

교량 검사에 대한 고찰-비파괴검사(II)

김 영 환

한국표준과학연구원, 비파괴평가그룹

1990년대에 들어서서 우리나라에는 유난히 많은 대형사고들이 발생되었다. 특히 1994년 10월 21일에 발생한 성수대교 붕괴 사고는 많은 충격을 주었으며 안전의식을 고취해야 하는 필연성을 인식시켜 주기도 하였다. 그래서 회원여러분에게 조금이나마 보탬이 되고자 동 해설을 작성하게 되었으며 I편에 이어 연재하게 된 것이다. I편은 '95. 6. 15에 발간된 Vol.15, No.1을 참고하기 바란다.

4. 교량의 구성 요소

교량은 크게 하부구조(substructure)와 상부구조(superstructure)의 두 부분으로 구분할 수 있다. 상부구조는 길이방향으로 놓인 교량의 윗 부분으로서 차량이나 보행자가 통행할 수 있도록 받쳐주는 부분이며, 하부구조는 상부구조를 지지하는 부분이다. 본 절에서는 교량의 구성요소 및 그 역할을 기술한다.

4.1. 하부 구조(Substructure)

하부구조는 상부구조 자체 하중과 차량 통행 등으로 상판(span)에 가해지는 하중을 지반(foundation)으로 전달해 주는 구조물이다. 상판이 하나인 교량은 두개의 교대(abutment)로 지지되며, 상판이 둘 이상인 교량의 경우는 상판이 만나는 부분에 교각(pier)을 설치한다. 때로는 교각 대신에 steel bent나 tower를 사용하기도 한다.

4.1.1. 교대(Butment)

교대는 교량의 양단에 설치되는 구조물로서 상부구조를 지지하는 확대기초(footing), 벽체(stem) 또는 흉벽(breast wall), 교좌(bridge seat)와 토사가 흘러내리는 것을 막는 뒷벽(backwall) 및 날개벽(wing wall)으로 구성된다. 뒷벽은 상부구조를 지

지하는 교좌 장치 부분에 교량 진입 성토 토사가 흘러드는 것을 방지하며, 날개벽은 교대 부근에 있는 성토 토사가 배수로나 도로로 넘치는 것을 방지하는 옹벽이다. 흉벽이 U자형일 경우에는 윗부분에 난간을 설치하기도 한다.

4.1.2. 교각(Pier)

교각은 상판이 둘 이상인 경우에 상판이 만나는 부분을 지지하는 부분으로, 확대기초, 기둥(column) 또는 벽체 및 cap으로 구성된다. 확대기초는 지반, 암반 또는 파일, 케이슨(caisson)이나 drilled shaft와 같은 기초에 설치되는 슬래브로 교각에 걸리는 하중을 지지한다. 기둥이나 벽체는 수직 하중이나 모멘트를 확대기초에 전달하는 요소이며, cap은 상부구조의 하중을 받아서 분배하는 구조이다. 강에 놓인 교량, 철도용 교량의 일부에서는 교각을 벽체로 만들기도 한다.

4.2. 상부 구조

하부구조가 지지하는 모든 부분을 상부구조라 하며, 이에 가해지는 모든 하중은 하부구조인 교대나 교각에 전달된다. 철근 콘크리트 슬래브 교량의 경우는 차량의 하중을 슬래브가 직접 받아서 교대나 교각에 전달한다. 또한, 빔 또는 거더 교량의 경우 슬래브는 통과 활하중을 하부구조로 전달하는 스틸,

콘크리트 또는 목재로 된 종방향재에 의해 지지된다. 상부구조는 바닥판(deck), 바닥틀(floor system) 및 둘 이상의 주지지 부재로 구성된다.

4.2.1. 바닥판(Deck)

바닥판은 차량이 통행하는 교량의 제일 윗 부분으로 콘크리트 슬래브, 목재판, 스틸 거더 또는 플레이트로 만들어진다. 차량의 통행에서 생기는 활하중을 직접 지지하며, 이를 바닥틀에 전달한다.

4.2.2. 바닥틀(Floor system)

촘촘히 배열된 가로보(transverse floor beam) 또는 가로보로 지지되는 몇개의 세로보(longitudinal stringer)로 구성된다. 이 경우 세로보는 일반적으로 넓은 플랜지 빔으로 만들어지며 가로보는 플레이트 거더, 넓은 플랜지 또는 트러스로 만들어진다. 가로보로만 바닥틀을 구성할 경우에는 압연 빔 또는 플레이트 거더로 만든다.

