건물 및 가스탱크와 같은 PSS 구조물에 대한 충돌하중 성능평가는 국내뿐만 아니라 해외 선진국에서도 하중의 특수성으로 인해 공개된 자료가 없는 실정이다. 그러므로 이 연구에서는 원전격납건물과 같은 PSS 벽체 구조물에서 적용되고 있는 이방향 비부착 프리스트레스트 패널에 대한 충돌저항성능을 검토하기 위하여 일반 철근콘크리트, 프리스트레스트 텐던으로만 보강된 콘크리트(Prestressed Concrete without Rebar, PS), 프리스트레스트 텐던과 철근으로 보강된 콘크리트(Prestressed Concrete with Rebar, PSR, 일반적인 PSS)로 제작하여 충돌 시험 및 충돌 후 잔류구조성능 실험을 수행하였으며, 충돌하중을 받는 콘크리트 구조물의 실험적 거동분석을 위한 충돌 계측 시스템을 구축하였다.

2. 충돌저항성능 실험의 구성

2.1 시편제작 및 재료특성

이방향 비부착 프리스트레스트 콘크리트 패널의 충돌 저항성능을 검토하기 위하여, 이 연구에서는 PSS 벽체구

조물에 대해 실험적 조건을 고려하여 Fig. 1과 같이 1400×1000×300 mm로 선정하였으며, 철근비는 0.024, PS 텐던비는 0.0107로 제작하였다. 또한 시편에 사용된 콘크리트는 Table 1과 같이 40 MPa의 강도의 콘크리트 배합을 사

Fig. 1 Specimen details (unit: mm)

Table 1 Concrete mixture

MCA ⁽¹⁾ (mm)	Slump (mm)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)						AE (%)
				W	Binder			S	G	
					C	FA ⁽²⁾	GGBS			
20	150	31.0	46	160	361	52	103	756	907	1.1

⁽¹⁾MCA: Maximum size of Coarse Aggregate

⁽²⁾FA: Fly-Ash

용하여 이방향 RC 시편 및 PS, PSR 시편을 제작하였다.

Fig. 1(a)와 같은 RC 시편의 경우 항복강도 300 MPa, 극한강도 440 MPa를 지나는 D13 철근을 사용하여, 100 mm 간격으로 양단 배근하여 제작하였다. PS 시편과 PSR 시편에 사용된 PS 긴장재는 시편사이의 실험적 제약조건으로 효율적으로 구속효과를 발현시킬 수 있는 ϕ 32 VSL Thread bar 강봉을 사용하여 긴장하였다. 사용된 PS 강봉은 항복강도 950 MPa, 극한강도는 1050 MPa, 단위길이 당 중량은 6.53 kg/m을 가진다. 또한 시편에 ϕ 50 쉬스관을 삽입하여 긴장 후 그라우팅을 하지 않는 비부착 포스트텐션 방식으로 긴장하였다. PS 시편과 PSR 시편은 긴장시 발생할 수 있는 콘크리트 압축파괴를 방지하기 위하여, 충분한 배합강도가 발생한 재령 30일에 Fig. 2와 같이 강봉을 이용하여 양방향으로 430 kN 만큼 긴장작업을 수행하였다. 긴장력은 긴장 유압계와 PS 강봉의 중앙, 단부, 긴장부에 변형률 게이지를 부착하여 변형률에 따른 긴장력을 계측하여 긴장하였으며, 실제 계측 결과 360 kN에서 440 kN의 긴장력이 도입되었다. 긴장된 PS강봉은 앵커플레이트와 앵커넛트를 이용하여 고정하였으며, 이 연구에서 적용하고자 한 430 kN의 긴장력에 의해 콘크리트에 발생된 콘크리트 응력은 계산한 결과 9.62 MPa 만큼 증가하였다.

콘크리트의 재료물성을 측정하기 위하여 100×200 mm의 원형공시체를 제작하였으며, 대기양생과 표준양생으로 재령 28일에 대하여 각각 측정하였다. 대기양생에 대한 콘크리트의 압축강도, 할렬인장강도, 탄성계수, 포아송비는 각각 평균 44.3 MPa, 3.9 MPa, 32.98 GPa, 0.196를 나타내었으며, 표준양생의 경우 평균 52.7 MPa, 5.2 MPa, 34.7 GPa, 0.203을 각각 나타내었다.

2.2 충돌실험 개요

이 연구에서는 10 m, 5 m, 4 m의 예비실험을 수행한 후에 계측 가능한 3.5 m의 이 실험으로 구성하여 실험을 수행하였다. 이 연구에서는 충돌실험에 대한 시편의 거동을 검토하기 위하여, Fig. 3과 같이 강제 지지대를 별도로 제작하여 시편을 거치하고 클램프 및 커버를 이용하여 고정하였으며, 시편 하부공간에서 계측이 가능하도록 충돌실험을 구성하였다. 또한 낙하추에는 충돌하중을 측정하기 위한 로드셀을 추가적으로 구성하였다.

