

우리나라 홍예교량의 비파괴진단 및 유지관리

Non-destructive Diagnosis and Maintenance of Historic Stone Masonry Arch Bridges in Korea



이성민*

*(재)한국건설품질연구원 이사

1. 서론

新增東國輿地勝覽에 기록된 우리나라의 古橋梁은 전국적으로 516개였으며, 이조말기 서울에만 86개의 교량이 있었지만 현재는 개발이라는 명분하에 거의 다 사라지고 전국적으로 62개만 남아 있다. 그중 문화재로 지정된 교량은 총 23개이며, 홍예교가 17개로 주류를 이루고 있다. 문화재로 지정되지 않은 것까지 포함해도 우리나라의 홍예교량은 30여개 밖에 남지 않았으며, 상당수는 원형이 많이 훼손된 상태에 있다. 현재 문화재로 지정된 홍예교는 국보 2개, 보물 7개를 포함하여 모두 17개이다. 조적조 아치교량의 역사는 기원전 2100년경 중국에서 시작되었다고 한다. 유럽에는 아직도 2000년 이상 된 조적조 아치교량이 사용 중에 있으며 경간도 수십 미터에 이른다. 우리나라의 홍예교 중 가장 오래된 것은 경주 불국사에 있는 청운교·백운교로서 통일신라시대에 건립된 것이지만, 대부분 조선시대 후기에 건립된 것들이다. 또한 가장 홍예의 규모가 큰 것은 여수 흥국사 홍교로서 홍예의 경간이 11.35m에 불과하다. 이렇게 우리나라의 홍예교는 다른 나라와 비교할 때 역사, 규모, 기술, 수량 등 모든 면에서 비교할 수 없이 초라하지만 그래도 우리에게 매우 특별한 정감이 있지 않을까 생각된다. 홍예교는 예로부터 ‘무지개다리’로 불려 왔고 지금도 시골에 가서 홍예교를 찾을 때는 무지개다리가 어디 있는냐고 물어야 한다. 계곡이나 작은 시내의

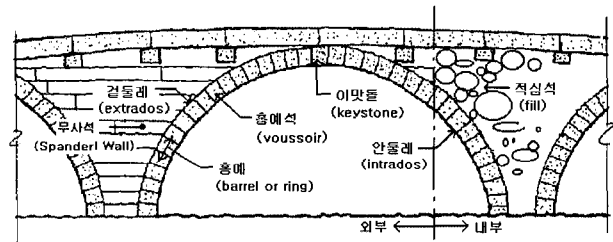


그림 1 홍예교의 구조



그림 2 여천 흥국사 홍교

양편을 조심스레 연결하는 이 교량들에는 웅장함도 정교함도 없지만 서민적이고 평범한 장인의 손길이 배어 있음을 느낀다.

앞으로는 얼마 남지 않은 이런 홍예교량들을 현 상태에서 보존하기 위해서는 각별한 노력을 기울여야 할 뿐 아니

라 보수·복원시 축조당시 가지고 있던 구조특성도 유지할 수 있도록 관심을 가져야 할 것이다. 이런 측면에서 문화재를 효과적으로 보존하기 위해서는 그 구조 특성을 정확히 파악하여야 한다. 그러나 석조문화재는 정형화되지 않은 매우 다양한 돌을 조적하여 구축한 것이므로 구조해석이 매우 곤란할 뿐만 아니라 보존을 최우선 목표로 하는 문화재에 있어서는 일반 구조물과는 달리 비파괴 조사를 우선적으로 고려하여야 하기 때문에 구조특성 파악은 쉽지 않다고 생각된다.