4.2.3. 주지지 부재(Main supporting member)

바닥틀은 모든 하중을 하부구조의 지지부로 전달한다. 교량의 강도와 안전도는 기본적으로 이 부분의 상태에 의해 결정되며, 목재, 강재, 콘크리트 보, 스틸 및 콘크리트 프레임, 각종 재료의 아치, 스틸 케이블 등으로 만들어진다. 빔이나 거더는 단일부재로 만들어지는 반면에 트러스의 경우는 몇개의 부재를 결합하여 만든다. 트러스의 종방향 상·하현재(chord)는 트러스의 저항 모멘트를 상쇄시키는 인장 및 압축력을 받는다. 빔에서는 플랜지가 이러한 역할을 한다. 보통 복부(web)라 불리는 트러스의 수직재 및 사재(diagonals)는 전단력을 받고, 경사재 또한 전단력을 지지한다.

4.2.4. 버팀대(Bracing)

빔이나 거더 구조에서는 각각의 부재가 격벽(diaphragm)과 프레임으로 서로 결합된 반면에, 트러스는 문형(portal), 프레임 및 수직 브레이싱(sway brace)으로 결합된다. 거더 또는 트러스의 긴 구조에는 수평 버팀대(lateral brace)가 사용된다. 격벽과 프레임은 빔이나 트러스를 안정시키고 이들 사이의 하중을 분배한다. 격벽은 일반적으로 복부재

이고 프레임은 트러스 판넬 또는 프레임으로 만들어진다.

4.2.5. 기타 부재

상부구조에는 구조적인 요소 이외에도 교량의 통행에 관련된 부재가 있다. 차도와 인도 사이의 경계석, 배수구, 인도, 난간, 레일, 교좌장치 및 신축이음부 등이 있다. 상판의 길이가 짧을 경우에는 온도 변화에 따른 상판 길이의 변화를 보상하기 위해서 교좌장치의 한쪽 부분에 단순한 미끄러짐 판(sliding plate)을 설치한다. 상판의 길이가 길 경우에는 roller나 rocker를 설치한다.

4.3. 미국 국도상의 교량

미국 National Bridge Inventory 조사에 의하면 약 570,000개의 교량이 국도상에 놓여 있으며, culvert나 tunnel을 제외하면 약 472,000개의 교량이 있다. 이들 교량을 상부구조의 재료에 따라서 분류하여 Table 3에 나타내었다. 이 표에서 가운데 칸은 총 교량 수를, 오른쪽 칸에는 구조적으로 문제가 있는 교량수를 나타낸다. 문제가 있는 교량은 교량의 열화가 진행하여 내하력이 매우 줄어든 교량을 의미한다. Table 3에서 보면 강 교량이 콘크리트 교량에 비해서 문제 교량의 비율이 높은데, 이는 콘크리트 교량은 비교적 최근에 시공되었기 때문이다. 목재로 된 교량은 전체의 10% 이내이나 이들의 거의 절반이 구조적 결함이 있는 교량이다.

Table 3. Highway bridges in United State of America

상부구조 재질	총 교량 수	문제 교량 수
강 재	194,035	61,691
철근 콘크리트	140,531	18,732
프리스트레스 콘크리트	92,364	3,332
목 재	41,945	19,730
기 타	3,594	1,150
합 계	472,469	104,635

문제 교량에 대한 원인을 Table 4에 나타내었다. 강교나 목교가 문제 교량으로 분류된 원인은 낮은 구조적 평가 등급(structural appraisal rating)으로, 이는 매우 낮은 하중 등급을 갖는다. 또한, 강교에서 deck이나 상부구조의 결함보다는 하부구조의 결함이 많다.

Table 4. Structural deficient highway bridge.

