

NDT-CE Symposium Berlin 1995: A Concluding Review

G. Schickert
독일비파괴검사학회

이 글은 1995년 9월 26일부터 28일까지 베를린에서 개최된 “토목공학에서의 비파괴 검사에 관한 국제 심포지움”에서 독일비파괴검사학회 회장인 G. Schickert 박사가 심포지움을 마감하면서 발표한 심포지움의 review를 번역한 것으로, 본문에 충실하도록 노력하였고 다만 참고문헌만 변경하였다. 성수대교나 삼풍백화점과 같은 대형 구조물의 붕괴 사고가 일어난 국내 실정을 감안할 때에 토목공학에서의 비파괴검사에 관한 세계적인 추이를 고찰할 수 있는 좋은 글이라 생각된다. 이 글을 번역하여 한국비파괴검사학회지에 게재할 수 있도록 허락하여 주신 G. Schickert 독일비파괴검사학회 회장께 감사드린다.

역자 : 김영환(대한검사기술주식회사)

1. 도입

이 글은 1995년 9월에 베를린에서 열린 “토목 공학에서 비파괴검사(Nondestructive Testing in Civil Engineering: NDT-CE)”에 관한 국제 심포지움에 발표된 200여개의 구두 및 포스터 발표에 관한 개괄을 제공하기 위한 것이다. 발표 논문은 모두 proceeding에 인쇄되었다.

따라서 이 글은 심포지움에 대한 해설이 붙은 일종의 분류 목록으로, 심포지움의 주제와 시험되어야 할 대상과 문제들을 관통하는 하나의 지침서이며 또한, 과거의 발전에 기초한 전 세계의 토목공학에서의 비파괴 검사의 현재 상황을 보여주고 있다. 이렇게 해서 독자들은 NDT-CE 방법들을 적용해 스스로가 새로운 단계의 연구를 수행해 나가는데 용기를 얻게 될 것이다. 그러나 분명한 것은 발표문들의 모든 측면들을 고려한다는 것은 불가능하다는 것이다. 그래서 연구 결과를 인용

하거나 검사법의 특수한 사용 및 명명에 대해서 심사를 하지 않았다. 이들에 대한 책임은 저자들에게 있다.

그러나 일부 개념들은 동일하게 사용해야 한다. “건축물 혹은 구조물의 진단(diagnosis)”이라는 용어는 특별한 의미가 배제된 포괄적인 표현이다. “진단(inspection)”은 주기적으로, 예를 들면 수 개월마다 혹은 수 년마다 반복되어야 하는 활동을 나타내며 이것과 대조적으로 구조물의 “control”은 시험(test)에 대한 요구가 있을 때 이루어지는 활동이다. 마지막으로 “감시(monitoring)”는 장비와 함께 혹은 장비없이 지속적인 관찰을 요구하는 활동이다.

Non-Destructive Civil Engineering: NDCE

1985년과 1991년에 이어 1995년에 NDT-CE에 관한 제 3차 심포지움이 베를린에서 있었다. 발표된 논문들은 다시금 NDT-CE의 폭넓은 과업과 기술들에 대해 입증하였다. 새로운 측정 장치들이 개발되었거

나 실용화되고 있다. 더구나 타 분야의 과학자들과 기술자들 간의 협력이 요구되고 있으며 근접 분야들의 절차서가 채택되어 적절하게 조정되고 있다. 초기엔 전형적인 실험실용 시험 방법들이 현장 적용용(in-situ application)으로 개발된 까닭으로 일부 실험실용 보고서들 역시 향후 현장에 적용되길 바라면서 심포지움에 제출되었다.

NDT-CE는 사실 무엇보다도 토목 공학에서 in-situ 측정을 나타내는 것이다. 여기엔 표준화와 자격 부여와 같은 더 나아가 활동들을 포함하는 중심적인 분야로서, 측정 방법을 달리하는 큰 활동 영역이 존재한다. 사실 NDT-CE 기술을 적용하기 위해서 뿐만 아니라 사용할 측정 장비의 물리적 기초는 말할 것도 없고 측정 대상 구조물이나 재료가 지닌 문제를 이해하기 위해서도 자격을 갖춘 숙련가가 필요하다. 이것이 소위 "엔지니어링"이라는 용어가 정확하게

의미하는 바이다.

