

## 콘크리트 박스거더 교량의 발파해체를 위한 교량모형 해체실험

양형식<sup>1)\*</sup>, 장형두<sup>1)</sup>, 고영훈<sup>1)</sup>

### A Demolition Experiment of a Scaled Model for a Concrete Box Girder Bridge

Hyung-Sik Yang, Hyong-Doo Jang, Young-Hun Ko

**Abstract** Along with series of concrete block experiments, a demolition experiment was conducted for a scaled concrete box girder bridge to investigate collapse and blast behavior. Tri nitro toluene (TNT), the standard explosive for strength was adopted as concussion charge. The result show that demolition was caused by not only direct detonation pressures at charging spots but also blast pressures at inner wall of concrete box girder.

**Key words** Blasting demolition, TNT, Concussion charge, Scaled concrete box girder bridge

**초 록** 콘크리트 블록에 대한 붙이기 발파실험과 더불어 콘크리트 박스거더 교량의 모형에 대하여 발파해체 실험을 실시하였다. 장약으로는 폭발위력의 기준 약으로 사용되는 TNT를 사용하였다. 실험결과 콘크리트 박스 거더 교량의 경우 폭약설치지점의 폭발력뿐 만 아니라 박스거더 내부 벽에 작용하는 폭풍압도 해체에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

**핵심어** 발파해체, TNT, 붙이기 발파, 콘크리트 박스거더 교량모형

#### 1. 서 론

교량은 대표적인 토목구조물 중의 하나로서 그 사용 재료에 따라 강구조 교량 및 철근콘크리트 교량으로 나눌 수 있다. 강구조 교량의 경우 부식이 발생하지 않는 한 거의 영구적인 재료라고 할 수 있으나 철근콘크리트 교량은 콘크리트의 균열 및 철근의 부식등의 이유로 강구조 교량보다 내구성 및 유지보수성이 떨어짐으로서 그 내구연한이 상대적으로 짧다. 한강의 장기간 콘크리트 교량은 향후 구조적, 기능적 노후화에 따른 발파해체의 증가가 예상된다.

한강상의 교량은 연속교의 형태로서 통상적인 해체공사는 대형기계 등을 이용해 콘크리트를 조각씩 파쇄, 절단하는 것이 일반적이다. 그러나 이와 같은 기계식 해체 공법은 해체공사시 구조물의 안전을 위하여 가설 지주 또는 가설 지보로 지지한 후에 해체해야 함에 따라 대규모의 가설장비가 필요하게 되어 공사비가 상승한다.

또한 가설물의 조립, 해체에 있어서 장기간의 공사작업이 필요하고, 안전관리 면에서도 문제가 발생하기도 한다. 이러한 문제점을 해결 할 수 있는 대안으로 발파해체공법에 의한 교량의 발파해체를 실시하여 교량의 상부 구조를 전도시킨 다음 대형 브레커 등을 이용해 콘크리트를 잘게 파쇄하여 운반시키는 방법을 사용함에 따라 시공의 안전성과 경제성의 향상이 기대된다.

본 연구에서는 미공병단교범(FM 5-250)에서 제시된 콘크리트 파괴공식(Breaching Charges, US Army, 1992)에 따라 콘크리트 블록에 대해 사전 실험을 실시하여 공식의 신뢰성을 확인 하였으며, 한강 상 철근콘크리트 교량의 대표적인 구조형식인 콘크리트 박스거더 모형을 제작하여 발파해체실험을 실시하여 교량모형의 발파특성 및 붕괴거동에 대하여 검토 하였다.

#### 2. 콘크리트 박스거더교 개요

콘크리트 박스거더 구조교량은 철근에 의해 콘크리트 인장강도의 약점을 보강한 철근콘크리트(RC) 교량과 프리스트레싱에 의해 부재에 작용하는 휨인장력에 저항할 만한 압축력을 사전에 작용시켜주는 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 교량으로 대별된다. 주형이 그림 1과

<sup>1)</sup> 전남대학교 에너지 자원공학과

\* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일 : 2011년 4월 7일

심사 완료일 : 2011년 4월 18일

게재 확정일 : 2011년 4월 20일

같은 단면으로 된 교량을 박스거더교(Box Girder Bridge)라고 하며 T형교보다 긴 중간 정도 지간의 콘크리트교에 종종 사용된다.

박스거더 교량은 상부에 박스거더보다 폭이 더 큰 슬래브를 갖게 되며 수직방향의 웨브와 하부 바닥플랜지

로 구성된다. 웨브의 폭은 23 cm 정도가 일반적이다. 바닥 플랜지는 상대적으로 얇은 14 cm 정도이며 상판 슬래브, 웨브 및 바닥 슬래브는 각각 구조단위별로 시공된다. 거푸집과 동바리를 이용한 현장타설 방식이 전형적인 건설방법이다(도로교 설계기준, 2005).

