

노후화된 국내 콘크리트 교량에 적합한 비파괴 시험 결과의 평가

Evaluation of Non-destructive Test Results for Existing Concrete Bridges in Korea

이 학 은* 윤 영 수** 백 영 인*** 이 병 철**** 김 영 민***** 정 우 용*****
Lee, Hak Eun Yoon, Young Soo Baik, Yeong In Lee, Byung Chul Kim, Young Min Jung, Woo Yong

ABSTRACT

Non-destructive field tests of the concrete has achieved increasing acceptance for the evaluation of existing concrete structures. As two major testing methods, this paper recommends the proper empirical relationship between the rebound number together with the ultrasonic pulse velocity and the core strength to fit the old concrete bridges in Korea.

1. 서론

국내에 많은 교량구조물이 열화와 부실공사로 인하여 안전진단을 필요로 하고 있다. 더욱이 몇해전 대형구조물 사고와 구조물의 장기 열화로 인하여 안전진단의 중요성은 더욱 커지고 있으며 안전진단의 방법과 신뢰성에 대한 연구가 활발해지고 있다.⁽¹⁻¹⁰⁾ 이러한 검사의 방법중 비파괴 시험은 비록 파괴 시험에 비하여 정확한 결과를 도출할 수는 없을지라도 간단한 사용법과 저렴한 경비로 안전진단에 많이 사용되고 있다. 그러나 이러한 보편적인 사용에도 불구하고 비파괴 시험 자체의 신뢰성과 여러 환경조건에 대한 적용의 문제점은 끊임없이 제기되고 있다. 본 연구에서는 여러 가지 비파괴 시험중 가장 대표적인 반발도법과 초음파법을 중심으로 적용의 신뢰성을 논하고 실제 국내교량의 적용결과를 바탕으로 문제점과 적용방법의 기준을 제시하고자 한다. 또한 기존의 적용방법 기준이 대부분 재령이 얼마 안되는 공시체를 바탕으로 하고 있어 실제로 문제가 되고 있는 오래된 교량에 대하여는 그 적용에 문제점을 가지고 있으므로 본 연구에서는 비교적 오래된 교량을 위주로 조사대상을 선정하였으며, 실제 경부고속도로상의 노후한 교량에서의 현장 비파괴 시험을 수행하여 제안한 평가식을 검증해 보았다.

*정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

**정회원, 고려대학교 토목환경공학과 조교수

***대림산업(주) 기술연구소 ASEM 팀장

****한국도로공사 도로연구소 부장

*****정회원, 고려대학교 토목환경공학과 대학원

*****정회원, 고려대학교 토목환경공학과 대학원

2. 비파괴 시험의 신뢰성

비파괴 시험이란 재료의 특성을 파악하기 위하여 그 특성값을 직접적으로 실험하는 것이 아니라 관계된 특성을 간접적으로 시험하여 원하는 값을 유추하는 것이다. 대표적인 시험법인 반발도법인 경우 표면경도에서 강도를, 초음파법인 경우 매질통과 속도에서 압축강도를 추정하는 것이다. 분명히 이러한 유추의 관계는 논리적으로 상관관계를 가지고 있으나 여러 가지 강도 영향인자를 모두 반영하기에는 부족함이 있다. 즉 같은 반발도값을 가지더라도 물-시멘트 비, 표면의 골재 분포, 습도, 내부적 결함, 코아채취 위치, 절삭작업, 철근의 유무 등에 의하여 다른 압축강도를 가질 수 있다는 것이다. 현재 연구중이거나 발표된 추정관계는 대부분 균일한 조건을 사용한 공시체를 바탕으로 하고 있으므로 이 두가지 요소만의 상관관계에는 문제가 없다. 그러나 실구조물의 적용에 있어서는 결과에 영향을 주는 여러 가지 요소를 모두 고려할 수 없는 것이 사실이다. 더군다나 재령이 오래된 교량의 경우 열화와 풍화 등으로 인해 이러한 가변적인 요소가 더욱 커진다. 그러므로 비파괴 시험의 실구조물의 적용을 위해서는 원론적인 측면에서 공시체에 의한 추정관계의 제안도 중요하지만 실구조물의 조사율 통한 추정관계도 중요하다고 하겠다.

