

국내외 세굴에 의한 교량붕괴 사례 및 감시대책

윤 태 훈* · 윤 성 범**

1. 머리말

우리나라 하천은, 암반층이 하상으로부터 수십 ~ 백미터 이상 하부에 존재하는 미국 등 외국과는 달리, 10~20m 이내에 얇게 존재하므로 대부분의 주요 교량의 교각기초가 암반층위에 직접 닿아있어 교각세굴에 의한 교량 붕괴사고가 드문 편이다. 그러나, 올해 태풍 제니스호의 한반도 접근과 함께 중서부지방에 8월 23일부터 25일까지 3일동안 최고 600mm의 집중호우가 내리, 충북 괴산군 도안면 도당리의 충북선 화성철교에서 부산발 청량리행 무궁화호 열차가 교각붕괴로 인해 객차 8량이 탈선·추락하여 1명이 사망하고 190여명이 중경상을 입은 교량붕괴사고가 발생하였다(그림 1 참조). 이날 사고는 23일부터 내린 폭우로 교각주위가 세굴되어 암반선에 깊숙히 근입되어 있지 않은 4개의 교각 중 2개가 무너지면서 발생한 것으로 우리나라도 교량붕괴사고에 대한 안전지대가 아님을 보여준다.

다음의 내용은 충북선 화성철교의 교각 붕괴사고를 계기로 최근의 외국교량 붕괴사례와 원인분석을 통하여 우리나라 교량의 교각세굴에 대한 문제점을 파악하고 이를 방지하기 위한 교량하부구조 감시체계의 필요성을 인식하는데 목적이 있으며, 주로 Richardson과 Lagasse(1995) 및 Lagasse,

Thompson과 Sabol (1995)의 연구내용을 인용하였다.

2. 하천교량 붕괴사례

(1) 프랑스

프랑스 동남부지방의 고도 Avignon시를 흐르는 Rhône강에 석회석으로 건설된 Saint Bénézet교량은, 1309년 교황 클레멘스 5세가 Avignon시로 유수되기 100여년 전에 건설된 교량으로, 정확한 시기는 알 수 없으나 Rhône강의 홍수로 일부가 유실된 채 현재에 이르고 있다(그림 2 참조).

(2) 미국

현재 미국의 전체교량 약 58만개 중 84%인 약 48만개 교량이 하천 또는 만 등을 지나가고 있다. 1992년 10월 미연방고속도로국(Federal Highway Administration, FHWA)에 의해 집계된 중간결과에 의하면, 미국내 수상교량 48만개 중 교량의 기초상태가 파악되지 않고 있는 교량은 22%인 104,000개에 달한다. 이는 현장점검이나 기록 또는 설계도면을 통한 실내점검으로서는 교각기초 하부의 토질여건 또는 기초하부 파일의 길이 등 제반여건을 알 수 없는 경우로서, 교량구조에 관련된 기록보유에 중대한 문제점이 있었음을 뜻한다. 또한 약 17%인 8만개 교량이 세굴에 대해 문제점이

* 한양대학교 토목공학과 교수

** 한양대학교 토목·환경공학과 조교수



그림 1. 1995년 8월 25일 충북선 철교붕괴



그림 2. 프랑스 Avignon 근교 Saint Bénézet 교량

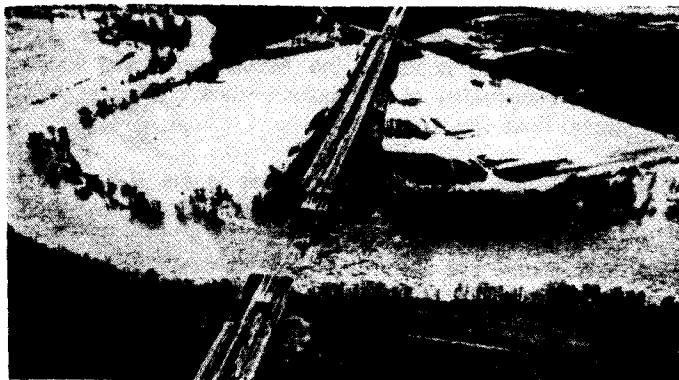


그림 3. 미국 New York주 Schoharie하천 교량붕괴

특집 : 하천세굴과 교량의 안전

있으며, 약 1%인 7만개 교량의 세굴상태가 심각함을 보여주고 있다. 최근의 미국 교량붕괴 사례를 들면 다음과 같다.

