

교량 검사에 대한 고찰 - 비파괴검사(I)

김영환

한국표준과학연구원, 비파괴평가그룹

1. 머릿말

1990년대에 들어서서 우리나라에는 유난히 많은 대형 사고들이 발생되었다. 교량 붕괴 사고는 그 자체가 주는 충격과 피해는 물론이고, 긴 복구 기간동안 교통 체증을 불러 일으키기 때문에 여파 또한 매우 크다. 1992년 7월 31일 신행주대교가 85%의 공정중에 붕괴되었는데, 이 사고는 공사중인 교량이어서 인명피해는 없었으며, 완공후 기대되었던 교통체증 감소의 효과가 사라졌을 뿐 이로 말미암은 교통체증이 늘어나지는 않았다. 그러나, 1994년 10월 21일의 성수대교 붕괴 사고는 인명 피해를 일으켰을 뿐만 아니라, 서울시내 교통 체증을 더욱 심각하게 하여 10부제 운행등의 수단이 동원되는 등 후유증도 심각하다. 사고가 일어난지 6개월이 넘었고 뒤이어 계속되는 가스 폭발 사고로 국민의 관심이 쏠린 탓인지, 이제는 사람들의 뇌리에서 점차 사라지고 있는 듯하다.

다리가 무너지는 사고는 비단 우리나라 뿐만 아니라 선진국을 비롯한 다른 나라에서도 있던 것은 사실이나, 사고에 대처하는 방법은 매우 다르다. 1879년 12월 영국의 테임즈강 하구에 있는 다리가 붕괴되었을 때 영국에서는 청문회가 열리고 사고의 조사만 8개월이 걸렸으며, 1968년 오하이오와 웨스트버지니아를 연결하는 실버교가 붕괴하였을 때 미국에서는 3년간 조사를 하여 엄청난 규모의 보고서를 작성한 예는[1], 우리나라의 경우 팔당대교, 신행주대교 및 성수대교 붕괴 사건의 처리와는 대조적이다.

현재 서울에 있는 자동차 전용 중요 시설물은 Table 1에 있는 바와 같이 한강교 15개를 포함하여 483개가 있고 성수대교를 기준으로 건설후 15년 지난 구조물은 절반이 넘는 280여개이다[2]. 우리나라 전체 교량의 수는 13,000개 정도이고, 이들 중에서 절반 정도가 안전도에 문제가 있고 10% 정도인 1,100개가 사고 위험이 있다고 보고 되고있다[3]. 성수대교 붕괴 사고를 계기로 교량의 검사에 대한 전반적인 내용을 두차례로 나누어 기록하고자 한다. 이번호에는 미국에서의 교량 사고의 예와 교량의 역사적 발달사 및 종류를 기술하고, 다음호에는 교량의 구성요소, 교량 검사의 전반적인 절차, 교량 검사에서의 비파괴 검사법, 관련 문헌에 대하여 기술하고자 한다. 아울러 본 자료는 필자가 1992년 미국의 아이오와 주립대의 Center for NDE의 객원 연구원으로 있을 때에 작성한 자료[3]를 근간으로 하였음을 밝히며, 자료들이 미국의 것들에 치중되어 있음과 사용된 용어들이 때로는 부적절하게 번역되었음을 죄송스럽게 생각한다.

2. 교량 붕괴의 대표적인 예

교량이 생겨난 이후로 크고 작은 사고가 계속하여 일어났지만, 문헌을 통하여 조사한 1980년대 이후에 미국에서 일어난 교량 사고의 대표적인 예를 들어본다.

사례 1[4]:

사고다리 : Baltimore-Washington Parkway상의

Table 1. 서울에 있는 자동차 전용 주요 구조물 건설 현황.

