

파괴 및 비파괴 검사를 이용한 노후 교량의 교각 두부 조사

Inspection of A Deteriorated Bridge Pier Cap Using Common Nondestructive and Destructive Test

김 태 완* 홍 성 남** 한 경 봉*** 박 선 규****
Kim, Tae Wan Hong, Sung Nam Han, Kyoung Bong Park, Sun Kyu

Abstract

Nondestructive testing techniques have been historically and commonly used to evaluate the quality of existing concrete structures. The techniques utilized included visual inspection, hammer sounding, Schmidt hammer rebounding, and ultrasonic pulse velocity testing including tomographic imaging. Results of the nondestructive tests were used to determine areas to be tested with local destructive tests. These tests included concrete compressive strengths, chloride testing, and petrographic testing. The overall results indicate that inside core of each of the pier caps are healthy. On all of the pier caps, extensive exterior concrete layer rehabilitation needs to be completed. This paper shows the application and interpretation of common nondestructive testing techniques and the consequent repair, rehabilitation, maintenance decisions and safety assesment.

요 지

비파괴 검사 기술은 현존하는 구조물의 진단을 위해 빈번하게 사용되었고, 사용되고 있다. 이러한 검사들로 본 연구에서 사용된 검사로는 육안적 검사, 해머 사운드, 슈미트 해머, 그리고 토모그래피를 포함한 초음파 검사 등이 있다. 완료된 비파괴 검사 결과는 국부적으로 수행될 파괴검사의 위치를 산정하는데 사용되었다. 그래서, 압축강도, 염화물, 암석 분류 실험으로 구성된 파괴검사를 수행하였다. 비파괴검사와 파괴검사의 결과들을 종합하여 교각두부의 건전성을 평가하였다. 본 논문에서는 파괴 검사와 비파괴 검사의 적용과 해석, 그리고 이어지는 보수, 보강, 유지 결정 과정에 대해서 나타내었다.

Keywords : Hammer sounding, Nondestructive testing, Schmidt hammer, Tomography, Ultrasonic pulse velocity

핵심 용어 : 해머 사운드, 비파괴 시험, 슈미트 해머, 토모그래피, 초음파 속도

* 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 연구교수

** 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정

*** 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사후연구원

**** 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 정교수

E-mail : tk776@skku.edu 031-290-7530

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2008년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

공용중인 콘크리트 구조물의 상세평가에 필요한 비파괴 검사 기법은 다양하다. 이러한 비파괴 검사 기법은 현장에서 구조물의 내하력(load-carrying capacity)을 가늠하는 잣대가 될 수 있고 나아가 경제적이고 효율적인 보수 보강 방법을 결정하는데 사용할 수 있다. Fig. 1에 나타난 적용대상 교량의 4기의 교각두부를 몇 가지 다른 비파괴 기법을 이용해 조사하였다. 적용대상 교량의 위치는 미국 콜로라도 주 덴버시에 위치했으며, 덴버시는 습기가 적지만 겨울철 강설량이 많은 기후 특징을 보인다. 적용된 검사기법으로 해머 사운딩, 슈미트헤머, 그리고 토모그래피(tomography)를 포함하는 초음파 검사이다. 또한 육안 검사를 실시하여 균열양상과 피복 박리 상태를 확인하였다. 각 기법별 비파괴검사 데이터는 Contour로 작성하였고, 교각두부의 상태를 더 잘 이해하기 위해 3가지 비파괴 검사 결과를 조합하여 나타내었다. 이 조합된 비파괴 검사는 해머 사운딩, 슈미트 헤머, 직선형 초음파 검사이다. 해머 사운딩과 슈미트 헤머 기법은 교각두부의 외측 상태를, 초음파와 토모그래피는 내측의 상태를 결정하는데 사용되었다. 또한 토모그래피는 교각두부의 정면과 측면 사이의 모서리 부를 분석하는데 이용되었다. 비파괴검사 후, 분석된 데이터를 바탕으로 교각두부의 국부적 파괴 검사를 실시할 위치를 결정하였고, 파괴검사는 콘크리트 코어를 채취하여 압축강도, 염화물양, 암석분류 검사를 수행하였다.



Fig. 1 동남쪽으로부터의 교량 전경

2. 실험

2.1 실험 개요

실험 전 Fig. 2에 나타난 바와 같이 교각두부의 각 면들 위에 모든 방향으로 알파벳과 숫자를 이용하여 격자를 10.2cm 간격으로 표시하였다. 각 격자들이 교차하는 지점은 교구의 알파벳과 숫자의 조합으로 명명하였다. 각 교각두부의 명칭은 Fig. 3에서 나타냈듯이 북동, 북서, 남동, 남서로 구분하였다. 또한 각 교각두부는 3면으로 구성되는데 위치에 따라 정면, 남면, 북면으로 나타내었다.

2.2 육안 검사

육안 검사는 사진을 이용하여 교각 두부의 상태는 상세히 기록하였는데, 균열, 피복박리, 철근의 노출 위치 등은 문서화하였다. 이러한 육안검사는 4기의 교각 두부 초기 상태에 대한 기초 정보로 활용하였다.