1987년 4월 5일 New York주 Montgomery County의 Schoharie하천을 통과하는 New York주 관통고속도로의 길이 156m에 달하는 교량중 하천중앙부 상판이 붕괴되었다(그림 3 참조). 당시 이 하천에는 기록최대홍수인 약 1,756m³/s의 유량이 흐르고 있었다. 피해상황으로는 1대의 트랙터와 4대의 승용차가 25m 아래 하천으로 추락하여 10명의 인명손실이 있었다. 이 교량의 하부구조는 4개의 교각과 2개의 교대로 구성되어 있었다. 각 교각은 파일이 없이 하상의 빙하표석점토(Glacial till, 漂石粘土)층에 직접 놓인 폭 5.5m 길이 25m 높이 1.5m의 철근콘크리트 확대기초위에 설치되어 있었다. 설계당시 기초가 놓인 빙하표석점토층은 암반층으로서 세굴에 대해 안전하다고 가정했던 것으로 추측된다. 또한 교대는 빙하기 표석점토층 위의 성토부를 관통하여 향타한 균집파일 위에 기초하고 있었다. 광범위한 조사와 수리 및 수치모형실험을 이용한 자세한 분석을 통해 미국립운송안전국(U.S. National Transportation Safety Board; NTSB)에서는 Schoharie 하천교량의 붕괴원인을 해당 고속도로청에서 교각 주위에 적당한 세굴방지공(Riprap)을 설치·유지하지 않아 확대기초 하부의 토양이 심하게 세굴된 것으로 결론지었으며, 1987년 붕괴당시의 단일홍수에 의한 세굴보다는 적어도 과거 10년동안의 흐름에 의해 누적되어 온 세굴이 더 중대한 붕괴요인이었음을 지적하였다. Rhodes와 Trent (1993)는 Schoharie 하천교량을 포함하여 New York주의 1987년 홍수에 의해 손상을 입은 다른 교량들에 의한 경제적 피해를 추정할 바, 도로우회 등에 의한 시간손실로 시민, 사업, 산업등에 미치는 간접적 손해가 교량 복구 및 보수에 드는 직접경비의 약 5배에 달한다고 보고하였다.

2년뒤인 1989년 4월 1일 미국 Tennessee주 Hatchie강을 지나는 51번 국도상의 길이 1,280m에 달하는 교량의 일부가 붕괴되어, 4대의 차량과

1대의 트랙터가 강으로 추락하여 8명이 희생당하는 사고가 발생하였다. 이때 하천유량은 약 224m³/s로서 최대홍수유량에 훨씬 못미치는 중규모 홍수량이었다. 그림 4에 보인 바와 같이 이 교량은 주수로상교각(Pier)과 홍수터상교각(Bent)으로 구성된 바, 모든 교각은 길이 6.1m의 균집파일상에 위치하고 있다. 이 중 홍수터 교각의 파일상단부 Cap 콘크리트 높이가 주수로상의 Cap 상단부보다 4m 상부에 위치하며, 교량건설 당시에는 모든 Cap 콘크리트가 하상으로부터 3m정도 지하에 매설되어 세굴에 대해 안전하게 설계되었다. 그러나 교량이 하천의 만곡부에 위치하여 북측 홍수터 제방의 주수로가 홍수터 쪽으로 점차 이동됨에 따라 홍수터에 위치한 70번 교각(Bent)의 Cap 콘크리트 하부 파일이 심하게 세굴되어 붕괴에 이르렀다. 미 국립운송안전국(NTSB)에서는 붕괴원인으로 하천만곡에 의한 주수로 이동을 교량설계시 감안하지 못하였으며, 건설후에도 점검 및 유지를 제대로 수행하지 못한 때문인 것으로 결론지었다.

가장 최근에는 1995년 3월 10일 오전 9시경 미국 California주 Arroyo Pasajero상 5번 도로의 교량중 남쪽교량과 북쪽 교량이 홍수로 인해 붕괴되어, 4대의 차량과 7명의 인명 피해가 있었다. 붕괴의 결정적인 원인을 밝히기에는 사후 수개월이 소요될 것이지만 세굴이 가장 중요한 역할을 했을 것으로 추정하고 있다. 이 교량은 1967년에 건설된 것으로, 교량연장은 각각 약 37m로서 4개의 상판이 현장타설 파일 교각으로 지지되고 있었다. 기본조사 결과에 의하면 홍수에 의해 하상물질이 전반적으로 유실되어 하상고가 저하되었으며, 여기에 교각국부세굴이 가세되어 붕괴에 이른 것으로 나타나고 있다.