구분	'50년이전	'50-59년	'60-69년	'70-79년	'80-89년	'90년이후	계
한강상교량	2	-	3	6	4	-	15
일반교량	4	4	38	138	89	19	292
고가차도	-	-	17	30	10	1	58
고가도로	-	-	2	1	-	-	3
입체시설	-	-	3	10	15	-	28
지하차도	-	-	1	18	38	13	70
터널	-	-	4	4	5	4	17
계	6	4	68	207	161	37	483

Maryland Route 198 다리

사고일시: 1989년 8월 31일

피해사황: 9명의 작업자와 5명의 통행자 부상, 400톤 가량의 자재가 Parkway상에 예고도 없이 떨어짐

사고원인: 건설중인 교량으로서 설계 잘못으로 지주 (shoring) 부품을 건설하지 않음

사고일시: 1987년 1월 스틸거더에서 균열이 발견

피해사황: 5개 상판(span)중에서 3번째 상판의 내부 거더 용접부에 균열이 발생

사고원인: 받침대를 교대벽에 연결하는 48개 볼트의 전단파괴. 현장에서 용접부를 보수할 경우에는 상태가 도리어 나빠질 수 있으며, 모든 보수 부위는 정밀한 재조사가 요구됨

사례 2[5]:

사고다리: Minnesota주 St.Paul 근처의 Lake Street-Marshall Avenue Bridge

사고일시: 1990년 4월 24일

피해사황: 1명의 작업자 사망, 1400톤가량의 자재가 미시시피 강으로 떨어짐

사고원인: 건설중인 교량으로서 건설 작업의 실수

사례 5[7]:

사고다리: Kansas주의 Arkansas River Bridge

사고일시: 1988년 12월 2일

사고원인: 다리의 10개의 핀(pin)과 걸이(hanger) 중 8개가 파손

사례 3[5]:

사고다리: Wisconsin주 Antigo의 Spring Brook에 있는 U.S. 45 Bridge

사고일시: 1990년 7월 13일

피해사황: 건설중인 교량 붕괴

사고원인: deck 받침대를 교대벽(abutment wall)에 연결하는 48개 bolt의 전단파괴

사례 6[8,9]:

사고다리: Missouri주 St. Louis의 55번 Interstate에 있는 다리

사고일시: 1987년 3월

사고원인: 사고를 발견한 당시에 다리는 확장 및 재건을 위해 계약한 상태였으며, 시공사의 근로자가 상판 하나가 약 4.5cm 내려 앉은 것을 발견하였다.

정밀 조사 결과로 이 상판을 지지하는 12개 핀 중에서 4개의 핀이 파손된 것을 발견하였다.

사례 4[6]:

사고다리: Cleveland의 무명의 스틸 거더(girder) Bridge

건설년도: 1957

사례 7[10-12]:

사고다리: Connecticut Greenwich의 Connecticut

Turnpike's Mianus River Bridge

건설연도: 1950년대 중반
 사고일시: 1983년 6월 28일
 피해사항: 4대의 차량이 강으로 추락, 3명 사망
 조사기관: Connecticut Department of Transportation
 사고원인: 이 다리는 굽은 스틸거더교로, 부유 (suspended) 상판의 주 거더는 외팔보 (cantilever)로부터 핀에 연결된 수직 고정 띠(strap)에 매달려 있었는데, 이 고정 띠가 핀으로부터 미끄러져서 사고가 발생하였다. 이 다리는 두개의 주 거더가 있었는데, 이러한 교량은 건설이 쉬워서 경제적이지만 설계 당시에는 이 교량이 지나고 있는 문제점을 알지 못했다. 즉, 교량 자체의 굽은 구조가 주 거더에 휩력을 가하고, 25년 동안의 이 힘이 고정띠를 핀으로부터 미끄러지게 만들었다.

사례 8[13]:

붕괴다리: New York의 Brooklyn Bridge
 건설연도: 1883년
 사고일시: 1981년 6월 28일
 피해사항: 1명 사망
 사고원인: 사고 교량은 현수교로 건설한지 거의 100년이 되어서 교체가 필요한 낡은 케이블이 많았는데, 그중에서 케이블 2개가 끊어졌다.

