

교량안전진단주기와 구조적 안전도의 상관관계

방 명 석
충주대학교 안전공학과 교수

1. 서론

공용중인 시설물의 안전성을 유지하고 사고를 방지하기 위한 지속적인 인적·물적 투자를 유지관리라고 한다. 이러한 유지관리는 시설물 책임관리기관의 자체 내규에 의하여 수행되어 오다가 1994년에 발생한 성수대교 붕괴사건을 계기로 1995년에 시설물 안전관리에 관한 특별법(이하 '시특법'이라 칭함)이 제정되었고, 이 법을 근거로 수행되고 있다. 이 시특법에서는 시설물의 점검이나 진단의 종류·주기·방법 등을 명확하게 규정하고 있다. 진단의 종류는 정기육안점검, 정밀점검, 정밀안전진단으로 구분하고 있으며, 이 중에서 정밀안전진단은 마지막 단계에 수행하는 진단으로 이 진단결과에 의하여 시설물의 사용지속여부를 결정한다.

시특법에 의하면 중요구조물은 준공 전에 정밀안전진단을 실시하여 공용 전의 내하력을 규명한 후에 공용 중에도 5년마다 정밀안전진단을 실시하도록 규정하였다. 그러나 1999년의 시특법의 개정에 의하여 10년이 경과된 시설물에 대하여 5년마다 정밀안전진단을 실시하도록 개정하고 관리주체가 시설물의 상태가 양호하다고 판단되면 다음 1회에 한하여 실시하지 않을 수 있도록 크게 완화하였다. 이는 시설물의 하차 보수기간을 5년에서 10년으로 연장함으로써 시공부실의 책임기간을 늘린다는 의도였으나, 준공 후 10년까지는 정밀안전진단을 면제해 주게 되고 10년 이상된 시설물을 5년마다 실시하도록 하여 준공 후 최대 15년이 된 시점에서나 정밀안전진단이 실시되는 결과가

되었다. 이러한 법개정은 관리주체의 진단부담을 크게 줄여주지는 취지가 크게 작용하였으나 안전측면에서는 많은 논란이 야기되고 있다.

본 논문에서는 이러한 법개정의 취지가 타당한가에 대한 의문점을 규명하기 위하여 시특법 제정 후 시행된 중요 교량의 정밀안전진단 결과들을 수집·분석하였다.

시특법 제정 이전에 발생한 시설물 사고의 대부분이 부실시공의 의혹이 많았고, 시특법 제정의 직접적 원인이었던 성수대교 붕괴사고도 부실시공이 주요 원인이었던 점을 감안하여, 이 시특법 제정 후에 교량의 주요 결함의 발생현황과 부실시공의 개선여부를 파악하고 안전진단주기의 개정이 시설물의 안전에 미친 영향을 분석하고자 한다.

2. 교량 정밀안전진단 실시 결과 및 결함 현황

2.1. 조사대상 교량 및 자료 수집

교량의 정밀안전진단은 시특법의 제정 전에도 20년 이상 실시되어 왔고, 수백개의 진단실적을 갖고 있다. 그러나 이 경우에는 진단범위나 주기, 대상을 관리주체가 임의적으로 결정하고 진단 후의 보고형식도 통일성이 없어 진단업무의 일관성이 결여되었다. 1995년에 제정된 시특법에서는 대상교량과 시행기관을 명확히 규정하였다. 최장기간이 50m 이상인 교량은 중요교량으로 분류하여 시특법에 근거하여 설립된 시설물안전

기술공단만이 정밀안전진단을 실시하도록 하였고, 이외 중소교량의 정밀안전진단도 시특법에 의한 자격요건을 구비하여 등록한 민간 안전진단업체만이 실시할 수 있도록 하였다. 본 연구의 목적이 시특법의 제정 후 교량의 상태변화를 규명하기 위한 것이므로 1995년 이후의 안전진단보고서를 가능한 한 많이 수집·분석하고자 하였으나, 50m 이상의 장대교량은 정부산하공단인 단일기관에서 실시하므로 수집이 용이한 반면, 중소교량은 200개 이상의 안전진단업체에서 수많은 관리주체의 독자적인 발주에 의하여 실시하므로 수집이 어렵고 표본성과 대표성 확보에 어려움이 많았다. 또한 중소교량은 교량형식도 다양하고 예산에 따라서 결과보고도 임의적 형식을 갖는 경우도 많아 본 연구에서는 제외하였다. 따라서 본 연구에서는 시특법 제정 후에 실시되어 진단이 종료된 176개의 장대교량에 대한 자료를 수집하고 분석하였다. 장대교량은 중소교량에 비하여 상대적으로 높은 기술수준을 요구하고 결함의 발생가능성 및 파급영향도 크므로 장대교량을 대상으로 한 분석결과가 현황 파악에 큰 문제가 없을 것으로 판단하였다. 176개 교량의 형식은 강상자형교, 프리스트레스트 콘크리트교, 아치교, 트러스교, 사장교, 현수교 등이 대부분이다.