(3) New Zealand

New Zealand의 경우에는 1973년 Rangitikei강의 Bulls교량이 1년 빈도의 소규모 홍수에도 불구하고 붕괴된 바 있다(그림 5참조). 당시 하상은 평균입경이 0.15mm의 두터운 모래층위에 평균입경 11mm의 자갈층이 두께 1m로 덮혀 장갑층

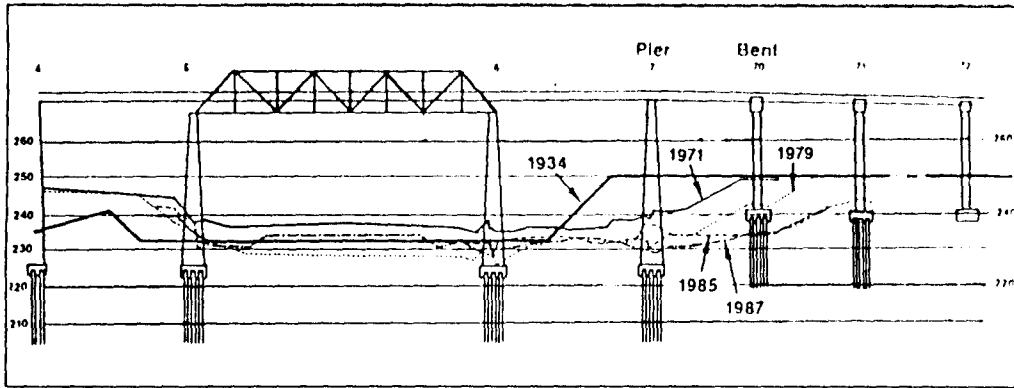


그림 4. 미국 Tennessee주 Hatchie강 교량의 하천단면 변화 개념도

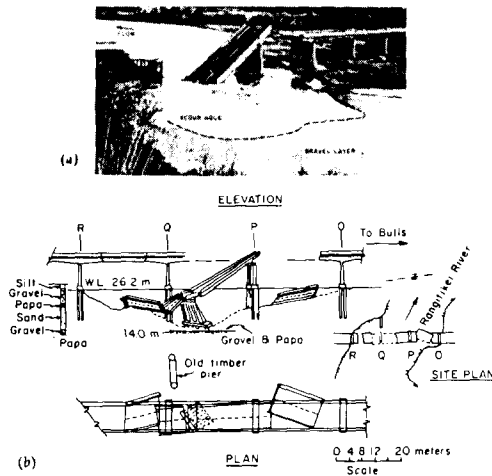


그림 5. New Zealand Rangitikei강의 Bulls 교량붕괴

(Armored layer)을 이루고 있었다. 붕괴원인으로 는 교각하류부의 장갑층이 교각에 의한 와류로 유 실되면서 하부의 모래층이 노출되면, 노출된 부위 가 정지상세굴로 점점 깊어지므로, 노출된 부위의 상류측 경계면에서 계속적으로 장갑층이 붕괴·유 실되어 결국 교각 상류부까지 붕괴선이 전진하므로 서 전반적인 하상저하가 발생하고, 교각에서는 국 부세굴까지 가세되어 총세굴깊이가 예상했던 것보 다 크게 증가하였기 때문이다(Raudkivi와 Ettma, 1985). 이러한 현상은 장갑층의 굵은 입자와 하부 층의 가는 입자 크기비가 작을수록, 장갑층의 두께

가 감소할수록 심각해지는 것으로 보인다.

(4) 한국

우리나라에서는 암반층이 지하 10~20m 이내로 얇게 존재하므로 주요교량은 거의 교각이 암반층까 지 도달하여 세굴에 대한 우려가 외국에 비해 적은 편이나, 지방의 소규모 교량에서는 금번 충북선 철 교붕괴와 같은 사례가 몇 차례 발생한 것으로 보고 되고 있다. 그러나 교량하부구조에 대한 정확한 자 료가 거의 없는 실정으므로 광범위한 조사작업이 필요하다.

