

GPR 시험을 이용한 교량기초의 안전성 조사방법에 관한 연구

김용곤[†] · 백신원

한경대학교 안전공학과

(2005. 9. 8. 접수 / 2006. 1. 10. 채택)

A Study on the Safety Evaluation of Bridge Footings using GPR

Yongon Kim[†] · Shinwon Paik

Department of Safety Engineering, Hankyong National University

(Received September 8, 2005 / Accepted January 10, 2006)

Abstract : The footing of a bridge is a very essential part that support the whole load induced by the bridge itself and the traffic as well. However, once a bridge is built, the footing is buried under soil so the footing is invisible from outside. Therefore, the safety or condition of the footing is very difficult to estimate. Not only the length of the imbedded part of the footings but also the type of footings are unknown once the design record is gone. Some nondestructive techniques can be used to evaluate invisible part of the footings but the results have not been successful yet.

Using GPR (Ground Penetrating Radar), which has been used for the nondestructive evaluation in military purposes, the condition assessment of the footings have been successfully conducted in this research. The field evaluation and laboratory tests have been conducted to find effective factors in the condition assessment of the footings. The equipment and basic theory of the GPR has been presented. The field test results show that the GPR can be successfully used for the safety evaluation of the footings. More test results and field data are needed for more precise evaluation of the footings.

Key Words : GPR, condition assessment, bridge, footing, nondestructive test

1. 서 론

교량의 기초는 상부구조의 하중을 지반에 전달하여 구조물을 견고하게 지지하는 역할을 한다. 그런데 기존교량의 기초는 지중에 위치하여 눈에 보이지 않는 문제점으로 인해서 기록이 남아있지 않은 교량의 경우는 말뚝의 형식, 위치 및 지지력을 파악할 수 없는 상황이다. 이에 따라 시설물 안전관리에 관한 특별법이 발효된 1995년 이전에 건설된 교량 중 적지 않은 교량에서 기초의 형식과 말뚝의 존재유무를 알 수 없고 존재유무를 안다고 하더라도 형식이나 근입 깊이를 알지 못하는 경우가 적지 않은 것으로 알려져 있다. 이에 따라 기존 교량의 유지관리를 위한 안전진단 및 구조성능 향상, 내진보강 등을 실시

한다 하더라도 기존교량의 구조적 성능 및 지지력을 파악할 수 없는 문제점이 지적되어 오고 있다. 그리하여 본 연구에서는 비파괴시험법을 이용하여 기존 교량의 기초상태를 파악할 수 있는 방법이 있는지를 조사하고 타당성을 평가하였다. 먼저 교량기초조사를 위한 비파괴시험법의 장단점과 적합성을 조사하였으며 그 중 타당하다고 평가되는 GPR 장비의 원리와 이용방법, 유전상수와 전기전도도 등을 이용한 결과해석방법을 정리하였다. 그리고 실험실 시험 및 현장시험을 실시하여 해석된 결과를 정리하였다.

2. 교량기초조사를 위한 비파괴 시험법

구조물에서 쓰일 수 있는 주요한 비파괴시험방법으로는 초음파 및 탄성파를 이용하는 방법, 적외선 열화상법, 전자파 및 레이더를 이용하는 방법, 방사

[†] To whom correspondence should be addressed.
yongon@hknu.ac.kr

선을 이용하는 방법 등이 있다. 각 비파괴시험 방법은 다음의 Table 1에 나타난 바와 같이 장단점과 한계를 가지고 있다.

어느 방법을 이용하는 시스템에 물리적인 충격을 가하고 그에 따른 구조물의 반응을 측정후 그 데이터를 분석하여 시스템의 상태를 평가한다는 데에 공통점이 있다. 그러나 말뚝의 경우는 지중에 묻혀 있으므로 직접 접근이 불가능하고 존재유무조차도 알 수 없는 상태에서 시작해야 한다는 특수성이 있다.

본 연구를 위하여 국내외의 비파괴시험방법 및 말뚝 관련 시험의 방법들을 조사하고 가능성 있는 방법들을 조사한 결과 대략 3가지 정도의 방법이 타당하다고 보아진다.

첫 번째는 탄성파나 초음파를 이용한 말뚝 혹은 기초의 건전도 및 선단조건 평가방법이다(김동수 외 2002, Sansalone 1989, Yongon Kim et. al., 1998). 이 방법은 Fig. 1과 같이 말뚝이 노출되어 있을 경우 말뚝의 상단에 탄성파, 혹은 초음파를 가하여 하단까지 내려갔던 파동이 반사되어 오는 상태를 평가하

여 건전도와 근입깊이를 추정할 수 있는 것이다. 그러나 기존 교량의 말뚝은 교량기초의 하단에 있어서 말뚝 상부에 직접 접근할 수가 없으므로 이 방법은 기존교량에서는 사용이 불가능하다. 또한 Fig. 2와 같이 기초의 상단에 접근이 가능할 경우 기초 상단에서 Impact Echo 시험을 통하여 기초내부의 건전도와 기초의 깊이를 추정할 수 있는 방법이 될 가능성도 있다. 그러나 기초의 하단이 암반층과 맞닿아 있는 경우 콘크리트와 암반의 물리적 성질(탄성계수, 포아슨의 비 등)이 유사함으로 인하여 반사파를 얻을 수 없거나 명확치 않은 경우가 더 많을 것으로 사료된다.

