

안전진단 수행과정에서 문제점



고 원 준
인덕대학 토목환경공학과의 겸임교수
g91kwj@induk.ac.kr



민 병 철
인덕대학 토목환경설계과 교수
msilver@induk.ac.kr

1. 서론

성수대교 참사를 계기로 사용성과 내구성의 확보를 위한 정기적인 교량점검이 수행되고 있다. 1등급교에 대해서 엄격한 기준에 의해서 안전진단이 수행되지만 3등급교 이하의 교량이 대다수인 현실에서 현장상황이나 기본적인 계측장비의 정비 등에서 문제가 잔존한다고 생각한다. 이에 대해서 안전진단을 수행했던 본 연구자가 생각한 바를 미흡하나마 정리했다.

본 내용은 기초적 계측기기의 오류와 안전진단현장에 대해서 언급하고 있지만 대부분이 수정되고 있으며 지금도 개선되고 있다고 생각한다.

언급된 내용은 본 연구자의 개인적인 판단이 많으며, 다른 안전진단이 충분히 만족할만한 기준으로 수행되고 있음을 전제로 하고 싶다.

본인이 수행했던 안전진단의 경험과 사례를 중심으로 안전진단 및 계측장비에 유의사항에 대해서 서술하고자 한다.

2. 안전진단 및 계측장비의 고려할 점

2.1 변형률게이지 및 계측장비

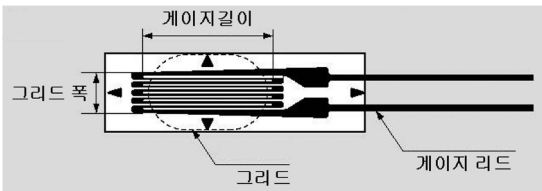
국내에 발표되는 논문가운데에서 변형률의 계측을 근거로 하는 시험 및 실험자료에 대해서 부끄럽게도 신뢰를 할 수 없다는 것이 본인의 생각이다.

토목, 건축공학의 안전진단 또는 시험체, 실험체연구에서 기본이 되는 요소인 변형률게이지는 가장 기초적 측정장치라고 할 수 있겠다. 변형률게이지는 일반적인 기계, 토목, 건축, 차량 등에서 시작해서 의료범위까지 넓게 사

용된다.

변형률측정은 변형률에 의한 변형량을 알고 싶을 경우, 변형률로부터 응력으로 환산하고 그 재료 또는 이를 이용한 구조물의 안정성을 알기위한 경우, 변형률로 변환하여 각종의 물리량을 간접적으로 알고 싶은 경우 등의 목적으로부터 이용된다.

변형률측정의 일반적인 개요와 구성요소는 다음과 같다.



〈Fig. 1〉 변형률 게이지의 명칭 및 구조

Fig. 1과 같이 변형률 게이지는 금속으로 구성된 그리드와 게이지리드선으로 이루어진다. 금속(저항체)은 외력을 신축시키면 일정범위에서 이 저항치도 증감한다. 따라서 변형률이 생기는 측정대상물에 전기절연체를 넣어서 접착시키면 측정대상물의 신축에 비례해서 금속이 신축된 저항치가 변화한다. 변형률게이지(전기저항식)는 이 저항변화에 의해서 변형률을 측정하는 센서이다.

게이지길이는 변형률게이지에서 변형률 수감부의 측정축방향길이, 게이지저항은 상온에 있어서 변형률 게이지를 접착시키지 않고 특별한 외력을 주지 않은 상태의 전기저항치이다.

$$\epsilon = \frac{\Delta R / R}{K} \quad (1)$$

여기서 ϵ 은 변형률, ΔR 은 변형을 받을때 저항변화량, R 은 게이지저항, K 는 게이지률이다.

게이지률은 측정대상재료에 접착되어진 변형률게이지에 이 변형률게이지의 축방향으로 가해지는 일축응력에 의해서 생기는 전기저항변화률과 이 응력에 의한 축방향 변형률과의 비율이다.

$$K = \frac{\Delta R / R}{\epsilon} \quad (2)$$

TYPE <u>FLA-3-11-5LT</u>			
LOT NO.	A510511	GAUGE LENGTH	3 mm
GAUGE FACTOR		2.14	±1%
GAUGE RESISTANCE	119.5±0.5 Ω	QUANTITY	10
TEMP.COMPENSATION FOR	11 ×10 ⁻⁶ /°C	TEST CONDITION	23°C 50%RH
TRANSVERSE SENSITIVITY	0.0 %	BATCH NO.	ZF28T
LEAD WIRES			
10/0.12 3W 5m			

〈Fig. 2〉 FLA-3-11-5LT 제품라벨

Fig. 2는 TML(東京測器研究所)의 변형률게이지의 FLA-3-11-5LT제품의 라벨 예이다.