3. 교량하부구조 감시 및 장비

교량붕괴의 원인으로는 설계상의 오류, 부실시공, 설계초과 하중의 통행등과 같은 상판의 붕괴사고와 하상저하나 국부세굴등에 의한 교각의 붕괴로 인한 사고로 대별된다. 미국내 고속도로의 교량붕괴사고중 60%가 세굴에 의한 교각붕괴사고로 알려져 있다. 세굴에 의한 교량붕괴사고를 방지하기 위해서는 교량설계시 교각에 의한 세굴심을 정확히 예측하여 기초를 세굴의 영향범위보다 깊게 설치하는 것이 최선의 방법이라 할 수 있으나 자연하천에서 세굴심의 정확한 예측은 거의 불가능한 실정이다. 그러므로 세굴을 예상하여 설계 및 시공된 교량에 대해서도 정해진 기간마다 세굴상태를 점검하여 설계시 예상치 못한 과도한 세굴이 발생할 우려가 있는 경우 세굴방지공 설치등 대책을 강구해야 할 것이다. 실례로 1987년 미국 New York주의 Schoharie 하천교량 붕괴사고는 설계시 암반층에 대한 세굴예측이 과소평가되었으며, 건설후에도 세굴감시가 소홀했었음에 그 원인이 있음을 살펴본 바 있다. 이는 대부분의 기초가 암반층에 놓인 국내 주요교량에 대해서도 세굴상태 점검과 평가가 필수적임을 일깨워주는 좋은 예라 할 수 있다.

세굴상태 점검은 최대세굴심을 주는 홍수시가 가장 중요하나 강한 유속으로 인하여 계측이 불가능한 경우가 일반적이다. 현재 미국에서는 홍수시에도 세굴심을 측정할 수 있도록 여러가지 감시방법이 개발되어 실용을 위한 시험단계에 있다. 이러한 세굴측정장비는 기술적으로 신뢰성있는 측정이 가능해야 하며, 교각 또는 교대에 고정설치할 수 있어야 하며, 홍수시에도 정확성이 유지되어야 하고, 또한 경제적이어야 한다. 현재 이러한 목적으로 개발되어 실용단계에 있는 세굴감시장비로서는 Magnetic Sliding Collar (MSC)와 Low-cost Sonic Fathometer (LSF)가 있다.

MSC는 원래 New Zealand의 Auckland 대학 연구팀에 의해 Horse-shoe Weight란 이름으로 개발되었다. 이는 최대세굴심이 예상되는 교각의 전

면부에 원관을 연직으로 부착하고 원관을 따라 무거운 말굽형추가 미끌어져 이동할 수 있도록 하여 항상 세굴공 바닥에 위치하므로써, 홍수과가 경과한 후 퇴매움 과정중에도 최대세굴심 위치에 남아 있도록 한 기구이다. 말굽형추의 위치 즉 최대세굴심은 추에 장치된 방사선방사원(Cobalt 60)으로부터 나오는 방사선을 원관내부를 통해 방사선탐지침을 줄에 매달아 내려보내 추의 위치에 도달하면 방사선을 탐지하여 신호를 보내도록 하므로써 추의 위치가 확인된다. 근래 미국에서는 방사선 대신 원형추(Collar)에 자성물질질을 탑재하고 자기탐지침을 이용하는 방법을 개발하고, Magnetic Sliding Collar (MSC)란 이름으로 실용화시키고 있다(그림 6 참조). MSC는 1992년 이후 미국 Colorado, Minnesota, Michigan, New Mexico, Texas주 등지의 현장에 설치되어 부유목, 부빙괴 등에 의한 충격 등 가혹한 현장조건 하에서의 성능시험을 위해 시험운용중이다. MSC는 성능시험결과 수심이 3~5m 정도로 비교적 얇은 소규모 교량의 경우에 적합하며 설치 및 작동이 간단하고 용이한 것으로 평가되었다.