교량종류	Deck	상부구조	하부구조	구조평가	배수평가
강재	22,902	22,624	27,607	33,813	1,712
콘크리트	8,243	9,396	10,065	5,706	868
프리스트레스 콘크리트	1,441	1,025	1,530	609	65
목재	5,769	6,470	10,207	14,715	883
합계	38,355	39,515	49,409	54,843	3,528

5. 교량 검사 기준

5.1. 교량 검사 방법

교량검사에는 정기적인 검사와 임시검사가 있다. 모든 교량은 적어도 2년에 한번은 정기적인 검사를 실시하게 된다. 임시검사는 그 목적에 따라서 주기가 달라진다. 하중 제한 구조물의 경우에는 1년에 적어도 한번은 모든 구조물에 대하여 검사하며, 구조적인 결함을 지닌 교량은 대중 안전과 구조적 건전성을 확보하기 위해서 가능한 한 자주 검사해야 한다. 사고 등으로 구조물이 손상을 입었거나 재설치 및 교체에 필요한 정보를 수집하고자 할 경우 또는 과하중 차량 통과를 위해서는 특수한 검사가 수행되어야 한다.

검사 순서로서 하부구조에서는 파일, 완충장치, 세굴(scour) 방지부, 교각, 교대, 아치 받침대, 확대기초이며, 상부구조에서는 주지지부재, 교좌장치, 이차부재(secondary member) 및 버팀대, 도로와 신축이음을 포함한 상판, 인도 및 레일이며, 기타 구조에서는 진입로, 가로등, 신호등, 전기, 방책, 게이트

및 기타 교통 통제장치 등의 순서로 진행한다.

5.2. 교량에 사용되는 재료

교량에 널리 사용되는 재료로는 콘크리트, 스틸, 목재, 석재 등이 있으나, 국내 교량에는 목재나 석재가 그리 널리 사용되지 않으므로 본고에서는 기술을 생략한다.

5.2.1. 콘크리트

콘크리트는 본질적으로 압축 하중을 견디는 재료로서 압축 하중을 기초재에 전달하는 무거운 부재로 사용되는 적합한 소재이다. 상부구조가 스틸인 교량의 경우에도 하부구조는 대부분 콘크리트로 만들어진다. 콘크리트가 낮은 인장 강도를 지녔지만, 철근으로 보강을 해주면 상판 슬래브나 거더와 같은 휨 부재에도 사용될 수 있다. 콘크리트의 대표적인 물성은 다음과 같다.

- 콘크리트의 압축 강도는 높지만, 전단 및 인장 강도는 압축 강도의 10% 정도로 낮다. 따라서 휨이나 인장을 받는 부분에 철근 등의 보강재(reinforcement)를 사용한다.
- 콘크리트에서 세멘트 페이스트가 골재 사이를 완전히 메꿀 수 없기 때문에 콘크리트에는 기공이 많다. 이 기공이 모세관 현상으로 수분을 흡수하고 압력이 가해지면 물이 통과한다. 기공 내의 수분 영향으로 동결-해빙 과정에 의해 콘크리트가 열화된다.
- 콘크리트는 균열 발생 없이도 팽창한다.
- 콘크리트의 내구성은 기후와 주위 환경에 영향을 받는다. 일반적으로 물-시멘트 비가 증가하면 내구성은 감소한다.
- 콘크리트 자체는 등방성이지만, 철근으로 보강하거나 강선으로 프리스트레스를 가한 경우에는 이방성을 지닌다.

이러한 콘크리트의 열화의 요인은 동결-해빙의 반복, 염분 침투, 열응력의 차이, 불량 골재사용, 알카리-골재 반응, 토질이나 물의 황산이온, 화학물 침투, 마모 및 마멸, 기초의 이동, 수축 및 전단력, 보강재의 부식 등이 있다.

검사 중에 박리(scaling), 균열, 박락(spalling), 연결부 박락, 솟아오름(pop-out) 등을 관측해야 한다.

5.2.2. 강재

강재는 신빙성이 있어서 교량의 시공 재료로 널리 사용되며, 선, 케이블, 판, 막대, 빔의 형태로 가공된다. 대개의 큰 교량은 강재로 시공된다. 강재의 대표적인 물성은 다음과 같다.

- 강재는 매우 큰 인장 및 압축 강도를 지니며, 전단력에도 강하다. 그러나, 얇은 부분에서는 압축시 좌굴(buckling)이 생기는 취약성이 있다.
- 교량 시공에 일반적으로 사용되는 저탄성강 또는 저합금강은 연성이 크다. 열처리, 용접 및 파괴에 의해 취성이 커진다.
- 강재는 적절히 보호되면 내구성이 크다.
- 탄소강은 부식되기 쉬우나 보호하는 방법이 개발되어 있다.