본고에서는 지금까지 연구되어 왔던 석조 홍예교의 구조적 거동이나 해석측면의 내용들을 정리함으로써 향후 우리나라 석조 홍예교량의 동적특성을 이용하여 비파괴조사 및 유지관리뿐만 아니라 구조해석까지 수행할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 동적특성을 이용한 석조문화재의 유지관리

구조물은 강성이 변하면 동적특성도 변한다. 이점을 이용한 석조문화재의 유지관리 관련 연구동향을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 동적특성을 이용하여 구조물의 상태를 모니터링할 수 있다. 구조물이 국부적, 또는 전체적으로 피해를 입으면 강성이 감소한다. 동적 응답은 시스템 파라미터(강성, 질량 및 감쇠)의 영향을 받기 때문에 이러한 파라미터들이 변하면 고유진동수, 모드 형태, 감쇠계수 등과 같은 동적 특성이 변하게 된다.⁴⁾ 균열이나 공동 등이 발생함으로 인해 구조체가 약해지면 강성이 감소하기 때문에 구조체의 고유진동수 값이 작아지며 다른 모드 성능에도 영향을 미치게 된다. Pretlove 등¹⁰⁾이 수행한 조적조 아치교량 모형실험에서 첫 번째 힌지가 발생하면 1차 고유진동수는 약 10%정도 저하하는 것으로 발표되었다. 이러한 점을 효과적으로 이용하여 동적 특성을 파악함으로써 홍예교의 역학적 특성 및 건전성의 판단은 그 구조 상태의 변화여부도 파악할 수 있다.

둘째, 동적특성 파악을 통해 접촉면의 강성을 추정할 수 있다. 손영식(1992)은 傳統橋梁 구조의 보편적인 특성을 연구하면서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 홍예교의 내하력을 추정하는 연구를 수행하였다.¹⁾ 이때 아치 불연속면의 전단강성을 어떻게 가정하느냐에 따라 그 결과치가 달라지게 된다. 이성민 등은 고유진동수를 측정함으로써 불연속면의 전단강성을 추정하는 방법에 대해 연구를 수행한 바

있다.²⁵⁾ 또한 아치구조물은 축력에 저항하는 구조로, 축력을 받으면 돌기(asperity)가 소성변형을 하면서 동적특성이 변하게 된다. 따라서 축력에 따라 변하는 전단강성에 대한 고려도 필요하다. 그러므로 고유진동수를 파악함으로써 강성을 추정할 수 있으며, 이 가정치는 구조모델링을 할 때 활용할 수 있을 것이며, 이를 통해 내하력을 추정하는 데에도 유용하게 활용될 수 있다.

셋째, 동적특성을 파악함으로써 직접적으로 지진이나 진동 등 동적 외력에 대해 피해를 예측하고 대책을 수립할 수 있는 자료를 마련할 수 있다.

3. 응력과 접촉면의 강성

석재의 접촉부는 실제로 평면으로부터 돌출된 일부분만 접촉하게 된다. 이렇게 돌출된 부분을 돌기(asperity)라 하고, 이 돌기가 접촉부의 구조적특성을 좌우한다고 해도 과언이 아니다. 접촉부에서 석재끼리 접촉되는 부분의 합을 실접촉면 A_r 이라고 하는데, 투영 또는 기하학적 접합면 A_n 보다는 매우 적다. A_r 은 마찰의 특성을 반영할 뿐 아니라 동적특성에도 큰 영향을 미친다.

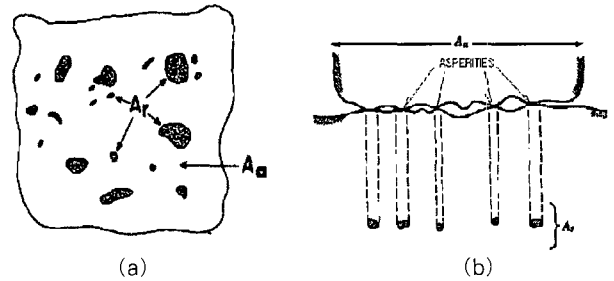


그림 3 석재접촉부의 돌기와 실접촉면¹⁶⁾

Brown과 Scholz는 두 거친 면에 대해서 수직하중에 의한 응력 σ_n 에 따른 표면 틈새의 간격 수축(closure) δ 를 다음 식으로 표현하였다.