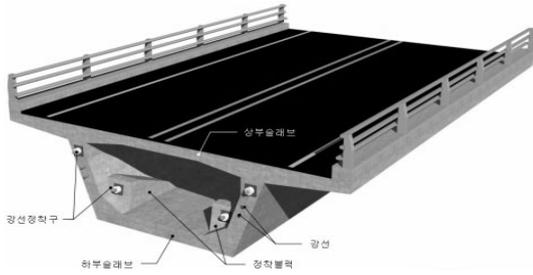


그림 1. Concrete Box Girder Bridge 형태

### 3. 철근콘크리트 블록 발파실험

#### 3.1 실험 개요

철근콘크리트 블록의 TNT약량에 따른 파괴능력을 확인함으로써 교량모형실험의 적절한 장약량을 제시하기 위해 실험을 실시하였다.

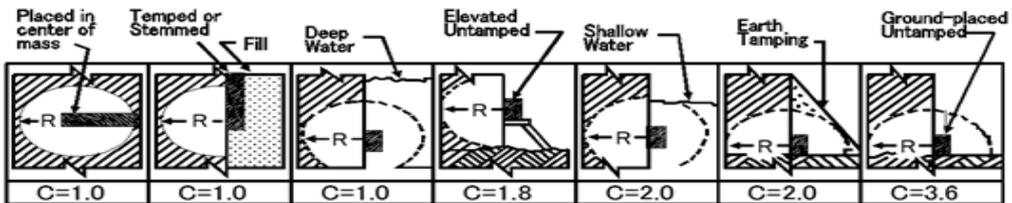
본 실험을 위한 모형체는 1000×300×330(mm<sup>3</sup>)의 규격으로 지름 13 mm의 인장 주철근을 각각 20 cm 간격으로 배열하였으며 도로교표준시방서의 내용에 따라 28일 양생시켜 압축강도 210 kgf/cm<sup>2</sup>의 블록을 제작하였



그림 2. 콘크리트블록 발파실험 전, 후(Test No. C-05)

표 1. Breaching Charges (US Army FM 5-250)

물질	파괴반경(R)	물질계수(K)
철근 콘크리트 (콘크리트만 파괴 철근은 고려되지 않음)	0.3m 이하	1.76
	0.3 m 초과 ~ 0.9 m 미만	0.96
	0.9 m 이상 ~ 1.5 m 미만	0.80
	1.5 m 이상 ~ 2.1 m 미만	0.63
	2.1 m 이상	0.54



전색계수(C)

Breaching Charges  $P=16R^3KC$

R: 파괴반경(m), K: 물질계수

C: 전색계수, P: 폭약량(kg)

다. 또한 미공병단교범(FM 5-250)에서 제시된 표 1의 콘크리트 파괴공식인 Breaching Charges(US Army, 1992)에 따라 계산된 약량을 기준으로 약량을 조절해가며 철근콘크리트 블록의 적정약량 및 사용공식의 신뢰성을 검토하였다. 다음의 그림 2는 철근콘크리트 블록의 상부에 TNT를 장약한 붙이기 발파 실험 전, 후의 모습이다.

**3.2 실험방법 및 결과**

다음의 표 1은 FM 5-250에서 제시된 Breaching Charges에 대한 내용이다.

표 1의 Breaching Charges 공식에 따라 계산된 콘크리트 블록 모형체에 대한 약량은 997 g으로 계산되었으나 군 작전의 특수목적상 작전성공을 위한 과장약이 적용된 공식임을 감안하여 계산된 약량보다 적은 907 g~181 g까지 TNT량을 줄여가며 총 6회의 실험을 하였다. 철근콘크리트 블록의 발파실험 결과 Breaching Charges 공식에서 제시하는 폭약량은 실제 파괴에 필요한 폭약량의 약 2배 이상으로 나타남을 확인할 수 있었으며 사용공식의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로

Breaching Charges를 적용하여 박스거더 교량 모형의 발파해체 실험을 실시하였다.