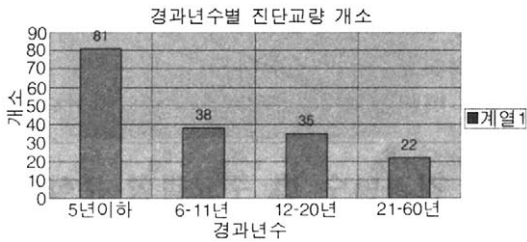


Fig.1. Number of bridges by age

2.2 결함현황 분석

대상교량 176개를 준공 후 안전진단을 실시한 시점까지의 경과된 시간을 기준으로 분류하면 Fig 1과 같다. 그림에서 괄호안의 숫자는 평균경과년수를 나타

내며, 경과년수 5년 이하에 해당하는 교량은 시특법 제정부터 1999년 개정 때까지 하자보수기간이 5년이었기 때문에 하자기간 만료시점에 안전진단을 실시한 교량이 대부분이다. 1999년에 하자보수기간이 10년으로 연장됨에 따라서 대상에 포함되어 11년차에 정밀안전진단을 실시한 교량들의 빈도가 다음으로 많고, 나머지는 시특법 제정 이전에 한번도 정밀안전진단을 실시하지 않다가 시특법 제정으로 처음 정밀안전진단을 받은 교량이 대부분이다. 이 중에서 5년 이하의 교량 대부분은 준공 전에 정밀안전진단을 의무화한 시특법에 의하여 개통 전에 종합적으로 정밀안전진단을 수행한 교량들과 준공 후 5년 시점에 하자만료로 정밀진단을 수행한 교량들이므로 시특법 실시 후의 시공도의 변화를 대표적으로 파악할 수 있다. 경과년수 5년 이하인 교량이 81개, 6~11년 이하가 38개로서 합해서 전체교량의 67.6%에 달하므로, 하자만료기간을 5년 혹은 10년을 기준으로 할 때 시공기간 중에 내재된 결함을 분석하기에 충분한 것으로 판단된다.

Table 1은 총 176개 대상교량들의 정밀안전진단보고서에 수록된 주요결함들을 유형에 따라서 분류한 것이다. 한 교량에서도 여러 종류의 결함유형이 여러 부위에서 나타날 수 있으므로 Table 1에는 발생한 모든 결함을 포함시켰다. 한 교량에서 가장 중요한 결함을 일대일로 표현하는 방법도 있으나, 준공 초기에 발생한 교량의 결함의 상대적 중요도는 교량 공용기간 중에 다양한 발전가능성을 가지므로 대표적 결함을 선정하는 것은 비합리적이다. 교량은 크게 바닥판과 바닥틀로 구성된 상부구조, 교각·교대·기초로 구성된 하부구조, 그리고 교량의 부속장치인 받침장치와 신축이음장치로 구분하였다. 단 상부구조는 콘크리트구조와 강구조가 확연히 다른 거동과 결함유형을 보이므로 둘로 구분하였으며, 교량의 바닥판은 강

상관교가 국내에 극히 소수이고 대부분 콘크리트 바닥판이므로 콘크리트구조에 포함시켰다. 단 균열의 경우 콘크리트구조와 강구조에서의 중요도에 차이가 있으므로 이를 고려하였다. 즉, 콘크리트 교량에서 건조수축균열이나 시공시에 발생한 신축균열 등은 공용중성장가능성이 없고 안전도에 영향을 미치지 않으므로 제외시켰고 안전에 영향을 주는 구조적 균열만을 포함시켰으며, 강교의 균열은 미세균열도 구조적으로 매우 중요하므로 모두 포함하였다. 또한 콘크리트에

발생하는 백태와 같은 결함 등은 제외하였다.