강재의 열화 요인은 대기 및 습기, 산업 배기가스, 제빙약품, 해수, 열응력, 과하중, 피로, 응력집중, 화재, 충돌, 동물 배설물, 용접, 화학전기(galvanic) 작용 등이 있다. 검사중에 부식, 균열, 좌굴, 꼬임(kink), 응력 집중, 화학전기 부식 등을 관찰하여야 한다.

5.3. 기초 이동

대부분 기초이동은 지반 거동에 기인한다. 이동의 종류는 수평이동, 수직이동(침하), 파일 침하, 회전이동(tipping)이 있으며, 이동의 원인은 성토사면의 파손, 지지력 저하, 압밀(consolidation), 침윤(seepage), 지하수위 변화, 동결작용, 상부구조로부터의 열력, 세굴 등이 있다. 검사 항목으로는 정렬 점검, 교각이나 파일의 수직도, 교대 표면 점검, expansion rocker나 roller 이동의 경사 관측, 교대 및 벽체의 신축이음 관측, 상판 이음, 슬래브 벽체, 뒷벽이나 보의 단부, 절·성토부의 경사, 세굴, 기 성토부의 불균형, 파일의 수중검사 등이 있다.

5.4. 구조 부재

교량에서 검사해야 하는 구조부재는 매우 많으며, 다음은 그 중에서 일례를 든 것이다.

5.4.1. Pier와 Bent

기초의 침식을 점검한다. 기울어지거나 침하가 있는지 점검한다. 물이 튀기는 부분, 수면, 지면, 도로

의 배수에 노출된 부위의 콘크리트의 박리를 점검한다. 기둥이나 cap에 균열이 있는지 점검한다. 교좌 부분에 균열이나 파편이 있는가 점검한다. 스틸 교각, 특히 접합부에 녹이 있는가 점검한다. 볼트 머리, 리벳 머리 및 너트는 녹이 슬기 쉽다. Pad나 pedestal의 grouting 부에 균열, 파편 및 열화가 있는가 점검한다. 스틸 파일의 물이 튀기는 부분과 수면 아래 부분을 점검한다. 심각한 교각의 이동이 있는가 점검한다. Pier와 bent 부재가 충돌이나 과부하로 구조적 손상을 입었는가를 점검한다. 과하중 차량이 통과시 bent 부재에 비정상적인 이동이 생기는지 점검한다.

5.4.2. 콘크리트 빔 및 거더

모든 빔에 대하여 콘크리트의 파편을 점검한다. 특히, 교좌장치에서는 온도변형에 의한 마찰 및 단부 압력이 높아 파편이 발생하기 쉽다. 빔에서의 사인장 균열은 전단파괴의 초기 증상이므로 지지부 근처의 사인장 균열을 점검한다. 콘크리트의 박리나 수직균열을 점검한다. 콘크리트 표면의 색변화로 부터 콘크리트의 열화나 철근의 부식을 감지할 수 있다. 과다한 진동이나 힘을 점검한다.

박스 거더의 경우는 내부에 균열이 있는가 점검한다. 배수구의 개폐 여부 및 작동 여부를 점검한다. 하단 슬래브의 아래쪽과 거더의 바깥부분에 과다한 균열이 있는지 점검한다.

프리스트레스 콘크리트 교량의 경우에는 모든 플렌지 표면에 종단 균열이 있는가 점검한다. 프리스트레스 콘크리트 빔의 정렬을 점검한다.

5.4.3. 스틸 빔 및 거더

부식과 열화를 점검해야 하는 중요 부위는 다음과 같다. 윗 플렌지, 볼트 및 리벳 머리 근처, 격판 및 버팀대 연결부위, cantilever hanger 및 핀 연결부, deck 연결부 및 배수와 접촉부위, 두 판이 맞닿는 곳 및 물이 들어갈 수 있는 부위 등이다. 만일 녹이 발견되면, 캘리퍼, 부식계 등을 사용하여 단면적이 줄어든 정도를 측정한다. 리벳이나 볼트 및 접합부 근처의 열화 및 어긋남을 검사한다. 용접부, 용접 끝단 및 인접한 금속부의 균열을 검사한다. 특히, 용접하기 곤란하여 비정상적인 용접을 한 부위,

큰 비틀림 모멘트를 받는 부재, 단면적이 급히 줄어드는 부분, 피로 하중을 받는 부분, 종방향 보강 연결부재 등을 중점적으로 검사한다.