**4. 콘크리트 박스거더 교량 모형 발파해체 실험**

본 실험에서는 한강 상에 위치한 00대교를 모델로 그림 3과 같이 한 경간에 대한 1/4 규격으로 10 m 길이의 실험모형을 제작하였다. 인장 주철근의 지름은 13 mm 이상, 철근의 중심 간격은 20 cm 이하로 하였으며 슬래브 위쪽 및 아래쪽에는 경간방향 및 경간 직각방향으로 지름 13 mm 이상의 철근을 각각 30 cm 이하의 중심 간격으로 배치하였다. 또한 210 kgf/cm<sup>2</sup>의 콘크리트 강도를 얻기 위해 28일 이상 양생시킨 후 실험을 실시하였다(도로교 설계기준, 2005).

**4.1 실험방법**

그림 4의 (a)와 같이 5개의 파괴반경 지점별 총 12개소에 TNT를 설치하였다. 장약량 산정은 Breaching Charges 공식으로 산정하였고 표 1에 따라 파괴반경 0.3 m 이하

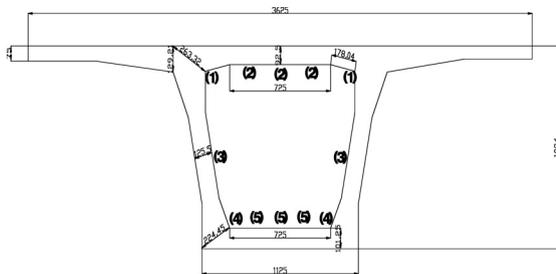


(a)



(b)

그림 3. 실험 교량 모형



(a)



(b)

그림 4. 박스거더 내부 장전 계획도와 장전후 사진

조건의 물질계수 1.76, Elevated 무전색 조건의 1.8을 적용하여 실험하였으며 그림 3의 (a)와 같이 교량모형의 교각과 교각사이 2/3지점에 총 4000g의 TNT를 콘크리트 박스거더 내부에 설치하였다.

**4.2 실험결과 및 검토**

실험모형의 교각과 교각사이 2/3 지점에서 TNT를 박스거더 내부에 설치하여 폭파함에 따라 실험모형은 구조물로서의 기능을 완전히 상실하였다.

당초 교각과 교각사이 2/3지점까지 자중에 의한 전도만을 예상하였으나, 실험결과는 그림 5와 같이 교각을 제외한 전체의 상부구조물 및 배열된 철근까지 절단됨과 동시에 수직붕괴 되었다.

또한 그림 6과 같이 교량모형 발파해체 실험 과정을 고속카메라를 통해 촬영하였다. 영상을 분석한 결과 폭

파시작과 동시에 하중 및 모멘트의 재분배과정을 거치면서 내력이 작은 곳에서부터 파괴되기 시작하였다. 폭파 후 3 ms경과 후에 모형이 파괴되기 시작하여 연쇄적으로 인접부재가 파괴 되었다. 4 ms에서는 폭파 후 폭풍압으로 관찰카메라가 흔들리며 점차 도미노형상으로 인접부재가 수직 방향으로 붕괴되며 9 ms후에 교량모형의 전체가 완전히 붕괴되었다.

이를 검토하였을 때 실험 결과 박스거더 교량의 파괴는 폭약설치지점의 폭발에 의한 영향뿐만 아니라 폭약의 폭발로 생긴 폭풍압이 박스거더 내부 벽에 미치는 영향도 고려해야 할 것으로 판단되었다.

