

레이더를 이용한 콘크리트 시편 내 수평 배근 간격 탐사

Measurement of Horizontal Rebar Spacing in Concrete Specimens Using Radar

임 홍 철* 김 우 석**
Rhim, Hong Chul Kim, Woo Seok

국문요약

콘크리트 구조물이 지진 등으로 손상을 입었을 때, 그 내부 상태를 파악하는 일은 구조물의 안전성 판단에 필요한 중요 과정 중 하나이다. 손상도 파악에 사용되는 비파괴 검사 방법 중 레이더법은 현재 콘크리트 부재의 두께와 매립된 철근 및 공동 탐사에 적용되고 있다. 레이더법은 다른 비파괴 검사 방법에서와 마찬가지로 측정된 신호의 처리와 해석에 따라, 그 결과가 좌우된다. 이 논문에서는 상용 레이더 시스템에서 얻어지는 화상 데이터를 개선하는 방법을 개발하여, 철근이 매립된 콘크리트 시편에 적용하였다. 실험에 사용된 시편의 크기는 1,000mm(길이)×600mm(폭)×140mm(두께) 이고, 철근의 매립 깊이는 표면으로부터 철근 중심까지 60mm이다. 레이더 실측 실험에서 철근의 수평배근 간격을 60, 90, 120, 150mm로 변화시켜, 간격 탐사 가능성을 시험하였다. 결과적으로, 상용 시스템에 비해 향상된 판별 효과를 나타냈으며, 배근 간격이 90, 120, 150mm인 시편에서 그 간격을 정확히 찾아내었다.

주요어 : 레이더, 비파괴검사, 콘크리트, 철근, 배근 간격, 해상도

ABSTRACT

Probing inside of concrete structures is one of important steps in assessing condition of the structures damaged by earthquake. For the assessment, a radar method is currently applied to the measurement of concrete thickness, and the detection of embedded rebars (steel reinforcing bars) and delaminations. Similar to the other nondestructive testing methods, the success of the radar method is dependent on signal processing and analysis of measured data. In this paper, an improved signal processing scheme has been presented and applied to the imaging of rebars inside concrete. The dimensions of the specimens are 1,000mm(length)×600mm(width)×140mm(thickness). The rebars are located at 60mm depth from the concrete surface. Horizontal rebar spacing has been set from 60mm to 90, 120, and 150mm. As results, the horizontal distances are clearly detected in the concrete specimens with 90, 120, and 150mm spacing.

Key words : radar, nondestructive testing, concrete, steel bars, rebar spacing, resolution

1. 서 론

사회 간접 자본 시설의 유지와 보수는 국가마다 주요 정책 과제 중 하나이다.⁽¹⁾ 이러한 유지관리 및 보수 분야에서 비파괴 검사법이 최근 들어 널리 활용되고 있다.⁽²⁾ 특히, 지진으로

피해를 입은 구조물의 안전성 평가의 경우, 정확하고 신속한 검사법의 개발과 응용이 필요하다.⁽³⁾ 이러한 목적을 위한 검사방법 중 전자기파를 이용한 레이더법은 초음파 검사법과 함께 그 활용도가 늘어나고 있다.

레이더법의 장점은 빛의 속도로 빠르게 검사를 할 수 있고, 작은 에너지를 사용하므로 X-ray 방법에 비교할 때 안전하다는 점이다. 또한, 초음파 방법과 비교하여 비접촉 방식으로 탐사가

* 정회원 · 연세대학교 건축공학과 조교수

** 현대산업개발 구조설계팀원

본 논문에 대한 토의를 2000년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

가능하기 때문에, 검사속도가 빠르고, 한번에 검사할 수 있는 범위가 넓다. 레이더법의 또 다른 장점은 안테나의 주파수를 변화시켜 해상도와 탐사심도를 사용목적에 맞게 조절할 수 있는데 있다.⁽⁴⁾

레이더법은 전자기파가 매질 내에서 전파 또는 반사하는 성질을 이용한다. 특히, 콘크리트에 매립된 철근에 민감하게 전자기파가 반응하기 때문에 철근콘크리트 구조물에 대한 탐사에 적합하다.^{(5),(6)}

이 논문에서는 중심 주파수 1GHz인 안테나를 이용하여, 콘크리트 시편에 매립된 철근의 수평 배근 간격을 측정하고 그 결과를 분석한다. 개발된 신호처리 기법으로 상용레이더 시스템에서 얻어지는 화상데이터를 크게 향상시켰으며, 수평배근 간격을 실제 길이에 가깝게 찾아내었다.

