

교량 붕괴율 분석

Bridge Failure Rate Analysis



이 일 근^{1)*}

Lee, Il Keun



이 일 용²⁾

Lee, Il Yong

국민의 생명을 최우선적으로 보호해야 하는 사명감이 필요한 유지관리 현장에서 가장 피하고 싶은 부분이 교량의 붕괴일 것이다. 그래서 교량 붕괴 사고가 발생하면 붕괴 원인에 대해 주목하게 된다. 그러나 교량 붕괴 사고 이후 관련 기술자들을 보호해야 한다는 미명하에 붕괴 사고 전말이 은폐되기 쉬운데 현실이다.

이번 호에 실린 해당번역기사는 미국에서 발생한 다수의 교량 붕괴사고 데이터를 심층 분석하여 발생원인과 발생률을 해석하여 제시한 내용이다.

TRB(Transportation Research Board) 2013 annual meeting에 발표된 논문으로 저자는 미국 유타대학교(Utah State Univ.) Wesley Cook, Paul J. Barr, Mavin W. Halling이다. 본 기사에서는 발표 전문을 요약하는 방식으로 구성하였다.

1) 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원, 공학박사

2) 한국도로공사 구조물처 차장, 공학석사

* E-mail : lik@ex.co.kr

요약문

일정 지역 교량 붕괴 DB를 활용하여 붕괴 원인을 파악하고 붕괴율과 붕괴확률을 결정하였다.

붕괴 원인을 타연구와 비교하였으며 주요 원인은 수압에 의해 발생함을 알 수 있었다.

매년 발생가능한 교량 붕괴율은 1/4,700정도였으며, 이 수치는 미국 전역에 적용 가능할 것으로 추정한다.

현행 교량설계법과 비교하기 위해 설계수명 75년 동안의 파괴확률을 계산한 결과 1/63정도로서 LRFD 설계법에서 제시하는 파괴확률 1/5,000보다 높았다.

붕괴된 교량의 준공시점과 설계법 변천에 따른 붕괴율 차이는 확인하기 어려웠다.

미국 전체 교량에 대해 붕괴율을 적용한 결과 매년 87건에서 222건 정도의 붕괴가 발생할 것으로 예상된다.

1. 서론

교량에서 가장 위험도가 큰 상황은 ‘교량 붕괴’ 일 것이다. 교량 설계자와 관리자는 붕괴를 감소시키기 위해 기존에 발생한 붕괴 원인 분석과 붕괴 확률을 파악할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 교량 붕괴 확률을 수치적으로 결정하는 것이다. 연구결과는 확률 방법론에 근거한 AASHTO LRFD Bridge Design Specification 에도 적용될 것으로 기대된다.

교량 붕괴 원인은 많은 교량 기술자의 관심사이다. AASHTO LRFD Bridge Design Specification 에서는 교량 붕괴의 주요 원인이 세굴(scour)이라 기술하고 있다. 1847에서 1975년까지 전 세계에서 발생한 교량 붕괴 사례를 조사한 Smith도 세굴을 교량 붕괴의 주요 요인으로 보았다.

미국 켄터키주에서 1951년에서 1988년 사이 발생한 교량 붕괴 사고를 조사한 Harik은 35건의 붕괴사례 중 초과하중에 의한 붕괴가 60%를 초과하면서 가장 주요한 원인으로 보았다. 켄터키주 이외 지역에서 발생한 교량 붕괴사고 75건에 대한 조사에서는 주요 원인이 충돌(37%)로 나타났다. Harik은 해당 연구에서 교량 붕괴의 주요 원인이 세굴이 아닐 수도 있음을 보여 주고 있다.

Wardhana는 뉴욕주 붕괴 사례를 조사하였다. 1989년에서 2001년까지 교량 붕괴사례 503개를 조사한 결과 53%가 수압(hydraulic)에 의해 발생한 것으로 결론지었다.

2. 교량붕괴의 정의

뉴욕연방교통국(NY DOT) 정의에 따르면 완전붕괴(total collapse)와 부분붕괴(partial collapse)로 구분하고 있다. 완전붕괴는 ‘한 경간 또는 수개 경간의 모든 주요 부재가 심한 변형을 일으켜

통행이 불가능한 상태’를 말하며, 부분붕괴는 ‘한 경간 또는 수개 경간의 주요 부재 전부 또는 일부가 심한 변형으로 통행 허용 시 위험할 수 있는 상태’로 정의되고 있다.