3. 경과년수별 주요결함 분석

총 176개소의 진단교량에서 보수·보강을 요하는 결함이 총 716개소 발생된 것으로 나타났으며, 상·하부의 주요 구조요소에서 발생된 결함은 345개소로서 48.2%를 차지하고 있다. 시트법과 관련 시행령 및 시행규칙에서 규정하고 있는 중대한 결함의 대상범위는 너무 넓고 포괄적이기 때문에 본 연구에서는 방치하면 교량의 안전성에 영향을 미치는 중대한 것으로

Table 1

구분	결함의 유형	경과년수별 결함수량				
		5년이하	6~11년	12~20년	21~60년	계
진단교량수 81		38	35	22	176	
콘크리트 상부구조	철근 노출 및 부식	18	10	13	10	51
	휨균열	9	3	4	4	20
	전단균열	7	3	1	3	14
	부재변형	2	0	0	0	2
	처짐	4	0	1	0	5
	중성화	0	2	1	1	4
	연해	0	0	0	0	0
	강도부족	0	0	0	0	0
강교 상부구조	부식	49	20	18	15	102
	볼트체결 불량	29	14	14	10	67
	부재 변형	8	4	4	7	23
	균열	1	1	11	6	19
	처짐	0	1	1	0	2
하부구조	구조적 균열	10	4	1	3	18
	세굴	4	2	2	3	11
	변형	1	1	0	0	2
	편기설치	1	2	0	0	3
	연단거리 부족	0	1	0	1	2
소 계	143	68	71	63	345	
반침장치	부식	36	9	13	11	69
	편기 및 경사설치	23	9	6	8	46
	작동 불량	10	13	10	12	45
	반침물탈 파손	15	3	6	7	31
	부품 누락 및 탈락	7	7	2	6	22
신축장치	누수	29	13	11	5	58
	파손	29	13	12	4	58
	단차	17	7	6	0	30
	유간 부족 및 과다	4	2	2	4	12
소 계	170	76	68	57	371	
계		313	144	139	120	716

서 보수·보강이 필요한 결함으로 국한하여 정의하였다.

첫째로 콘크리트 상부구조의 경과년수별 결함현황은 Fig.2와 같다.

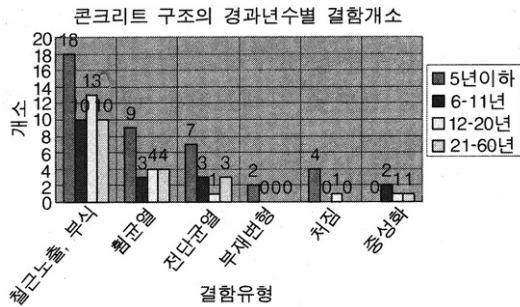


Fig. 2. Num. of defects of concrete superstructure by age

Fig.2에서 철근노출 및 부식은 경과년수가 5년 이하에서 18개소, 11년 이하에서 28개소로 많은 수의 결함이 초기에 나타나고 있음을 알 수 있다. 여기에서 철근노출 및 부식은 방치하게 되면 교량의 내구성과 내하력을 저하시키는 수준의 시공결함을 지적한 것이다. 이것은 잘못된 시공관행이나 부실에서 비롯된 사소한 결함이 교량의 안전에는 중대한 재해로 이어질 수 있음을 의미하며, 공용개시 초기에 발견하여 철저히 조치되어야 할 결함유형이다. 특히, 교량의 안전에 큰 영향을 줄 수 있는 휨·전단균열과 같은 구조적인 균열도 총 22개소가 준공 후 11년 이하에서 발생하였으며 16개소의 결함이 경과년수 5년 이하의 초기결함으로서 73%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. Fig.2에서 부재변형이나 처짐은 장경간 프리스트레스트 박스거더교에서 자주 발생하는 크리프에 의한 과도한 장기처짐이나 프리플렉스교 강재의 횡방향 좌굴 및 보의 편기 설치 등 결함을 말하는 것으로서, 대부분이 준공 직후 또는 공용개시 초기에 발생되어 공용중에 점진적으로 확대되어 교량의 안전성 및 사용성을 크

게 저하시키는 결함유형이다.