5.4.4. 트러스

트러스를 검사하는 항목은 녹이나 열화, 트러스 부재의 정렬, 과부하 트러스, 느슨한 연결, 핀 및 인장 부재이다.

6. 교량의 비파괴검사

6.1. 비파괴검사의 종류

방사선투과시험 (RT) : 강재에서의 결함을 검출하기 위해서 사용된다. 용접부위 특히 인장보수 용접부위에 대해서는 전부 RT 검사를 수행해야 한다. 얇은 콘크리트 슬래브에 대해서 RT를 적용할 수도 있다.

초음파탐상 (UT) : 강재에서의 결함 검출에 사용된다. RT의 보완으로 사용된다. 수직 및 경사각 탐촉자를 사용해야 하며 보다 두꺼운 재료의 검사에 유용하다.

자분탐상 (MT) : 강재의 표면결함을 탐지하는데 사용된다.

침투탐상 (PT) : 표면결함을 탐지하는데 사용된다. PT를 수행하기 위해서는 매끄러운 표면이 필요하다. RT나 UT 대신에 사용할 수 없다.

음향방출 (AE) : 대부분의 재료에서 진행중인 결함을 탐지한다. 결함을 활성화 하기 위해서는 외부하중이 필요하다. AE는 전체 구조물에 대하여 결함의 위치를 판정할 수 있다. 신뢰성있는 시험결과를 얻기 위해서는 잡음을 분리해내는 적합한 기술이 필요하다.

반발경도법(Rebound number testing)-슈미트햄머 : 슈미트햄머를 사용하여 반발계수치를 측정하여 표면경도를 결정한다. 반발계수치와 콘크리트의 강도 사이에는 경험식이 있다. 콘크리트의 균질성을 신속하고 저렴하게 측정할 수 있다. 시험결과에는 표면조건, 시험체의 재령, 습도 등의 많은 인자에 영향을 받는다. 초음파 속도법을 병행하면 콘크리트 강도의 추정치의 신뢰성을 높힐 수 있다.

초음파펄스속도법(Ultrasonic pulse velocity

method) : 콘크리트에서의 초음파 전파시간을 측정한다. 콘크리트의 강도와 균열깊이를 결정할 수 있다.

충격공진법(Impact-resonance testing) : 구조물의 공진 주파수를 측정한다. 콘크리트 슬래브의 두께측정이나 묻혀있는 물체까지의 깊이를 결정한다. 철근 탐지, tendon 내부의 grouting 불량부위 탐지 등에도 활용된다.

자속법(Magnetic flux method) : 강자성체가 존재할 때에 자속의 변화를 검출하는 방법으로 콘크리트 내부의 철근을 탐지하는데 사용된다. 철근의 굵기와 깊이를 동시에 측정하려면 별도의 지침이 필요하다.

지중레이다(Underground Radar) : 콘크리트 내부의 공동이나 철근을 검출하는데 사용된다. 콘크리트 내에서는 투과도의 저하로 검출깊이에 제한이 있다.

6.2. 교량 부재에 대한 검사의 예

문헌 조사를 통하여 수집한 교량에 대한 검사의 예는 다음과 같다.

- 스틸 파일과 수중의 목재검사에 초음파 두께 측정법이 유용하다¹⁸⁾.
- 교량 핀과 hanger strap 및 연결부에 대해서는 초음파 pulse-echo 및 경사각 탐상이 가능하다¹⁹⁻²¹⁾.
- 고속도로 강교의 경우에 UT를 사용하여 결함을 검출할 수 있었으며, 잔존 수명을 예측할 수 있었다^{22,23)}. 육안검사가 가장 효율적이지만 제한이 있다. 균열과 같은 심각한 불연속면은 매우 tight하여 표면형상, 페인트, 녹 등으로 인하여 육안 점검이 곤란하며, 확대경을 사용하여도 판독하기가 곤란하다.
- Flexible metal pipe 교량은 일반적인 교량구조와는 매우 달라서 토질역학 및 지반공학이 매우 중요하다²⁴⁾.
- 봉인되지 않은 균열이나 연결부는 인접한 콘크리트 및 교각에 심각한 손상을 일으킬 수 있다²⁵⁾.
- 용접결함을 찾기위해 비파괴검사가 이용되었다²⁶⁾.
- 목재 파일의 검사에는 UT가 가장 실용적이다²⁷⁾.