이러한 노력들의 필요성, 중요성 그리고 복잡성을 평가하는데서 (Fig. 1 참조) 자연스럽게 이 분야의 활동들을 비파괴 토목공학(Nondestructive Civil Engineering: NDCE)으로 부르기로 제안되어 왔다.

NDT-CE의 한계

NDT-CE는 다른 분야와 비교해 볼 때 상대적으로 연륜이 짧은데도 불구하고 시험 기술과 과정의 다양성은 엄청나다고 할 수 있다. 그러므로 NDT-CE의 범위를 즉, 주요한 측정 대상과 문제점 그리고 방법에 포함되는 것과 포함되지 않는 것을 정의하는 것이 필요하다. 물론 이러한 경계를 짓는데 물리적으로나 이론적으로 특별한 이유가 있는 것은 아니다. 이렇게 제안된 범위가 오직 실용적일 따름이다. (Fig. 2 참조).

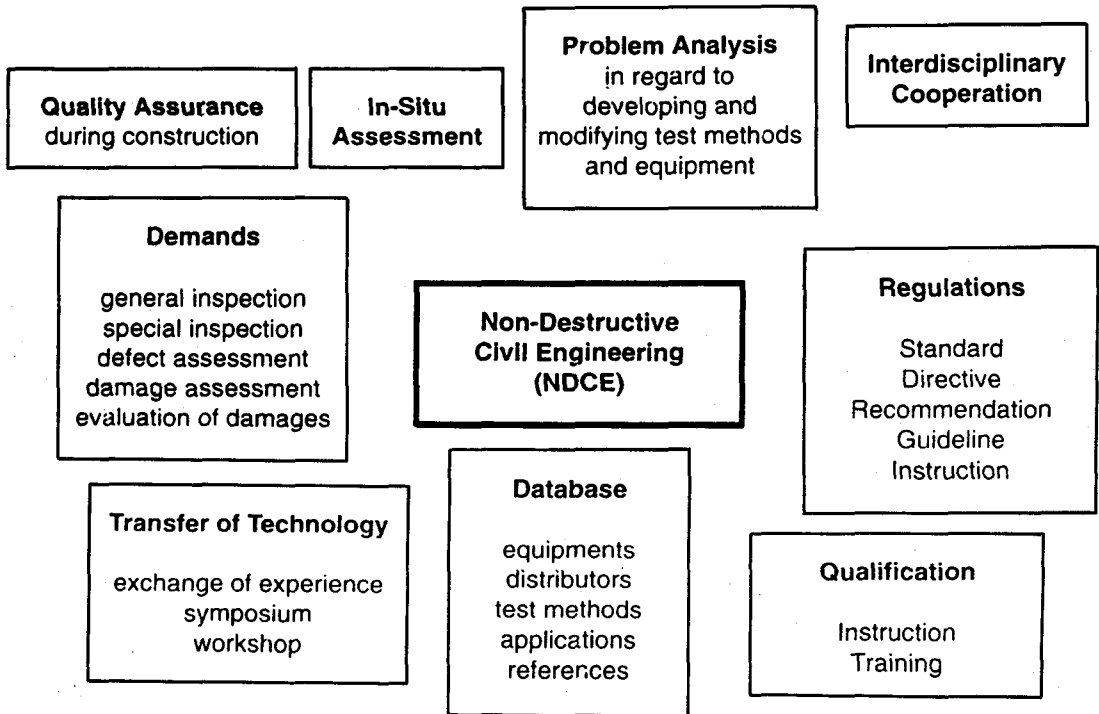


Fig. 1. 비파괴 토목공학(NDCE)의 구성 요소

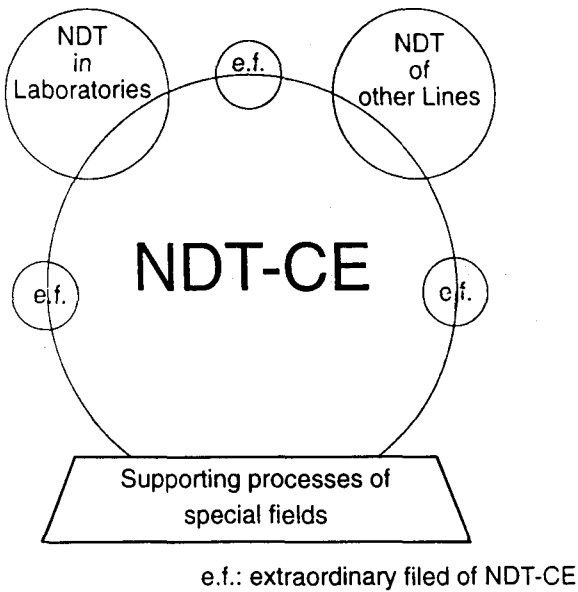


Fig. 2. 토목공학에서 비파괴검사(NDT-CD)의 시스템

전형적인 토목 공학 활동들 모두가 NDT-CE의 주요한 분야에 포함된다. NDT-CE와 관련된 대부분의 주요 어휘들을 Fig. 4에서 Fig. 7까지 나타내었다. 여기서 이미 NDT-CE 혹은 NDCE가 모두 복잡함을 알 수 있다. 그러나 의심할 여지없이 토목 공학자들에게 여기서 언급되지 않은 또 다른 과제들이 있다. 사실 강구조물 설비나 용접 구조물 부재들은 수십 년전부터 잘 알려진 NDT 방법들을 적용하여 검사해 왔다. 따라서 유용한 경험과 표준들이 축적되어 있다. 자격을 갖추고 공인된 기술자들이 이러한 시험들을 실내외에서 수행하고 있다. 그러나 이외에 다른 학문 분야, 예를 들면 의학같은 분야에서도 NDT 방법들을 적용하고 있다. Fig. 2에서 대략 나타내었지만 그런 분야들은 부분적으로 NDT-CE의 방법들과 겹치는 데가 있다. 따라서 경험의 교류에 관해서는 뚜렷한 경계가 없어야 할 것이다. 그러나 다른 무엇보다도 이런 학문 분야들은 자신들의 심포지움을 통해 NDT-CE와는 구별된다. 예를 들면 불과 얼마 전 “예술 작품들의 비파괴검사에 관한 국제회의”가 열렸는데 이 역시 부분적으로 역사적 건축물들을 취급하였다.