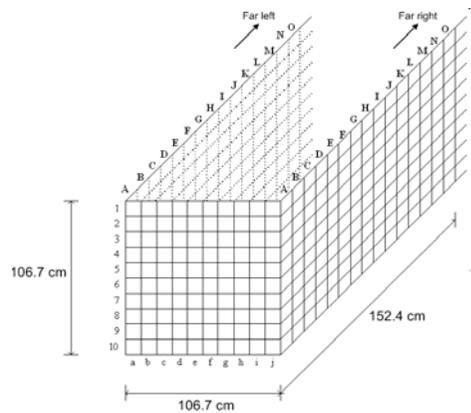


Fig. 2 교각 두부의 해석 위치 명명법

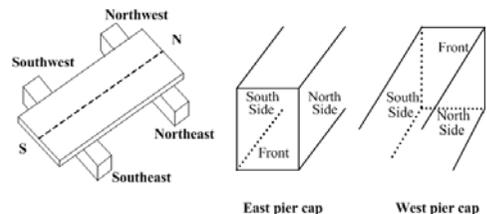


Fig. 3 각 교각 두부와 단면의 명명법

2.3 해머 사운드링 검사

해머 사운드링(Hammer Sounding) 기법은 콘크리트 표면 상태를 결정하는 손쉬운 비파괴검사이다. 도로 포장 검사의 체인 드래그 기법과 유사하게 평범한 망치로 콘크리트 표면을 타격하여 진행되고, 타격 시 소리를 주관적으로 해석하여 콘크리트 상태를 판단한다. 이 기법은 사용자의 판단에 의해 결과가 좌우되나 일반적으로 신뢰할 수 있는 결과를 도출한다. 속이 찬 듯한 소리는 콘크리트 표면 아래에 별다른 이상이 없음을 나타내고 속이 빈 듯한 소리는 콘크리트 표면 아래에 공극, 노후화, 벌집 같은 모양, 혹은 균열이 있음을 나타낸다. 본 연구에서 해머 사운드링 기법을 도식화하기 위해 양호한 콘크리트 상태일 것이라 추정되는 곳은 "1", 불량한 콘크리트 상태는 "0"으로 정의하여 기록하였다. 이렇게 수집된 데이터는 Contour 그래프로 도식화하였다.

2.4 슈미트 해머 검사

슈미트 해머(Schmidt Hammer) 기법은 각 교각 두부의 충격 경도를 이용하여 상대적 강도를 결정하는데 사용하였다. 슈미트 해머 결과의 반발 수치는 압축 강도와 콘크리트 표면의 상대적 상태를 비례적으로 보여준다. 슈미트 해머 검사는 사용이 쉽고, 운반이 용이하고, 저렴하여 자주 사용되나 정확도면에서 다소 아쉬운 점이 있다. 하지만, 파괴 검사나 보다 정확한 비파괴 검사와 병행하여 사용된다면 슈미트 해머는 그러한 검사들이 수행될 한계 단면의 대략적 위치를 파악하는데 도움이 되어 고가의 장비 사용을 줄이는데 일조를 할 수 있다. 본 연구에서는 앞서 언급했던 격자 교차점에서 5회의 타격을 수행하였고 그 결과 값은 사용된 장비에 자동 기록되었다. 이 수치들은 평균해서 해머 사운드링 기법에서처럼 Contour로 도식화하였다. 반발 수치는 콘크리트 압축강도에 직접적인 비율이기 때문에 해머 사운드링 결과처럼 환산은 할 필요가 없었다. 높은 반발 수치는 높은 경도, 즉 높은 강도를 의미하고, 낮은 반발 수치는 낮은 강도를 의미한다. 슈미트 해머가 정량적인 기법이긴 하지만 가변성이 존

재하기 때문에 앞서 말했듯 도식화되기 전 평균값은 5번의 가격 중 최고값과 최저값을 배제한 남은 3 반발 수치만을 이용하였다.⁽¹⁾

2.5 초음파 검사

초음파 기법(Ultrasonic Pulse Velocity Test, UPV)은 매질을 통과하는 음파의 속도가 탄성 물성치의 기능이라는 기본적 이론 하에 콘크리트 부재 내부에 관한 정보를 제공한다. 검사되는 실험체의 파동시간과 기하학적 치수를 이용하여 직접적인 속도를 산정할 수 있다. 초음파 검사는 이 파동시간이나 계산된 속도에 의해 균열, 벌집형태, 노후화된 콘크리트 같은 내부 비정상 단면의 위치를 추적할 수 있다. 초음파에 의한 속도와 주관적 콘크리트 상태의 상관관계가 제시되었고, 이를 Table 1에 나타내었다.⁽⁶⁾

일반적으로 빠른 속도, 즉 파동시간이 짧은 경우는 콘크리트 내부가 양호한 상태이다. 초음파 검사 기구는 파동을 만들어 보내는 송신 변환기와 그 파동을 반사하는 수신 변환기로 구성된다. 양 변환기는 정확한 검사를 위하여 콘크리트와의 접지부에서 틈이 생기지 않도록 부착되어야 한다. 비교적 큰 입자인 콘크리트 재료에는 50kHz 변환기의 사용이 일반적이다. 본 연구에서는 직선형 초음파 검사(Direct transmission UPV)와 내부 사선형 초음파 검사(Diagonal direct transmission UPV)가 콘크리트 내부와 외곽 모서리부의 조사에 각각 적용되었다. 직선형 초음파 검사는 4기의 교각 두부 남면과 북면 사이 거울상과 같은 직선상에서 수행되었다. 직선상의 마주보는 지점으로부터 데이터가 획득되었기 때문에 같은 거리를 적용하여