3. 교량붕괴 데이터 활용

1987년 뉴욕 쇼하리계곡을 가로지르는 Thruway 교는 기초 세굴로 붕괴되었다. 이 사고 이후 뉴욕 연방교통국은 미국에서 발생하는 모든 붕괴 사례를 대상으로 하는 ‘NYSDOT 교량 붕괴 데이터’를 관리하게 된다. 그러나 데이터 수집 및 관리 과정에는 여전히 누락이나 불충분한 정보 기재 등 많은 어려움이 있으며, 이는 각주에서의 적극적인 협조가 부족한 게 가장 큰 원인이어서 연방차원에서 강력한 규정을 통한 관리가 필요하다.

Wardhana 연구에서는 다른 어떤 주보다 붕괴 사례가 잘 관리되어 기록이 많은 뉴욕주 데이터를 활용하고 있다. 본 연구에서도 본격적으로 DB가 쌓이게 된 ‘NYSDOT 교량 붕괴 데이터’를 활용하기로 한다. 이외 미연방도로관리청(FHWA)의 NBI(National Bridge Inventory) 데이터를 활용하기로 한다. NBI에서는 6.1미터 이상으로 공공의 목적으로 관리하는 교량들을 다루고 있다.

1987년 이후 25년간 총 103건의 교량붕괴

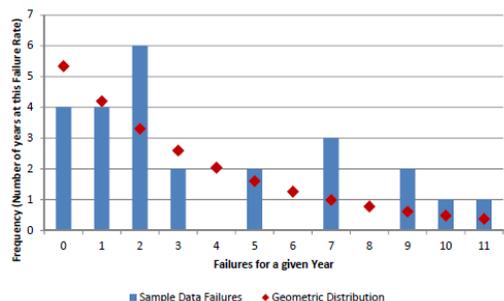


Fig. 1 교량붕괴 사고빈도(1987~2011)

Table 1 교량붕괴사고 빈도 및 확률

Frequency of Failures	Bridge Failures in a Year		
	Sample Data (1987 to 2011)	Midwest State (1990 to 2008)	Southwest State (1996 to 2008)
0	4	3	6
1	4	4	3
2	6	1	3
3	2	2	-
4	-	2	1
5	2	1	-
6	-	1	-
7	3	2	-
8	-	-	-
9	2	2	-
10	1	-	-
11	1	1	-
Population	17,300	24,200	3,900
Annual Failure Rate	1/4,700	1/6,200	1/3,900

Note: - means the value is zero in both tables.

사고가 있었다. 그중 철도교 1건, 보도교 10건이며 나머지는 92건의 공공 목적으로 관리되고 있는 교량이다. 붕괴율 해석은 이 92건(SD, Sample Data)을 가지고 분석하기로 한다. 92건 중 부분 붕괴가 52건이고 완전붕괴가 40건이다.

SD분석자료에서 연평균 교량붕괴건수는 3.68로 나타났다. 2011년 NBI 자료에 의하면 전체 17,300개의 교량이 존재하므로 매년 붕괴확률은 2.13×10^{-4} 또는 1/4,700로 나타났다. 다소 누락된 자료가 있다고 한다면 실제 붕괴확률은 약간 더 심할 수도 있을 것이다.

Fig. 2는 붕괴된 교량의 10년 단위 공용연수에 따라 붕괴빈도를 나타내고 있다. 평균 공용연수는 54.8년이고 중간값은 50.5년으로 나타났다. 교량붕괴의 절반은 중간값인 51년 이전에 발생하였으며 나머지 절반은 설계수명보다 큰 51년 이후에 발생하였는데 전체적인 양상은 약간 오른쪽으로 기울어지는 분포를 보이고 있다. 사실 붕괴이전에 해체된 다수의 교량이 빠져있고 이

벤트 하중으로 더욱 많은 교량이 붕괴될 것으로 예상되기 때문에 오른쪽으로 기울어지는 분포 양상은 뚜렷할 예상된다. 즉 공용연수는 교량붕괴 요인을 결정하는 주요 인자가 아니거나 덜 중요한 요소인 것으로 판단된다.

4. 교량붕괴 원인

교량붕괴 원인은 Table 2와 같다.