3. 조사대상과 방법

본 연구에서는 국내 콘크리트 교량의 비파괴 조사의 기준을 분석하기 위하여 시설안전기술공단, 한국도로공사, 서울시 건설안전관리본부, (주)대우 등에서 조사한 200여개의 교량에 대한 정밀안전진단 보고서의 비파괴 조사의 내용을 검토하였으며 국내 콘크리트 교량에 적합한 비파괴 조사 평가기준을 위한 자료를 정리하였다. 또한 기존 대부분의 강도 추정식이 재령이 얼마 안되는 공시체를 바탕으로 하고 있어 실제로 재령이 수년에서 수십년이 된 오래된 교량에 대하여는 그 적용에 문제점을 가지고 있으므로 안전진단이 필요한 오래된 교량에 적용할 수 있는 추정강도식을 제안하기 위하여 비교적 오래된 교량을 위주로 조사대상을 선정하였다.

비파괴 시험의 추정 강도식을 이상적으로 유도하기 위해서는 동일한 부위에 대하여 코아강도값 3개 이상의 평균과 비파괴값을 연결해야 하지만 국내 콘크리트 교량 200여권의 안전진단보고서에서는 그러한 자료를 찾기 어려워 근접한 부위의 코아강도값 평균과 비파괴값을 비교하거나 동일한 부위의 하나의 코아강도값과 비파괴값을 비교하였다. 조사결과 20여개의 교량에 대해서 적합한 자료를 찾을 수 있었으며 비파괴값으로는 반발도값과 초음파속도를 조사하였다. 교량의 재령은 모두 재령계수 0.63과 0.64를 사용하는 오래된 교량을 조사 대상으로 하였다. 표 1과 표 2는 200여권의 안전진단보고서에서 추정강도식을 유도하기 위해 적합한 자료만을 정리해 놓은 것이다.⁽¹¹⁻³⁰⁾

4. 조사결과와 분석

4.1 반발경도법

콘크리트의 반발경도를 이용한 강도 추정은 여러 연구자들에 의해 많은 식이 제시되어 왔다. 그러나 그림 1에서 제시된 여러 식들이 다른 형태를 보여주듯이 강도추정식의 적용이 사용자에게 따라 달라질 수 있고 국내의 오래된 콘크리트 교량을 위한 추정식은 적합한 것이 없다고 하겠다.

표 1 선유고가차도의 4개 교량의 비파괴값과 코아강도

| 교량 | | 보정 R값 | 초음파 속도 (km/sec) | 코아강도 (kg/cm ²) | |
|--------|--------|-------|-----------------|----------------------------|-------|
| 교량 이름 | 부위 | | | | |
| 선유고가차도 | 교대 | 40.55 | 3.91 | 271 | |
| | 교대 | 41.65 | × | 229 | |
| | 교대 | 47.75 | 3.97 | 287 | |
| | 교대 | 49.05 | 3.81 | 318 | |
| | 교대 | 36.05 | × | 257 | |
| | 교각 | 41.35 | 3.67 | 252.5 | |
| | 교각 | 42.95 | × | 282 | |
| | 교각 | 46.20 | × | 250 | |
| | 교각 | 39.60 | × | 265 | |
| | 교각 | 36.75 | × | 298 | |
| | 슬래브 | 43.3 | × | 356 | |
| | 슬래브 | 37.65 | 3.96 | 271 | |
| | 슬래브 | 55 | × | 339 | |
| 탄천교 | 교각 | 47 | × | 249 | |
| | 슬래브 | 54 | 3.935 | 304 | |
| 가화천교 | 교각 | 53.5 | 3.760 | 438 | |
| | 교각 | 42.0 | 3.934 | 216 | |
| | 교각 | 46.0 | 3.839 | 204 | |
| | 파라펫부 | 48.0 | 3.702 | 352 | |
| 광진교 | 교각 | 42.56 | 3.67 | 331.7 | |
| | 교각 | 42.00 | 3.74 | 170.5 | |
| | 교각 | 42.76 | 3.35 | 283.1 | |
| | 교각 | 42.88 | 3.32 | 323.4 | |
| | 교각 | 43.72 | 3.56 | 302.8 | |
| | 교각 | 44.84 | 3.68 | 279.7 | |
| | 교각 | 43.52 | 3.66 | 332.8 | |
| | 교각 | 40.48 | 3.49 | 186.6 | |
| | 교각 | 41.52 | 3.59 | 267 | |
| | 교각 | 41.36 | 3.62 | 399.9 | |
| | 교각 | 42.24 | 3.29 | 355 | |
| | 교각 | 41.80 | 4.09 | 276 | |
| | 교각 | 43.44 | 3.52 | 390 | |
| | 교각 | 44.04 | 3.52 | 349 | |
| | 교각 | 43.04 | 3.47 | 361 | |
| | 교각 | 45.28 | 4.09 | 337.3 | |
| | 교각 | 48.12 | 3.26 | 337.9 | |
| | 교각 | 48.48 | 4.09 | 309.9 | |
| | 교각 | 43.84 | 3.36 | 182.5 | |
| | 교각 | 43.56 | 4.10 | 209.3 | |
| | 교각 | 41.76 | 3.35 | 409 | |
| | 현저고가차도 | 교대 | 48.0 | 3.94 | 271.1 |
| | | 교대 | | | 184.3 |
| | | 교대 | 44.4 | 3.84 | 209 |
| | | 교대 | 47.1 | 3.97 | 205 |