NDT-CE와 접하는 다른 분야들이 있다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 “Other Lines”이라는 분야(field 2) 외에 전형적인 실험실용 시험 기술들을 나타내는 분야(field 1), 그리고 수치계산과 같은 지원 분야(field 3)가 있다. 이 두가지 경우에도 대부분의 절차서들이 원래는 다른 분야에 적용되던 것들이 발전되어 온 것이다. 그러나 부분적으로 NDT-CE의 요구 및 방법들과 겹치므로 지식의 상호 교류를 이루는 것이 좋다.

마지막으로 Fig. 2에서 나타내었듯이 최소한 일시적이거나 특별한 중요성을 갖는 NDT-CE 영역들이 있다. 예를 들면 “Extra Ordinary Fields”와 같은 영역은 문제점들과 수치적 해답 그리고 시험 기술들을 더욱 상세하게 토론하기 위하여 스스로의 워크샵을 조직하고 있다. 따라서 일종의 별도의 심포지움인 “Moisture Day”가 베를린의 NDT-CE 심포지움 이튿날에 개최되었다.

Result of adjoining fields to NDT-CE

NDT-CE는 최소한 두 측면을 지니고 있는데 기술적인 측면과 계약자의 견해로부터의 측면이다. 물론 시험 방법들은 저렴한 가격에서 빠르고 정확하게 이루어져야 하며 오랜 경험의 자격을 갖춘 기술자들이 수행해야 한다.

NDT in laboratories (field 1 in Fig. 2)

크립과 수축공에 대해 연구된 최근에 개발되고 있는 고성능의 콘크리트에 대해서 NDT-CE 기술에 관한 새로운 의무들이 생겨날 지 모른다. Building dynamics의 영역에서는 토양에 관한 특성 값들이 요구되고 있다. 이러한 목적으로 resonant-column device를 실험실에서 사용하고 있다. NDT-CE 적용에 대한 유익한 충격을 주는 다른 이웃 학문 분야로는 파괴 역학, 고온 열화 시험, irradiation, accelerated corrosion, 혹은 염분 확산 등이 있다. 미세한 변형률과 변위 분포나 시멘트 기지로 감싸인 철강 섬유 미세한 기계적 거동도 기록되어야 한다. 내하중 시험과 더불어 음향 방출 기술을 현장에 적용한다면 좋을 것이다. 그러나 무엇보다도 그런 시험들은 예를 들어 콘크리트나 다른 시험체 혹은 실린더 형의 암석 시험편의 파괴 기록을 기록하기 위한 일종의 실험실용 기술이다. 불만

정한 균열 성장의 시작은 음향 신호의 활동이 심하게 나타나는데 이것은 dilatancy, 즉 응력-변형 곡선을 뒤집어 놓은 것과 관련이 있다. 아스팔트 혼합재에서 피로 시험 동안 발생하는 균열을 컴퓨터 단층촬영으로 관찰하였다.