두 번째 방법은 시추공탐사를 하여 지층의 구조로서 말뚝유무와 깊이를 유추하는 방법이며 그림 3 및 4와 같이 추가적으로 시추공 내부에서 cross hole test를 실시하거나 레이더 안테나를 삽입하여 시추공 레이더 탐사를 행하는 방법이다(Woods 1986, Hoar and Stokoe 1978). 중요교량의 경우라면 이러한 방법을 사용할 수 있겠으나 수많은 중소 교량의 기초를 그러한 방법으로 조사하는 것은 경제적인 측면에서 타당성이 다소 떨어지는 것으로 보인다.

Table 1. Nondestructive test methods and their characteristics

검사방법	현재 적용분야	장점	단점 및 한계
초음파 및 탄성파	공동, 균열 탐지	철근의 영향이 적음	신호획득시간이 많이 걸림 골재크기, 수분 등의 영향에 민감함
적외선 열화상법	균열, 공동, 박리탐지	사용이 간편함	깊이측정 불가 주위 환경에 민감함 투과성이 약함
레이더 및 전자파	철근, 공동, 균열 탐지	비접촉성이 고 신속함	습기가 있으면 감쇄가 심함 금속성에서는 반사가 심함 콘크리트의 투과성능이 좋지 않음
방사선	철근, 공동, 균열 탐지	해상도와 투과성이 높음	고가이며 위험성이 있음 분석시간이 많이 필요함 대상물체의 양쪽에 접근이 필요함

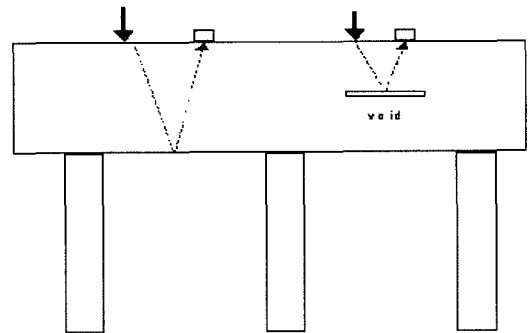


Fig. 2. Nondestructive test using impact-echo method.

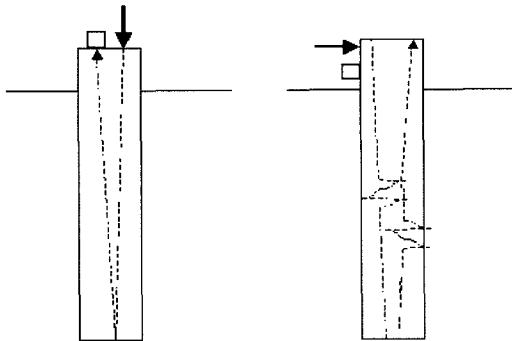


Fig. 1. Evaluation of underground piles using stress wave test.

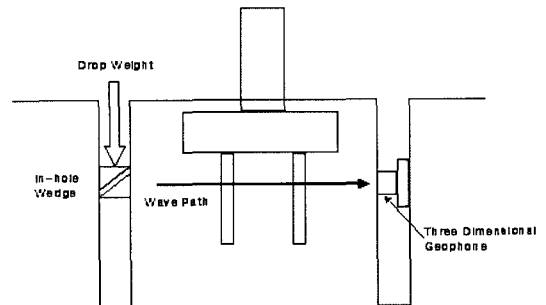


Fig. 3. Cross hole test.

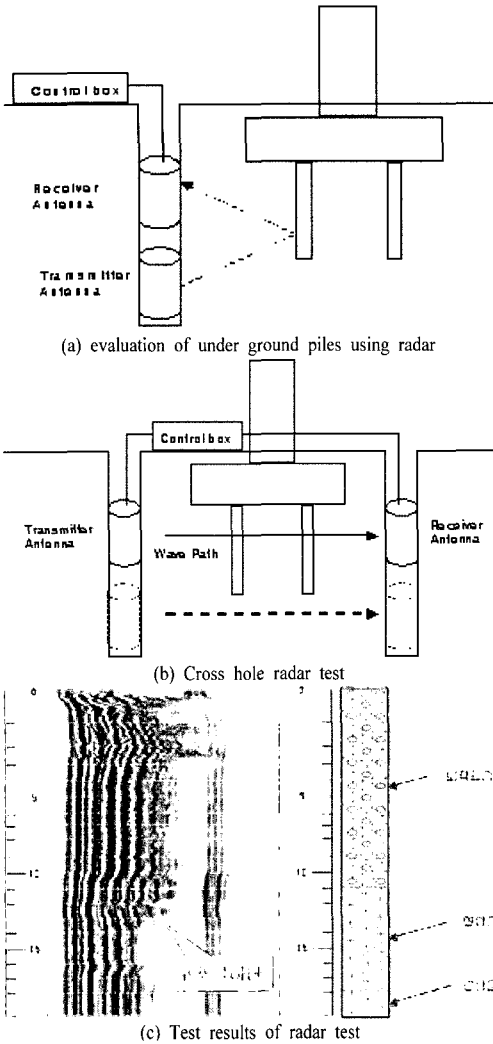


Fig. 4. Evaluation using radar.