3. 충돌계측시스템의 구성

3.1 충돌실험장의 구성

이방향 비부착 프리스트레스트 콘크리트의 충돌저항 성능을 검토하기 위해서는, 선정된 충돌하중에 대한 충돌시험이 가능한 충돌실험장을 구성해야 한다. 이 연구에서는 국방과학연구소의 다락대시험장에 Fig. 4와 같이

Fig. 2 Prestressing of concrete panel

Fig. 3 Details of impact experiment & pendulum

Fig. 4 Impact test setup

시험체의 자유낙하를 위한 낙하탑, 시험체에 충격을 주기 위한 낙하추 및 측정장치로 구성하였다. 낙하탑은 낙하추를 10~15 m까지 상승시킬 수 있는 철골 구조물로 구성하였으며, 20 kN 중량을 2~3 m/min의 속도로 상승시킬 수 있는 호이스트 시스템, 낙하추를 일정시점에서 낙하시키는 릴리즈 시스템, 중량체가 반복하여 낙하하더라도 안전한 기초, 낙하로 인한 발생할 수 있는 위험을 감소시킬 수 있는 챔버, 낙하추의 높이 상승시 발생할 수 있는 회전 및 중량위치를 잡기 위한 spins-away, 낙하추의 높이를 측정하고 제어하는 컨트롤 및 원격제어시스템으로 구성하였다.

3.2 계측시스템의 구성

구성된 충돌실험장은 Fig. 5에서 보는 것과 같은 계측시스템으로 구성하였다. 낙하추의 높이는 원격제어시스템과 시험장의 제어케이블을 통해 설정한 정확한 높이만큼 상승 가능하며, 설정된 높이에서 순간적인 낙하가 가

Fig. 5 Data measurement system

Fig. 6 Sensor placement of panel

능하도록 구성하였다. 또한, 충돌실험과 같이 짧은 시간에 발생하는 극한하중의 경우에는 별도의 동적계측장비가 필요하다.

그러므로 이 연구에서는 D사의 Dewe 2600과 Dewe 1201을 이용하여 500 kHz의 sampling rate로 계측을 수행하였으며, 충돌 시 220 frame/s의 초고속카메라를 이용하여 충돌 시 추의 속도 및 낙하지점을 확인하였다. 또한 이 실험에서는 포텐서미터(LP-50F)를 이용한 처짐, 제작한 로드셀을 이용한 충돌하중, 가속도(PCB 350B03) 및 변형률, 상하부면에서 발생한 균열형태를 측정하였으며, 계측센서의 위치는 Fig. 6과 같다.

4. 충돌저항성능 실험 결과

4.1 충돌하중 측정 결과

이 연구에서는 14 kN의 낙하추를 이용하여 10 m, 5 m, 4 m 높이의 예비실험을 수행하였으며, 이를 통해 결정된 3.5 m 높이에서의 충돌저항성능을 검토하였다. Fig. 7은 낙하추와 시편의 충돌장면을 초고속카메라로 촬영한 것으로 충돌-바운스-충돌을 반복하는 것을 확인할 수 있으며, 추의 낙하속도를 측정한 결과 14.2 m/s의 속도로 에너지 보존 법칙에 따른 낙하속도인 14 m/s와 유사하게 측정되었다.

시편에 작용된 충돌하중은 휘스톤 브릿지(wheatstone bridge)로 구성된 로드셀을 제작하여 측정하였으며, 3.5 m 높이에서 낙하된 RC, PS, PSR 시편의 충돌하중은 Fig. 8

Fig. 7 Photos of high-speed camera

Fig. 8 Impact load-time history curve

과 같다. Fig. 8에서 보는 것과 같이 자유낙하 후 3~4번의 바운싱이 발생하였으며, 추가 낙하되는 시점에 따라 최대 0.5초의 차이가 발생하였다. 또한 최대 충돌하중은 9,971.3 kN~13,445.4 kN으로 시편에 따라 차이가 나타났으며, 2nd peak 하중은 최대 충돌하중에 대하여 0.3~0.36 배의 하중을 나타내었으며, 3rd peak 하중은 최대하중에 대하여 0.14~0.25배의 하중을 가지는 것을 확인하였다. 예비 실험과 본 실험에서 측정된 최대하중 및 충격량은 Fig. 9와 같다. 시편 최대 충돌하중이 발생할 시, 낙하추와 시편에 접촉되어 있는 시간은 낙하 높이에 따라 차이가 발생하였으나, 대부분의 시편에 0.018 sec동안의 짧은 시간동안 약 10000 kN 이상의 큰 충돌하중이 가해졌다.