표 2 청평대교의 14개 교량의 비파괴 값과 코아강도

| 교량 | | 보정 R값 | 초음파 속도 (km/sec) | 코아강도 (kg/cm ²) | | | |
|-----------|-----|------------------------------|-----------------|----------------------------|-------|-------------------|-----|
| 교량 이름 | 부위 | | | | | | |
| 청평대교 | 슬래브 | 48 | 3.961 | 218.3 | | | |
| | 슬래브 | 46.9 | 3.885 | 251.6 | | | |
| 신갈J/C 4육교 | 슬래브 | 35.62 | 4.43 | 443 | | | |
| | 슬래브 | 34.41 | 4.46 | 440 | | | |
| 금호대교 | 교대 | 48.40 | × | 273 | | | |
| | 교대 | 48.55 | 2.91 | 339 | | | |
| | 슬래브 | 59.65 | 3.62 | 447 | | | |
| | | 50.10 | 3.29 | 445 | | | |
| 양양대교 | 교대 | 42 | 3.907 | 350 299 | 324.5 | | |
| | 교각 | 42 | 3.898 | 294 282 | 288 | | |
| | 교각 | 43 | 4.107 | 256 228 | 242 | | |
| | | 슬래브 | 55 | 4.167 | 234 | | |
| 서울교 | 교각 | 48 | 3.821 | 280 | | | |
| | 교대 | 42 | 3.968 | 205 | | | |
| | 슬래브 | 56.7 | × | 490 409 | 449.5 | | |
| 양화교 | 슬래브 | 33.1 | 3.32 | 186 | | | |
| | 슬래브 | 38.7 | 3.83 | 155 | | | |
| | 교대 | 37.40 | 3.73 | 213 | | | |
| | 교대 | 40.56 | 3.67 | 211 | | | |
| | 교각 | 50.50 | 3.62 | 278 | | | |
| 한남 1교 | 슬래브 | 45.8 55.5 54.5 49.1 | 51.2 | 4.444 3.636 3.921 | 4.000 | 345 331 389 | 355 |
| 송파육교 | 슬래브 | 54.24 | 4.19 | 352 | | | |
| | 슬래브 | 55.28 | 4.09 | 335 | | | |
| 성동교 | 교대 | 49.89 | 4.02 | 245 | | | |
| | 교대 | 51.11 | 4.05 | 219 | | | |
| 능안육교 | 슬래브 | 51.33 | 4.19 | 271 | | | |
| | 교대 | 49 | 4.15 | 249 | | | |
| 파정육교 | 슬래브 | 49 | 4.14 | 284 | | | |
| | 교대 | 43.25 | 4.04 | 241 | | | |
| 삼평육교 | 슬래브 | 55.68 | 4.22 | 481 | | | |
| | 교대 | 50.1 | × | 361 | | | |
| 잠실철교 | 교대 | 41 | × | 227.9 | | | |
| | 교대 | 54.5 | × | 210.1 | | | |
| | 교각 | 48.5 | 3.794 | 156 | | | |
| | 교각 | 41 | 3.784 | 192.9 | | | |
| | 교대 | 32 | 3.759 | 127.1 | | | |
| 광교교 | 교대 | 41 | 3.68 | 134.3 | | | |
| | 슬래브 | 46.9 | × | 258.8 | | | |