Table 1 콘크리트 상태와 초음파 속도와의 관계

Longitudinal Pulse Velocity (km / sec)	Quality of Concrete
> 4.5	Excellent
3.5 - 4.5	Good
3.0 - 3.5	Doubtful
2.0 - 3.0	Poor
< 2.0	Very poor

속도를 계산하였다. 내부 사선형 초음파 검사는 정면과 남면 혹은 정면과 북면 사이의 모서리를 마주보는 평면에 대해 수행되었다. 파동은 그 모서리로부터 정면쪽으로 10.2cm 되는 지점에서 남면쪽 혹은 북면쪽으로 10.2cm 되는 지점 사이의 내부 사변면에 대해 적용되었다(평면 1 혹은 Slice 1). 더 나아가 20.3cm×20.3cm(평면 2 혹은 Slice 2), 30.5cm×30.5cm(평면 3 혹은 Slice 3) 평면에서도 내부 사선형 초음파 검사가 수행되었다. 해머 사운드와 슈미트 해머의 결과 해석과 같이 내부 사선형 초음파 검사 결과는 Contour를 이용하여 도식화하였다.

2.6 토모그래피

음향 토모그래피(Tomography)는 적용대상의 내부 평면 속도를 정의하기 위해 초음파 검사 기법을 사용한다. 직선형 초음파 검사는 콘크리트 표면 안쪽의 비정상에 관한 정보를 제공하는 반면, 토모그램(tomogram)은 많은 초음파 광선 경로를 이용해 콘크리트 표면 안쪽의 특정한 단면에 대한 보다 종합적인 정보를 획득하는데 사용될 수 있다. 파동이나 음파는 직선형이나 사선형 같이 동일한 높이의 직선상에서만 수행되지 않고 송신 위치를 고정한 후 수신 위치를 다양하게 이동시키면서 데이터를 획득한다. 본 연구에서는 수신부를 옆에 따라 이동시키며 교각 두부의 세로 방향 단면에 대해 토모그램을 진행하였다. 수신부가 옆을 따라 이동함으로 송신부와 수신부 사이 거리가 변화하는데 이 거리를 고려한 속도는 U. S. Bureau of Mines 에서 개발된 해석 프로그램에 의해 계산하였다. 이 프로그램은 한 점 주위를 지나는 여러 광선 경로의 속도를 수학적 이터레이션에 의해 그 점에서의 속도 또한 계산된다. 전형적인 토모그래프 단면에 대한 광선경로(파동 혹은 음파)는 Fig. 4에서 나타내었다. 토모그램이 수행된 단면의 위치는 정면으로부터 30.5cm 떨어지고 정면에 평행한 단면이다. 다른 모든 초음파 검사와 일관성을 유지하기 위해 토모그램의 진동 속도는 0에서 5.59km/sec 사이 수치만을 데이터로 활용하였다. 보다 자세한 토모그래프 해석에 대한 정보는 참고 문헌에서 (2)(4)에서 접할 수 있다.

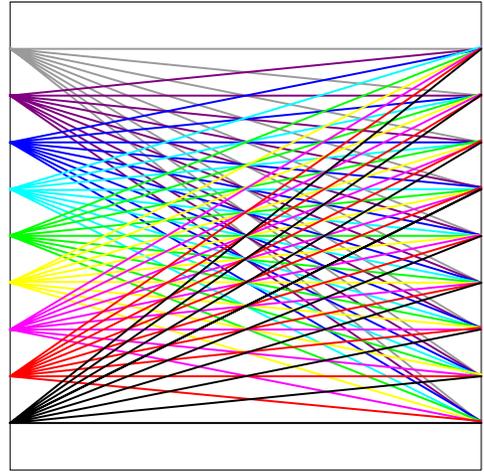


Fig. 4 토모그래피의 광선 경로

2.7 비파괴 검사의 조합

교각 두부의 검사 결과를 일목요연하게 표현하기 위해 해머 사운드, 슈미트 해머, 직선형 초음파 검사의 결과들을 조합하였다. 다른 3종류의 데이터를 조합하기 위해, 각 데이터 위치에 대한 개별검사의 결과는 개별검사 최대치에 대한 백분율로 환산하였다. 질적인 데이터(해머 사운드)가 양적인 데이터보다 다소 정확성이 없을 거라 사료되지만 3종류의 검사들은 동일한 공헌을 한다는 가정 하에 비율 요소 값 1/3을 앞서 계산된 백분율에 곱하였다. 그래서, 조합된 데이터는 단위 없이 0에서 1까지 변화하는 비율적 수치로 나타내었다. 다음은 조합된 효과를 획득하는데 사용된 식이다.

$$CE = \frac{1}{3} \cdot \frac{HS(x)}{HS_{max}} + \frac{1}{3} \cdot \frac{SH(x)}{SH_{max}} + \frac{1}{3} \cdot \frac{UPV(x)}{UPV_{max}} \quad (1)$$

CE=조합 효과(Combined Effect)

HS_{max}=최대 해머 사운드 검사치

HS(x)=각 위치별 해머 사운드 검사치

SH_{max}=최대 슈미트 해머 반발치

SH(x)=각 위치별 슈미트 해머 반발치

UPV_{max}=최대 직선형 초음파 속도

UPV(x)=각 위치별 직선형 초음파 속도

2.8 압축강도 실험

앞서 언급했던 비파괴 검사의 결과는 파괴 검사를 실시할 국부 지역의 선정을 위해서 사용하였다. 이를 근거로 4개의 콘크리트 코어 샘플을 4기의 교각 두부 각각에서 채취하였다. 모든 코어의 압축강도는 원 설계 요구 조건 이상의 강도를 나타냈으나 최저의 압축 강도를 보이는 교각 두부에서 부가적으로 1개의 코어 샘플을 더 채취하였다.