F항은 변형률게이지의 종류를 의미하며 F는 일반용계이지를 의미한다.

LA항은 변형률게이지의 형태로 LA는 단축형태를 의미한다.

3항은 변형률게이지의 길이로 단위는 mm이다.

11항은 온도보상대상재료로서 11은 연강을 의미한다.

5항은 리드선의 길이를 의미한다.

LT는 리드선의 기호로서(L은 2선식, LT는 3선식을 의미한다.

리드선은 일반적으로 2선식과 3선식으로 나누어지는데 변형률 게이지와 리드선의 결선은 다음과 같다.

〈Table-1〉 리드선 결선법에 따른 게이지연결방법 도해

리드선의 결선법 (1)	변형률게이지의 연결 (2)
2선식	
3선식	

(Table-2) 리드선의 결선에 따른 K_0

2선식의 경우 (1)	3선식의 경우 (2)
$A = \frac{R}{R+rL}$	$A = \frac{R}{R+\frac{rL}{2}}$
$K_0 = \frac{R}{R+rL} = AK$	$K_0 = \frac{R}{R+\frac{rL}{2}} = AK$

변형률게이지 측정에서 변형률게이지와 측정기사이에서 리드선을 길게 직접연결하면, 리드선의 선저항에 의해 걸 보기 게이지물이 저하하기 때문에 Table 2와 같은 보정이 필요하다.

여기서 r 은 리드선 1m당의 왕복저항치(Q/m), L 은 리드선의 길이(m)이며 K_0 는 보정된 게이지물이다.

실제 시험에서 가장 문제가 되는 것은 변형률게이지로부터 변형률측정기(Data Logger)로 변형률치를 받을 때 필요한 변형률측정기의 계수설정치, C_s 의 값이다.

$$C_s = \frac{2.00}{K_0} \quad (3)$$

변형률측정기(Data Logger)를 이용하여 변형률 값을 구할 때 가장 중요한 특성치는 C_s 라 할 수 있겠다. C_s 의 값이 크면 변형률 시험치는 상승하고, 값이 낮으면 변형률 시험치는 하락한다. 변형률은 보통 단위로 변하기 때문에 변화에 민감하게 변동한다.

하지만 본인이 목격했던 다른 연구자들은 C_s 설정법을 몰라서 임의적으로 제각기 시험치에 적용하는 경우가 다반사였다. 이로 인해서 시험치에 대한 신뢰도결함의 문제가 심각했다.

일반적으로 철근콘크리트부재에서 이용되는 콘크리트 변형률을 측정하기위한 변형률게이지, FLA-30-11이다.

FLA-30-11에 대한 C_s 를 게이지물,로 착각해서 2.14를 그대로 사용하는 경우, 실험적인 경험으로 통해서 $2.14/2=1.07$ 로 사용하는 경우, $C_s=1$ 로 설정하고 응력-변

형률도를 그린 후 고유의 변형률특성치(철근의 항복변형률 또는 콘크리트 인장변형률)를 기준하여 환산해서 다시 그리는 경우도 있었다.

Table 2와 같이 리드선의 결선에 의한 보정치를 적용하지 않는다면 Eq. (3)으로부터 얻어지는 $C_s = 2.00/2.14 = 0.935$ 의 값이 정확한 값이다.

임의의 시험치, 2의 배수 입력값(1, 2, 4, ..., 4096, 8192)을 이용해서 C_s 의 평균(AV.)과 모집단 표준편차(STDVA.)로 비교하면 다음과 같다.