- 교량 상판을 검사하는데 적외선 주사 및 thermography 방법이 연구되었다^{28,29)}.

6.3. 기타 정보

문헌조사의 결과 중에서 중요 문헌의 내용을 요약하여 기술한다.

- 참고문헌 [23]: 특정한 교량 부재의 잔존 수명을 평가하는 데에는 균열의 크기가 중요하다. MT, PT, UT, RT 및 AE와 같은 비파괴검사 수단이 유용하지만 각각 제한이 있다. 어떠한 비파괴 검사방법이 사용되어야 할지 결정하는 요인은 많지만 검사 대상부위(where to look)를 결정하고 적절한 검사방법(how to look)을 선정한 후에 적합하게 훈련된 검사요원(hand-on people)에 의해 수행되어야 한다.
- 참고문헌 [30]: 교량의 평균 수명이 50년이지만 미국의 경우 1900년 이전에 건설된 교량중에

25,000개 정도가 아직도 사용된다. 1935년 까지 설계 및 시공 재료에 대한 표준화가 이루어지지 않았으며 1976년에 FHWA는 교량 시공에서 붕괴유발부재(fracture critical member: FCM)와 fracture control plan (FCP)의 개념을 도입하였다. FCM은 그 부재의 파손이 교량의 붕괴를 유발할 수 있는 인장 부재를 의미하며 FCP는 FCM을 설계 제작을 제어하는 FHWA의 계획이다. 붕괴로 이어지는 FCM의 확인을 위해서 비파괴검사를 효율적으로 사용해야 한다. 스틸 교량의 경우 대표적인 FCM 및 이에 대한 비파괴 검사 방법의 예시는 참고문헌 [35]에 요약되었다.

- 참고문헌 [31]: 미국의 강교는 약 565,000개 정도이며 이중의 50%가 30년 이상 되었다. 피로 관련 업무를 수행하는 전문기관은 MIT, Lehigh 대학, 스위스의 Ecole Polytechnique Federale

Table 5. Example of FCMs in steel bridge.

Structure	Framing System	FCMs
Two-girder system	<ul style="list-style-type: none"> • Simple span • Anchor-cantilever • Continuous span 	<ul style="list-style-type: none"> - Bottom frange, web adjacent to the bottom frange - Top frange and adjacent portion of web over the support - Bottom of the girders near the center of spans and top of the girders over the supports
Two-truss system	<ul style="list-style-type: none"> • Simple span <ul style="list-style-type: none"> - Chords - Diagonal - Vertical • Anchor-cantilever • Continuous span 	<ul style="list-style-type: none"> - Bottom cords - Diagonal in tension - Vertical in tension - Similar to that in a girder system - Similar to that in a girder system
Tied arch	-	- Ties of tied arches
Suspension span	<ul style="list-style-type: none"> • Eyebars chain • Cable • Cable stayed 	<ul style="list-style-type: none"> - Members with two or less eyebars - Main cable - Cable tie analyzed in regard to criticality
Cross girders and pier caps	-	- Simply supported cross girders and steel pier caps
Pin and hanger supports	-	- Pin and hanger in a two-girder framing system

Tbale 6. NDT application to steel bridge inspection.