세 번째 방법은 표면에서 지반탐사용 레이더(GPR: Ground Penetrating Radar)를 이용하여 탐사하는 방법이다. 그림 5 및 6과 같이 지표면에서 지하부를 향하여 레이더를 발사하고 지하부의 경계면에서 돌아오는 신호를 받아 지하의 상태를 추정하는 방법이다. 지하에 지장물이 존재한다면 이는 GPR 단면에서 포물선 형태로 나타나게 되는데, GPR 단면도상의 포물선형태의 반사신호는 지하매설물 조사에 중요한 단서를 제공한다. 그러나 지반의 다짐상태나 지반 상부의 축적조건이 불량할 경우 반사과가 교란되어 피사체의 위치 및 규모, 상태 등을 정확히 판단하기에 어려움이 있을 수 있으며, 이 때는 기타 참고 자료등과 비교하여 위치를 유추해야 한다.

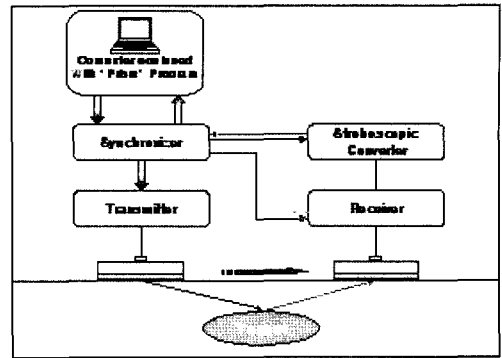


Fig. 5. Nondestructive evaluation from surface using GPR.

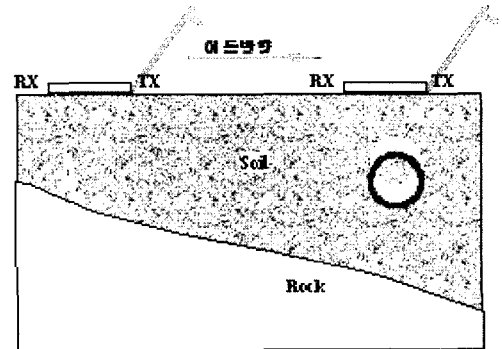


Fig. 6. Evaluation of underground objects using GPR.

표토층이 전기전도도가 높은 점토질로 이루어져 있거나, 상부에 철근 콘크리트가 존재할 경우 전자파의 감쇠가 심하여 침투 깊이가 현저히 감소하고, 신뢰할만한 자료취득이 힘들어지는 단점이 있다. 그러나 간편하게 표면에서 실시할 수 있는 방법으로서 시간적, 경제적으로 유리하며 레이더와 관련한 전자, 기계적인 기술과 신호의 해석 및 영상화 기술이 날로 발전하고 있으므로 장기적인 관점에서 사용가능한 방법이 되리라 예상되어 실제 교량의 기초를 대상으로 GPR을 이용한 탐사를 실시하고 적용가능성을 평가하였다.

3. GPR 탐사장비의 이용과 자료해석 방법

3.1. 탐사원리

송신안테나(Transmitter)로부터 수 MHz-GHz 범위의 전자기파를 지표면이나 구조물의 노출면에서 내부로 방사시킨 후, 전자기적 물성이 다른 매질을 만나 반사되어 돌아온 신호를 수신안테나(Receiver)에서 받고 이를 시간축에 기록한다. 이러한 과정을 미

리 설계된 탐사 축선을 따라 안테나를 수평으로 이동시키면서 계속하여 시간을 표시하는 수직축과 수평거리를 나타내는 수평축에 반사강도를 표시하는 2차원 단면도를 얻는다. 매질 내에서의 전자기파의 속도를 알면 단면도에 나타난 수신파의 시간, 거리 간격으로부터 반사체의 거리, 방향과 같은 정보를 얻게 된다.

3.2. 유전상수와 전기전도도

레이다파의 전파특성은 매질의 2개의 물리적성질 즉, 유전상수(Dielectric Constant)와 전기전도도(Electric Conductivity)에 영향을 받는다. 유전상수는 매질분자의 극성과 관련된 상수로, 그 값이 큰 물질 내에서 전자기파는 진행에 방해를 받으며 전파속도는 줄어든다. 매질간 유전상수의 차이가 클 때 반사계수가 커진다. 공기의 유전상수는 1이며, 물의 유전상수는 81이다. 금속을 제외한 대부분의 지표물질의 유전상수는 1-81 사이에 있으며, 같은 물질일 때는 함수율이 증가하면 유전상수도 증가한다. 전기전도도는 전자장 내에 놓인 물질내 자유전자의 흐름을 표시하는 상수로 전자파의 감쇠율을 결정한다. 금속과 같이 전기전도도가 큰 물질 내에서는 전자파의 에너지는 표면에서 급속히 감소하여 곧 진행이 차단된다. 일반 지표물질에서 전자기파는 전기전도도에 비례하여 감쇠한다.