(Table-3) 임의 값에 대한 C_s 의 평균과 표준편차

Input (1)	$C_s(=0.935)$ (2)	$C_s(=1.0)$ (3)	$C_s(=1.07)$ (4)	$C_s(=2.14)$ (5)
1	0.935	1	1.07	2.14
2	1.87	2	2.14	4.28
4	3.74	4	4.28	8.56
8	7.48	8	8.56	17.12
16	14.96	16	17.12	34.24
32	29.92	32	34.24	68.48
64	59.84	64	68.48	136.96
128	119.68	128	136.96	273.92
256	239.36	256	273.92	547.84
512	478.72	512	547.84	1095.68
1024	957.44	1024	1095.68	2191.36
2048	1914.88	2048	2191.36	4382.72
4096	3829.76	4096	4382.72	8765.44
8192	7659.52	8192	8765.44	17530.88
AV.	1094.15	1170.21	1252.13	2504.26
STDVA.	2174.40	2325.56	2488.35	4976.70

변형률데이터가 상당히 민감하게 변화하는 작은 값임을 고려할 때, 균열폭 산정에서 가 적절히 적용되지 않는다면 균열폭이 과대평가됨을 알 수 있다.

본인이 수행했던 철근콘크리트의 부착응력시험에서 철근표면과 콘크리트 인장부에 FLA-30-11을 동일하게 부착하여 사용했다. 보통은 변형률게이지를 종류에 따라 주문하지 않고 철근콘크리트실험용이라고 하면 계측회사에서 FLA-30-11등급의 제품을 공급한다.

이 때문에 대학교의 콘크리트연구실에서 사용되는 변형률게이지는 대동소이하며, 상대적으로 비싼 소모품인 변형률게이지를 충분히 구입할 수 없기 때문에 대부분이

1종류만 구입한다.

일반적으로 철근콘크리트부재 시험에서는 철근의 항복변형률과 콘크리트의 인장변형률을 알기위해서 변형률게이지를 부착한다. 그러나 철근과 콘크리트에는 각각 다른 변형률게이지를 부착해야한다는 것을 대부분 모르고 있다.

불균질 재료의 경우에 변형률을 평균할 수 있는 적당한 길이가 필요하다. 특히 콘크리트와 같은 불균질 재료의 측정에는 골재직경에 3배정도되는 게이지길이를 가진 게이지가 사용되어야 한다. 이러한 경우는 FLA-30-11은 적당하다.

[Table-4] 게이지길이에 따른 적합한 측정대상

게이지길이 [mm] (1)	측정대상 (2)
0.2~1	응력집중 측정
2~6	금속일반에 대한 변형률측정
10~20	물दार, 목재, FRP등의 일반측정
30~120	콘크리트의 일반측정

철근과 같은 재료에 대해서 게이지길이와 측정대상재료의 탄성과 종파속도에 따라서 결정되는 응답성을 만족시켜야 한다.

[Table-5] 게이지길이에 따른 측정재료의 응답성

게이지 길이 [mm] / 측정재료 [KHz]	0.2	1	3	5	10	30	60
강재	660	530	360	270	170	-	-
콘크리트	-	-	-	-	120	50	20

구조시험에서 필수적인 UTM의 로드셀 역시 변형률게이지식 변환기이기 때문에 변형률게이지와 유사한 원리에 의해서 작동된다.

변환기의 용량에 대한 출력(정격출력)은 mV/V의 형태이며, 이는 최대부하를 받을 때 출력전압으로 인가전압 1V에 해당하는 출력으로 표시된다.

예를 들어 1.5mV/V라는 것은 인가전압 1V때, 용량까지 부하가 될 때 출력전압이 1.5mV라는 것이다. 만약 인가전압 2V일 때는 1.5mV/2V=3mV이다.

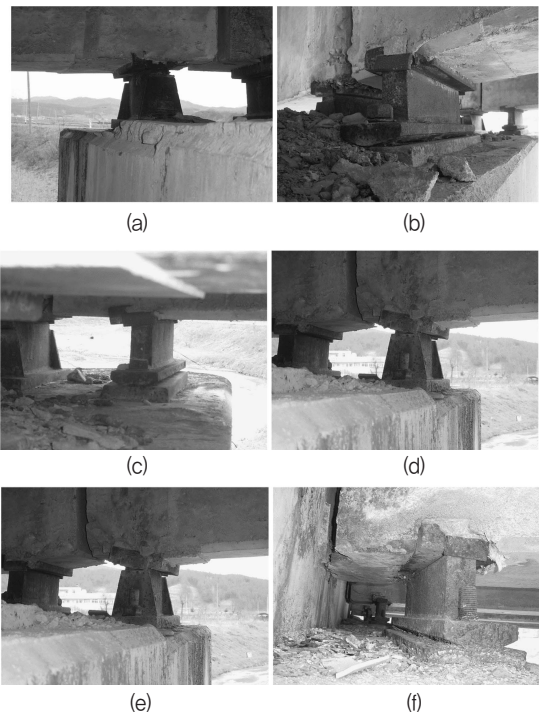
이때 변환기의 출력전압이 3V가 되며, 변환식을 거쳐서 게이지측정기의 게이지를, K가 계산되어진다.