2.9 염화물 양 검사

염화물 검사는 코어 샘플 채취로 추출한 콘크리트를 분말화하여 염화물의 양과 종류를 측정한다. 염화물의 종류 파악은 콘크리트 내부에 위치한 보강철근의 부식 잠재 여부를 결정할 때 큰 역할을 할 수 있다. 본 연구에서는 수용성 염화물과 총 염화물의 양적 해석을 시도하였다.

2.10 암석 분류 검사

콘크리트 내부의 암석 분류는 scanning electron microscope를 이용한 경화된 콘크리트의 미세구조를 검사하는 방법이다. SEM은 실험체 내부에 전자선을 주사하고 실험체와 전자선 교란으로부터 촉발되는 신호를 측정한다. 이런 신호의 조합으로 작성되는 토포그래피(topography)상을 이용하여 입자의 크기, 모양, 표면 조도 등에 대한 정보를 획득한다. 이러한 정보를 바탕으로 콘크리트 내부의 골재 분류, 시멘트의 손상여부 및 손상 원인을 규명한다. 이 기법은 다음과 같은 기존 콘크리트 구조물의 상태를 예측할 경우에 유용하다.

- ㉠ 콘크리트 열화의 원인 결정 및 향후 기대 가능한 성능
- ㉡ 시멘트 층에 대한 상세 정보
- ㉢ 알칼리 실리카 반응 혹은 알칼리-카보네이션 반응의 존재 여부
- ㉣ 황산염 침투에 의한 영향
- ㉤ 동결 용해에 의한 해로운 영향

3. 실험결과 및 해석

비파괴와 파괴 검사의 결과는 구조물에 대한 보수 및 유지 계획을 결정하는 중요한 자료로 사용될 수 있는데, 본 연구에서는 교각 두부의 부분 보수와 전면교체를 검토하였다. 다음에 소개되는 절차에 준하여 기본적인 해석이 수행되었다.

- (1) 사진과 육안에 의한 검사가 콘크리트의 초기상태와 노후화를 결정하는데 사용
- (2) 해머 사운드링, 슈미트 해머, 초음파 검사가 각 교각 두부에 수행
- (3) (2)에서 행해진 검사들을 조합한 Contour 작성
- (4) (1)에서 (3)의 결과를 이용하여 파괴검사인 코어 샘플링의 위치를 결정
- (5) 코어 샘플을 이용하여 염화물과 압축강도에 대한 검사가 수행
- (6) 암석 분류 검사가 수행될 위치가 선정

Table 2는 4기의 교각 두부의 파괴와 비파괴 검사에 대한 결과 요약을 나타낸 것이다. 북동과 남동 교각 두부는 각 면마다 크고 작은 균열과 정면 상단에서 콘크리트 피복 분리로 인한 보강철근의 노출이 있었다. 북서 교각 두부는 북면, 남면, 정면 각각에서 세로, 가로, 사면 방향으로 큰 균열이 발견되었고, 남서 교각 두부는 앞서 언급한 다른 교각 두부와 비교하면 폭의 견지에서 작은 균열만을 보였다. 또한, 파괴 검사의 결과로서 북서 교각 두부는 최저 압축 강도와 최대 염화물의 양을 보여 4교각 두부 중 가장 상태가 나쁜 것으로 판명 되었다. 이러한 이유로 북서 교각 두부는 암석 분류 검사 수행 대상으로 결정되었다. 결론적으로, 북서 교각 두부만이 앞서 언급한 6단계 해석 절차가 실시되었다. 본 연구에서는 반복을 피하면서 모든 해석 절차를 보여줄 수 있는 북서 교각두부의 결과만을 나타내었다.

3.1 육안 검사

Fig. 5~Fig. 7은 북서 교각 두부의 각 면(북면, 남면, 정면)을 보여준다. Fig. 5는 북서 교각 두부 북면의 육안 확인 상태이다.