Table 2는 지반을 구성하는 대표적인 물질의 자기적 특성을 보여준다. 점토는 모래보다 유전상수와 감쇠율이 커서 전자파의 투과 깊이가 짧고, 따라서 탐사가능심도가 훨씬 낮을 것임을 예측할 수 있다. 철근은 일반물질 중 유전상수와 감쇠율이 가장 높다.

3.3. 자료해석방법

GPR 자료에서 수평축은 안테나의 이동거리를 나

Table 2. Electromagnetic properties of materials

물질	유전상수	속도(cm/nsec)	감쇠율(dB/m)
공기	1	30	0
물(담수)	81	3.3	0.1
모래	4	15	0.01
점토	9~25	10~6	1~300
아스팔트	5~6	13	(0.4~1)
콘크리트	6~12	12~8	(1~100)
화강암	4~6	13	0.01~1
현무암	8~12	10~9	
석회암	4~8	15~10	0.4~1
철근	200~	~2	300~

타내고 수직축은 반사파의 도착시간을 거리로 환산한 심도를 나타낸다. 수직축에는 수신안테나를 통해 기록된 신호를 위글(wiggle) 프로파일로 그리거나, 신호의 강도를 색상으로 나타낸다(Fig. 7).

나타난 색상은 전자기파가 매질경계면에서 반사된 반사강도를 나타내는데 색상 그 자체보다는 인접부분과의 색상차이, 즉 반사강도의 차이가 중요하다. 지반하부의 반사 경계면이 곡면이면 GPR 단면에서도 곡면을 보게 되므로 이를 통해 지반형태를 유추할 수 있다. 3차원의 지장물이 존재한다면 이는 GPR 단면에서 포물선 형태로 나타나게 되는데, GPR 단면도 상의 포물선형태 시그널은 지하매설물 조사에 중요한 단서를 제공한다. 지반의 다짐상태나 지반 상부의 측정조건이 불량할 경우 반사파가 교란되어 피사체의 위치 및 규모, 상태 등을 정확히 판단하기에 어려움이 있을 수 있으며, 이 때는 기타 참고 자료등과 비교하여 위치를 유추해야 한다. 표토층이 전기전도도가 높은 점토질로 이루어져 있거나, 상부에 철근 콘크리트가 존재할 경우 전자파의 감쇠가 심하여 칩투 깊이가 현저히 감소하고, 신뢰할 만한 자료취득이 힘들 때도 있다.

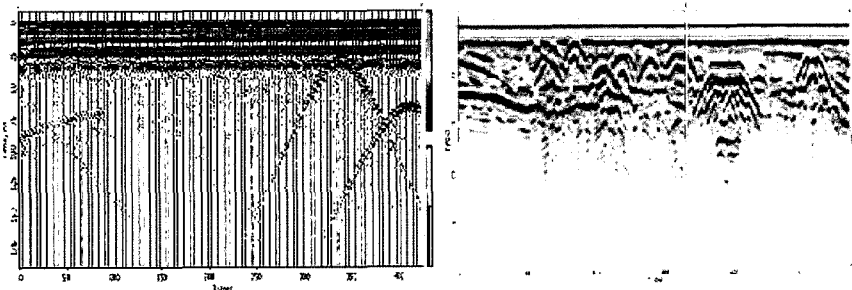


Fig. 7. GPR results (left: wiggle, right: color).

Table 3. GPR system

구분	구성품	모델 및 규격	비고
주장치 (ZOND 12c)	Main Frame	-	전원공급, 전자기와 송신 및 수신, 전자기와 반사 데이터 화상처리 및 표시, 이미지 조정, 데이터 필터링
	Control/Display Module	휴대용 노트북 PC	
측정 안테나 (전자기와 송수신기)	500 MHz 750 MHz	-	수직탐사심도 약 5m 수직탐사심도 약 3m
실내 분석 장치	IBM 호환 퍼스널 컴퓨터	Pentium4-2.4	데이터 분석 및 저장
	데이터 분석용 Software	Prism1.064	디지털 신호처리 기법을 응용한 다각적인 데이터 분석 및 관독

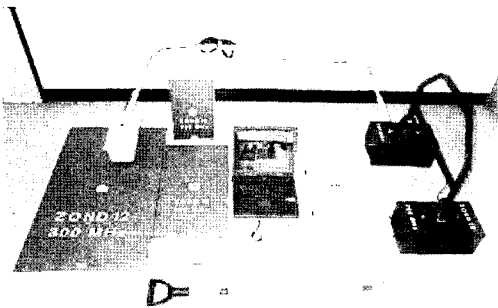


Fig. 8. GPR 시스템 (Zond 12c).

4. 현장시험

4.1. 사용장비

본 조사에 사용된 GPR 시스템은 Zond 12c(Radar Systems Inc., Latvia)이며, 시스템의 제원은 아래와 같다.