Fig. 9에서 보는 것과 같이 RC와 PSR 시편에 대한 예비 실험(10 m, 5 m, 4 m)과 본 실험(3.5 m)에서 측정된 최대 충돌하중은 12844 kN~13496 kN으로 그 크기가 유사하게 측정된 것을 확인할 수 있다. 그러나, 10m에서 낙하한 PSR-1 시편의 최대 충격량은 65.07 kN이 발생하였으며, 본 실험(3.5 m 낙하)에 비하여 약 10 kN-sec의 충격량 차이가 발생한 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 9(e)에서 보는 것과 같이 PS 시편은 다른 시편에 비하여 적은 충돌하중이 측정된 것을 확인할 수 있다.

이는 PS 시편에서는 충돌하중에 의한 충돌에너지가 시편에 의해 흡수되는 것보다 추에 의해 거동하는 운동에너지가 크게 작용하였기 때문이다. 즉, 에너지 보존법칙에 의해 낙하에너지는 추의 운동에너지와 시편에 흡수되는 에너지로 전환되며, 시편에 의해 흡수된 에너지는 시편의 운동에너지와 충돌에 의한 분화구(crater)의 크기,

균열형상, 박락 등의 파괴에너지 등으로 변환된다. 그러므로 충돌 전후로 변화되는 추의 속도 차이로 계산되는 운동에너지의 차이는 시편에 의해 흡수되는 에너지이며, 시편에 흡수되지 않은 에너지는 충돌 이후의 추의 운동에너지로 변환되어, 추의 리바운드와 같은 충돌 이후의 추의 거동에 영향을 주었다고 판단하였다. 이와 같이 낙하에너지와 충돌이후의 추의 운동에너지 차이로 인해 발생하는 시편에 흡수되는 에너지는 다음 식 (1)~(5)를 통해 구할 수 있다. 이 연구에서는 최대충돌하중에 의한 시편의 흡수에너지만을 고려하였으므로, 최대충돌 이후의 추의 리바운드에 대해서는 고려하지 않았다.

시편에 작용하는 충돌하중 $F(t)$ 은 낙하추의 질량 m 과 속도 v 에 의해 결정되며, 초기 충돌속도 v_0 는 식 (1)과 같이 중력가속도 g 와 낙하높이 H 에 의해 결정된다. 더불어, 시간에 따른 낙하추의 충돌 속도 v 와 변위 s 는 충돌하중에 의해 식 (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_0 = \sqrt{2gH} \quad (1)$$

$$v(t) = v_0 - \left(\frac{1}{m}\right) \int_0^t F(t) dt \quad (2)$$

$$s(t) = \int_0^t \left(v_0 - \left(\frac{1}{m}\right) \int_0^t F(t) dt \right) dt \quad (3)$$

시편과 충돌한 낙하추의 속도와 운동에너지는 시편의 충돌흡수에너지에 따라 감소하게 된다. 그러므로 낙하추의 충돌운동에너지, E_{imp} 와 시편에서 흡수되는 충돌흡수

Fig. 9 Maximum impact load and impulse curve

Fig. 10 Impactor velocity and absorbed energy

에너지, E_{ab} 는 식 (4), (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{imp} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4)$$

$$E_{ab}(t) = \frac{mv_0^2}{2} - \frac{1}{2}m\left(v_0 - \frac{1}{m}\int_0^t F(t)dt\right)^2 \quad (5)$$

이를 바탕으로 본 실험에서 측정된 충돌하중을 바탕으로 낙하추의 속도변화와 시편의 충돌흡수에너지를 살펴보면 Fig. 10과 같다. 낙하추의 속도는 3.5 m의 높이에서 대략 8.28 m/s의 속도를 유지하지만, 시편과 충돌한 후에는 RC와 PSR 시편은 약 0.5배로 속도가 감소하였고, PS 시편은 0.33배로 속도가 적게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 RC, PSR 시편의 경우에는 낙하추에 의한 480.2 kJ의 운동에너지가 시편에 의해 약 350 kJ 만큼 흡수되나, PS 시편은 260 kJ의 에너지만이 시편에 의해 흡수되었다. 이는 PS 시편의 경우, RC와 PSR 시편에 비해 적게 흡수된 에너지만큼 취성적으로 거동하였으며, 시편에 흡수되지 않은 에너지만큼 추의 운동에너지로 전환되는 것을 확인할 수 있다.