그림 1에서 제안식 (1)은 1차 회귀 분석을 통한 반발도에 따른 예상 압축강도를 나타낸 식이며 제안식 (2)는 1차 회귀분석에 대한 10%의 확률적 저항도가 일어날 강도식을 나타낸 것이다. 이러한 수법은 ASTM C 94-74에서 권장되는데 강도설계법으로 설계된 경우 통상 10% 강도시험이 설계강도 이하로 떨어지는 것이 허용된다는 규정이 ACI 214-77에 나타나 있다.⁽³¹⁾ 즉 (2)식에 의한 추정강도가 설계강도 보다 클 경우에는 구조물이 위험하지 않다고 말할 수 있다. 그림 1에서 보여주듯이 조사결과 의 분산도가 너무 크므로 특정 반발도값이 특정 강도를 나타낸다기 보다는 확률적으로 최소한 어느 정도 이상의 강도를 가질 것이라는 기준으로 사용되어야 한다.

또한 대한건축학회의 신도시를 대상으로한 추정식과 같이 비교적 젊은 재령의 구조체에 대한 추정식의 기울기가 크고 본 연구의 추정식과 구룡근/오병환의 연구자의 추정식과 같이 오래된 구조물에 대한 추정식의 기울기는 작은 것을 알 수 있다. 이는 구조물이 오래될수록 반발경도와 강도와의 상관관계가 점점 줄어든다는 것을 말해준다.

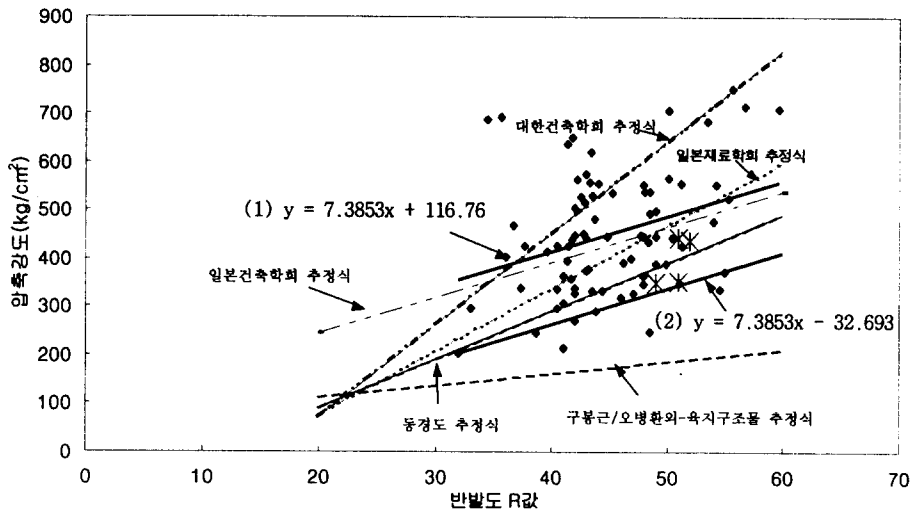


그림 1 반발경도식의 제안과 다른 제안식의 비교

그림 1에서 다이아몬드로 표시된 점은 국내 콘크리트 교량의 비파괴 시험조사에서 얻은 반발경도값과 코아강도값의 관계를 표시한 것이며 재령 1년에 대한 점으로 환산하여 나타낸 것이다. 별표로 표시된 점은 김천교 현장의 실제 조사에서 반발도값과 코아강도값의 관계를 나타낸 것이다. 김천교 현장에서의 실제조사값은 제안식 (1)의 값과 정확히 일치하지는 않지만 제안식 (2)의 범위 안에 든다. 이는 반발도값이 추정강도의 의미보다는 저항도 확률로서의 의미가 더 적합하다는 것을 보여준다.