하지만 본연구자의 시험실에서 UTM용 새로운 로드셀을 주문설치했고 보정을 위해 계측회사 전문가가 방문했다. 본인은 로드셀의 인가전압과 게이지를 회사 전문가에게 물었으나 상기의 사항을 전혀 모르고 있었다. 회사 전문가는 기준시험체 같은 것으로 하중을 주면서 시행착오방식으로 로드셀을 보정하고 있는 것을 보고 놀란 경험이었다.

2.2 교좌장치

DB24와 같은 1등급교에 대해서는 교좌장치의 교체와 유지가 대체적으로 잘 이루어진다고 할 수 있다. 본인이 수행한 안전진단의 DB13.5 교량의 교좌장치를 본다면 놀라지 않을 수 없다. 이에 대한 예는 다음과 같다.

Fig. 3과 같은 교량상태를 볼 때, 안전진단 책임자라면 교좌장치의 교체를 제시할 수 밖에 없다. 하지만, 과거에



(Fig. 3) DB-13.5 교량에서 교좌장치의 파손 및 부식상태

비해서 저렴해졌다고 하나 내진기능이 있는 교좌장치와 교좌장치를 설치하기 위한 장비와 설치비용을 고려할 때, 신규로 건설하는 것이 장기적으로 저렴하다고 생각한다.

교좌장치의 교체를 위해서 우선 교량상판을 유압잭으로 상승시켜야한다. 대부분의 교량이 연속교형태인 상황에서 최소 5 mm ~ 10 mm로 상판을 인상시켜야한다. 동시에 상판을 균일하게 상승시킨다는 것은 어려운 일이며, 지점높이의 변화가 상판구조물에도 악영향을 미친다는 것도 잘 알려진 사실이다. 기존 교좌장치를 교체하기 위해서 교좌장치와 콘크리트부와 결합되어진 부분은 물리적 방법으로 철거되며 대부분이 인력으로 수행되기 때문에 교각상부에 균열과 주철근의 손상에 영향을 줄 수 밖에 없다. 또한 1등급교와 같이 여유공간이 있어서 작업여건이 좋은 경우가 아니라면 작업공간의 확보 자체가 어렵다.

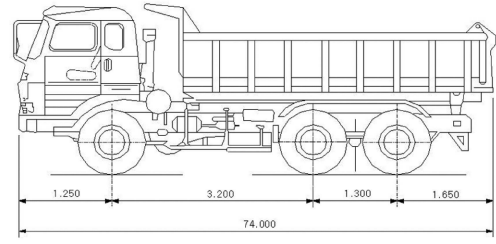
이러한 공간을 확보하기 위해서 교각에 추가구조물을 설치해야만 한다.

신규교좌장치가 설치되기 위해서 기존 교좌장치가 있던 위치에 새로이 보강을 위한 철근배근을 필요하며, 부분적으로 교좌장치부에 거푸집을 설치하여 콘크리트 타설을 하며 최소 7일이상의 양생이 필요하다.

상기의 내용을 고려해 볼 때 교좌장치를 교체한다는 것은 상당한 비용과 시간이 추가로 부담된다는 것이 자명한 사실이다. 또한 3등급교 이하의 도로가 대부분인 지방자치단체에서 근무하는 공무원조차도 교좌장치의 교체를 수행한 경험이 없다는 것은 쉽게 확인할 수 있었다. 결국 교좌장치의 교체는 안전진단보고서에서 이야기만 되는 부분이라고 생각된다.

2.3 DB하중 및 재하차량

교량에 대한 안전진단에서 교량평가에 핵심적인 부분은 실제차량을 재하시키는 정적재하시험과 동적재하시험이라 할 것이다.



〈Fig. 4〉 15tonf 덤프트럭의 차량

정적재하시험은 작용 외력에 대한 대상교량의 정적거동특성을 파악하고 내하력 평가를 위한 정적 범위 및 응력의 응답비를 얻기 위해서 실시한다. 동적 재하시험은 구조물의 동적 거동을 조사, 측정하기 위한 것으로 교량의 실충격계수와 고유진동수 등의 동적 특성을 측정 기록하여 교량의 안전성을 검토하기 위한 기본자료이다.