4.2. 측정결과

본 연구에서는 GPR 안테나가 지중에 위치한 기초에 다가갈 때 기초의 근처에 이르면 반사신호로서 횡방향 포물선신호(sidelobe)가 발생하는 것에 착안하여 확대기초와 우물통기초의 깊이가 크게 차이가 나기 때문에 가까이 다가갈 때 횡방향 돌출의 크기가 서로 다를 것이라 가정 하에 확대기초와 우물통기초의 교량에 현장시험을 실시하였다.

Fig. 9는 국도 45호선 상의 군문교 10번 교각에서 측정한 결과이다. 기초의 형식은 우물통이다. 500 MHz의 안테나를 이용하였으며 신호도에서 지면하부 기초로부터의 반사신호를 볼 수 있으며 빨간색

화살표는 교각의 중심이고 노란색 화살표는 예상되는 우물통의 경계를 나타내어 기초의 형태를 확인할 수 있다. Fig. 10은 같은 교량의 5번 교각 인근에서 수중에 배를 이용하여 안테나를 띄우고 하상의 상태를 측정한 결과이다. 단면도상의 마크 1은 교각이 위치한 교량 중심선의 위치를 나타내며 교량 중심위치에서 토사가 유실되는 것이 확인되었다. Fig. 11과 12는 sidelobe의 차이를 보기 위하여 실내에서 높이가 다른 2개의 철제구조물에 대해 실시한 실험 결과이다. 마크 1과 3은 대상구조물의 좌우 경계이

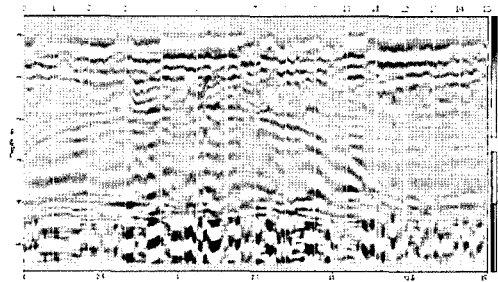
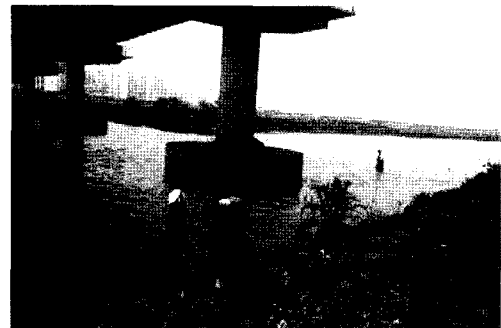
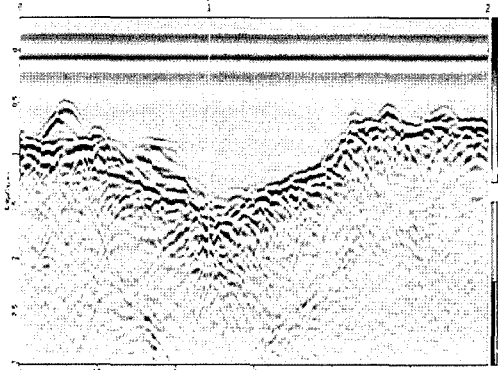


Fig. 9. GPR results of Gunmun-Bridge.



(a) Measuring the underwater contour

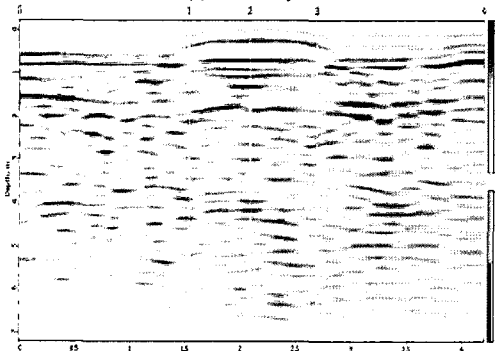


(b) Results acquired

Fig. 10. Evaluation of Gunmun-Bridge.



(a) Laboratory tests

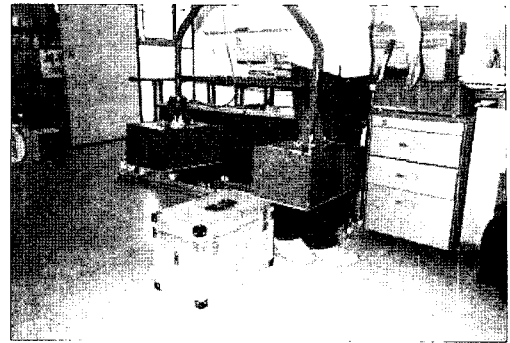


(b) Results

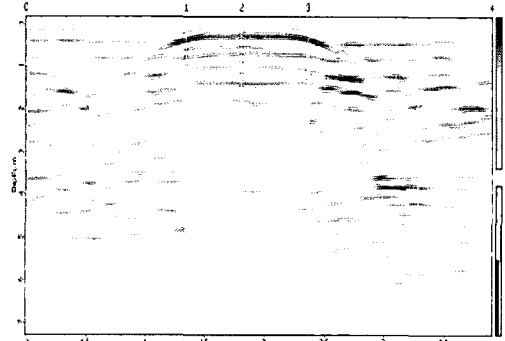
Fig. 11. Evaluation of artificial structure in the laboratory - I.