사례 9[13]:

사고다리: Massachusetts주 Hermanville 근처의 1차선 나무다리
 사고일시: 1981년 12월 17일
 피해사항: 4명의 어린이와 어른 1명 사망, 4명 부상
 사고원인: 정원을 초과한 학교 van이 안개비 속에서 미끄러져서 3m 아래의 계곡으로 추락

사례 10[14]:

사고다리: Maryland Denton의 Denton Bridge
 사고일시: 1976년
 사고원인: 목재 파일 지지 교량으로 무너지기 1년전 에 수행한 육안 검사에서는 아무 결함도

발견되지 않았지만, 붕괴 후에 조사한 결과로는 파일의 강도가 현저하게 감소되었음이 판명되었다.

사례 11:

사고다리: West Virginia주 Point Pleasant의 Silver Bridge
 건설연도: 1927년
 사고일시: 1967년
 사고원인: 붕괴의 원인은 노면보다 높은 곳에 있는 suspension 체인의 eyebar 내부에 발생한 약 2mm 정도의 응력부식균열이 발달이었다. 이 균열은 eyebar의 취성파괴를 촉진하여 다리가 붕괴되었다. 1927년 이 다리를 설계할 당시에는 일상적인 지역의 정상적인 환경에서 교량 재료가 응력 또는 피로 부식이 일어날 수 있다는 사실을 알지 못했다. 이 균열은 다리를 해체하기 전에는 찾을 수 없었는데, 이는 예측할 수 없는 상황에서도 교량을 검사할 수 있도록 설계하고 시공해야 하며, 또한 이러한 검사가 가능하도록 새로운 검사법이 개발되어야 한다는 점을 시사한다.

이상에서 검토한 바와 같이, 교량의 사고는 설계 잘못이나 시공의 잘못은 물론이고, 교통사고나 설계 기준 이상의 차량 통과 및 설계나 시공시 잘 알려지지 않았던 기술적인 문제 등에 의해서 발생된다. 따라서, 설계 및 시공이 완벽하게 되었다고 할 지라도 수시로 검사하여 안전도를 확보하면 사례 4-6의 경우와 같이 대형 사고를 미연에 방지할 수 있다.

3. 교량의 역사 및 형태[15]

3.1. 역사적인 발달사

아마 역사적으로 가장 오래된 다리의 형태는 통나무 다리일 것이지만 썩기 쉬운 탓에 남아 있는 예가 알려진 것은 없다. 또 다른 오래된 다리는 clapper bridge로서, 길이가 1-2m 정도의 단단한 자연석을 이용하여 만든다. 영국의 Dartmoor에 3개의 상판으로 된 고대의 clapper 다리가 남아있다.

현재 남아있는 오래된 다리들은 돌로된 아치교이

다. 유사 아치교로는 양쪽의 끝에서 부터 시작하여 가운데서 만나도록 기대어 놓는 방법으로, 이 돌들은 외팔보와 같이 힘을 받는다. 기원전 3,4천년전의 이집트의 피라미드나 기원전 1300년의 그리스의 Mycene이 이에 해당한다. 본격적인 아치교는 아치 링에 있는 각각의 돌들이 직접 압력을 가하는 것으로 에투루리아 사람들은 이러한 아치교에 능숙하였으며, 로마인들은 이를 수로나 도로에 사용해 왔다. 이 아치교는 12-18세기까지 다리의 주된 형태를 이루어 왔으며, 아치의 모양도 반원, 고딕 타원으로 점차 변화였다.

18세기말에서 19세기 중엽에 새로운 다리의 형태와 재료가 선보이기 시작하였다. 1776년 영국의 Severn강에 놓인 아치교에 주철(cast iron)이 처음 사용되었고, 1796년에는 미국의 펜실베니아에 연철(wrought iron) 체인을 사용한 현수교가 등장하였다. 목재 트러스교가 등장하는가 하면, 19세기 초에는 연철과 목재를 사용한 트러스교가 등장하였다. 이러한 변화는 현대적인 철도와 도로 시스템의 발전을 가져왔다.