$$\delta = B + D \log \sigma_n \quad (1)$$

여기서 B와 D는 탄성계수와 표면의 형태에 따른 상수이다. 그림 4는 실험결과로서 식 (1)을 증명해 보여주고 있다. 하중이 가해지면 돌기는 얼마간의 영구변형과 눌림(flattening)이 발생하는데, 이는 돌기 단부의 취성파괴 및 소성흐름(plastic flow) 때문이다.¹⁶⁾ 석벽돌 적층 모형에 축력을 가한후 응력과 1차 고유진동수의 관계를 연구한

바에 의하면 응력-고유진동수 관계는 그림 5와 같이 로그 함수의 형태로 나타나는 것으로 나타났으며, 그림 4와 유사한 결과를 나타낸다.⁷⁾

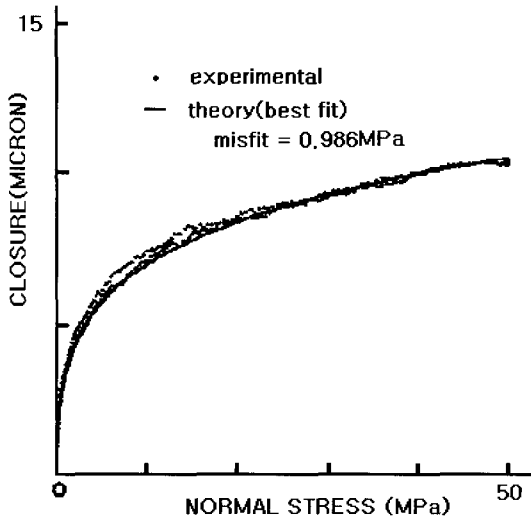


그림 4 응력증가에 따른 접촉면의 간격수축¹⁶⁾

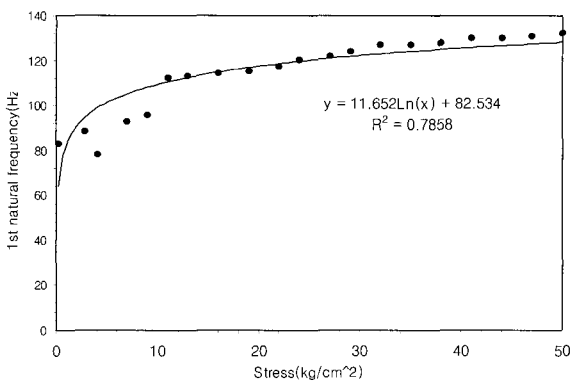


그림 5 석벽돌 적층모형의 응력-강성 관계⁷⁾

4. 석조 홍예교의 고유진동수

4.1 홍예교의 고유진동수

Pretlove 등¹⁰⁾은 조적조 아치교량의 1차 횡 고유진동수, F 를 다음 식 (2)의 실험식으로 제안하고 있다.

$$F = R \left(\frac{d^{3/2}}{c^{1/2} s^2} \right) (Hz) \quad (2)$$

여기서, d : 홍예석(barrel 또는 ring)의 두께(mm)
 c : 정점에서의 홍예석과 적심석(fill) 두께(mm)

s : 경간의 길이(m)

이며, R 을 사용성지수(serviceability indicator ratio)라고 한다. Brown 등¹⁰⁾은 실험결과를 근거로 하여 보통 아치교량의 R 값은 약 3정도이며, 만약 아치교량에 균열이 발생하여 R 값이 2보다 작게 되면 사용성에 문제가 있을 가능성이 있다고 발표하였다. 그림 6은 아치교량 모형 시험체에 가해지는 하중과 이에 따라 변화하는 사용성지수의 관계를 보여주고 있다.