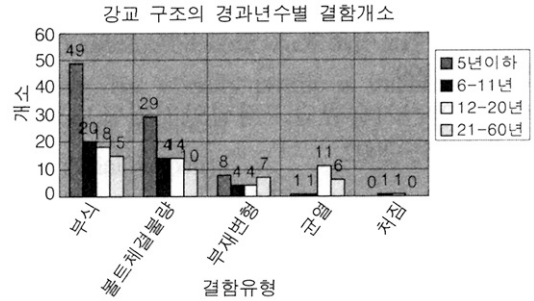


Fig. 3. Num. of defects of steel superstructure by age

둘째로 강교상부구조의 경과년수별 결함현황은 Fig.3과 같다. 강교의 부식은 경과년수 5년 및 11년 이하에서는 총 69개소가 발생되었으며, 이 중 49개소 즉 71%는 경과년수 5년 이하에서 발생되고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 경과년수가 오래되지 않은 상태에서 부식이 발생하고 있는 것은 강재의 장기수명화를 위한 도장조치에 문제가 있거나 시공시 도장불량에 기인한 것으로서 초기부터 보수되어야 할 문제점이다. 볼트체결불량은 시공시 부주의와 결함을 간과함에 따라 초기부터 교량이 지니게 되는 결함이다. 작업자의 수준에 따라서 해당 교량에 전반적인 현상으로 나타나는 경우가 대부분이다. 볼트체결불량은 근접점검 및 간단한 시험에 의해서 발견할 수 있기 때문에 초기에 발견하여 조치가 가능함에도 불구하고 소홀히 취급되어 공용중 진동에 의한 볼트탈락, 풀림, 장력이완 등 2차 결함을 발생시켜 시설물에 큰 영향을 미치고 있다. 부재변형 및 처짐은 강재의 복부판과 압축부재의 국부좌굴 변형 및 과하중에 의한 처짐 등을 말하는 것으로서, 교량의 안전성에 매우 큰 영향을 주어 교량의 붕괴로까지 이어질 수 있는 결함유형이다.

이와 같은 결함들은 준공 단계에서 흔히 알 수 있는 결함임에도 불구하고 은닉되거나 소홀히 취급되어 대형사고로 이어질 수 있다. 강교에서 강재의 균열은

반복 활하중의 누적피로에 의해서 발생하기 때문에 경과년수 11년을 초과하는 교량에서 주로 발생하는 것으로 나타났다. 설계 또는 시공오류에 의해서 부재 연결 상세부, 용접부 및 단면변화부 등에서 결함이 존재하게 되면 공용초기에 균열이 발생하기도 한다. 즉, 용접 결함부, 연결 상세부, 단면변화부의 결함 등은 공용개시 전에 미리 확인하여야 하며 점검을 통한 주기적인 관찰이 병행되어야 한다.

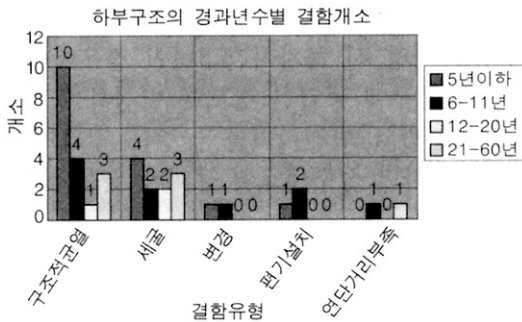


Fig. 4. Num. of defects of substructure by age

셋째로 Fig 4의 하부구조에서 구조적인 균열은 교각 두부에서 휨모멘트가 크게 작용하는 부위의 인장균열과 전단력이 크게 작용하는 지점부 근처의 사인장균열이 대부분을 차지하고 있으며, 전단지간비가 작은 보 또는 깊은 보의 역학적 특성을 고려하지 않고 설계·시공된 경우에 지점부 부근에서 수평전단철근의 부족으로 압축스트럿을 따라 발생하는 활렬인장균열이 많이 발생되고 있다.

이러한 균열은 준공후 사용활하중에 의해서 발생하기 때문에 Fig 4에서 알 수 있는 바와 같이 균열이 공용개시 초기에도 자주 발생되고 있음을 알 수 있다. 하부구조의 기초 세굴은 초기 10년 이내에 많이 발생하는 것으로 나타났다. 이것은 기초의 세굴이 시간의 경과에 따라 점진적으로 발생하기도 하지만, 주로 홍수시에 기초 또는 기초 주변에 세굴의 요인이 되는 요소에 대한 조치가 미흡할 경우 일시에

발생하기 때문이라고 사료된다. 따라서 공용개시 초기에 정밀한 세굴조사와 수리학적 세굴 안전성 검토가 이루어져야 한다고 판단되며, 이와 같은 기본자료의 분석을 통해서 대상 교량들의 수중조사 점검주기를 합리적으로 조정할 수 있을 것이다. Fig 4에서 변형이라 함은 높은 교각에서 주로 발생하는 것으로, 종단경사나 교량신축에 따라 받침에 발생하는 수평마찰력 또는 기초의 지지력 부족 등이 원인이 되는 변형이며, 우물통기초의 편기 설치, 받침부의 연단거리 부족, 설계 및 시공단계의 오류에 의해서도 발생한다. 이러한 변형은 초기 진단에서 간단한 측량과 육안 조사를 통해 쉽게 발견할 수 있기 때문에 결함의 정도에 대한 안전성 검토를 통해서 보수·보강의 시행여부를 초기부터 결정하여야 할 것이다.