고 마크 2는 구조물의 중심이다. 노란색 화살표는 구조물 측면의 sidelobe를 보여주고 있다. 두 경우에 대상 물체의 형상차이가 그리 크지 않아 격차가 명확하게 나타나지는 않고 있으나 Fig. 11에서 Fig. 12보다 sidelobe의 각도가 약간 깊게 나오는 것이 관찰되었다.

Fig. 13은 국도 42호선 상의 추계1교에서 측정된 결과이다. 아래쪽 신호도에서 표시선 1과 2는 교각의 경계, 그리고 노란 화살표는 예상되는 기초의 상단 경계를 표시한다. 그리고 그 경계에서 양쪽 사선방향으로 물결모양의 횡방향 포물선 신호가 발생되어 있으며 그 깊이는 대략 1m 정도로 추정되어 기초의 형식은 확대기초로 확인된다. Fig. 14는 같은 교량의 수중교각에 대한 측정결과이다. 단면도 상부의 마크 1과 3이 교각의 중심을 나타내며 수중 지형과 세굴된 상황을 볼 수 있다. 노란색 화살표가 기초상부의 경계부분으로 추정되는 곳에 위치하고 있으며 붉은색 화살표는 구조물 측면으로부터의 sidelobe를 보여주고 있다. Sidelobe의 연장이 다소 짧으며 완만하게 퍼지므로 확대기초인 것이 확인된다.



(a) Laboratory tests



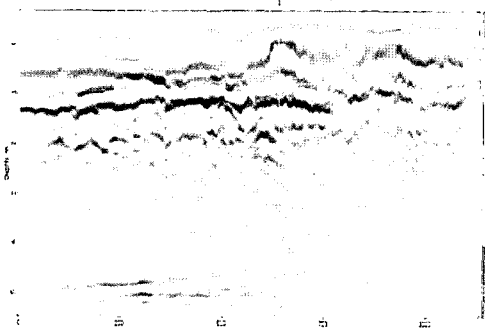
(b) Results

Fig. 12. Evaluation of artificial structure in the laboratory - II.

Fig. 15의 경우 국도 37호선 상의 여주대교 육상 교각에서 측정된 결과이다. 신호도에서 표시선 1, 2, 3은 교각의 양쪽 경계와 중심선을 각각 나타낸다. 노란 화살표가 기초의 상부경계이며 빨간화살표가 횡방향 포물선신호를 나타낸다. 본 교각은 우물통기초로서 포물선신호가 깊이까지 연결되는 것이 마땅하나 보기에 따라 깊이까지 이어졌다고 할 수도 있고 중간에서 끊긴 것으로도 볼 수 있는 불명확한 신호로 나타나 있다. 그 원인은 지표 모래층 하부가 복잡한 이물질로 구성되어 신호가 산란되는 것으로 추정된다. Fig. 16은 여주대교의 수상교각으로서 북측 물 경계면에 접한 교각이다. 하상면 하부에서 교각기초로부터의 반사파가 일어났다. 노란색 화살표는 교각경계를 나타낸다. 우물통기초의 폭은 약 9m인데 반사파의 sidelobe가 좌우 하단부로 깊게 연결되어 우물통 기초인 것이 확인된다. Fig. 17은 여주대교의 강 한가운데 있는 수상교각에서 측정된 결과이다. 수면과 세굴된 하상면을 볼 수 있으며 하상면 하부에 교각기초로부터의 반사파를 볼 수 있다. 노란색 화살표는 교각경계를 나타낸다. 우물통기초의 폭은 약 4m로서 연장된 반사파의 sidelobe로부



(a) Measuring Piers



(b) Results

Fig. 13. Measurement and results of pier on the ground in Choogye-Bridge.

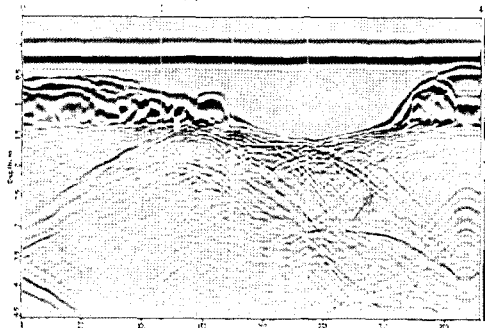
터 우물통 기초라는 것을 추정할 수 있다. 신호도에서 좌측보다는 우측에서 sidelobe가 더 길게 발생한 것은 측정시 좌측에는 다른 기초가 있음으로서 간섭을 받았으나 우측에는 다른 기초가 없음으로서 간섭이 없이 sidelobe가 발생된 것을 알 수 있다.