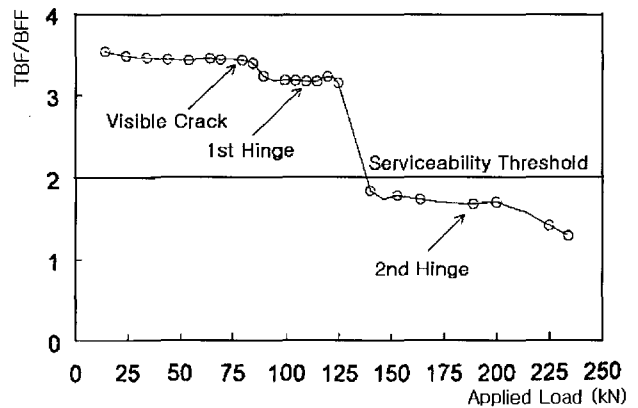


그림 6 재하하중에 따른 사용성지수의 변화

이성민 등³⁾은 우리나라의 18개 홍예교량의 고유진동수를 측정된 결과 경간 x 에 대한 고유진동수 f 의 관계를 식 (3)과 같이 제시한 바 있다.

$$f = 46.58 x^{-0.5950}, R^2 = 0.736 \quad (3)$$

4.2 보수 전·후 선암사 승선교의 고유진동수

전남 승주군 선암사 승선교는 과거 차량이 통과하는 등의 이유로 지반이 이완되고 홍예석에 변형이 생기는 등 붕괴 위험이 있다고 판단되어 최근 해체 복원한 구조물이다. 문화재청과 순천시는 승선교의 반원형태가 뒤틀리는 등 붕괴 위험이 있자 2002년 11월 해체 복원을 시작하였으며 2004년 7월 19일 공사를 완료하였다. 승선교는 기초암반이 화강석으로 보완됐고 홍예석 147개 가운데 깨지거나 강도가 약해진 32개는 기존 석재의 재질과 같은 전북 익산 석으로 교체되었다. 해체 전·후 현장답사 결과와 복원공사 당시의 사진을 볼 때 홍예석이나 적심석에 석회, 시멘트 등 교착제를 사용하지 않은 원래의 공법을 사용한 것으로 보인다. 복원 전 측정된 고유진동수는 9.9Hz였으나, 해체 복원 후고유진동수는 14.9Hz로 증가하였다. 이러한 측