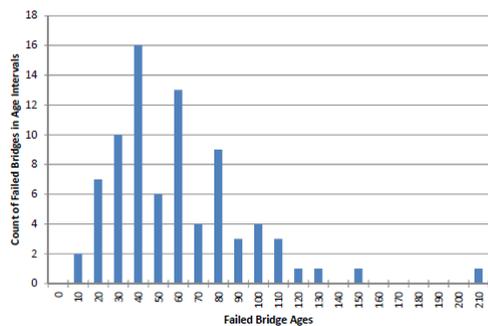


Fig. 2 공용연수에 따른 붕괴사고빈도

Table 2 교량붕괴 원인별 비율

Cause of Failure	Partial Coolapse	Total Collapse	Total Count	Percentage of Total
Hydraulic Total	21	27	48	52.17%
Hydraulic	-	2	2	2.17%
Flood	8	18	26	28.26%
Scour	12	7	19	20.65%
Ice	1	-	1	1.09%
Collision Total	17	1	18	19.57%
Collision	14	1	15	16.30%
Auto/Truck	3	-	3	3.26%
Overload	3	8	11	11.96%
Deterioration Total	4	2	6	6.52%
Deterioration	-	1	1	1.09%
Steel deterioration	2	1	3	3.26%
Concrete deterioration	2	-	2	2.17%
Fire	3	-	3	3.26%
Construction	1	1	2	2.17%
Fatigue-steel	1	-	1	1.09%
Bearing	-	1	1	1.09%
Soil	1	-	1	1.09%
Miscellaneous	1	-	1	1.09%
Total	52	40	92	100.00%

수압에 의한 원인이 절반이상을 차지하고 있으며 그중 40% 정도가 세굴로 인해 발생한 것으로 나타나고 있다.

충돌이나 횡방향 충격이 두 번째 요인이다. 대부분은 부분붕괴 수준이며, 모든 붕괴사고가 하부에 도로를 가지는 교량이었으며 선박 충돌로 인한 붕괴가 전혀 없었다는 것은 흥미로운 결과이다. 이런 타입의 붕괴가 많은 이유로는 형하고 부족, 높이가 큰 차량의 통행 등이 주요 원인으로 추정된다.

과적으로 인한 붕괴는 하중경로 여유도(redundancy)가 부족하면서 공용연수가 큰 교량에 과적 차량이 통행할 때 발생하는 것으로 추정된다.

열화로 인한 붕괴는 하중경로 여유도 부족, 불리한 환경, 기후, 충격하중 등 복합적인 원인에 의해 발생한 것으로 나타났다.

시공 중 붕괴사고는 많지 않다. 이는 최근 설계법의 발전과 품질관리가 충분히 반영된 결과로 보인다.

5. 교량붕괴 모델링

발생연도에 따라 발생한 교량붕괴에 대한 회귀곡선을 Fig. 3에 도시하였다. 시간에 따라 붕괴율이 감소됨을 보여주고 있다. 일반적으로 설계법의 발전과 다양한 시공 품질관리로 교량 붕괴율은 감소할 것으로 기대하기도 한다.

어떤 일정한 기대붕괴율을 가지는 교량붕괴건수에 대한 분포는 다음식과 같다.

$$f(t) = (1 - p)^x p, \quad 0 < p \leq 1, \quad x \geq 0$$

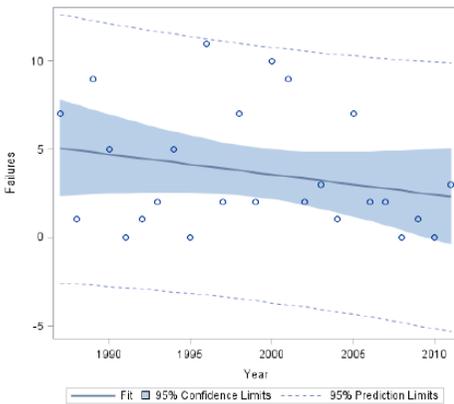


Fig. 3 연도별 교량붕괴사고

여기서, x : the average or expected number of failures in a given year

p : determined by

$$E(x) = \bar{x} = (1 - p)/p$$

SD교량은 총 17,300개소이며 연기대붕괴건수는 3.68건($E(X) = \bar{x} = 3.68$)이다. 미국 교량이 600,000개소라 하면 평균 기대붕괴건수는 매년 128건으로 볼 수 있다.