초기의 트러스는 모델을 파괴시험하여 얻은 경험에 의존하여 제작되었으나, 1847년에 트러스 상판에 대한 최초의 응력해석이 이루어졌다. 1864년에 최초로 오하이오 주의 Steubenville에 오하이오 강을 가로지르는 whipple 형의 긴 상판을 지니는 트러스교가 생겼다. 이 다리는 양끝의 포스트와 압축을 받는 부분은 주철을 사용하고, 인장을 받는 부분은 연철을 사용하였다. 이렇게 주철과 연철을 조합하여 건설된 오래된 트러스교가 몇몇 남아서 아직도 사용되고 있다.

1855년 스틸(steel)을 만드는 Bessemer 공법의 개발로 스틸을 사용한 교량이 늘어나기 시작하였다. 스틸을 사용한 최초의 중요한 다리는 St. Louis의 미시시피 강을 가로지르는 Eads Bridge로 길이가 450m가 넘는 스틸 아치교로 3개의 상판으로 되어있다. 이는 1874년에 완공되었는데 공사기간이 6년이 걸렸다.

3.2. 현대적인 교량

현대적인 의미의 교량은 고정식 교량, 움직일 수

Table 2. 한강교의 교량 형태 분석표.

다 리 명	준 공	공 법	통과하중	안 전 도
성산대교	80년 6월	트러스	DB-18	비교적 양호
양화대교	65년 1월	스틸플레이트거더	DB-18	보강이 시급
마포대교	70년 5월	스틸플레이트거더	DB-18	보강이 시급한 위험한 다리
원효대교	81년 10월	PC 박스거더	DB-18	성능개선 공사중
한강대교	37년 10월	스틸플레이트거더	DB-24	나이에 비해 믿을만한 다리 81년 12월 확장공사 완공
동작대교	84년 11월	스틸박스거더	DB-24	안전도 양호
반포대교	82년 6월	1층: RC 슬래브 2층: 스틸박스거더	1층: DB-18 2층: DB-18	보강이 시급한 다리
한남대교	69년 12월	스틸플레이트거더	DB-18	보강이 시급한 불량 다리
동호대교	84년 12월	스틸박스거더	DB-24	전반적으로 안전한 다리
성수대교	79년 10월	게르버 트러스	DB-18	사고다리
영동대교	73년 11월	스틸플레이트거더	DB-18	보강이 시급한 위험한 다리
잠실대교	72년 7월	스틸플레이트거더	DB-18	안밖으로 보강해야 할 다리
올림픽대교*	89년 12월	스틸박스거더	DB-24	양호한 다리
천호대교	76년 7월	스틸플레이트거더	DB-18	교각 보강이 시급한 다리

*교각 내부의 구조변형을 읽을 수 있는 자동센서가 설치된 교량

있는 교량 및 현수교로 나누어 볼 수 있겠다. 고정식 교량은 트러스교, 거더교 및 콘크리트 교량으로 나눌 수 있다. Eads Bridge와 같은 스틸 아치교는 점차 스틸 트러스 교로 바뀌어 갔으며, 수많은 형태의 트러스들이 개발되었다. (Fig. 1 참조) 트러스의 형태는 빔이나 거더 형으로 발전되어 갔으며, 많은 트러스교가 지금도 사용되고 있다. 트러스교는 긴 상판을 제작할 수 있다는 장점이 있으며, 단점으로는 한 부위 또는 연결이 취약하면 전체 구조물이

파손된다는 점이다.

1850년 Wales에 세워진 Britannia 다리는 최초의 박스거더교이며, 거더의 재료로는 연철에서 스틸로 바뀌었다. 짧은 상판교는 리벳을 사용한 플레이트 거더교가 일반적인 형태이다. 차차 대형 롤링 밀이 개발됨에 따라서 리벳 거더는 I-빔 거더로 바뀌어졌으며, 현대의 도로용 교량에는 거의 리벳 또는 I-빔 거더교가 사용된다. 초기에는 단일 상판 구조를 많이 사용하였지만, 부유 상판과 외팔보 상판에 대