4.2 균열 및 손상형상

1.4 t의 추로 낙하된 이방향 RC, PS, PSR 시편의 균열 형상은 Fig. 11과 같다. Fig. 11(a)~(d)에서 볼 수 있듯이 RC 시편의 경우에는 상부면에 충돌에 의한 관입(penetration)이 발생하였으며, 하부면의 경우, 부분적으로 스폴링이 발생되었으나 비교적 균열이 잘 분산된 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 11(e)~(f), (k)와 같이 PS 시편에는 상부면에 관입뿐만 아니라 항복균열에 따라 파괴가 발생하였으며, 하부면에도 항복균열 및 방사형태로 취성적인 파괴가 발생한 것을 확인할 수 있다.

PSR 시편의 경우에는 예비실험의 결과를 제외한 Fig. 11(i)~(j), (l)에서 보는 것과 같이 RC 시편과 같이 하부면의 균열분산이 효과적으로 발생하였으며, 균열폭이 RC 시편에 비해 상대적으로 작게 발생하였다. Table 2와 Fig. 12에서 보는 것과 같이 RC, PS, PSR의 평균 관통깊이는 손

상률(damage rate)에 비해 시편별로 불규칙적인 경향을 나타낸다. 여기서 손상율은 충돌에 의해 시편에 발생한 관통깊이와 표면균열에 의해 발생한 손상을 면적으로 계산하여 계산한 것이다. 또한, 각 시편별 RC, PS, PSR 시편의 평균 관통깊이는 20.5 mm, 19 mm, 19 mm로 시편종류와 상관없이 평균 관통깊이가 유사하게 발생하였다. 그러나, PSR 시편의 경우에는 3.5 m 낙하높이에 대하여, 시편별 관통깊이가 15 mm와 23 mm로 발생하였으며, 그 차이가 상대적으로 크게 발생하였다. 그러므로 관통깊이만으로는 시편 종류에 따른 충돌저항성능을 판단하기에는 한계가 있으므로, 이 연구에서는 관통깊이를 포함한 표면균열면적에 따른 손상율을 살펴보았다. 3.5 m 높이의 충돌실험에 대한 RC, PS, PSR 시편의 평균 손상율은 14.6%, 20.5%, 9.4%의 값을 나타내며, 이와 같은 표면 손상율에 의하면 PSR 시편이 RC, PS 시편에 비하여 0.356, 0.561만큼 표면 손상율이 감소한 것을 확인할 수 있다. 즉, 표면 손상율을 통해 PSR 시편이 RC, PS 시편에 비해 우수한 충돌저항성능을 지니고 있는 것을 확인할 수 있다.

4.3 충돌 시편의 측정 데이터

이 연구에서 구성한 계측시스템을 이용하여 측정된 데이터는 변위, 변형률, 가속도로 나뉘 각 시편별로 측정하였다.

4.3.1 충돌하중에 대한 시편의 변위

충돌하중을 받는 시편의 처짐은 중앙부분과 대각선 방향의 1/3인 250 mm에서 측정하였다. Fig. 13과 Table 2와 같이 3.5m 높이에서 수행한 본 실험 시편의 중앙부 최대 처짐의 거동에 대해서 정리해보면, RC 시편의 경우, 중앙부 최대처짐은 -20.06 mm, -21.24 mm로 잔류처짐에 대한 회복비는 0.82, 0.33으로, 충돌하중에 대한 처짐이 회복되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 PS 시편의 경우에는 Fig. 13(b)에서 확인할 수 있듯이, 중앙부 최대처짐은 -13.84 mm, -19.0 mm로 RC 시편에 비하여 상대적으로 낮은 최대처짐을 가지고 있으나, 잔류처짐에 대한 회복력