2. 이론적 배경

2.1 레이더의 측정원리

레이더에 의한 탐사는 Fig. 1에서와 같이 콘크리트 표면에서 내부를 향해 전자파를 방사한 후, 반사되어 돌아오는 신호를 처리 영상화하는 것이다.^{(7),(8)} 이 때, 콘크리트 내에 있는 철근, 공동 등 각기 다른 전자기적 특성을 가진 물질로부터 반사파가 돌아오게 된다.

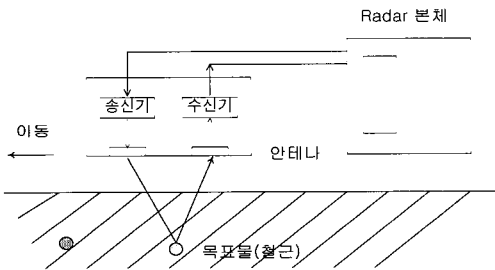


Fig. 1 Radar measurement scheme

2.2 콘크리트의 전자기적 성질

모든 물질은 전자기파의 전계와 자계에 영향을 주는 고유한 특성을 갖는다. 이것을 물질의 전자기적 특성이라고 하고 일반적으로 복소유전율, 복소투자율, 전도율로 나타낸다.⁽⁹⁾

콘크리트와 같이 전기 전도성이 없고 자성이 되지 않는 물질을 유전체(dielectric material)라고 한다. 유전체는 전도율이 거의 0이고, 강자성체가 아니므로 복소투자율은 진공의 투자율과 거의 같다. 따라서 유전체의 전자기적 특성은 복소유전율로 규정되며 다음과 같이 나타낸다.⁽¹⁰⁾

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad [\text{F/m}] \quad (1)$$

ϵ' : 유전상수 (dielectric constant)

ϵ'' : loss factor

j : $\sqrt{-1}$

복소유전율은 전자기파의 주파수에 따라 변화한다. 안테나의 주파수가 1 GHz일 때 콘크리트의 유전상수와 loss factor는 Table 1과 같다.⁽¹¹⁾

Table 1 Dielectric constant and loss factor of concrete

| Material | dielectric constant ϵ' | loss factor ϵ'' |
|----------------|------------------------------------|-----------------------------|
| concrete (wet) | 9~14 | 0.7~1.7 |
| concrete (dry) | 4~8 | 0.03~0.1 |

2.3 콘크리트 내에서의 전자기파 전파 속도

유전체 내에서 전자기파의 속도는 유전상수 (dielectric constant)로 결정된다.⁽¹⁰⁾

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

v : 콘크리트 내에서의 전자파 속도

c : 진공에서의 전자파의 속도

($=3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

콘크리트의 유전상수를 9로 가정하면 콘크리트 내에서 전자기파의 속도는 식 (2)에 의해 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v &= \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}} = \frac{3 \times 10^8 [\text{m/s}]}{\sqrt{9}} \\ &= 1.0 \times 10^8 \quad [\text{m/s}] \end{aligned}$$

따라서 콘크리트 내부에서의 파의 진행거리는 아래의 식으로 계산된다.

$$S = v \times t = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \times \frac{\Delta t}{2} \quad [\text{m}] \quad (3)$$

Δt : 측정 왕복 시간 (ns)

전자파를 이용하는 비파괴검사에서는 매질의 전자기적 특성이 미치는 영향이 중요하다. 이것은 레이더법에서 매질 내 전파속도가 측정시간을 결정하고 이를 통해서 물체에 대한 정보를 판별하기 때문이다.⁽⁸⁾