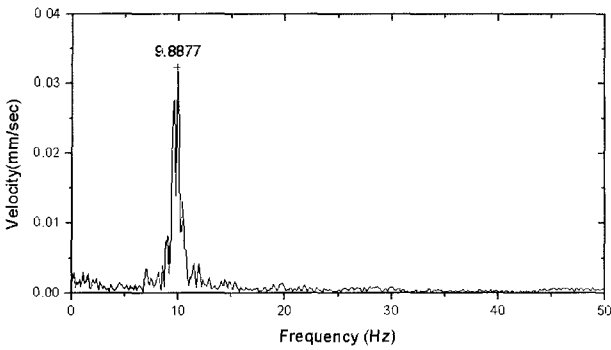


그림 7 승선교 보수 전의 고유진동수³⁾

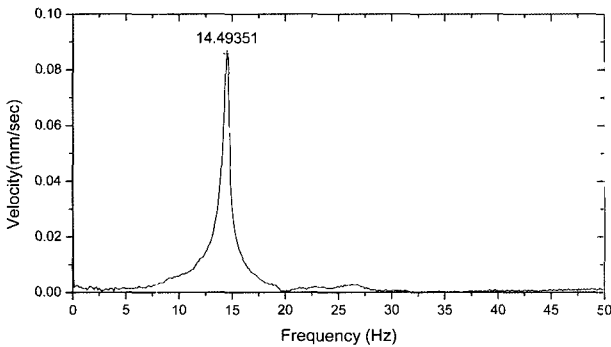


그림 8 승선교 보수 후의 고유진동수

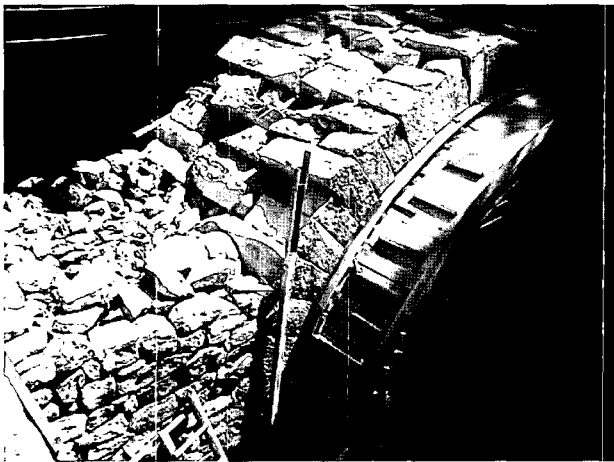


그림 9 승선교 보수 장면(저작권자의 허가를 득함)¹⁹⁾

정결과를 볼 때 석조홍예교량은 같은 재료를 사용하였다고 해도 그 견고성에 따라 동적특성에 큰 차이가 있을 것을 알 수 있으며, 고유진동수를 측정함으로써 문화재의 이상여부를 감지할 수 있음을 의미한다.

4.3 무사석 및 적심석의 영향

무사석 및 적심석이 고유진동수에 미치는 영향에 대해 Brown 등의 식 (1)을 검토하면 fill의 두께가 두꺼울수록

고유진동수는 감소하도록 되어 있다. 이는 fill에 의한 강성증진효과를 무시한 채 질량증가만을 고려하였기 때문이다. 반면 Bensalem 등⁸⁾의 연구에 의하면 무사석 역할을 하는 spandrel wall이 있는 경우가 없는 경우보다 고유진동수가 높은 것으로 나타났다.

고유진동수에 관한 연구는 아니지만 fill이 아치교의 내하력에 미치는 영향에 대한 논란은 오래전부터 있었다. Heyman 등은 조적조 아치교에서 fill이 구조적으로 기여하는 바가 없다고 하였으나, Davey는 fill이 있는 경우의 강성이 없는 경우보다 2.5배라는 실험결과를 발표하였다. 반면, 근래 컴퓨터 해석이 발달하면서 홍예석간의 접합면을 어떻게 가정할 것인지, 그리고 fill을 어떻게 가정할 것인지에 대하여 연구되어 왔으며, 이러한 연구는 Fanning, Brencich, Thavalingam, Bićanić 등에 의해 수행되었다.^{9,11,12,16,18)} Fanning 등은 fill이 arch barrel과 spandrel wall의 변형을 구속함으로써 강성을 증가시킨다고 하였고, Brencich 등⁹⁾은 fill의 종류에 따라 다르지만 점착력이 있는 fill의 경우 내하력을 15% 증가시킨 것으로 발표하였다.

Thavalingam 등¹¹⁾은 fill의 내부마찰각, 밀도와 두께가 증가함에 따라 아치교의 내하력이 증가한다고 연구하였다. 이러한 일련의 연구결과들을 통해 볼 때 적심석(fill)이 고유진동수 증가의 원인이 됨은 물론 적심석의 종류나 강성에 따라 큰 차이가 있을 것으로 예측할 수 있다. 특히 축력을 받는 홍예교에서는 적심석 층의 두께가 증가함에 따라 고유진동수가 증가할 것이라는 추정이 가능하다. 그러나 전단강성을 파악하기 위해 실험해석시험을 실시하기에는 구조물의 특성상 곤란한 점이 많다. 따라서 고유진동수를 측정함으로써 전단강성을 추정하는 것이 하나의 방법이 될 수 있다.

이를 위해 무사석 및 적심석이 없는 순수한 홍예구조의 고유진동수를 실제로 측정하였다. 측정대상 홍예는 청도 석빙고, 금산사 홍예문, 오천성 홍예문, 그리고 주변 공사를 하면서 홍예상부 표토를 제거해버린 건봉사 입구 군부대 옆 홍예 및 근래에 구축한 통도사 상류 홍예교이다.