4. 교량의 안전성에 미치는 문제점

Fig 2에서 Fig 4까지의 결과로부터 경과년수 별로 교량당 평균 결함 수를 Fig 5 및 Fig 6에 나타내었다.

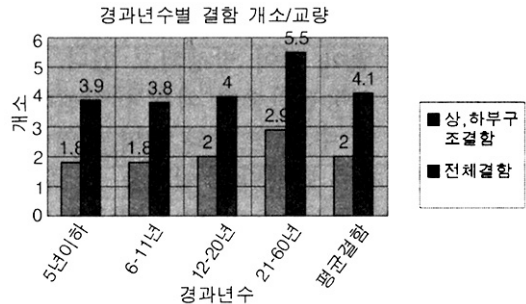


Fig.5. Average num. of defects by age per bridge (divided by 5, 11 year)

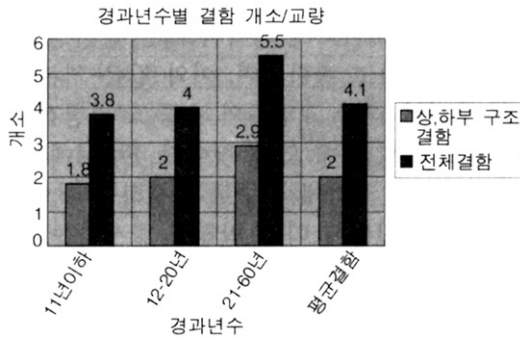


Fig.6. Average num. of defects by age per bridge (totally under 11 year)

Fig5 및 Fig.6에서 좌측막대는 상·하부구조의 결함을 나타내고 우측막대는 반침 및 신축이음장치의 결함을 포함한 전체결함을 말한다.

두그림에서 경과년수별 교량당평균결함수는 21~60년 사이에서 가장 많이 발생하고 있는데, 이것은 공용기간이 20년을 초과하게 되면 피로 균열, 중성화, 염해, 동결융해, 부식 등 공용년수가 장기화되면서 나타나는 열화현상들이 추가되어 나타나는 결과로 판단된다. 그러나 Fig.6에서 경과년수 11년이하 교량에서 나타나는 교량당평균결함수 1.8개와 12~20년 사이에 발생한 평균결함수 2.0개는 비슷한 값을 보여주고 있으며, Fig.5에서 경과년수 5년이하의 교량당평균결함수 1.8개도 위와 동일한 결과를 보여주고 있는 것으로 보아 초기부터 내재되어 있는 결함이 제거되지 않고 점진적으로 확산되고 있다고 판단된다. 즉 초기에 내재된 시공결함이 시특법 제정시 하자기간 5년인 경우나 개정 후 10년인 경우에 동일한 정도가 발생하는 것은 이러한 초기결함의 발견시기를 늦추는 결과가 되며, 이대로 방치하면 성수대교의 붕괴와 같은 대형사고가 재발할 수도 있으므로 시특법의 재개정이 시급하다.

5. 결론

정밀안전진단을 실시한 총 176개의 교량에 대한 결함유형의 분석을 통해서 교량의 안전에 영향을 미치

는 수준의 구조적인 결함이 아직도 시공중에 많이 발생하고 있음을 알 수 있다. 준공 전 정밀안전진단의 무효하지 않을 경우에 이러한 초기결함을 5년 내지 10년 후에 발견하게 되어 연장된 시간만큼 교량의 안전성을 위협하게 되고 수명을 단축시키게 될 것으로 판단된다

또한 준공 직후나 공용개시 초기에 정밀안전진단을 의무화하면 공용개시 초기에 발생될 문제점을 미리 찾아내어 적은 비용으로 보수가 가능하므로 결함의 진전으로 인한 사고의 위험성을 미리 예방하는 효과가 크다. 따라서 초기 정밀안전진단은 시설물의 안전성과 유지관리의 경제성 측면에서 계속 유지하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

결함중에서 공용개시 초기에 발생하는 것으로 나타난 구조적 휨·전단균열과 부재의 좌굴이나 과대처짐은 안전성에 큰 부정적 영향을 주기 때문에 초기에 정밀안전진단을 통하여 원인규명과 근본적인 대책이 강구되어야 한다. 이러한 결함은 전문적 기술과 정밀조사를 통하여 해결해야 하므로 육안조사나 정밀조사가 아닌 정밀안전진단을 실시하여 대책을 수립해야 한다. 