4.2 초음파법

초음파 속도법은 콘크리트의 종류, 대상 구조물의 형상·치수 등에 대해서 적용상의 제약이 비교적 적어 현재 반발경도법 다음으로 많이 쓰이는 비파괴 시험법이다. 그러나 콘크리트에 적용은 측정조건, 사용 골재의 종류·치수·양, 콘크리트의 함수상태, 내부철근의 배근상태 등 많은 원인의 영향을 받고

또한 모든 조건을 고려하기가 어려워 콘크리트의 압축강도 추정은 신뢰성이 적은 것이 사실이다. 본 연구에서는 20여개 교량에 대한 초음파속도와 코아 압축강도 시험에서 그 상관 관계를 조사하였으나 기존의 제시된 추정식과는 다른 형태의 추정식이 도출되었다. 그림 2와 같이 추정식의 일차항의 계수가 음의 값이 나왔으며 이는 초음파 속도와 압축강도가 아무 상관이 없다는 것을 보여준다. 이러한 결과의 원인은 초음파 속도가 압축강도 뿐만 아니라 예민한 여러 가지 요소에 의해 영향을 받음을 나타낸다고 할 수 있다. 또한 자료조사의 결과가 좋지 않다는 것은 역으로 말해서 현행의 초음파 속도에 의한 검사가 제대로 이루어지고 있지 않다는 것을 의미한다고 할 수도 있다. 그러므로 이러한 여러 가지 요소에 대한 보정이나 표준화가 없이는 초음파 속도만으로 압축강도를 측정하는 것은 무리가 따를 수 있다고 판단된다.

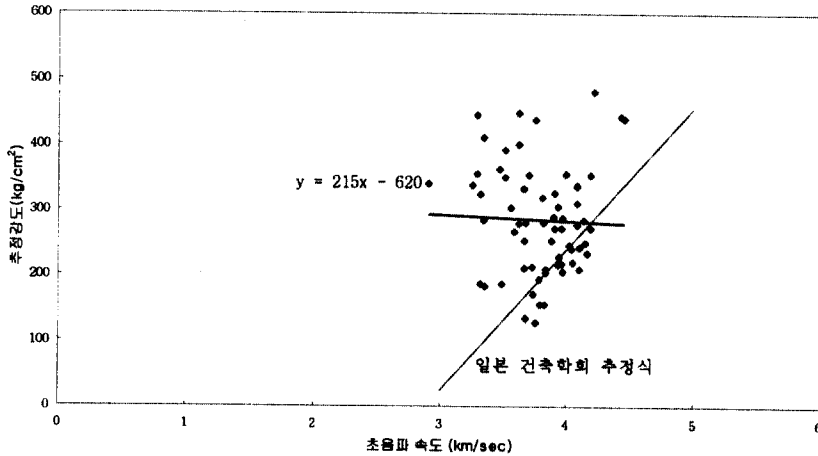


그림 2 초음파 속도와 압축강도와의 관계

4.3 비파괴 시험값 사용의 문제점

200여개의 교량에 대한 정밀안전진단 보고서의 비파괴 조사 내용을 검토한 결과 비파괴 시험값 사용의 대표적인 문제점이 다음과 같이 조사되었다.

- 1) 교량의 각 요소에 대하여 한 부분의 측정값으로서 모든 부분을 대표할 수는 없다. 즉 동일한 슬래브라 할지라도 중앙부와 지지부는 다른 용력값을 가지기가 쉽다. 또한 똑같은 교대에 대해서도 위와 아래, 오른쪽과 왼쪽이 다른 강도값을 가질 수 있다. 그러므로 비파괴 조사는 하나의 교량에 대하여 다른 용력을 받을 것이라 예상되는 부분을 모두 검사 하는 것이 바람직 하겠다. 그러나 많은 수의 정밀안전진단 보고서에서 하나의 요소를 한 부분의 측정값으로 대표하였다.
- 2) 비파괴 검사를 통한 안전성 예측은 단순히 평균값을 이용하는 것이 아니라 통계적 개념을 도입해야 한다. 적합한 강도를 추정하기 위해서는 하나의 요소에 대하여 충분한 양의 측정값이 필요하며 측정값의 적용은 단순히 평균값을 이용하는 것이 아니라 표준편차를 고려하여 표준편차에 따라 저항도가 일어날 확률을 고려하여 구조물의 강도를 추정 평가하는 것이 바람직 하겠다. 그러나 본 연구에서 조사한 200여개의 정밀안전진단 보고서에서는 이러한 확률통계적 개념이 들어간 분석은 거의 없었다.