Structure	Major points to be inspected	Available NDT methods
Two-girder system	<ul style="list-style-type: none"> • Welded member <ul style="list-style-type: none"> - All transverse groove welds - All transverse stiffeners and connection plate to web - Web at the termination of longitudinal stiffeners - Cover plate terminus - Heavy corrosion area - Possible poor quality or irregularities of longitudinal fillet welds - Intersecting welds on a FCMs - Plug welds - Tack welds • Riveted or bolted member <ul style="list-style-type: none"> - Bolts and rivets - Misplaced holes filled with weld metal 	VT, PT, MT, RT, UT VT, PT, MT VT, PT, MT VT, PT, MT VT, PT, MT, UT VT, PT, MT VT, PT VT, PT, MT, UT VT, PT VT, PT, MT VT, PT, MT
Pin and hanger connection	<ul style="list-style-type: none"> - Hanger plate - Pin 	VT, PT UT
Cross girder pier caps	<ul style="list-style-type: none"> • Welded member <ul style="list-style-type: none"> - Similar to those in two-girder system • Riveted or bolted member <ul style="list-style-type: none"> - Riveted connection area in web - Misplaced holes filled with weld metal 	VT, PT VT, PT, MT
Truss tension member	<ul style="list-style-type: none"> • Welded member <ul style="list-style-type: none"> - All longitudinal welds of FCMs - All joints at the ends of FCMs - All transverse welds in box members - Gusset plate welds - Back up bar - Misplaced hols filled with weld metal • Riveted or bolted members <ul style="list-style-type: none"> - Similar to those in two-girder system • Eyebars member • Counters 	VT, PT, MT, UT, RT VT, PT, MT VT, PT, MT VT, PT VT, PT VT, PT, MT VT, PT, MT, UT VT, PT
Tied arches	<ul style="list-style-type: none"> • Welded members <ul style="list-style-type: none"> - Corner welds - All fillet welds inside girder - Intersecting welds - All the internal diaphragm and transverse butt welds • Riveted or Bolted Member <ul style="list-style-type: none"> - All tack welds for repair - Floor beam connection 	VT, PT, MT VT, PT, MT VT, PT VT, PT, MT, UT, RT VT, PT VT, PT, MT
Suspension span	<ul style="list-style-type: none"> • Eyebars chain • Cable 	VT, PT According to cable guideline

de Lausanne (EPFL)이 있다.

- 참고문헌 [22]: 피로나 파괴가 일어날 위험을 인지하고 보수의 시점을 정할 정확한 방법은 존재하지 않으며, 강교에 대한 피로파괴를 예측하는 방법이 소개되었다. 이 계산에는 균열 성장 속도, 파괴인성, 균열의 크기 및 하중이력이 필요로 하고 실제 교량의 자료가 이 참고문헌에 있다. 이 방법은 특정한 파괴없이 사용할 수 있는 교량의 수명을 결정하는데 유용하다.
- 참고문헌 [25]: 미국내 교량의 절반 정도가 1940년 이전에 세워졌고, 이들의 대부분은 통과 차량의 댓수, 차량의 무게 및 속도를 제한하고 있다. 이들 교량의 40%는 문체 교량으로 분류되고, 보수가 요구된다. 고속도로와 교량의 통행량은 설계 당시의 기준에 비하여 10배 정도 증가하였다.
- 참고문헌 [27]: 미국 교량의 35%가 1930년대나 그 이전에 세워졌고, 이들 중의 30%가 결함이 있는 교량으로 알려져 있다.
- 참고문헌 [32-34]: 강교의 진단에 AE를 사용할 수 있음을 기술하였다. 여기서 주로 관심사는 피로균열의 검출으로, 새로운 균열 및 활성 균열의 검출, 손상도 평가, 균열보수 평가, 균열 위험도의 정량화, 보수 우선순위 결정 등에 유용함을 입증하였다. 피로 수명예측, 복잡한 용접부 및 핀의 평가 등을 감시할 수 있다.
- 참고문헌 [35]: 스틸 교량의 검사에서 FCM에 대한 검사는 무엇보다도 우선되어야 한다. 대표적인 FCM은 Table 5에 나타내었다. 교량검사에서 가장 우선되는 것은 육안검사(VT)이며, 비파괴검사가 병행된다. 교량의 부위별로 적용하는 비파괴 검사법은 Table 6에 나타내었다.

7. 맺음말

교량의 붕괴는 재산 피해는 물론이고 인명 피해도 야기시킬 수 있다. 또한, 그 후유증이 심각함은 성수대교의 붕괴로 입증되고 있다. 성수대교 붕괴에서도 입증된 바와 같이 작은 부위의 손상이 교량 전체의 붕괴로 이어질 수 있다는 점을 상기해 볼 때에 하나하나의 부위에 대한 검사는 매우 중요하

다. 일반적으로 교량의 크기가 거대한 만큼 검사 부위도 많은 것은 사실이다. 이들 부위의 검사에서 육안검사가 일차적으로 수행되지만, 신뢰성 향상을 위해서는 비파괴검사가 차지하는 비중은 매우 크다.