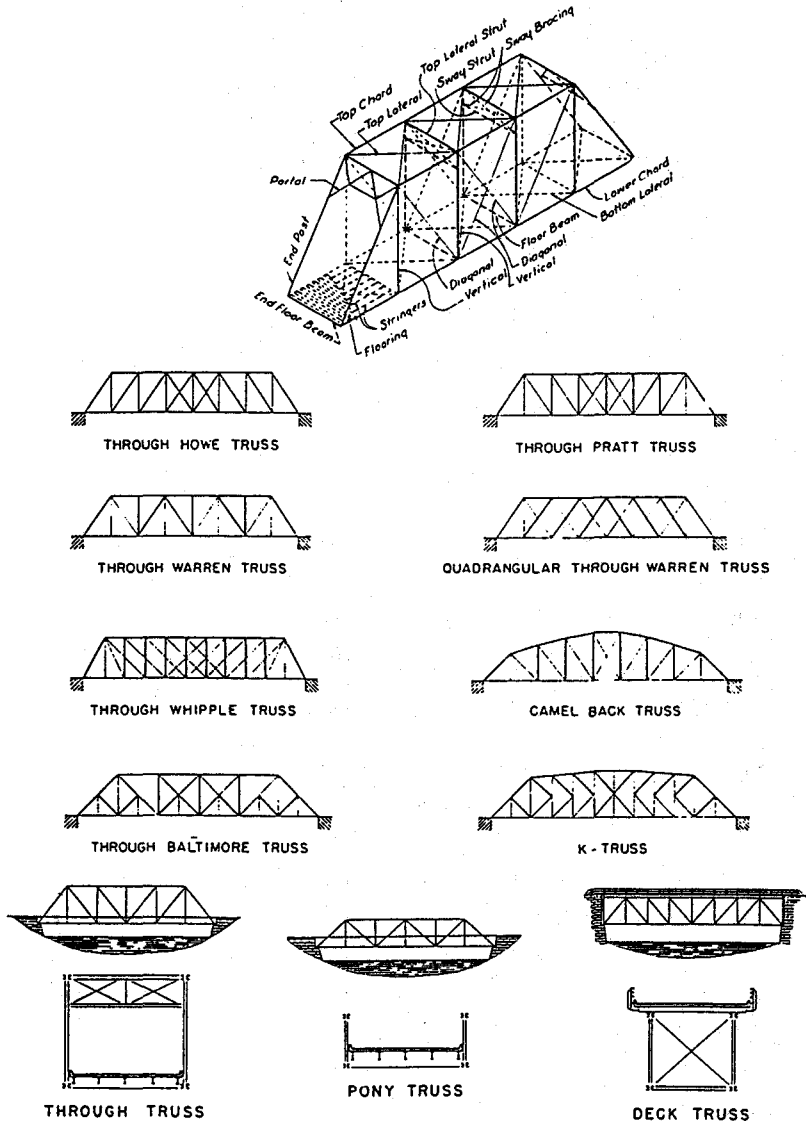


Fig. 1. 트러스교의 대표적인 예.

한 기술을 확보하면서 두개 또는 그 이상의 상판구조로 발전하게 되었다. (Fig. 2 참조)

콘크리트 교량은 콘크리트의 높은 압축강도와 철근의 높은 인장강도를 이용한 것이다. 최초의 철근 콘크리트 슬래브는 1880년 프랑스에서 만들어졌으며, 1894년에 미국에 최초의 콘크리트 아치교가 등장하였다. 단일 상판 슬래브 또는 빔 교량에서 rigid frame 또는 prestress 교량이 등장하였다.(Fig. 3 참조) 상부구조가 스틸로 된 다리에서도 철근 콘크리트는 전체적으로 중요한 역할을 하는데 교대벽, wing wall, pier 및 deck에는 거의 모든 경우 철근 콘크리트를 사용한다.