Table 2 각 교각 두부 상태 요약

	Hammer Sounding		Schmidt Hammer		Ultrasonic Pulse Velocity	
					Direct	Corner
Northeast	S	Poor condition to approximately 10.2 cm from front face	N	Poor condition to approximately 10.2 cm and at top corner	Poor condition to approximately 10.2 cm from front side	Overall poor condition at slice 1 and poor condition at top of slices 2 and 3 at north corner
Northwest	S	Poor condition to approximately 10.2 cm from front face and at bottom	S	Poor condition at bottom portion	Poor condition to approximately 71.1 cm from front face	Overall poor condition at slices 1, 2, and 3 at north corner Overall poor condition at slice 1 at south corner
	F	Poor condition at north and south bottom corners	F	Poor condition at bottom and north portion		
	N	Poor condition to approximately 20.3 cm from front face and at top and bottom	N	Poor condition to approximately 76.2 cm from front face		
Southeast	S	Poor condition to approximately 30.5 cm from front face	S	Poor condition to approximately 10.2 cm from front face	Poor condition to approximately 10.2 cm from front face	Poor condition at top of slices 1, 2, and 3 at north corner Overall poor condition at slice 1, and poor condition at bottom of slice 2 and top of slice 3 at south corner
	N	Poor condition to approximately 10.2 cm from front face	F	Poor condition at top and along south edge		
Southwest	S	Poor condition at top and bottom portion	Overall good condition on north, front, and south faces		Poor condition at top corner	Poor condition at bottom of slices 2 and 3 at north corner Poor condition at top of slice 3 at south corner
	F	Poor condition at south bottom corner				
	Tomography		Visual Inspection		Core Test	
Northeast	Poor condition at top and bottom		Concrete cover spall and exposed reinforcement at top north corner		40.68 MPa(5900 psi) 0.354% water soluble chloride content	
Northwest	Poor condition at top and bottom on north side Poor condition at bottom on south side		Serious crack lines at bottom north corner on front side and at bottom on south side		30.54 MPa(4430 psi) 0.509% water soluble chloride content	
Southeast	Poor condition at top on north side		Concrete cover spall and exposed reinforcement at top on front side		41.64 MPa(6040 psi) 0.319% water soluble chloride content	
Southwest	Poor condition at bottom on north and south sides		A few crack line on north and south sides		40.40 MPa(5860 psi) 0.266% water soluble chloride content	

Note. N: north, F: front, S: south side



Fig. 5 북서 교각 두부 복면의 육안검사
(표시된 선은 균열)



Fig. 6 북서 교각 두부 정면의 육안검사
(표시된 선은 균열)

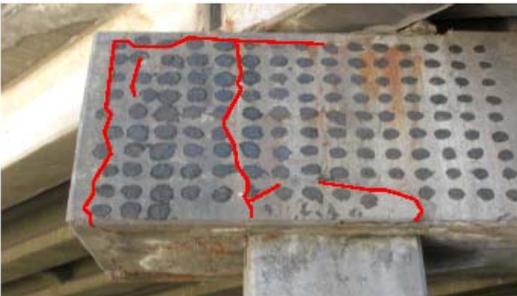


Fig. 7 북서 교각 두부 남면의 육안검사
(표시된 선은 균열)

복면에서 0.635cm부터 1.27cm까지의 세로, 가로, 경사 균열이 정면 방향으로 형성되어 있었다. 이 세 종류의 균열은 한 지점에서 만나 Fig. 6에서 보여지듯 정면의 바닥부 경사 균열로 연결되었다. Fig. 6에서 이 교각 두부의 바닥부는 경계선 주위로 많은 균열이 존재하였다. 또한, 세로와 가로 방향 균열은 Fig. 7에서 보여지듯 남면의 앞부분에서 관측되었다. 이렇

듯, 육안 검사에 기초한 콘크리트의 전반적 상태는 정면 모서리 주위 모든 면이 불량하다고 판단되었다.

3.2 해머 사운딩 검사 결과

북서 교각 두부의 복면에 대한 결과는 정면으로부터 약 20.3cm 지점까지의 콘크리트가 좋지 못한 것으로 나타났다. 남면에서는 정면으로부터 10.2cm 지점까지 좋지 못했다. 덧붙여 정면에서 불량한 콘크리트는 바닥부 양 모서리에서 발견되었고, Fig. 8은 북서 교각 두부의 각 면들에 대한 결과를 나타낸 것이다.

3.3 슈미트 해머 검사 결과

앞서 거론된 해머 사운딩 결과와 슈미트 해머 결과는 그 두 검사 기법이 유사한 것처럼 높은 연관성이 있었고, 차이점은 슈미트 해머가 상대적 반발도에 기초한 수치를 제공하는 것이다. 그리고, 슈미트 해머 검사 기법은 해머 사운딩 검사와는 다르게 검사자의 주사 기법은 해머 사운딩 검사와는 다르게 검사자의 주관이 개입되는 것을 배제할 수 있었다. 데이터의 결과는 0에서 55 사이의 수치로 표현되었다. Fig.2에 도식화된 각 격자점에서 5회 타격을 실시하고 가장 높은 수치와 낮은 수치를 배제한 3데이터 값의 평균값을 각 격자점의 슈미트 반발 강도치로 산정하였다. Fig. 8과 유사하게 슈미트 해머 데이터는 Fig. 9에 도식화하여 나타내었다. Fig. 9는 정면으로부터 76.2cm 지점까지 불량한 콘크리트가 존재함을 나타내고 있다.

3.4 초음파 검사 결과

초음파 검사의 결과는 속도로서 산정되었는데 그 범위는 앞서 말했듯이 0에서 5.59km/sec였고 모든 데이터는 객관성을 유지하기 위해 Ryall(Table 1)의 분석결과와 비교 하였다. 직선형과 내부 사선형 초음파 검사 결과와 토모그래피 결과는 아래와 같다.

· 직선형 초음파 검사 결과

북서 교각 두부의 직선형 초음파 결과는 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 정면으로부터 71.1cm까지 취약한 콘크리트가 존재한다는 것을 나타냈다.