2.4 특성 임피던스

매질 내 경계면에서의 반사파는 각 물질의 임피던스 차이에 의한 반사계수에 따른다. 임피던스도 유전율과 투자율의 상호 관계에 의해서 결정이 되는데 특성 임피던스(Z)와 반사계수(Γ)는 아래와 같다.⁽¹⁰⁾

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \quad [\Omega] \quad (4)$$

$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}'} - \sqrt{\epsilon_{r2}'}}{\sqrt{\epsilon_{r1}'} + \sqrt{\epsilon_{r2}'}} \quad (5)$$

반사계수는 유전상수의 조합으로 이루어졌기 때문에 유전상수 정보로서 계산할 수 있다. 반사계수를 계산하여 반사파의 위상으로 내부 물질의 위치를 판단하게 된다.

이 식에 공기중 임피던스 $Z_1 = 337$, 콘크리트 임피던스 $Z_2 = 109$, 공기중 유전상수 $\epsilon_{r1}' = 1$, 콘크리트 유전상수 $\epsilon_{r2}' = 12$ 를 대입하면 반사계수 $\Gamma = -0.55$ 이다. 반사계수가 음의 부호를 가진다는 것은 입사파의 위상과 반사파의 위상이 상반된다는 것을 나타낸다.

2.5 수평 해상도

수평 해상도 (horizontal resolution, R_H)는

동일 깊이에 있는 두 물체, 즉 콘크리트의 경우는 주로 철근간격을 구별하는 능력을 말한다.⁽¹¹⁾

$$R_H = 4d \sqrt{\frac{\ln 2}{2 + \alpha d}} \quad (6)$$

d : 콘크리트의 피복두께

α : 감쇠상수 (attenuation factor)

$$\alpha = \omega \left[\frac{\mu \epsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

ω : 각속도 ($2\pi f$)

μ : 투자율 (permeability)

일반적인 콘크리트의 감쇠상수는 내부의 수분함유 상태에 따라 다르나 10~25의 값을 가지며 실험에 적용된 피복두께는 60mm 이므로 해상도의 값은 123.9~106.8mm 가 된다.

3. 실험

3.1 실험체

수평배근 실험체는 4개를 제작하였으며 각각의 시편에는 수평 간격을 달리한 1쌍의 철근이 매립되어 있다. 4주 압축강도는 246.4 kgf/cm^2 이고, 시편 크기는 1000mm(길이)×600mm(폭)×140mm(두께)이다. 레이더의 수평배근 탐사 가능성을 알아보기 위하여 Fig. 2와 같이 D19 철근을 피복 두께 60mm에 수평 간격이 서로 다르게 매립하였다.

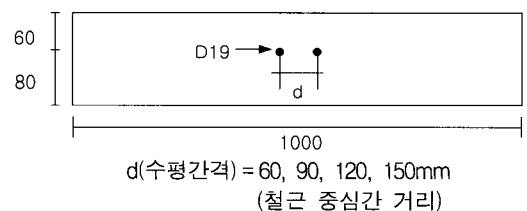


Fig. 2 Section of concrete specimen (unit : mm)

3.2 실험장비

1GHz의 중심 주파수를 갖는 안테나가 연결된 레이더를 사용하였다. 1GHz 안테나는 안테나 상자 내부에 송신 안테나와 수신안테나가 따로 분리되어 있는 형태이며, 송신부와 수신부의 bowtie 안테나의 내부 정렬 방식은 Fig. 3과 같다.^{(7),(10)}

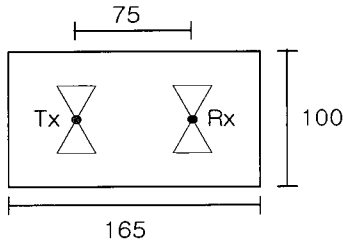


Fig. 3 Antenna arrangement (unit : mm)

수신안테나에서 받은 반사파는 본체 제어부에 저장되고 여기서 측정된 데이터는 안테나 제조 회사에서 제공하는 데이터 분석용 프로그램에서 분석되며 좀 더 세밀한 분석을 위하여 신호를 재처리하는 과정을 거치게 된다.