표 1 측정대상 홍예구조

구조물 명칭	소재지	비 고
청도 석빙고	경북 청도군	홍예 4개
금산사 홍예문	전북 김제시	홍예 2개
오천성 홍예문	충남 보령시	
건봉사입구 홍예교	강원 고성군	표토제거상태
통도사 상류홍예교	경남 양산시	근래 시공되었음

표 2 측정대상 홍예구조의 1차 고유진동수

구조물 명칭	경간(m)	1차 고유진동수(Hz)
청도석빙고	4.1	5.9~11.0
금산사 홍예문	3.2	12.6~13.6
오천성 홍예문	3.08	12.2
건봉사입구홍예교	3.2	11.2
통도사상류홍예교	9.93	22.7



그림 10 청도 석빙고



그림 11 금산사 홍예문



그림 12 오천성 홍예문



그림 13 건봉사 입구 홍예교



그림 14 통도사 상류 홍예교

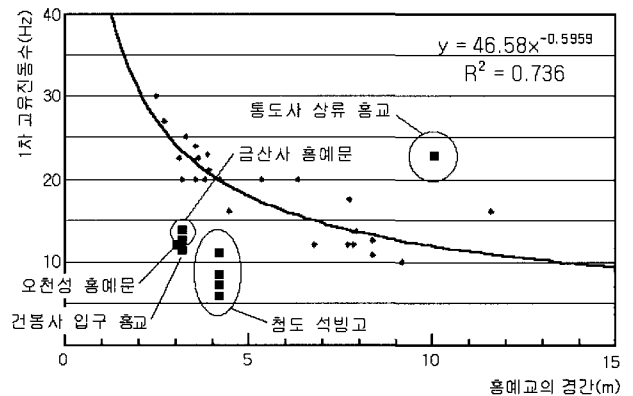


그림 15 홍예구조의 경간에 따른 고유진동수

무사석과 적심석이 없이 홍예만 남아 있는 우리나라 홍예구조물 5개소에 대한 고유진동수 측정 결과는 표 2와 같다. 그리고 이 결과를 무사석과 적심석이 있는 우리나라 홍예교량의 경간에 따른 고유진동수 자료와 비교하면 그림 15와 같다.

홍예석 사이 줄눈에 모르타르를 사용하지 않은 청도 석빙고, 오천성 홍예문, 건봉사 입구 홍예교, 금산사 홍예문

은 기존 홍예교보다 경간에 따른 고유진동수가 현저하게 낮은 것으로 나타났다. 이러한 사실을 통해 볼 때 적심석의 내부마찰각이 얼마인가를 떠나 적심석의 존재가 질량 증가보다는 강성증가에 더 크게 기여하고 있음을 알 수 있다. 기존의 연구 결과들을 참고할 때 다음의 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째는 적심석의 하중으로 인해 홍예석의 응력이 증가하고 따라서 불연속면의 전단강성이 증가한다는 점과, 둘째는 적심석이 홍예의 변형을 구속함으로써 홍예교 전체의 강성을 증가시킨다는 점이다. 통도사 상류홍예교의 경우 기계다듬을 하여 줄눈 틈이 거의 없는데다가 줄눈 사이를 시멘트로 채웠으므로 경간에 따른 고유진동수도 매우 높게 측정되었다. 이러한 점들을 통해 홍예구조에서 홍예 줄눈의 강성이 홍예구조의 동적특성에 미치는 영향이 무엇보다도 크며, 여기에 적심석이 있음으로써 홍예교의 고유진동수를 증가시킨다는 것을 알 수 있다.

5. 컴퓨터 모델링

석조구조물을 모델링하는 방법으로는 구조물을 극단적으로 이상화·단순화한 방법부터 석재사이의 접촉부의 소성변형까지 고려하는 비선형유한요소해석법까지 매우 다양하다.