Fig. 11 Damaged surface and crack profile of impacted concrete panels

Table 2 Measured data under impact loading

			RC			PS		PSR			
			RC-1	RC-2	RC-3	PS-1	PS-2	PSR-1	PSR-2	PSR-3	PSR-4
Surface crack		Penetration depth (mm)	33	21	20	18	20	51	21	15	23
		Crack area ($\times 10^4$ mm ²)	27.47	21.75	19.39	32.51	25.15	79.76	19.50	12.67	13.71
		Surface damage rate (%)	19.57	15.48	13.80	23.10	17.87	56.9	13.89	9.03	9.77
Impact loading		Max. loading (kN)	13,240.2	NR ⁽¹⁾	13,445.4	NR	9971.3	13,496.6	13,250	NR	12,844.1
		Max. impulse (kN-sec)	63.626	NR	53.167	NR	42.561	65.07	55.564	NR	54.129
Energy		After impact velocity (m/s)	5.45	NR	4.29	NR	5.58	9.39	4.70	NR	4.40
		Absorbed energy (kJ)	478.11	NR	351.2	NR	262.50	755.05	393.96	NR	344.6
Dis- plac- ment	Center	Maximum (mm)	NR	-20.05	-21.24	-13.84	-19.00	NR	NR	-50.96	NR
		Residual (mm)	NR	-3.57	-14.28	-13.84	-16.59	NR	NR	-25.4	NR
		Recover ratio ⁽²⁾	NR	0.82	0.33	0	0.127	NR	NR	0.501	NR
	250 mm distance	Maximum (mm)	NR	NR	-20.6	NR	-17.82	NR	-31.2	-25.8	-17.13
		Residual (mm)	NR	NR	F ⁽³⁾	NR	-8.44	NR	F	-16.49	-15.22
		Recover ratio ⁽²⁾	NR	NR	F	NR	0.53	NR	F	0.36	0.111
	NIA (normalized interface area)		1.0	1.0	1.0	0.404	0.404	1.404	1.404	1.404	1.404
Acc.		Peak accelerometer (g)	2394.5	NR	1751.0	1298.97	1797.2	2396.4	1211.6	1618.0	NR
		Specimen velocity (m/s)	1.277	NR	0.768	0.805	0.721	1.268	0.848	0.824	NR
		Specimen kinetic energy (kJ)	8.562	NR	3.099	3.433	2.759	9.187	4.104	3.879	NR
Height of pre-test			5 m					10 m	4 m		

⁽¹⁾NR: non-reported, ⁽²⁾Recover ratio: (max.-residual)/max. displacement, ⁽³⁾F: fall after measuring max. displacement

Fig. 12 Relation of penetration depth and damage rate

Fig. 13 Displacement behavior under impact loading with 3.5m height

은 0, 0.127로 소성적이고 취성적인 거동을 하는 것을 확인할 수 있다. PSR 시편의 경우에는 Fig. 13(c)에서 확인

할 수 있듯이, 중앙부의 최대처짐은 -50.96 mm의 큰 처짐과 0.5의 잔류처짐 회복력이 발생하였으나 측정된 데이

터의 부족으로 인해, 중앙에서 250 mm 떨어진 위치에서 측정된 처짐을 추가적으로 비교하였다. 그 결과 PSR-3과 PSR-4 시편의 중앙에서 250 mm 떨어진 위치에서 측정된 처짐은 -25.8 mm, -17.1 mm로 측정되었다. 이는 Table 2에서 볼 수 있듯이, RC와 PS 시편의 중앙 250 mm 위치에서 측정된 변위가 각 -20.6 mm, -17.82 mm로, PSR 시편의 평균처짐은 다른 시편에 비해 4.126~ 20.37%의 큰 처짐이 발생한 것을 확인할 수 있다. 비록 획득한 데이터의 부족으로 인한 PSR 시편의 중앙부 최대처짐에 대한 신뢰성은 떨어지나, 각 위치에서의 최대처짐만을 비교하게 된다면, 취성적으로 거동한 PS 시편의 최대처짐이 상대적으로 적게 발생한 것을 확인할 수 있다. 이는 충돌하중에 대한 최대처짐은 콘크리트의 강성보다도 콘크리트 내부의 철근 및 쉬스관 등에 의한 계면(interface)과 공극량에 의해 크게 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. Table 2와 같이 RC 시편에 의한 철근과 콘크리트의 사이의 계면을 1.0으로 정규화해보면, PS, PSR 시편은 0.404, 1.404으로 계산할 수 있다. 즉, 충돌시편 중에서 가장 큰 최대처짐이 발생한 PSR 시편의 계면이 다른 시편에 비하여 크게 발생한 것을 확인할 수 있다. 즉, 이는 콘크리트에 삽입한 철근은 충돌하중에 대하여 콘크리트 시편의 연성을 증가시켜, 충돌저항성능 및 회복력을 향상시키나, 철근 및 쉬스관에 의한 콘크리트 시편내부의 계면 및 공극을 증가시켜, 짧은 시간에 작용하는 큰 충돌하중을 견딜 수 있는 면적이 감소하여, 큰 최대처짐을 발생시키는 것을 확인할 수 있다.

4.3.2 충돌하중에 대한 시편의 변형률

매립된 철근게이지의 충돌에 의한 변형률은 Fig. 14에서 보는 것과 같이 충돌 직후 게이지의 측정 범위 이상까지 넘어가는 것을 확인할 수 있다. 이는 충돌하중에 의한 철근의 변형은 철근의 항복변형률인 20000 $\mu\epsilon$ 을 초과하며, 소정거동을 하는 것을 확인할 수 있다. 또한 PS, PSR 시편에서 발생하는 프리스트레싱 긴장력 변화는 Fig. 15와 같이 측정할 수 있다. 시편에서 계측기에 따른 기계적 오차를 줄이기 위하여, 긴장당시 사용한 TDS-303을 이용하여, 충돌 전후로 각각 계측하였다.