**5. 폭풍압에 대한 검토**

콘크리트 박스거더 교량 모형실험 결과 교량의 파괴



그림 5. 콘크리트 박스거더 교량모형 실험 전, 후

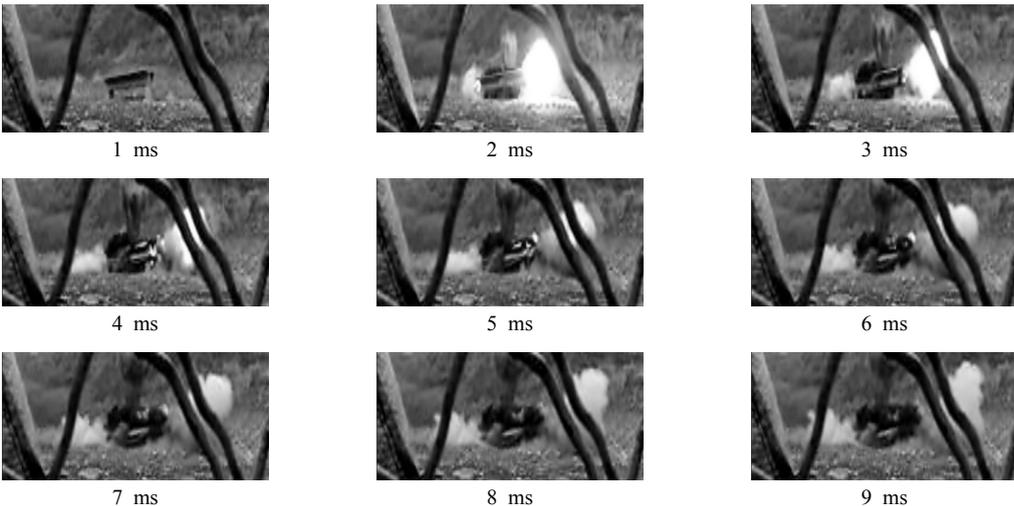


그림 6. 교량모형실험 고속카메라 영상

는 폭발지점의 폭발에 의한 영향뿐 만 아니라 폭약의 폭발로 생긴 폭풍압이 박스거더 내부 벽에 미치는 영향도 고려해야 할 것으로 판단되었다. 또한 실물의 박스 거더 교량은 좌우의 개구부 이외의 폭풍압이 유실될 만한 열린 공간이 없고 폭발지점부터 개구부까지의 거리가 멀어 압력의 손실없이 폭원부터 상당한 거리까지 영향을 미칠 것으로 판단된다.

**5.1 박스거더 내부의 폭풍압 예측**

교량모형의 발파해체 실험시 폭약의 폭발로 인한 구조물 내부에서의 폭발압력 변화를 예측하기 위하여 그림 7과 같은 모델을 적용하였다. 모델은 미 공병단 교범 TM 5-1300의 여러 모델 중 교량 축소모형 실험과 가장 유사한 모델인 일 방향으로만 열려있는 모형(Department of Defense, 2008)의 열려있는 방향(front)과 옆면(side)

만을 고려하여 폭풍압을 예측하였다.

폭원에서 거리의 따른 폭풍압을 예측하기 위하여 Scaled venting( $A/V^{2/3}$ )과 Cube labels indicate( $Z: ft/lb^{1/3}$ )의 관계에 따른 폭풍압을 예측하는 도표(Department of Defense, 2008)를 사용하였다. Scaled venting은 내부의 단면적을 내부의 유효면적(내부의 총면적 - 내부 기기 및 기자재의 면적)을 나타낸 계수이며 Cube labels indicate( $Z$ )는 폭원에서의 거리와 TNT약량의 관계를 나타내는 계수이다.

교량모형 실험에 적용된 TNT 약량과 모델을  $80 \times 80 \times 1,000 \text{ cm}^3$ 로 가정하여 구한 scaled venting( $A/V^{2/3}$ )과 cube labels indicate( $Z: ft/lb^{1/3}$ )를 그림 8과 그림 9에 적용하여 교량모형 모델 내부에서 폭약의 폭발로 인해 발생하는 폭풍압의 변화를 나타내었다.

개구방향(front)에서는 폭원으로부터 3 m 이내의 값

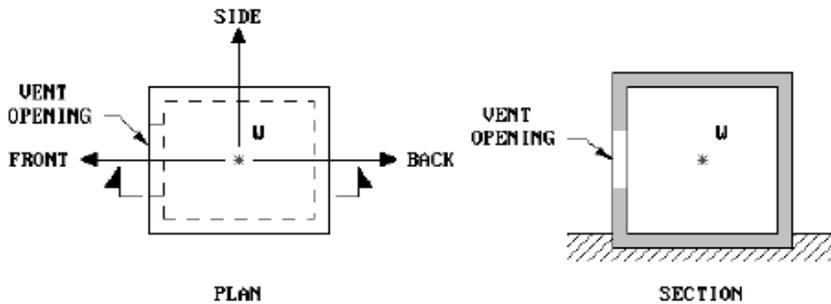


그림 7. 일 방향 개구 모델(Department of Defense, 2008)