이상화·단순화하여 해석하는 방법으로는 석조구조물을 연속체모델로 가정하여 해석하는 방법을 생각할 수 있는데, 매우 간편하지만 구조물의 특성을 파악하지 않으면 안된다. 석구조는 부재의 응력에 의한 파손보다는 석재와 석재사이의 힘의 불균형에서 오는 안정성 상실에 의한 붕괴가 많기 때문에 연속체로 가정할 경우 국부적인 응력이나 변형, 그리고 평형상태를 파악하기가 어렵다. 따라서 석조구조물의 쌓기 특성, 부재의 접합상태, 붕괴기구(collapse mechanism) 등 주요한 포인트를 파악하지 않으면 오류를 범하기 쉽다. 요즘은 유한요소법을 이용하여 석조구조물을 해석하는 사례가 많아졌다. 그러나 석재는 워낙 불규칙하고 문화재라는 특성상 비파괴시험이 원칙이므로 석재의 상태와 석재와 석재사이 접합부의 상태를 명확히 파악하기는 곤란하며 또한 알 수 있다고 해도 아주 많은 시간과 노력이 필요하다. 그러므로 석조구조물의 중요한 특성을 반영하면서도 해석을 최대한 간편하게 할 수 있는 방법이 필요하다.

우리나라의 홍예교에 대한 구조모델링으로, 손영식은 병영성홍교를 대상으로 유한요소법을 이용하여 해석을 하였는데, 불연속면의 전단강성을 4.5kgf/cm^2 로 가정하였다.¹⁾

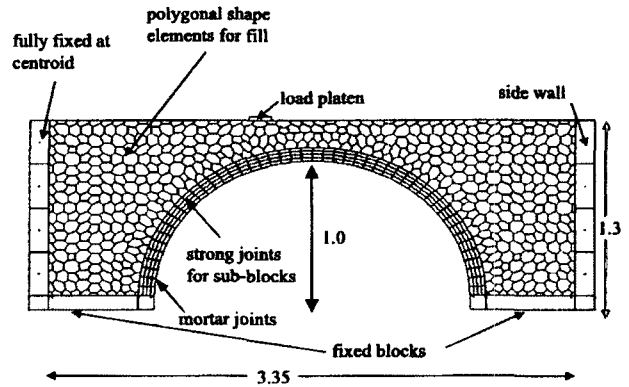


그림 16 조적조 아치교 구조모델링 사례¹⁵⁾

또한 정형식 등⁷⁾은 Barton-Bandis 제안식을 활용하여 여천 홍국사 홍교를 대상으로 컴퓨터 해석을 실시하였다. 이때 홍예석 접촉면의 전단강성을 1.7kgf/cm^2 로 가정하였다. 이러한 수치는 응력이 매우 높은 압절리면 등에 적용되는 지표이기 때문에 석조문화재의 실제조건과는 상당한 차이가 있을 수 있다. 그러므로 석조문화재에 적용할 수 있는 정수를 어떻게 산정할 것인가 하는 과제가 있으며, 이를 위해 많은 실험과 연구가 있어야 한다. 석조구조물의 접촉면의 강성은 축응력에 따라 증가하는 것으로 이성민 등⁴⁾에 의해 연구된 바 있다. 요즘은 해외 연구에서도 ADINA, DIANA 등의 프로그램을 사용하여 유한요소법을 이용한 컴퓨터 모델링이 수행되고 있는데,^{15,21,22)} 근본적으로 홍예석 접촉면의 강성과 적심석의 강성, 그리고 홍예석과 적심석의 역학관계를 어떻게 규명하는지 여부가 핵심적이면서도 어려운 문제로 여겨지고 있다. 이러한 강성을 추정하는 데는 고유진동수 등 동적특성을 파악하는 방법이 제시되고 있다.

6. 결 론

구조물은 강성이 변하면 동적특성도 변한다. 이점을 이용하여 석조구조물의 동적특성을 파악하면 해당 문화재의 밀실도와 견고성을 파악할 수 있을 뿐 아니라 지속적으로 모니터링 하면서 이상 유무를 추정할 수 있다. 또한 고유진동수를 측정함으로써 불연속면의 전단강성을 추정할 수 있으며 이 가정치는 구조모델링을 할 때 활용할 수 있을 것이며, 이를 통해 내하력을 추정하는 데에도 유용하게 활용될 수 있다.