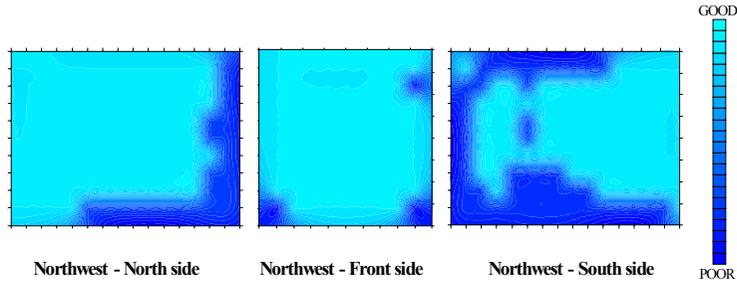


Fig. 8 북서 교각 두부의 해머사운드 검사 결과

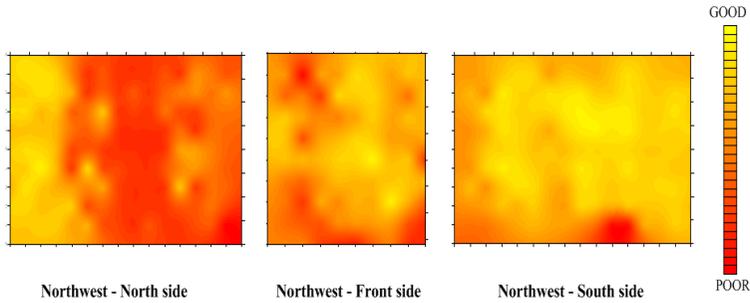


Fig. 9 북서 교각 두부의 슈미트해머 검사 결과

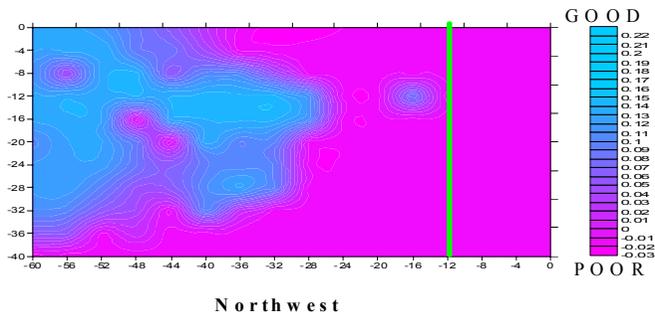


Fig. 10 북서 교각 두부의 전단면 초음파 검사 결과

· 내부 사선형 초음파 검사 결과

내부 사선형 초음파 검사는 북면 혹은 남면 모서리의 10.2cm, 20.3cm, 30.5cm 되는 곳으로부터 정면 모서리의 10.2cm, 20.3cm, 30.5cm 되는 지점 사이 3 단면에 대해 행해졌다. 10.2cm×10.2cm 평면을 단면 1, 20.3cm×20.3cm 평면을 단면 2, 30.5cm×30.5cm 평면을 단면 3이라 명했는데 이러한 평면의 위치는 Fig. 11과 Fig. 12의 작은 아이콘으로 나타냈다. Fig. 11(북면과 정면 사이)에서 나타냈듯이 단면 1과

단면 2는 전반적으로 불량한 콘크리트 상태이고 단면 3은 바닥부가 취약한 상태였다. Fig. 12에서 모든 단면의 바닥부와 중앙부가 취약한 상태로 판명됐다.

· 토모그래피 검사 결과

토모그래피 해석은 정면으로부터 30.5cm 떨어진 남면과 북면 사이의 단면에서 수행되었다. Fig. 10에서 세로방향 녹색 실선은 토모그래피가 행해진 위치를 보여준다. 북서 교각 두부의 결과는 Fig. 13에서 알 수 있듯이 검사된 단면의 외부가 취약하고 내부는 문제가 없는 것으로 나타났다.