4. 실험결과

4.1 유전상수의 측정

시편 내부의 목표물의 정확한 위치를 판별하기 위해서는 시간의 축을 거리의 축으로 환산하여야 한다. 이미 알고 있는 시편의 두께를 이용하여 식 (3)으로부터 유전상수의 값을 계산할 수 있다.

$$\epsilon' = \left(\frac{c}{S} \times \frac{\Delta t}{2} \right)^2 \quad (8)$$

실제 시편의 두께(S)는 0.1430m, 측정된 시편의 앞 표면의 시간이 0.8438ns이고, 뒷 표면의 시간이 4.160ns이므로 왕복시간 Δt 는 3.316ns가 된다.

따라서 식 (8)에 의해 유전상수 값은 12.10으로 계산된다.

Table 2는 수평배근 각 실험체의 유전상수 값을 나타낸 것이다.

Table 2 Dielectric constant

| Specimen No. | Dielectric constant (ϵ') | Horizontal spacing (mm) |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------|
| 1 | 12.10 | 60 |
| 2 | 11.18 | 90 |
| 3 | 10.68 | 120 |
| 4 | 13.05 | 150 |

4.2 수평배근 실험체의 탐사결과

아래 Table 3과 4 및 Fig. 4는 실험체의 실험 결과이다. Fig. 4의 (a), (c), (e), (g)는 각각 레이더 본체에 측정시 표시되는 raw data이며 (b), (d), (f), (h)는 신호처리과정을 거친 데이터이다.

Table 3은 철근의 수평거리를, Table 4는 철근의 피복두께의 측정 결과를 나타낸 것이다.

화상데이터에서 알 수 있듯이 수평간격 60mm의 경우에는 신호를 처리하여도 철근의 개수를 확인하기 어렵다(Fig. 4(a), (b)). 철근 사이의 간격이 안테나의 수평해상도보다 작은 범위에 들어있기 때문에 안테나가 두 철근을 분리해 내지 못하는 것이다.

Table 3 Results of horizontal spacing measurement

| Specimen No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------|----|------|------|------|
| Actual spacing (mm) | 60 | 90 | 120 | 150 |
| Measured spacing (mm) | - | 95 | 115 | 140 |
| Error (%) | - | 5.56 | 4.17 | 6.67 |

Table 4 Results of cover depth measurement

| Specimen No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------|------|------|------|------|
| Actual depth (mm) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Measured depth (mm) | 57.4 | 56.3 | 53.5 | 54.9 |
| Error(%) | 4.33 | 6.17 | 10.8 | 8.50 |