이동식 다리에는 도개교(bascule bridge), 회전교(swing bridge) 및 수직이동교가 있다. (Fig. 4 참조) 가장 초기의 이동식 다리는 중세에 성이나 시의 방어를 위하여 사용된 단엽 도개교이다. 배가 지나는 곳에 다리를 설치할 경우에 사용되며 대개의 경우는 쌍엽 도개교가 이용된다. 회전교는 중앙의 pier를 중심으로 수평으로 90도 회전할 수 있게 하여 선박이 통행할 수 있도록 하는 교량이다. 수직 이동교는

구조의 양끝에 있는 탑에서 동작하는 케이블에 의해 다리가 수직으로 이동하는 교량이다. 이때에 다리는 수평을 유지하고 있다. 이러한 이동식 교량을 검사하려면 별도로 전문 인력이 필요하다.

현수교는 주로 해협과 같이 중간에 교각을 설치하기 곤란한 경우에 상판의 길이를 늘리는 목적으로 많이 건설되었는데, 최초의 현수교는 1796년에 펜실베이니아의 Uniontown에 연철 체인으로 만들어진 것이고, 1841년에 필라델피아에 세워진 것은 상판의 길이가 303m 이었다. (19세기 최대 상판의 길이는 513m로 이는 대형 외팔보 다리이다.) 1883년에 세워진 New York의 Brooklyn Bridge는 상판의 길이가 478m 였으며, 1926년에 세워진 Delaware 강 위에 세워진 Philadelphia-Camden Bridge가 525m 이었으며, 1932년에 세워진 George Washington Bridge는 상판의 길이가 1050m나 되었다. 계속하여 Golden Gate, Mackinac Straits, Verrazano Narrows Bridge와 같은 대형 현수교들이 세워졌으며 마지막의 것은 탑 사이의 거리가 1278m로 세계 최대이다. 1940년에 Tacoma Narrows Bridge가 공

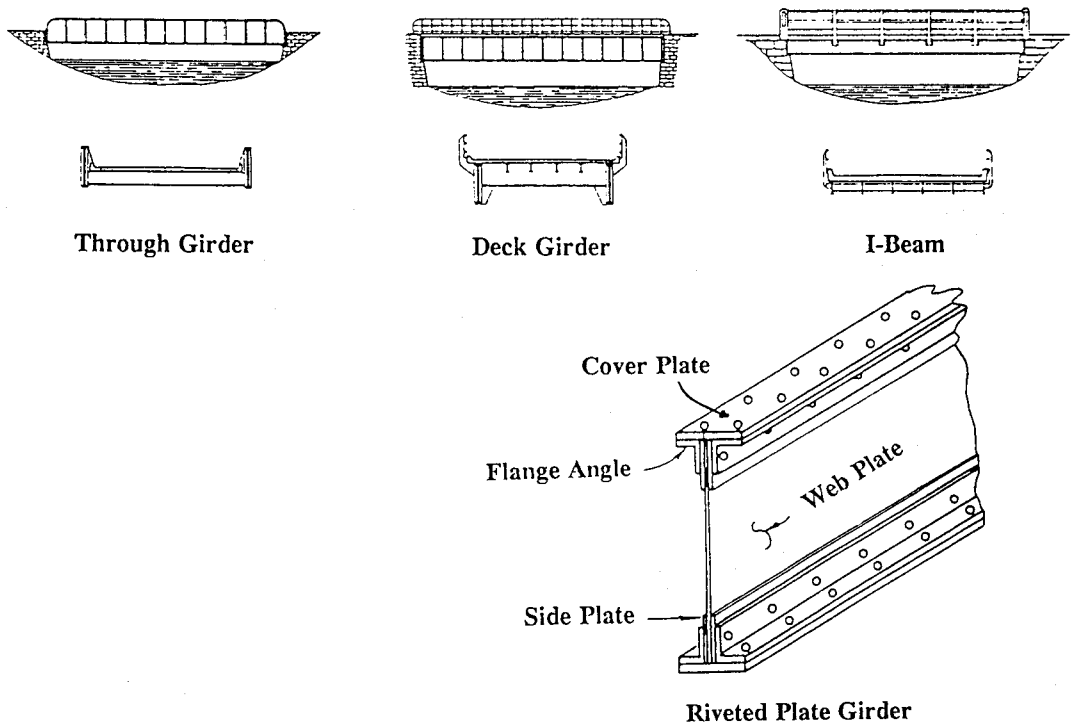


Fig. 2. 거더교의 예 및 리벳 플레이트 거더.