4.3. GPR 측정결과의 제약사항과 문제점

GPR을 이용한 실험을 실시함으로써 레이더를 이



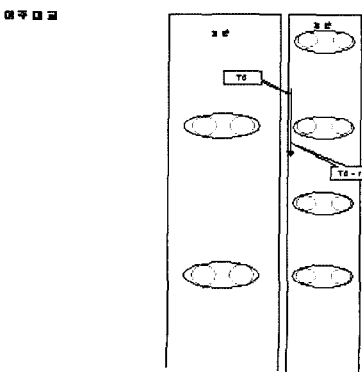
(a) Pier tested



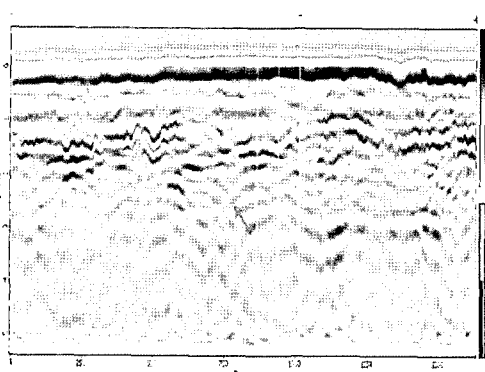
(b) Results

Fig. 14. Measurement and results of pier in the water in Choogye-Bridge.

용하는 본 시험방법이 교각의 기초에 대한 비파괴 시험법으로서 유효한 방법이 될 수 있는 가능성은 탐지할 수 있었다. 그러나 시험결과에서 보듯 주변 여건에 따라 민감하게 반응함으로써 측정장치 근처에 있는 다른 물체의 영향을 받기도 하며 지표내의 물질을 이루는 성분이 이물질들로 이루어져있거나 공극이 많으면 그 경계면에서 반사파가 발생하는 문제점도 큰 것으로 나타났다. 즉, 매질이 균일하지 못



(a) Pier locations and shapes



(b) Results acquired

Fig. 15. GPR evaluation results of on-ground pier from Yeouju-Bridge.

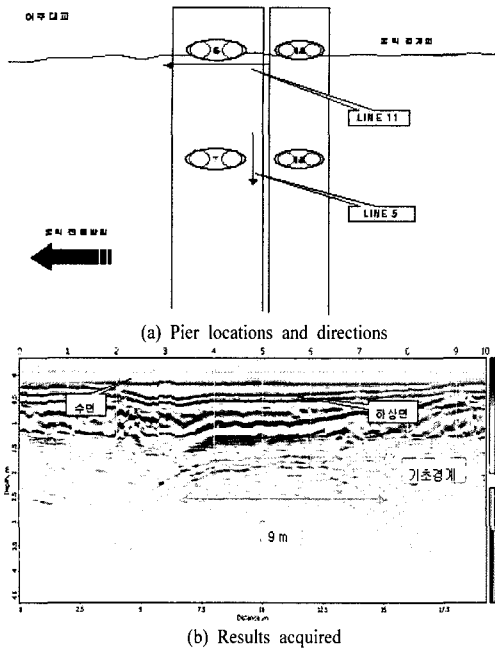


Fig. 16. GPR evaluation results of under-water pier from Yeouju-Bridge.

하면 결과가 부정확해지는 문제점이 해결되어야 일상적으로 사용될 수 있을 것으로 보인다. 또한, 결과를 분석하는 데 있어서도 많은 경우의 신호를 접해 본 경험자가 아니면 제대로 알아보기 어렵다는 사실도 아직은 일상적인 시험법이 되기에 부족한 면으로 보인다. 결과를 분석하여 누구나 알아보기 쉽게 보여주는 분석방법 및 시각적 표현방법이 개발되어야 할 것으로 보인다.

5. 결론

탄성파나 초음파를 이용한 말뚝의 건전도 및 선단조건 평가방법으로 말뚝의 상태와 근입깊이를 조사하는 것은 기존 교량의 경우 말뚝이 기초의 하단에 위치하여 말뚝 상부에 접근할 수 없으므로 적용이 불가능하다. 그리하여, 시추공 탐사를 하거나 시추공을 이용한 cross hole test 혹은 시추공 레이더 공법을 이용하면 기초의 상태를 보다 자세히 알 수 있으나 중요 교량이 아닌 중소교량에 대하여 대규모로 이 방법을 적용하는 것은 비경제적이라 사료된다. 지반탐사레이더(GPR)을 이용하여 지표면에서 지하부로 신호를 보내고 지중에 매설된 기초의 상부

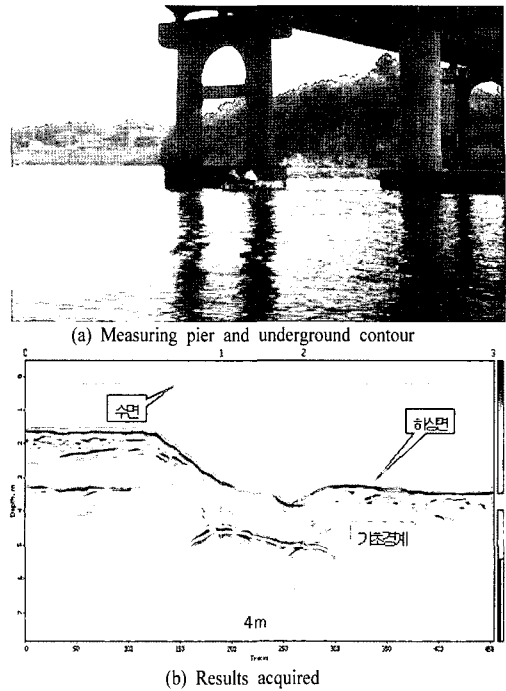


Fig. 17. GPR evaluation results of under-water contour from Yeouju-Bridge.