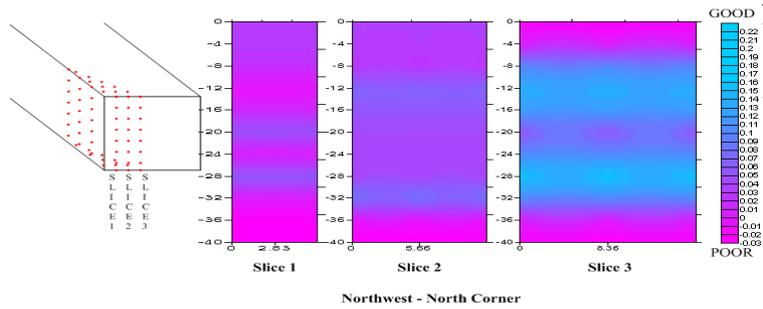


Fig. 11 북서 교각 두부의 북쪽 모퉁이 초음파 검사 결과

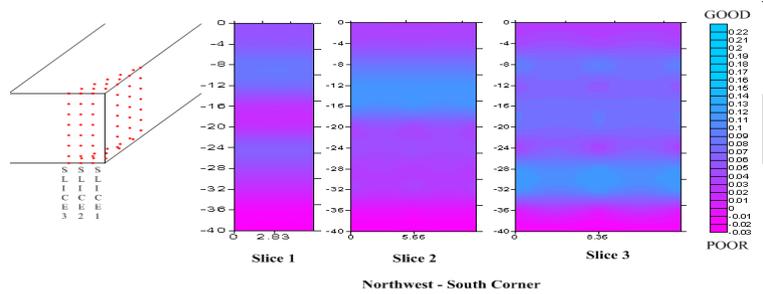


Fig. 12 북서 교각 두부의 남쪽 모퉁이 초음파 검사 결과

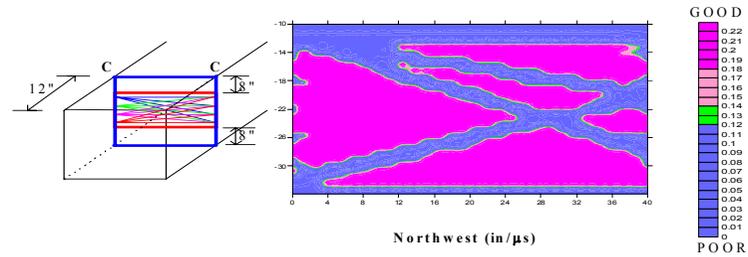


Fig. 13 북서 교각 두부의 토모그램

3.5 비파괴 검사 조합 결과

해머 사운드, 슈미트 해머, 직선형 초음파 검사의 결과는 수식(1)을 이용하여 조합된 한 그래프로 표현되었다. 그 결과는 Fig. 14에 나타냈듯이 북서 교각 두부의 남면에 대해 정면으로부터 20.3cm 지점까지, 그리고 바닥부와 상부에서 취약한 콘크리트가 존재하였다. 북면에 대한 조합된 그래프는 Fig. 15에 보여 지는데 정면으로부터 76.2cm 지점까지의 콘크리트가

취약한 것으로 판명되었다. 또한 이 조합된 그래프는 시각적으로 좋은 효과를 보인다.

3.6 파괴 검사 결과

길이가 45cm이고 지름이 7.62cm인 코어가 앞서 언급했듯이 4기의 교각 두부로부터 5개가 채취되었고 압축강도를 검사하였다. 4기의 교각 두부의 평균 압축강도는 40.89MPa였고 최저의 압축강도는 북서 교각

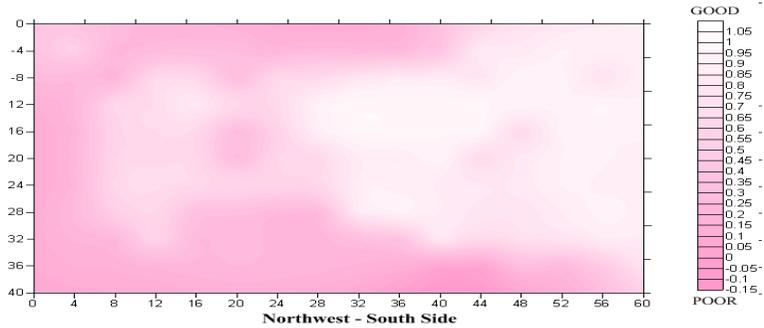


Fig. 14 북서 교각 두부 남면 비파괴 검사 결과의 조합도

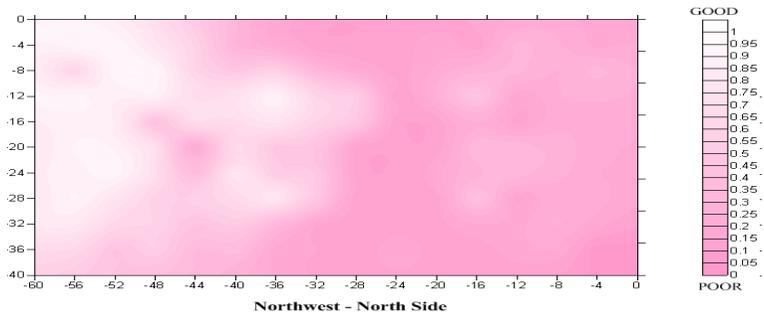


Fig. 15 북서 교각 두부 북면 비파괴 검사 결과의 조합도

두부로서 30.54MPa였다. 북서 교각 두부의 압축강도는 4기의 교각 두부의 평균 압축강도보다 10MPa 정도 낮았고 최고치를 기록한 남동 교각 두부보다는 11MPa 정도 낮았다. 하지만 모든 교각 두부의 압축강도는 최초 설계 강도인 20.68MPa보다 높았다.

염화물 검사 결과는 수용성 염화물 양이 0.27%에서 0.51%였고 총 염화물 양 검사가 수용성 염화물 양 검사보다 15% 정도 높게 측정되었다. 본 연구에서 북서교각 두부는 최대의 염화물 양을 함유하고 있는 것으로 나타났다. 하지만 4기의 교각 두부의 염화물 양은 일반적인 철근 콘크리트 구조물에는 문제가 없는 수치였다.