프리스트레싱 긴장력은 강봉의 긴장부, 중앙부, 단부로 나눠 계측을 하였으며, 시편의 장방향(PL series)과 단방향(PS series)으로 나눠 측정하였다. Fig. 15(a)에서 볼 수 있듯이, PS-1과 PS-2 시편 단방향의 긴장력은 평균 9.0 kN, 25.7 kN만큼 증가한 반면, 장방향의 긴장력은 평균 44.3 kN, 19.2 kN이 감소하였다. 이를 통해 PS 시편은 충돌하중에 의해 장방향의 긴장력은 감소하나, 단방향으로의 긴장력은 증가하며, 그로 인해 증가된 콘크리트 구속압으로 인해 단방향 중심으로 PS 시편의 파괴(Fig. 11(e)~(f))가 발생한 것을 확인할 수 있다. 더불어, PSR 시편의 경우에는 Fig. 15(b)와 같이 철근에 의해 충돌하중이 시편에 균일하게 분산되었으며, 그로 인한 프리스트

Fig. 14 steel strain behavior

(a) PS panel

(b) PSR panel

Fig. 15 Prestressing force of prestressing tendons

레싱 긴장력은 긴장력이 가해진 방향성과 상관없이 균일하게 증가한 것을 확인할 수 있다.

4.3.3 충돌하중에 대한 시편의 가속도

Fig. 16은 3.5 m의 본 실험에 수행된 시편에서 측정된 가속도이다. 시편에 따라 가속도의 최대크기는 1200~2400 g으로 상이하나, 유사한 형태로 거동하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Table 2에서 보는 것과 같이 시편에서 측정된 가속도로 계산된 본 실험 시편의 속도는 0.721~

(a) RC panel

(b) PS panel

(c) PSR panel

Fig. 16 Measured acceleration under impact loading with 3.5 m height

0.824 m/s로 대체적으로 유사한 경향을 나타내고 있으나, RC, PS 시편은 PSR 시편에 비해 0.93, 0.88배의 낮은 시편속도가 발생하였다. 즉, 이는 PSR 시편의 경우, 시편에 흡수된 충돌에너지가 RC, PS 시편에 비해 1.25, 1.406배 높은 시편의 운동에너지로 변환되었음을 확인할 수 있다.

4.4 충돌하중에 의한 잔류구조성능

이 연구에서는 이방향 비부착 프리스트레싱 패널의 충돌 후 잔류구조성능을 검토하기 위하여, Fig. 17과 같이 3000 kN UTM을 사용하여 1.5 kN/s의 하중속도로 충돌

Fig. 17 Residual flexural strength test setup

Fig. 18 Residual load-displacement curves

및 구조시편에 대하여 3점 휨 실험을 수행하였다. 시편의 형상이 이방향 슬래브이나, 충돌에 의한 손상에 의한 가압위치를 고려하기 위하여 단순지지에 대한 선하중으로 가압하였다. 또한, 충돌하중을 받은 면을 압축구간으로 두었으며, 하중에 따른 변위를 측정하기 위해 2000 kN의 로드셀과 100 mm의 변위계로 측정하였다.

Fig. 18은 3.5 m의 높이에서 낙하시킨 본 실험에 대한 충돌시편과 손상 받지 않은 일반 RC, PS, PSR 구조시편의 평균 잔류성능에 대하여 검토하였다. 일반 RC 구조시편은 사인장균열이 발생하는 반면에, 충돌손상을 받은 RC 충돌시편은 전단파괴가 발생하였으며, RC 구조시편에 비하여 극한하중이 평균 0.836배 감소하였다.

일반 PS 시편은 무근 콘크리트와 같이 중앙집중 균열이 발생하였으며, 가압하중이 제거된 이후에는 PS 긴장력에 의해 균열 닫힘 현상이 발생하였다. 충돌손상을 받은 PS 시편은 긴장재를 중심으로 취성파괴가 발생하였으며, 극한하중이 PS 구조시편에 비하여 0.475배 감소하는 것을 확인하였다. PSR 구조시편의 경우, RC 구조시편에 비하여 1.5~1.6배의 극한하중과 높은 강성을 지니고 있으며, RC 구조시편과 같이 휨 균열이 발생하였다. PSR 충

돌시편은 전단균열이 발생하였으나, PSR 구조시편에 비하여 0.88배의 극한하중을 지니고 있다. 이를 통해 PSR 시편이 RC 및 PS 시편에 비하여 충돌하중에 대하여 높은 저항성능을 지니고 있음을 확인할 수 있다. 또한 충돌에 의한 극한하중은 감소하였으나, 강성의 감소는 발생하지 않은 것을 확인하였다.