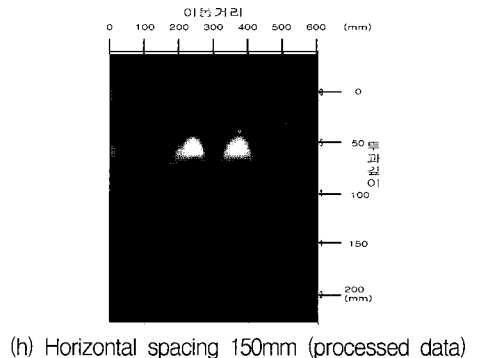
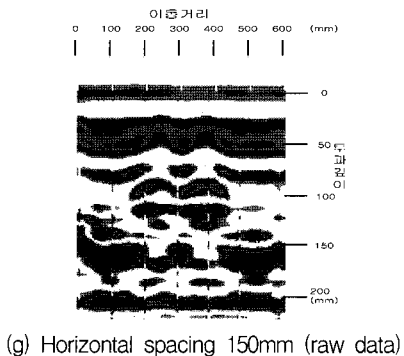
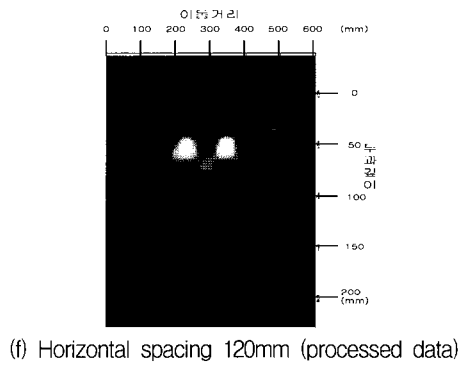
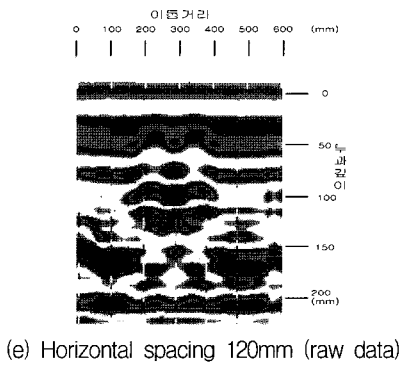
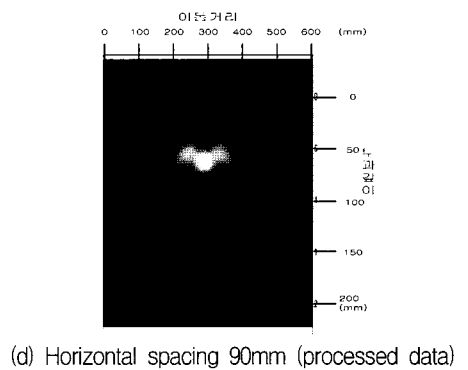
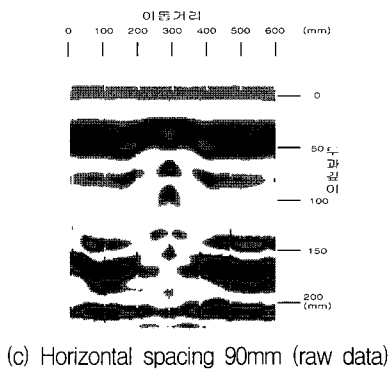
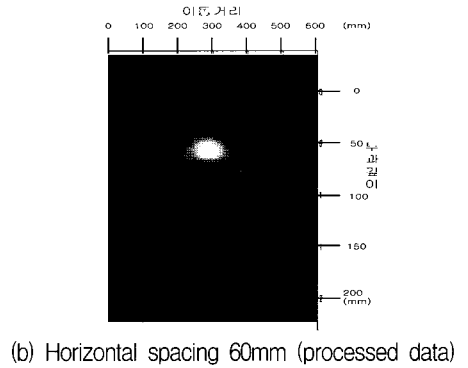
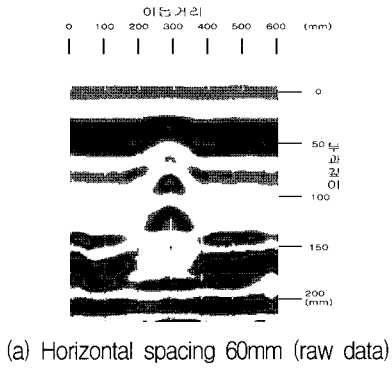


Fig. 4 수평배근 실험체의 탐사결과 화상데이터

90mm의 경우부터 raw data와 신호 처리된 데이터 모두 철근이 분리되어 보이기 시작하는 것을 확인할 수 있으며, (그림 4(c), (d)) 120mm와 150mm의 경우에는 그 분리 현상이 확연히 드러난다(Fig. 4(e), (f), (g), (h)). 신호처리과정을 거치면 철근의 매립깊이까지도 확실하게 알 수 있다. 여기에서 특기할 사항은 raw data에서는 잘 나타나지 않는 공기와 시편의 경계를 신호처리 data에서는 약하게나마 보여주고 있다는 것이다.

신호처리 방법에는 여러 가지가 있을 수 있으나 여기에 사용된 것은 image processing 방법⁽¹⁾이 아니라, 전자기파의 철근에 의한 반사파의 데이터를 Matlab 프로그램을 이용하여 전환한 것이다.

5. 결 론

1GHz의 중심주파수를 가진 레이더를 이용하여, 모르타르 시편 내에 매립된 공칭직경 D19의 철근을 탐사한 결과는 다음과 같다.