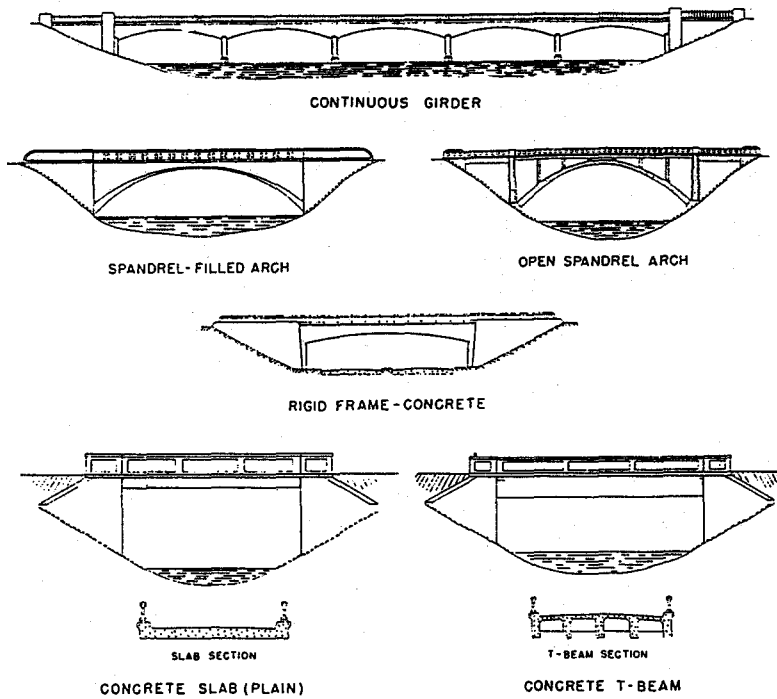


Fig. 3. 콘크리트 교량.

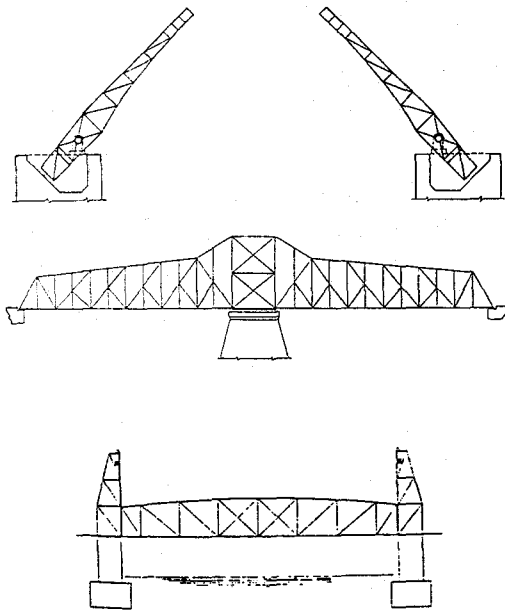


Fig. 4. 이동식 다리. (a) 도개교, (b) 회전교, (c) 수직이동교

기 역학적 힘에 의해 파괴가 된후에 이러한 힘의 영향에 대한 연구와 몇몇개의 중요한 다리에 대한 보강 공사가 이루어졌다. (Fig. 5)

3.3. 20세기 경향 및 최근의 개발 현황

긴 상판의 다리에는 스틸 트러스교가 사용되고 있으며, 콘크리트 및 돌 아치교도 계속적으로 사용되고 있다. 작은 상판에 대해서는 철근 콘크리트 슬래브, T-빔, wide flange 스틸 또는 조립 스틸 거더교가 채용되고 있다. 1920년대말 1930년대 초반에는 낡아지고 미려한 철근 콘크리트 rigid frame 교량이 parkway에 사용되었다. 심미적인 관점에서 작은 돌 아치교가 highway에 사용되기도 하였다. 1940년대에는 복합적인 건설기법이 개발되었다. 스틸 stud, spiral, channel, angle, bar와 같은 shear connector를 사용하여 스틸 빔이나 거더를 콘크리트 슬래브로 만들어진 교량의 deck에 붙이는 방법이 사용되었다.