5. 결 론

이 연구에서는 이방향 비부착 프리스트레스트 콘크리트 패널의 충돌저항성능과 충돌 후의 잔류 구조성능을 실험적으로 비교 평가하였다. 또한 짧은 시간에 국부적으로 큰 하중이 가해지는 충돌하중을 측정하기 위한 계측 시스템 및 제어시스템을 구축하였다. 프리스트레싱 강봉과 철근에 의해 구축된 PSR 시편은 RC 및 PS 시편에 비하여 분산된 균열분포 및 높은 에너지 흡수력, 잔류 구조성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다. 즉, 충돌하중의 경우, 일반적으로 측정하는 처짐 및 관입깊이만으로 시편의 충돌저항성능을 평가하는 것이 아니라, 균열형상, 에너지 흡수력, 손상면적, 잔류 구조성능 등을 통한 전반적인 평가가 이뤄져야 한다고 판단된다. 이 연구를 통하여 비부착 프리스트레스트 콘크리트 구조물에 대한 충돌 해석 및 추가적 충돌 실험을 위한 기초적인 자료로써 활용이 가능하며, 추후 이 연구에서 수행된 실험 결과를 바탕으로 full-scale의 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 충돌하중에 대한 해석적 검토가 반드시 수행되어야 한다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단(NRF)의 지원(No. 2012-0005218)과 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 2010-162010180)을 통해 이뤄졌으며, 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. Yi, N. H., Kim, S. B., Kim, J. H. J., and Cho, Y. G., "Behavior Analysis of Concrete Structure under Blast Loading: (II) Blast Loading Response of Ultra High Strength Concrete and Reactive Powder Concrete Slabs," *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 29, No. 5A, 2009, pp. 565-575 (In Korean).
2. Ha, J. H., Yi, N. H., Kim, S. B., Choi, J. K., and Kim, J. H. J., "Experimental Study on Blast Resistance Improvement of RC Panels by FRP Retrofitting," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 1, 2010, pp. 93-102 (In Korean).
3. Yoo, D. Y., Min, K. H., Lee, J. Y., and Yoon, Y. S., "Evaluating Impact Resistance of Externally Strengthened Steel Fiber Reinforced Concrete Slab with Fiber Reinforced Polymers," *Journal of the Korea Concrete*

- Institute*, Vol. 24, No. 3, 2012, pp. 293-303 (In Korean).
4. Min, K. H., Shin, H. O., Yoo, D. Y., and Yoon, Y. S., "Flexural and Punching Behaviors of Concrete Strengthening with FRP Sheets and Steel Fibers under Low-Velocity Impact Loading," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 1, 2011, pp. 31-38 (In Korean).
5. Ha, J. H., Yi, N. H., Choi, J. K., and Kim, J. H. J., "Experimental Study on Hybrid CFRP-PU Strengthening Effect on RC Panels under Blast Loading," *Composite Structures*, Vol. 93, No. 8, 2011, pp. 2070-2082. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.02.014>)
6. Yi, N. H., Kim, J. H. J., Han, T. S., Cho, Y. G., and Lee, J. H., "Blast-Resistant Characteristics of Ultra-High Strength Concrete and Reactive Powder Concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 28, No. 1, 2012, pp. 578-584. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.014>)
7. Sugano, T., Tsubota, H., Kasai, Y., Koshika N., Ohnuma H., Riesemenn von W. A., Bickel D. C., and Parks M. B., "Local Damage to Reinforced Concrete Structures Caused by Impact of Aircraft Engine Missiles. Part 1. Test Program, Method and Results," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 140, Issue 3, 1993, pp. 387-405. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0029-5493\(93\)90120-X](http://dx.doi.org/10.1016/0029-5493(93)90120-X))
8. Sugano, T., Tsubota, H., Kasai, Y., Koshika, N., Itoh, C., Shirai, K., Riesemenn, von W. A., Bickel, D. C., and Parks, M. B., "Local Damage to Reinforced Concrete Structures Caused by Impact of Aircraft Engine Missiles. Part 2. Evaluation of Test Results," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 140, 1993, pp. 407-423.
9. Abbas, H., Paul, D. K., Godbole, P. N., and Nayak, G. C., "Aircraft Crash Upon Outer Containment of Nuclear Power Plant," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 160, 1996, pp. 13-50. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0029-5493\(95\)01049-1](http://dx.doi.org/10.1016/0029-5493(95)01049-1))
10. Jovall, O., "Airplane Crash Simulations: Comparison of Analyses Results with Test Data, Transactions," 19th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 19), Toronto, Canada, 2007, p.#wJ2/2.
11. Katayama, M., Itoh, M., and Rainsberger, R., "Numerical Simulation of Jumbo Jet Impacting on Thick Concrete Walls-Effects of Reinforcement and Wall Thickness," *2nd Asian Conference on High Pressure Research (ACHPR-2)*, Nara, Japan, 2004, pp. 1-7.
12. Mizuno, J., Koshika, N., Sawamoto, Y., Niwa, N., Yamashita, T., and Suzuki, A., "Investigation on Impact Resistance of Steel Plate Reinforced Concrete Barriers Against Aircraft Impact Part 1: Test Program and Results, Transactions," *18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18)*, Beijing, China, 2005, pp. 2566-2579 (#05/2).
13. Shahvar, F. V., "Assessing Impact Resistance of Concrete-Based Materials," University of California, Berkeley, Thesis of Doctor of Philosophy, 2008.
14. Manolis, G. D., Gareis, P. J., Tsonos, A. D., and Neal, J. A., "Dynamic Properties of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete Slabs," *Cement and Concrete Composites*, Vol.