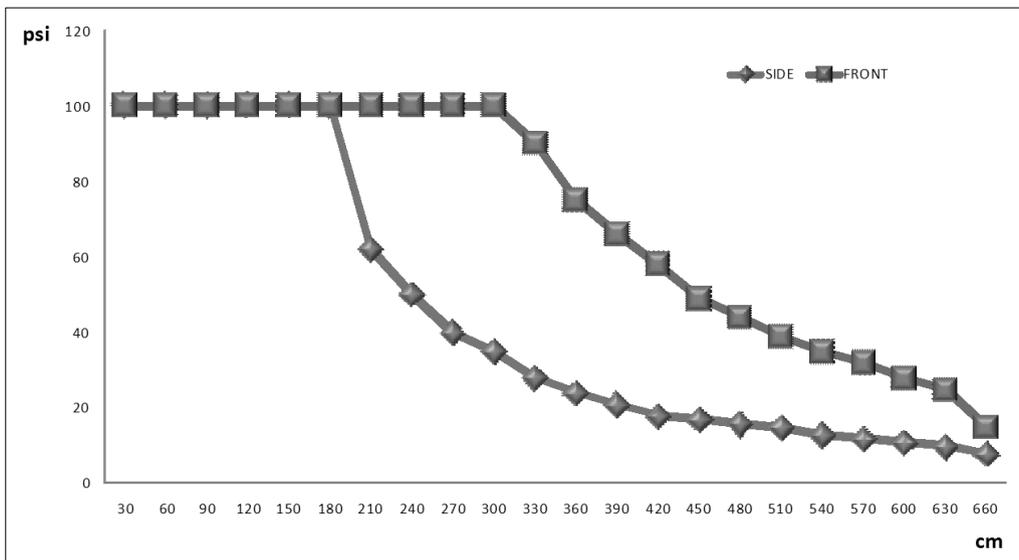


그림 8. 폭원에서의 거리의 따른 폭풍압(Side, Front)

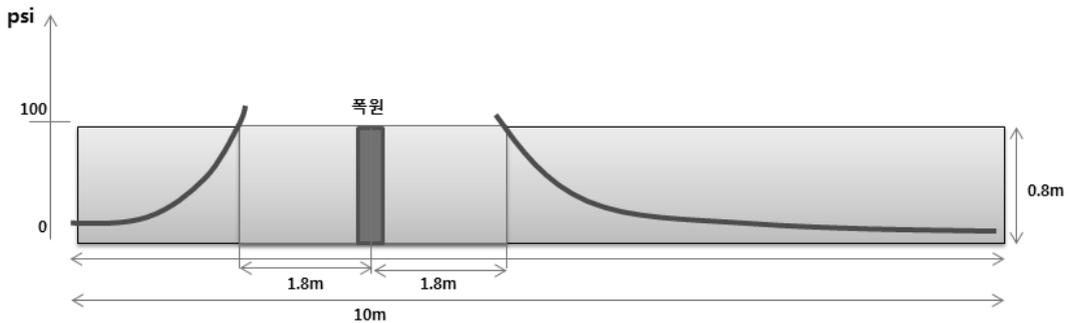


그림 9. 교량모형에서의 폭풍압 예측

과 벽면방향(side)에서 1.8 m 이내의 폭풍압은 100 psi 이상으로 도표의 예측 범위를 벗어난다. 터널에서의 일반적인 발파풍압은 노천에서보다 완만하게 감쇠되는 경향을 보이는데 이와 동일한 양상을 모형에서 예측된 폭풍압을 도시화한 그림 9를 통해 확인할 수 있다.

6. 결론

1. 교량모형에 대한 부재실험으로서 콘크리트 블록에 대하여 US-Army(FM 5-250) Breaching Charges 공식을 적용한 발파실험 결과 Breaching Charges 공식에 따라 제시된 폭약량은 실제 파괴에 필요한 폭약량의 약 2배 이상으로 나타남을 확인할 수 있었으며 사용 공식의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

2. 실험결과는 교각을 제외한 전체의 상부구조물 및 배열된 철근까지 절단됨과 동시에 수직붕괴 되었다. 결과의 고찰로서 콘크리트 박스거더교량의 파괴는 폭약 설치지점의 폭발에 의한 영향뿐만 아니라 폭약의 폭발로 생긴 폭풍압이 박스 거더 내부 벽에 미치는 영향도 고려해야 할 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. US ARMY, 1992, FM 5-250 Explosives And Demolitions Manual, p. B-2.
2. 한국도로교통협회, 2005, 도로교설계기준 2005, p. 38.
3. Department of Defense, 2008, Structure to resist the effects of accidental explosive. UFC 3-340-02 pp. 258-267.

양 형 식



1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과 학사  
 1981년 서울대학교 대학원 자원공학과 석사  
 1987년 서울대학교 대학원 자원공학과 박사  
 Tel: 062-530-1724  
 E-mail: hsyang@chonnam.ac.kr  
 현재 전남대학교 에너지자원공학과 교수

장 형 두



2003년 목포대학교 공과대학 물리학과 학사  
 2011년 전남대학교 대학원 에너지자원공학과 석사  
 Tel: 062-530-0824  
 E-mail: albatrossking@hotmail.com  
 현재 전남대학교 대학원 에너지자원공학과 박사과정

고 영 훈



2010년 강원대학교 공과대학 에너지자원공학과 학사  
 Tel: 062-530-0824  
 E-mail: dddd8401@nate.com  
 현재 전남대학교 대학원 에너지자원공학과 석사과정