기하분포변수(p)에 대한 95% 신뢰구간에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$[np\bar{x} - n(1 - p)] / \sqrt{n(1 - p)} = \pm 1.96$$

여기서, n : 해당 연도수(예. 25년)

p 는 대략 0.136~0.285가 되며, 95% 신뢰수준에서의 연기대붕괴건수는 2.51~6.36건으로 나타난다. 연붕괴율은 1.45×10^{-4} (1/6900) ~ 3.68×10^{-4} (1/2700)가 된다.

미국 전체 교량 600,000에 대해 계산하면 연기대붕괴건수는 87~222건으로 추정된다.

SD교량에 대해 얻어진 1/4700의 붕괴율이 타

지역에도 적용될 수 있을까?

일단 다양한 붕괴 원인별 붕괴율이 타지역 교량 설계 코드에 적절히 반영되진 않았을 것이다. 또한 붕괴확률은 지역에 따라 다르며 기후, 환경, 트럭 교통량에 따라서도 달라질 것이다.

그러나 Table 1에서 Midwest 붕괴에 대해 계산한 결과 연붕괴율은 1.61×10^{-4} (1/6200), Southwest에서의 연붕괴율은 2.56×10^{-4} (1/3900)로서 전절에서 계산한 연붕괴율의 신뢰구간에 모두 들어온다. 따라서 1/4,700은 미국내 어떤 지역에서도 적용 가능하지 않을까 제시해 본다.

6. 관련 규정 영향

최근 설계법에서 가장 큰 변화는 AASHTO LRFD Bridge Design Specification의 적용이다. 그러나 이전 설계법과 유사성이 존재한다. LRFD 변수 보정법은 이전 설계법(ASD) 안전성 보정에서도 사용되었다. 또한 부재 두께도 과거와 크게 다르지 않다. 따라서 붕괴확률은 과거와 큰 차이가 없을 것이다.

AASHTO LRFD Bridge Design Specification에서 규정하는 신뢰성 지수 3.5에 해당하는 파괴확률은 2.0×10^{-4} (1/5000)이다. 반면 전절에서 계산한 공용교량의 붕괴확률을 설계수명 75년으로 환산하면 0.016 (1/63)으로 상당한 차이를 보이고 있다. 즉 현재 붕괴확률이 현행 설계상에서 요구하는 수준을 크게 상회하고 있다.

두 번째 주요한 규정의 변화는 세굴에 대한 점검을 강조한 FHWA Technical Advisory T5140.20 (1988)이다. 이 규정에 따른 적절한 점검으로 수압으로 인해 발생하는 다수의 붕괴를 1/2로 줄일 수 있다면 75년 이내 붕괴확률을 1/85로 감소시킬 수 있다. 결론적으로 수압, 특히 세굴은 교량 붕괴를 감소시킬 수 있는 핵심 인자가 될 것이다.