- 1) 유전상수는 시편마다 조금씩 차이를 보이기 때문에 시편에 맞는 유전상수를 구해 적용하는 것이 실험결과의 정확성을 높이는 방법이 된다.
- 2) 신호처리를 통하여 시편 내 철근의 존재 여부와 위치를 보다 명확하게 확인하였다.
- 3) 수평간격 60mm의 경우에는 배근상태를 확인하기 어려웠으나 90, 120, 150mm의 경우에는 배근상태를 확인할 수 있었다.
- 4) 대부분의 철근콘크리트 건축물에서 벽체의 배근이나 슬래브의 바닥배근 상태가 120~150mm인 것을 감안하면 슬래브의 배근탐사에 1GHz 안테나가 적합한 것으로 판단된다.
- 5) 보와 기둥의 경우 수평간격이 탐사 가능한 수평해상도보다 작기 때문에 주파수가 높은 안테나를 사용하는 것이 적합하다.
- 6) 이번 실험에서는 매립깊이가 중심거리 기준으로 60mm의 경우만을 대상으로 하였다. 그

러나 실제의 건물에서는 다양한 피복두께로 시공되고 있으므로 매립깊이를 달리한 실험이 이후에 수행되어야 한다.

- 7) 안테나의 해상도를 결정짓는 감쇠상수(α)는 주파수, 부재의 습윤상태와 관련이 있으므로 주파수와 습윤상태가 변함에 따른 다양한 실험이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 (KOSEF)에서 설립한 서울대학교 지진공학 연구센터 (KEERC)로부터 연구비를 지원 받았고, 교육부의 1996년도 이공계 대학연구소 기차재 첨단화 지원사업에 따라 연세대학교 공과대학 건축과학기술연구소 비파괴구조연구실이 보유하고 있는 실험 장비를 사용하였습니다. 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Chong, K. P., Scalzi, J. B., and Dillon, O. W., "Overview of nondestructive evaluation projects and initiative at WSF," *Journal of Intelligent Materials, System and Structures*, Vol. 1, October, 1990, pp. 422-431.
2. "건축 토목구조물의 비파괴검사방법", 한국 콘크리트학회지, 제10권 제2호, 1998, pp. 5-64.
3. Rhim, H. C., "Nondestructive evaluation and seismic hazard monitoring method for concrete structures," *Korea Earthquake Research Center 1998 Annual Report*, Seoul National University, January, 1999, pp. 176-181.
4. Gerardo, G. C., *CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Short-pulse Radar Method*, CRC Press, Boston, pp. 343.
5. Udaya, B. H., Chen, H. L., Bhandarkar, V., and Sami, Z., "Detection of sub-surface anomalies in concrete bridge decks using

- ground penetrating radar," *ACI Material Journal*, Vol. 94, No. 5, September-October 1997, pp. 396-408.
6. Rhim, H. C., Buyukozturk, O., and Blejer, D. J., "Remote radar imaging of concrete slabs with and without a rebar," *Materials Evaluation*, American Society for Nondestructive Testing, Vol. 52, No. 2, 1995, pp. 295-299.
 7. Johnson. R. C., *Antenna Engineering Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1993, pp. 1477.
 8. Levanon. N., *Radar Principles*, Wiley Interscience Publication, New York, 1988, pp. 308.
 9. Rhim, H. C. and Buyukozturk, O., "Electromagnetic properties of concrete at microwave frequency range," *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 3, May-June 1998, pp. 262-271.
 10. Cheng, D. K., *Field and Wave Electromagnetics*, Addison-Wesley Pub. Co., Massachusetts, 1989, pp. 703.
 11. Daniels, D. J., *Surface Penetrating Radar*, The Institution of Electrical Engineers, 1996, pp. 300.
 12. Shaari, A., Millard, S. G., and Bungey, J. H., "Coupling effects on GPR surveys," *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Proceedings, ISECS, 1997, pp. 247-259.
 13. Park, S. K. and Uomoto, T., "Radar image processing for detection of shape of voids and location of reinforcing bars in or under reinforced concrete," *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Proceedings, ISECS, 1997, pp. 53-67.