암석 분류 해석 결과는 북서 교각두부의 균열이 알카리 실리카 반응과 알카리 실리카 젤에 의해 야기되는 내부 압력에 의한 것으로 사료되었다. 이는 겨울철 눈이 많이 내리는 지역의 특성으로 염화칼슘의 잦은 사용이 원인일 것이라 추정된다. 하지만 동결융해로부터 손상은 관측되지 않았다. 이 검사는 또한 콘크리트

가 공기 연행되었고, 공기 간극이 원형이고, 부피면에서 8.9% 정도 점유한다는 것을 보였다. 공기 간극의 권장치는 부피면에서 4.5~7.5%이다. 굵은 시멘트 페이스트는 부피 면에서 23%의 시멘트 양을 차지하고 있었다. 굵은 골재는 규암, 갈색 반암, 편암 등으로 구성되어 2.54cm의 최대 공칭크기를 보였다. 암석 분류 해석의 결론은 연구된 교각 두부들이 35년의 실제 나이에도 불구하고 15년의 평균 나이를 나타냈다. 파괴 검사에 대한 결과는 Table 3과 4에 나타났다.

Table 3 파괴검사 요약

Pier Cap	Density (kN/m ³)	Compressive strength (MPa)	Chloride testing	
			H ₂ O Soluble Cl	Total Cl
Northeast	21.945	40.68	0.354	0.372
Northwest	21.898	30.54	0.509	0.585
Southeast	22.055	41.64	0.319	0.384
Southwest	22.055	40.40	0.266	0.333

Table 4 암석분류해석 결과

	Air Content % by volume	Spacing Factor (inch)	Specific Surface (in ² / in ³)	Voids per inch	Paste / Air Ratio	Paste content % by volume
Northwest	8.9	0.005	488	10.85	2.58	23
Standard	4.5 - 7.5	Less than 0.008	At least 600	(1.5 to 2)×(% air)	NA	NA

4. 결론 및 제언

공용중인 교량의 교각 두부 4기를 비파괴와 국부적 파괴 검사를 이용해 검사하였다. 육안 검사, 해머 사운딩, 슈미트 해머, 초음파 검사가 모든 교각 두부에 대해 수행, 완료 되었고 압축강도, 염화물, 암석 분류 검사 또한 복서 교각 두부에 실행되었다. 본 연구에서 완료된 검사 데이터를 통해 보수 유지 시나리오가 도출되었고 그 시나리오는 전체 교각 두부의 교체보다는 국부적 교체 및 보수로 결정되었다. 이렇듯이 파괴 검사와 비파괴 검사의 혼용은 최소 비용으로 의사 결정 능력을 증대 시켰다. 참고로 검사직전의 초기 결정은 구조물 전체의 교체였다.

본 연구에서 진행되었던 의사 결정까지의 절차와 방법을 간단히 요약하면 다음과 같다.

1. 육안적 검사를 통해 대상 구조물의 상태를 요약
2. 해머사운딩 검사를 통해 불건전한 콘크리트의 위치 파악
3. 슈미트 해머 검사를 통해 불건전한 콘크리트의 위치를 데이터화함으로써 파괴검사나 고가의 장비가 드는 다른 비파괴 검사 영역을 도식화함
4. 토모그램 해석을 포함한 초음파 검사를 수행하여 불건전한 콘크리트의 단면들을 분석하여 파괴검사의 위치 산정
5. 비파괴 검사에 의해 산정된 위치에 기준하여 파괴검사(코어링)를 수행
6. 추출된 코어를 이용하여 필요한 검사 수행
7. 최소 비용의 의사 결정을 돕기 위해 수행된 파괴 검사 결과와 비파괴 검사 결과를 이용해 보수나 혹은 보강 영역 및 방법을 제안

위 명시한 절차를 통해 본 연구에서 수행한 대상 구조물에 권장하는 보수는 양호한 내부까지 외곽 콘크리

트를 제거하고 새로운 물질(고성능 혹은 고강도 콘크리트)로 대체하는 것이다. 이는 적어도 토모그래프가 수행되었던 평면(30.5cm) 보다는 내측이어야 한다. 최종적인 콘크리트 제거 양은 보수하는 동안 육안에 의해 결정되어야 할 것이다. 그래서 검증된 기술자가 보수에 참여하는 것이 바람직하고 보수하기 직전 보수 재료가 위치할 단면에 대한 검사도 포함되어야 할 것이다. 또한 노후화된 보강 철근도 교체되어야 한다.

감사의글

본 논문은 건설교통부 건설핵심연구개발사업(05건설핵심 D11-01)의 지원으로 수행되었으며 전폭적인 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

1. ASTM C 805, "Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete," ASTM Standards Vol. 04.02, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA, 1997.
2. Hager, A., "Non-Destructive Evaluation of the Westbound Sixth Avenue Viaduct," Master of Science Thesis, University of Colorado at Denver, May 2005.
3. Liephart, G.S., Rens, K.L., & Knappmiller, J., "Gauge Capability Analysis in Data Collection for Acoustic Tomography," Journal of Infrastructure Systems, ASCE Vol. 5, No.1, March 1999, pp. 11-20.
4. Rens, K.L., Transue, D.J., & Schuller, M.P., "Acoustic Tomographic Imaging of Concrete Infrastructure: History, Interest, and Applications," Journal of Infrastructure Systems, ASCE, Vol. 6, No. 1, March 2000, pp. 15-23.

5. Rens. K.L & Transue. D.J., "Tomographic Imaging of Cracked Pier Cap of Evans over Santa Fe Bridge," Concrete Repair: International Concrete Repair Institute Vol. 15, No 4, July 2002, pp. 22-29.

6. Ryall. M.J., "Bridge management," Butterworth-Heinemann, Woburn, MA 01801-204136~51, 2001.

(접수일자 : 2007년 4월 7일)