- 19, Issue 4, 1997, pp. 341-349. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(97\)00030-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00030-9))
15. Zineddin, M. Z., "Behavior of Structural Concrete Slabs under Localized Impact," The Pennsylvania State University, Pennsylvania, Thesis of Doctor of Philosophy, 2002, pp. 75-205.
16. Zineddin, M. Z. and Krauthammer, T., "Dynamic Response and Behavior of Reinforced Concrete Slabs under Impact Loading," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, No. 9, 2007, pp. 1517-1534. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.10.012>)
17. Zhang, M. H., Shim, V. P. W., Lu, G., and Chew, C. W., "Resistance of High Strength Concrete to Projectile Impact," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31, No. 7, 2005, pp. 825-841. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.04.009>)
18. Dancygier, A. N. and Yankelevsky, D. Z., "High Strength Concrete Response to Hard Projectile Impact," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18, No. 6, 1996, pp. 583-599. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)00063-G](http://dx.doi.org/10.1016/0734-743X(95)00063-G))
19. Riedel, W., Noldgena, M., Straßburgera, E., Thomaa, K., and Fehlinge, E., "Local Damage to Ultra High Performance Concrete Structures Caused by an Impact," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, Issue 10, 2010, pp. 2633-2642. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.07.036>)

요 약 2001년 9.11테러로 인한 미국 세계무역센터 및 미국 국방성 펜타곤이 붕괴된 이후, 전 세계적으로 충돌, 폭발 등의 극한하중에 의한 테러가 빈번하게 발생하고 있으며, 극한하중에 의한 구조물의 거동에 대한 사회적 불안감은 더욱 증가되고 있다. 그러나 지금까지의 사회기반시설구조물에는 폭발 및 충돌 등과 같은 극한하중에 대한 방호 및 방재개념을 설계에 고려하지 못하고 있는 실정이며, 원전격납건물, 가스탱크, 교량, 터널 등에 널리 사용되는 프리스트레스트 콘크리트 구조물에 대한 극한하중 연구는 전 세계적으로 미흡하다. 충돌과 같은 극한하중은 집약된 에너지의 급작스런 방출로 인한 높은 충돌압력을 형성하므로, 극한하중의 특성 및 전파 메커니즘을 이해하는 것이 필요하다. 그러므로 이 연구에서는 이방향 비부착 프리스트레스트 콘크리트 패널의 충돌저항성능을 비교검토하기 위하여, 1400 mm×1000 mm×300 mm의 철근콘크리트(RC), 프리스트레스트 텐던으로만 보강된 콘크리트(PS), 프리스트레스트 텐던과 철근으로 보강된 콘크리트(PSR, 일반적인 PSC) 시편을 제작하였다. 실험 조건에 맞춰 14 kN의 추를 10 m, 5 m, 4 m 높이에서 낙하하는 예비 실험과 3.5 m 높이의 본 실험으로 구성하여 충돌하중에 대한 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 실험적 평가를 수행하였다. 또한, 충돌실험을 위한 기본적인 실험 구성 및 계측시스템을 구축하였다. 충돌 저항성능은 균열형상, 손상면적, 에너지 흡수, 처짐, 변형률, 가속도 등의 충돌에 의한 계측데이터를 이용한 거동분석 뿐만 아니라, 충돌 후 잔류구조성능 실험을 수행하여 이방향 비부착 프리스트레스트 콘크리트 패널의 충돌저항성능을 검토하였다. 본 실험은 향후 국내외 프리스트레스트 콘크리트에 대한 충돌 방호설계 및 충돌해석 등 관련 연구분야의 기초자료가 될 것이라고 판단되는 바이다.

핵심용어 : 충돌하중, 이방향 비부착 프리스트레스트 콘크리트, 충돌저항성능, 충돌 계측시스템, 잔류구조성능