본인이 수행했던 3등급교(DB-13.5) 안전진단의 재하시험에 사용된 시험차량은 15 tonf 덤프트럭으로서 1대를 재하 하였고 만재된 상태의 각 차륜하중을 계량소에서 측정기록했다.

DB-하중제원과 본연구자가 시험에 이용한 트럭의 제원을 Table 6과 같다.

DB하중과 실제 시험차량의 총중량을 비교하여 보면, 전륜하중이 크게 차이가 있음을 알 수 있다.

이는 DB하중을 재하하기 위한 기준차량이 없기 때문이

(Table-6) DB-하중의 제원과 실제 재하차량

교량등급 (1)	하중 (2) W(tonf)	총중량 (3) 1.8W(tonf)	전륜하중 (4) 0.1W(kgf)	후륜하중 (5) 0.4W(kgf)
1등급	DB-24	43.2	2400	9600
2등급	DB-18	32.4	1800	7200
3등급	DB-13.5	24.3	1350	5400
15 tonf덤프		22.9	2298	4596

다. 하중적재가 차량운전사의 기준에 의해서 만재되기 때문에 정확한 하중이 재하될 수 없다. 또한 안전진단업체가 상대적으로 영세하기 때문에 이미 운전자가 임의로 만재시킨 차량이 도로교시방서의 하중기준에 맞지않는다고 해도 추가비용을 들여서 교량등급에 맞는 DB하중을 맞출 수 없기 때문이다. 이러한 이유로 실제 재하시험으로 얻어진 정적, 동적데이터가 DB하중을 정확히 반영한다고 말할 수 없다.

2.4 철근배근과 공시체

안전진단항목에서 철근배근과 피복상태를 점검하기 위한 철근탐사시험이 있다. 점차적으로 기술이 발달되어서 철근 위치 탐지가 향상되고 있지만, 불균질한 철근콘크리트 면에 대해서 철근배근위치와 피복두께를 정확히 찾을 수 있는지는 의심하지 않을 수 없다.

기존 철근탐사장비 역시 실험 전 Check를 위한 샘플에 대해서 정확히 철근배근상태를 보이지만, 실제 타설된 교량에서 철근의 위치나 피복두께를 정확히 반영하는지, 안전진단 실무에 종사했던 본인은 정확하지 않다고 말할 수 밖에 없다.

특히 교대와 같은 부분에서 철근위치를 대략적으로 알 수 있다고 해도, 교량 상판에서 철근위치를 구한다는 것은 더욱 어렵다고 생각된다.

현장에서 교량의 콘크리트 강도를 판정하기 위해서 코어채취가 필요하다. 적절한 코어채취를 위해서 철근이 배근되지 않은 부분을 알아야한다. 하지만 교량상판의 철근 (Table-7) 철근탐사장비의 예

사용장비 (1)	사용방법 (2)	결과 (3)
		
- Ferroscan RV-10 - Range: 600×600mm, 120mm(Depth)	- 콘크리트 구조물에 전면에서 Scan작업을 실시하여 측정	- 철근배근상태 및 피복두께를 측정

위치를 알지 못하기 때문에 다수의 채취홀을 뚫어야 되며, 철근이 코어를 통과하는 경우에는 코어채취작업 중간에 중지해야한다.

만약 철근이 통과하지 않는 부분의 코어지점을 확보한다고 하더라도 1등급교와 같은 상위교량이 아닐 경우에는 철근이 배치되지 않는 플랜지부분에서 시편을 채취할 수 밖에 없다.

일부 교량은 교량상판의 높이가 20 cm가 되지않는 경우도 빈번하기 때문에 강도시험을 위한 기준 공시체 높이 20 cm 또는 30 cm이상을 가진 코어를 채취할 수 없는 경우도 많다.

이에 대해서 본 연구자는 교량 최초타설 시에 교대와 상판의 위치에 쉽게 분리할 수 있는 유럽형태의 Square형 콘크리트공시체 3개 이상이 설치되어야 한다고 생각한다. 국내와 같은 원통형 공시체의 경우 타설이 다소 불편하기 때문이다. 상기와 같은 조치가 이루어진다면 보다 빠르고 효율적인 코어채취와 강도평가가 가능하리라고 생각한다.