미국의 경우 100년 정도된 교량이 실제로 사용되는 것을 감안할 때에, 교량은 건실하게 시공되어야 함은 물론이고, 사용중에도 안전진단을 통하여 이상부위에 대한 적절한 보수를 통하여 그 수명이 연장될 수 있음을 명심해야 할 것이다. 이러한 일들이 어느 날 갑자기 되었다기 보다는 긴 기간동안의 연구의 결과라 할 수 있겠다. 다음은 본 해설을 작성하는데에 사용된 일반적인 자료들이다. 이들 자료에서 선진국의 교량 진단에 관한 내용을 일부나마 짐작할 수 있기에 여기에 열거를 한다.

- FHWA, "Bridge inspector's training manual", U.S. DOT (1979)
- V. M. Malhotra, "Testing hardened concrete: Nondestructive Methods", ACI monograph No.9, ISU, Ames, IA (1976)
- Transportation Research Board, "Transportation Research Record 899, Bridge inspection and rehabilitation", National Academy of Science, Washington D.C. (1983)
- Transportation Research Board, "Transportation Research Record 607, Bridge design, testing and evaluation", National Academy of Science, Washington D.C. (1976)
- Transportation Research Board, "Transportation Research Record 676, Bridge design, evaluation and repair", National Academy of Science, Washington D.C. (1978)
- Transportation Research Board, "Guidelines for evaluation and repair of damaged steel bridge members", National Cooperative Highway Research Program Report 271 (Jun. 1984)

참고 문헌

- 18) T. J. Collins, "Underwater Inspection: Documentation and Special Testing", Public Works, (Jan.

- 1988) pp. 53-55.
- 19) D. E. Kelsey, *et al.*, "Ultrasonic Testing of Bridge Pins and Hanger Straps", *Mater. Eval.*, Vol. 48, (Apr. 1990) pp. 488-493.
- 20) F. L. Carrol, *et al.*, "Nondestructive Bridge Pin Inspection", *Public Works*, (Jan. 1989) pp. 68-69.
- 21) M. McCurdy, "Ultrasonic Inspection of Pin Assemblies in Bridges", *Mater. Eval.*, Vol. 47, (Dec. 1989) pp. 1340-1341.
- 22) *J. Struc. Eng.*, Vol. 113, No. 3, (1987) pp. 483-501.
- 23) K. K. Verma, "A Conceptual Approach to Prevent Crack-Related Failure of Steel Bridge", *Eng. J.*, Vol. 25, No. 1, (1988) pp. 17-19.
- 24) D. C. Cowherd, "A Better Way to Evaluate Long-Span Flexible Pipes", *Public Works*, Vol. 117, (Feb. 1986) pp. 48-49.
- 25) J. P. Cook, "Joint and Crack Sealing Needed for Bridge, Highway Upkeep", *Adhesive Age*, (May 1985) pp. 29-31.
- 26) A. W. Pense, "Examination and Repair of Bridge Structures", *Weld. J.*, (Apr. 1984) pp. 19-25.
- 27) R. H. McCuen, *et al.*, "Spacing for Accuracy in Ultrasonic Testing of Bridge Timber Piles", *J. Struc. Eng.*, Vol. 114, No. 12, (1988) pp. 2652-2668.
- 28) "Infrared Scanning Speeds Bridge Deck Inspection", *Public Works*, (Jun. 1988) pp. 77-79
- 29) J. S. Kipp, "Thermographic Investigation of a Bridge Deck", *Public Works*, (Sep. 1983) pp. 70-73.
- 30) *Mater. Eval.*, Vol. 41, (1983) pp. 1352-1355.
- 31) *Public Roads*, Vol. 53, No. 4, (1990) pp. 109-117.
- 32) Z. Gong, *et al.*, "Acoustic Emission Monitoring of Steel Railroad Bridges", *Mater. Eval.*, (Jul. 1992) pp. 883-887.
- 33) P. E. T. Hopwood, "Acoustic Inspection of Steel Bridges", *Public Works*, (May 1988) pp. 66-69.
- 34) "Engineers Listen to Structural Flaws in Bridge", *Metal Prog.*, (Sep. 1986) pp. 10.
- 35) K. S. Koh, "NDT Application to Steel Bridge Inspection", *Proc. Safty & NDT '95*, Pusan (Oct. 1985)