최근에는 약 120m 정도되는 긴 스틸 거더교가 개발되어 짧은 트러스 교량을 대체해 나가고 있다.

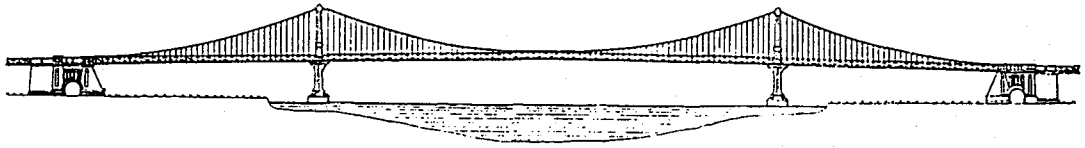


Fig. 5. 현수교.

플레이트 거더를 제작할 때에 리벳을 사용하는 대신에 용접을 하는 경향으로 바뀌고 있으며, 리벳 보다는 고장력 볼트를 사용하는 추세이다. 1950년대에 prestress 콘크리트가 사용되기 시작하여 현재는 표준 방법으로 널리 사용된다. 스틸 복합 박스 거더 및 미려한 스틸 deck이 개발되고 있다.

3.4. 한강교의 유형별 분류

다음 Table 2는 서울에 있는 한강교를 유형별 분류와 안전도를 나타낸 것이다. 안전진단은 92년 12월에서 93년 12월, 93년 5월에서 94년 7월 등 2단계에 걸쳐서 토목학회의 진단을 근거로 한 것이다.[16] 통과하중의 DB-18은 전체하중 32.4톤의 차량이 시속 80km로 줄지어 달릴 수 있는 하중 기준이고, DB-24는 전체하중 43톤의 차량이 시속 80km로 줄지어 달릴 수 있는 하중 기준이다.

참고 문헌

- 1) "100년주의' 철학을 세우자", 한겨레 21, 제32호, (1994년 11월 3일), p. 30
- 2) "서울, 그 견딜 수 없는 불안함", 한겨레 21, 제32호, (1994년 11월 3일), p. 9
- 3) 김영의, "국내 토목구조물 기술진단의 향후 과제", 제4회 물리음향연구모임 workshop, 서울 (1995년 3월 24일)
- 4) P. Jeong, Young H. Kim and Jong S. Kim, "Thoughts on Bridge Inspection-Literature Survey", CNDE, Iowa State University, Ames, IA, USA, Oct. 28, 1992 (unpublished work)
- 5) Public Roads, Vol. 55, No. 2 (1991), pp. 37-40
- 6) Public Roads, Vol. 55, No. 2 (1991), p. 38
- 7) Public Roads, Vol. 53, No. 4 (1990), pp. 123-130
- 8) Mater. Eval., Vol. 47 (1989), p. 1340
- 9) Public Works, Jan. 1989, p. 68
- 10) Mater. Eval., Vol. 47 (1989), p. 1340
- 11) Mater. Eval., Vol. 41 (1983), p. 1352
- 12) L. Zetlin et. al., Consultant Engineer, June 1985, pp. 52-57
- 13) M. McCurdy, Mater. Eval., Vol. 47 (1989), pp. 1340
- 14) Mater. Eval., Vol. 41 (1983), pp. 1352-1353
- 15) J. Struc. Eng., Vol. 114, No. 12 (1988), pp. 2652-2668
- 16) K. E. Kruckemeyer et. al., "Bridge Design/Aesthetics and Developing Technologies", Massachusetts Department of Public Works and Massachusetts Council on the Arts and Humanities, Boston (1986)
- 17) "믿고 건널 다리가 없다", 한겨레 21, 제32호 (1994년 11월 3일), pp. 24-29