7. 결론

- (1) 최근에 발생한 미국 내 92건의 붕괴사고를 분석한 결과 기대교량붕괴율은 매년 1/4,700정도이며, 95% 신뢰구간에서는 1/6,900~1/2,700으로 나타났다. 이 확률은 미국 전지역에 적용이 가능할 것으로 판단되며 미국 전체 교량에 적용하면 매년 미국 내 발생 가능한 교량 붕괴는 87~222건 정도 발생할 것으로 예측된다.
- (2) 준공된 시기에 따른 붕괴율을 검토하였지만 별다른 특성을 보이지 않았다. 즉 보강된 설계기준이 붕괴율을 감소시키거나 수중 점검의 도입이 수압에 의해 발생하는 교량 붕괴율을 낮출 것이라는 증거는 파악할 수 없었다.
- (3) AASHTO LRFD Bridge Design Specification에서는 붕괴확률을 75년 이내 1/5,000로 규정하고 있지만 실제 교량 붕괴율은 1/63으로 상당히 높은 것으로 나타났다.
- (4) 붕괴의 주요 원인은 수압 52%, 충돌 20%, 과적 12% 그리고 열화 7%로 나타났다. 수압에 의한 붕괴율을 반으로 낮출 수 있다면 연 붕괴확률을 1/6,400으로 감소시킬 수 있다.
- (5) 분석에 포함되지 않았던 보도교 붕괴 원인의 89%가 횡방향 충돌로 발행하였고, 11%는 시공중에 발생하였다.
- (6) 보다 정확한 붕괴율 모형을 만들기 위해선 더욱 정확한 붕괴 사례 데이터 수집 및 분석이 필요하다. 이를 위해선 연방정부 차원의 규정과 강제력이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Arneson, L. A., L. W. Zevenbergen, P. F. Lagasse and P. E. Clopper, Evaluating Scour at Bridges, FHWA-HIF-12-003, HEC-18 (5th ed.). FHWA, U.S. Department of Transportation, 2012.
2. Auyeung, W., Unpublished data. New York State Department of Transportation. Albany, New York, 2012.
3. Brown, D. A., J. P. Turner and R. J. Castelli, Drilled Shaft: Construction Procedures and LRFD Design Methods. Publication FHWA-NHI-10-016. FHWA, U.S. Department of Transportation, 2010.
4. Chang, F. A., Statistical Summary of the Cause and Cost of Bridge Failures. Publication FHWA-RD-75-87. FHWA. U.S. Department of Transportation, 1973.
5. Dunker, K. F. and B. G. Rabbat, Highway Bridge Type and Performance Patterns. Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 4, No. 3, 1990, pp.161-173.
6. Elms, D. G., Achieving Structural Safety: Theoretical Considerations. Structural Safety Ed. Elsevier, Vol. 21, No. 4, 1999, pp.311-333.
7. Foster, M., R. Fell and M. Spannagle, The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 37, No. 5, 2000, pp.1000-1024.
8. Harik, I. E., A. M. Shaaban, H. Gesund, G. Y. Valli and S. Wang, United States Bridge Failures, 1951-1988. Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 4, No. 4, 1990, pp.272-277. TRB 2013 Annual Meeting Paper revised from original submittal. Cook, Barr, & Halling.
9. Henley, E. and H. Kumamoto, Reliability Engineering and Risk Assessment. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J., 1981.
10. Hida, S., F. I. Sheikh Ibrahim, H. A. Capers, G. L. Bailey, I. M. Friedland, J. Kapur, B. T. Martin Jr., D. R. Mertz, G. R. Perfetti, T. Saad, B. Sivakumar, Assuring Bridge Safety and Serviceability in Europe. Publication FHWA-PL-10-014. U.S. Department of Transportation, 2010.
11. Kamojjala, S., N. P. Gattu, A. C. Parola and D. J. Hagerty, Analysis of 1993 Upper Mississippi Flood Highway Infrastructure. Proceedings of the First International Conference of Water Resources Engineering, ASCE. San Antonio,

- TX, 1994, pp.1061-1065.
12. LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials. 5th Ed., 2010.
 13. NBI ASCII Files. <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/nbi/ascii.cfm>. FHWA. Accessed May 11, 2012.
 14. Padgett, J., R. DesRoches, B. Nielson, M. Yashinsky, O. Kwon, N. Burdette and E. Tavera, Bridge Damage and Repair Costs from Hurricane Katrina. *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 13, No. 1, 2008, pp.6-14.
 15. Rasmussen, N. Reactor Safety Study, Report WASH-1400. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1975.
 16. Richardson, E. V., L. J. Harrison, J. R. Richardson and S. R. Davis, Evaluating Scour at Bridges, FHWA-IP-90-017, HEC-18 (1st ed.). FHWA, U.S. Department of Transportation, 1991.
 17. Smith, D. W., Bridge Failures. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 1, Vol. 60, No. 8, 1976, pp.367-373.
 18. Swenson D. V. and A. R. Ingraffea, The Collapse of the Schoharie Creek Bridge: a Case Study in Concrete Fracture Mechanics. *International Journal of Fracture*, Vol. 51, No. 1, 1991, pp.73-92.
 19. Wardhana, K. and F. C. Hadipriono, Analysis of Recent Bridge Failures 1 in the United States. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 17, No. 3, 2003, pp.144-150.
 20. Willett, T. O., Technical Advisory: Evaluating Scour at Bridges, Oct. 1991, FHWA T5140.23, <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/policymemo/t514023.cfm>. Accessed May 8, 2012.
- 담당 편집위원: 이일근
(한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원)
lik@ex.co.kr