및 측면에서 반사되는 신호를 포착하여 기초의 형식을 추정하는 비파괴 시험방법이 경제적인 기초형식 추정방법으로서 가능성은 있는 것으로 판단되었다.

GPR 시험은 육상교각보다는 수중교각에 대하여 조사하는 경우 더 좋은 측정 결과가 얻어진다. 그 이유는 첫째, 육상교각 하부는 대체적으로 지면이 평탄하지 못하여 표면안테나에 의한 자료의 취득이 용이하지 못한 경우가 많은 반면, 수중교각 하부에서는 수면에서의 자료취득이 용이하기 때문이다. 둘째, 육상교각에서는 상부 수 m 내의 토양이 불균질하거나 점토질 토양일 경우 교각기초로부터의 반사파 강도가 현저히 약해지는 경우가 많으나, 수중교각 하부에는 점토질 토양은 거의 존재하지 않으며 자갈과 모래로 이루어져 있는 경우가 많으므로 교각기초로부터의 반사파 강도가 훨씬 강하기 때문에 기초 연장 추정이 용이하다.

그러나 GPR 시험이 일상적인 시험방법이 되는 데에는 다음과 같이 아직 해결해야 할 문제점이 남아 있다.

- 1) 지반의 다짐상태나 지반 상부의 측정조건이 불량할 경우 반사파가 교란되어 전자파의 감쇠가 심

하여지고 침투 깊이가 현저히 감소하고, 신뢰할만한 자료취득이 힘들어지는 문제점이 있다. 시험체 주변에 신호를 반사시키는 다른 물체가 있다면 그 영향을 받아 민감하게 신호가 변화하여 간섭에 취약한 특성이 있다. 이와 같은 문제점이 해결되어야 더욱 신뢰성있고 정확한 측정이 가능할 것으로 보인다.

2) 결과를 분석하는 데에 있어서도 경험자가 아니면 제대로 알아보기 어렵다는 사실도 아직은 일상적인 시험법이 되기에 부족한 문제점으로 보인다. 향후, 더 발전된 분석방법 및 시각적 표현방법이 개발되어야 할 것으로 보인다.

그럼에도 불구하고 현재까지 경제성과 조사의 편의성을 동시에 고려한다면 GPR 시험은 교각기초의 종류파악과 하상 세굴조사에서 유용한 것으로 보인다. 그 용도와 장점은 다음과 같다.

1) 수중교각 하부의 GPR 탐사에 의해 교각기초의 종류를 파악하는 것이 가능할 것으로 보인다. 향후 보다 많은 양의 자료수집과 상이한 환경 하에서의 반응에 대한 이론적 및 실험적 연구가 더 이루어져야 할 것이나, 현재까지 수집된 자료에 의해 2m 연장의 기초와 10m 연장의 기초로부터의 반응은 상이하게 나타나는 것이 확인되었다.

2) 수중교각 하부탐사를 통하여 교각기초의 형태 조사와 세굴조사가 동시에 이루어질 수 있다. 이미 실용단계에 있는 GPR을 이용한 하상지형조사법에 의해 교각 부근 토양의 세굴조사는 용이하게 이루어

질 수 있다.

참고문헌

- 1) Kim Yongon and Y. Richard Kim, "Prediction of layer moduli from FWD and surface wave measurements using artificial neural network", Transportation Research Record No. 1639, December, pp. 53~61, 1998.
- 2) Sansalone, M. and N. J. Carino, "Detecting Delaminations in Concrete Slabs with and without Overlays Using the Impact-Echo Method", Materials Journal, American Concrete Institute, Vol. 88, No. 2, 1989.
- 3) Hoar, R. J. and K. H. Stokoe, II, "Generation and Measurement of Shear Waves in Situ", Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP654, American Society for Testing and Materials, pp. 3~29, 1978.
- 4) Woods, R. D, "In-situ Tests for Foundation Vibrations", Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, S.P. Clemence, Ed., ASCE, New York, pp. 336~375, 1986.
- 5) 김형우, 김동수, 김원철, "충격반향기법을 이용한 암반근입 현장타설말뚝의 선단조건 평가", 한국지반공학회 논문집, 제18권, 제4호, pp. 21~32, 2002.
- 6) 김유진, 김용곤, "콘크리트 구조물의 결함발견을 위한 3차원 초단파 영상처리 시스템의 개발", 산업안전학회지, 제18권, 제4호, pp. 98~104, 2003.