유림의 일부 아치교량은 건설된 지 2000년이 넘었는데 아직도 사용 중에 있다. 요즘 사용되는 교량중 120년 이상 된 철골 또는 콘크리트 교량이 없는 것과는 대조적이며, 내구연한 비용을 고려하면 조적조 교량이 더 경제적이라

는 견해도 있다. 우리나라의 홍예교량은 개발이라는 명분 하에 거의 다 없어지고 이제 30 여개밖에 남지 않았다. 그리고 상당수는 원형이 많이 훼손된 상태에 있다. 앞으로는 얼마 남지 않은 홍예교량들을 현 상태에서 보존하기 위해 각별한 노력을 기울여야 할 뿐 아니라 보수·복원시 축조 당의 가지고 있던 구조특성도 유지할 수 있도록 관심을 가져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 손영식, “韓國 古 橋梁의 構造形式에 관한 研究”, 한양대학교 박사학위 논문, 1992.
2. 이성민, 박현구, 김선우, 이수곤, “석벽돌의 쌓기 단수에 따른 동적특성 변화에 대한 연구”, 대한건축학회지 제17권 제5호 통권152호, 2001년 6월.
3. 이성민, 박현규, 서만철, 이수곤, “우리나라 홍예교의 동적특성에 관한 연구”, 대한건축학회지 제17권 제9호 통권 155호, 2001년 9월, pp.107~106.
4. 이성민, 손호웅, 이수곤, “석벽돌 적층모형의 압축응력과 동적특성”, 지구물리, 제7권 제1호, 2004, pp.31~40.
5. 이성민, 손호웅, 이수곤, “석탑문화재의 강성과 고유진동수에 관한 연구”, 구조물진단학회지 제8권 제3호, 2004년 7월, pp.263~270.
6. 장기인, “韓國建築大系 VII, 石造”, 보성각, 1997.
7. 정형식 외, “고대 석조아치교량의 내하력에 관한 연구”, 한국지반공학학회지 제8권 제4호, 1992.
8. A. Bensalem, C. A. Fairfield & A. Sibbald, “Non-destructive Testing for Arch Bridge Assessment”, Arch Bridges, Thomas Telford, London, 1995.
9. A. Brencich et al, “Load Carrying Capacity of Masonry Arch Bridges”, Programma di Ricerca Scientifica di Rilevante Interesse Nazionale Anni 2002-2003, Italy.
10. A. J. Pretlove & G. Brown, “Changes in the Dynamic Characteristics of a Masonry Arch Bridge Subjected to Monotonic Loading to Failure”, Arch Bridges, Thomas Telford, 1995.
11. A. Thavalingam et al, “Computational framework for discontinuous modelling of masonry arch bridges”, Computers and Structures 79, 2001.
12. A. M. Sowden, “The Maintenance of Brick and Stone Masonry Structures”, E. & F.N. Spon, 1990.
13. C. Melbourne et al, “The Behaviour of Multi-span Masonry Arch Bridges”, Arch Bridges, Thomas Telford, London, 1995.
14. Christopher H. Scholz, “The Mechanics of Earthquakes and Faulting”, Cambridge University Press, pp88~89, 1990.
15. Daniel Schiff, “Dynamic Analysis and Failure Modes of Simple Structures”, John Wiley & Sons, Inc., 1990.
16. J. Wallsgrave, ‘The Aesthetic of Loadbearing Masonry Arch Bridges.’ Arch Bridges, Thomas Telford, London, 1995.
17. N. Bićanić et al, “Discontinuous Modelling of Structural Masonry”, Fifth World Congress on Computational Mechanics, July 7-12, 2002, Vienna, Austria.
18. Paolo Faccio, et al, “Load Carrying Capacity of Masonry Arch Bridges”, Arch Bridges, Thomas Telford, London, 1995.
19. Paul J. Fanning, et al, “Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges”, Computers & Structures 79, 2001.
20. <http://blog.empas.com/foreverhappy4u> 