LSF (Low-cost Sonic Fathometer)는 어군탐지기로 사용되는 상업용 음향측심기를 세굴감시 및 측정용으로 개조한 것이다(그림 7 참조). 세굴이 예상되는 위치를 향해 교각 또는 교대에 관을 장착하고 관 내부를 신호발신기가 미끌어져 움직일 수 있도록 지지대를 설치하여 운용한다. 수심측정은 신호음이 하상에서 반사되어 되돌아오는 시간을 측정·환산하므로써 얻어진다. 세굴 측정자료는 음향측심기에 연결된 자료획득기에 기록되며, 최대세굴심만을 주는 MSC와는 달리 세굴과 퇴매움등 시간에 따른 세굴과정을 자세히 측정·기록할 수 있는 장점이 있다. 또한 원격송신장치를 이용하여 실내에서 여러 현장의 중앙통제 및 감시가 가능하다. 1992~95년의 3년동안 미국 Colorado주의 South Plate River 교량, New Mexico주의 Rio Grande 교량 및 Texas와 New York주의 교량등에서 LSF의 현장시험이 이루어졌으며, 그 결과는 매우 우수한 것으로 나타났다. 특히 Florida주의

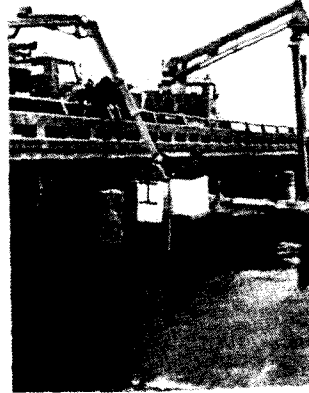
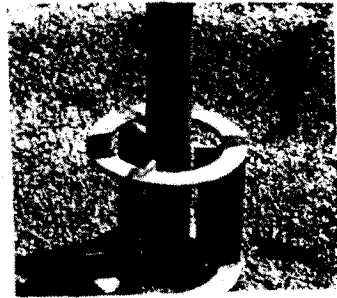


그림 6. Magnetic sliding collar(좌)와 설치장면(우)

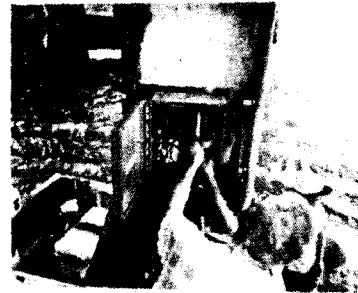


그림 7. Low-cost sonic fathometer(좌)와 자료획득기(우)

Gulf Coast에 위치하는 Johns Pass교량에서 실시된 LSF의 성능시험결과, 수심이 깊고(14m) 조석 흐름이 매우 강한 경우에도 신뢰성있는 계측이 가능한 것으로 판명되었다. 다만 신호발신기 하부 수면 또는 수중에 부유물질이 집적되는 경우 정확한 수심측정이 불가능한 점이 한가지 단점으로 지적되고 있으며, 토사를 운반하는 강한 흐름조건에서도 작동에 별다른 지장이 없는 것으로 알려졌다.

4. 맺는말

이상에서 살펴 본 바와 같이 하천상의 교각세굴

에 의한 교량 붕괴사고를 방지하기 위해서는, 신설 교량에 대해서는 설계홍수에 대한 세굴심을 예측하여 교각기초부를 세굴에 안전하도록 깊숙히 근입시켜야 할 것이며, 기존교량에 대해서는 정기적인 점검을 통하여 기초상태를 감시하고 평가하여 세굴위험이 있는 교량에 대해서는 세굴방지공을 설치하여야 할 것이다. 현재 우리나라 주요교량에 대한 기초상태 파악이 설계도면 부재와 교량하부구조 감시체계 미확립으로 제대로 이루어지지 못하고 있는 실정에 있으나, 성수대교 붕괴로 교량 안전에 대한 관심이 고조되면서 교량하부구조인 교각과 교각주위의 세굴 및 감시체계와 평가에 대한 연구가 활발

특집 : 하천세굴과 교량의 안전

히 진행되고 있음은 다행한 일이다.

참 고 문 헌

- Breusers, H.N.C. & Raudkivi, A.J. 1991 Scouring, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Lagasse, P.F., Thompson, P.L. & Sabol, S.A. 1995 Scour, Civil Engineering, ASCE, June, pp.56-59.
- Raudkivi, A.J. & Ettma, R. 1985 Scour at cylindrical bridge piers in armored beds. J. of Hydraulic Engineering, Vol.111, No.4, pp.713-731.
- Rhodes, J. & Trent, R. 1993 Economics of floods, scour, and bridge failures. ASCE, Proc. 1993 National Conf. of Hydraulic Engineering, CA, pp. 928-933.
- Richardson, E.V. & Lagasse, P.F. 1995 Stream stability and scour at highway bridges. Proc. International Joint Seminar on Reduction of Natural and Environmental Disasters in Water Environment, Seoul, Korea, pp. 186-210.