2.5 균열폭

철근 콘크리트 부재의 안정성 면에서 휨, 전단내력을 확보하고, 사용성 및 내구성의 확보를 위해서 콘크리트 부재에 발생하는 균열폭의 허용균열폭을 제한할 필요가 있다.

국내의 허용균열폭의 기준은 다음과 같다.

(Table-8) 피복두께에 따른 허용 균열폭(mm)

강재의 종류 (1)	강재의 부식에 대한 환경조건			
	건조한 환경 (2)	습윤 환경 (3)	부식성 환경 (4)	고 부식성 환경 (5)
철근	0.4mm와 0.006C _c 중 큰값	0.3mm와 0.005C _c 중 큰값	0.3mm와 0.004C _c 중 큰값	0.3mm와 0.003C _c 중 큰값
프리스트레싱 긴장재	0.2mm와 0.005C _c 중 큰값	0.2mm와 0.004C _c 중 큰값	-	-

여기서 C_c는 최외단 철근의 표면과 콘크리트 표면 사이의 콘크리트의 최소피복두께(mm)

철근콘크리트의 휨균열을 전공한 본인은 과연 휨균열 폭이 Table 8에서 규정한 0.40 mm가 안전진단에서 최대 균열폭 허용한계기준이 되어야 하는가?에 대해서 의문을 가지고 있다.

Haldane은 균열기술자 35명, 건축가18명, 건축과학생 101명, 60명의 일반인을 대상으로 하여 소형 콘크리트슬래브에 0.09 ~ 0.79 mm까지 균열에 대해서 허용균열폭을 조사한 심리테스트를 수행했다. 이 결과에 의한다면 건축가가 균열에 대해서 가장 엄한 기준을 주고 있다. 대부분의 경우는 0.25 mm이상의 균열폭을 허용균열폭의 한계로 생각하고 있다.

일본균열연구위원회에서 다수의 위원들에게 수행한 설문조사결과가 반드시 보수가 필요한 범위의 균열폭영역의 최대값을 철근과 직각방향의 균열인 경우 대략 0.95 mm, 철근방향에 따른 균열인 경우에는 0.65 mm정도까지 철근뿔개의 두께에 따라서 구별하고 있다.

상기의 내용을 보면, 허용 균열폭에 대한 기준은 구조물을 평가하는 사람의 입장에 따라서 많은 차이가 있다고 생각된다.

시방서상 균열폭에 대해서 0.4 mm이하라는 엄격한 규제가 요구되지만 실제 안전진단현장에서 1.0 mm이상의 균열폭을 갖는 교량은 너무나 많다. 실제 균열에 대한 보수로 여러 가지 공법이 제시되고 있지만 시멘트풀로 균열을 매우는 것보다 얼마나 많은 구조적 효율성을 주는지는 의심된다.

본연구자는 부식성환경이 아니거나 PS긴장재를 사용하지 않는다면, 안전진단에서 발생되는 1.0~1.5 mm이하에 대한 균열면의 처리는 철근부식을 막을 정도의 시멘트풀 표면마감으로 적절하다는 견해를 가지고 있다.

또한 철근콘크리트 교량에서 대규모의 콘크리트 탈락

이나 심한 박리가 없다면 무난히 사용할 수 있다는 것이 철근콘크리트 구조물의 장점이고 이러한 장점을 살리는 것이 효율적이지 않을까라는 생각을 한다.

3. 결론 및 제언

비록 미흡하지만 안전진단과 시험을 하며 느꼈던 경험을 근거로 하여 개선되거나 고려되어야 될 점을 일부 언급했다.

공학발전 요소가 시험을 기본으로 하는 자료축적이 근간임을 생각해 볼 때, 기초가 되는 자료의 절대적인 신뢰가 필요하다.

이미 대부분의 경우 많은 개선과 노력이 기울여지고 있다고 생각하나 연구자 개개인 자신이 경험했던 오류와 시행착오를 언급하며, 다른 연구자에게 전달될 때 시험자료의 신뢰성 문제가 다소나마 해소될 것이라 생각한다.

참고문헌

1. Haldane, D. (1976) The Importance of Cracking in Reinforced Concrete Members, Int. Conf. Performance Build. Struct., GBR, pp.99~109
2. 東京測器研究所 (2002) 製品總合カタログ2001-2002
3. 日本コンクリート工學協會 (1987) 콘크리트調査,補修・補強指針