5. 결론

본 연구에서는 노후화된 20여개의 콘크리트 교량에 대한 비파괴시험의 반발도값과 초음파값에 대한 조사에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 실제 교량에 대한 비파괴 시험값과 교아강도의 관계는 회귀분석을 통한 단순한 제안식을 사용하기에는 너무 분산된 형태의 분포를 나타내었다.
- 2) 비파괴값에 의해 노후화된 구조물의 강도를 평가하기 위해서는 단순히 비파괴값을 제안식에 대입하여 추정강도를 사용하기보다는 확률통계개념을 도입한 저강도 확률로서 사용하는 것이 바람직하겠다.
- 3) 경부고속도로상의 노후교량에 대해 현장 비파괴시험을 수행해본 결과 제안식 (1)과 제안식 (2)의 범위내에서 비교적 안전한 강도추정이 가능한 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 비파괴시험에 의한 기존 콘크리트 구조물의 압축강도 추정, 구봉근/오병환외, 한국콘크리트학회, 콘크리트 학회지, 6권 6호, 1994.12
2. 콘크리트 구조물의 비파괴 검사 및 안전 진단, 한국 콘크리트학회, 1994.2
3. In situ/Nondestructive Testing of Concrete, 관련논문 38편 수록, V.M Malhotra Edited. American Concrete Institute, ACI SP-82, 1982
4. Properties of Concrete A.M Nevile, 3rd Edition, 1981
5. 콘크리트 구조물의 비파괴 검사, 이종득, 도서출판 일광, 1996.5
6. 콘크리트 구조물의 비파괴 검사 및 안전 진단, 한국 콘크리트 학회, 1994.12
7. 장기재령 아파트 건축물의 실태조사 보고
8. 기존 구조물 콘크리트 강도의 검사 및 평가성, 심종성의, 한국 콘크리트학회, 콘크리트 학회지, 6권2호, 1994.4
9. 콘크리트 비파괴 시험, '97 건설기술 Academy 과정 교재', 삼성물산 건설 부분, 1997
10. 비파괴 시험법의 분류 및 특성, 심종성의, 한국 콘크리트학회, 콘크리트 학회지, 6권2호, 1994.4
11. 정밀안전진단보고서, 경부고속도로 금강2교의 5개교량, 한국도로공사, 1996.12
12. 정밀안전진단 보고서, 서울시 잠실철교, 시설안전기술공단
13. 정밀안전진단 보고서, 서울시 선유고가차도, 시설안전기술공단, 1996.10
14. 정밀안전진단 보고서, 성남시 삼평육교, 시설안전기술공단, 1996.12
15. 정밀안전진단 보고서, 서울시 한남고가차도, 시설안전기술공단, 1996.11
16. 정밀안전진단 보고서, 수원시 파정육교, 시설안전기술공단, 1996.12
17. 정밀안전진단 보고서, 수원시 능안육교, 시설안전기술공단, 1996.12
18. 정밀안전진단 보고서, 국호 37호선 청평대교, 시설안전기술공단, 1995.12
19. 정밀안전진단 보고서, 남해고속도로 가화철교, 시설안전기술공단, 1997.8
20. 정밀안전진단 보고서, 서울시 양화교, 시설안전기술공단, 1996.11
21. 정밀안전진단 보고서, 국도 39호선 (구)행주대교, 시설안전기술공단, 1995.12
22. 정밀안전진단 보고서, 국도 7호선 양양대교, 시설안전기술공단, 1996.8
23. 정밀안전진단 보고서, 경부고속도로 금호대교, 시설안전기술공단, 1996.12
24. 정밀안전진단 보고서, 신갈/안산 고속도로 신갈 J/C 4육교, 시설안전기술공단, 1996.12
25. 정밀안전진단 보고서, 국호 37호선 청평대교, 시설안전기술공단, 1996.12
26. 정밀안전진단 보고서, 서울시 성동교, 서울시 건설안전관리본부, 1997.3
27. 정밀안전진단 보고서, 서울시 서울교, 서울시 건설안전관리본부, 1997.9
28. 정밀안전진단 보고서, 만경강교의 8개소, (주)대우건설기술연구소, 1997.12
29. 정밀안전진단 보고서, 광진교 하부구조, 대한 토목학회, 1993.12
30. 정밀안전진단 보고서, 신갈-안산 신갈JC교의 8개소, 한국도로공사 도로 연구소, 1996.12
31. ACI 214-77, Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Result (Reapproved 1989), p.16