NDT of other lines (field 2 in Fig. 2)

Vault bridge 내하중이 계산 값과 실제 값이 다르다면, 시험을 해야 하는 몇 가지 이유가 있다. 따라서 특별한 경우엔 변위와 변형을 짝지워 실행하는 것이 필요하며 유용한 정보를 얻을 수가 있다. 비파괴 혹은 거의 비파괴적인 방법들을 사용해 강 교량의 잔존 피로 수명을 평가하는데 도움을 얻을 수 있다. 프리스트레스 콘크리트 부재에서 철선 하나의 prestressing level의 현장 측정에 관한 내용이 연구된 바 있고 두께 측정용 열전달법을 취급하고 있는 연구도 나와 있다. 강자성체가 아닌 재료는 특수한 자기적 방법에 의해 600mm까지 두께를 측정할 수 있다. 특수한 실외용 측정 설비로 수동 혹은 능동 태양열 건물 부재를 검사하는 동안 열물리 변수들이 결정되는데 이것들로 말미암아 실제 기상 조건에서 벽과 빌딩 구성 요소들의 동적 거동들을 연구할 수 있다.

다른 절차에 의해 지원되는 NDT-CE (field 3 in Fig. 2)

재료의 특정 거동과 성질에 기초한 알고리즘을 공식화하기 위해서는 오랜 작업이 필요하다. 무엇보다 어려운 것은 절차서를 거슬러 가는 것으로, 전체적인 결과는 알려져 있고 이로부터 출발해 재료의 거동과 조건에 대한 다른 변수들을 계산해 내는 것이다. 따라서 적외선에 의한 영상을 분석하여 탄소 섬유 강화 플라스틱내 결합들의 두께와 깊이를 알아낸다. 다른 알고리즘은 열이나 적외선 방사를 개별적으로 언급하고 있거나 열과 공기 그리고 수분 이동을 결합시켜 언급하고 있다. NDT-CE 측정에 더하여 상호 작용하는 열과 기후 조건의 모델링이 매우 중요하다. 열 에너지에 관해서는 방과 기후 에너지의 신축적인 모의 실험용 프로그램이 제시되었다. 일반적으로 시험 결과 수치의 평가엔 수학적 방법이 큰 도움이 된다. 보고된 것들 중 대다수는 특별한 재료에서 열 전

달을 언급하고 있다. 복합재료를 평가하는데 초음파 단층 촬영술을 사용하고 있다. 그 데이터의 분석은 음향영상처리용 프로그램에 기초하고 있다. 마지막으로 NDT-CE 시험 데이터는 다른 데이터들처럼 통계적 방법에 의해 점검할 필요가 있다. 따라서 데이터 사이의 통계적 연관 관계를 밝힐 수 있다.

토목공학에서 비파괴검사의 구성 요소들

NDT-CE 활동들에 대한 일람표를 만드는데 여러 방법이 있다. 다양한 측정 방법들을 기준으로 할 수도 있고 측정 대상 혹은 문제들을 기준으로 할 수도 있다. Fig. 3은 이러한 구성 요소들을 보여 주고 있는데 제 요소들은 서로서로 의존하고 있다. 때때로 측정 방법이 논쟁의 표면으로 나타나고 다른 한편 다른 비파괴검사 기술을 요구하는 문제들이 논쟁거리가 된다. 이 글에서는 이런 모든 구성 요소들을 받아 들였다. 이것이 의미하는 바는 심포지움에 발표된 논문들을 “대상물”이라는 제목 아래 언급할 수 있다는 것이며 “측정 방법” 혹은 “action”이 지적될 때 두세번 언급할 수 있다는 것이다. 이렇게 해서 독자들은 포괄적인 개괄을 빨리 이해하고 특별하게 자신이 관심을 가진 문제로 나아갈 수가 있다. Fig. 4~7에 수록된 주요 어휘들이 매우 다양한 NDT-CE 과업들을 나타내고 있음을 한 눈에 알 수 있다.

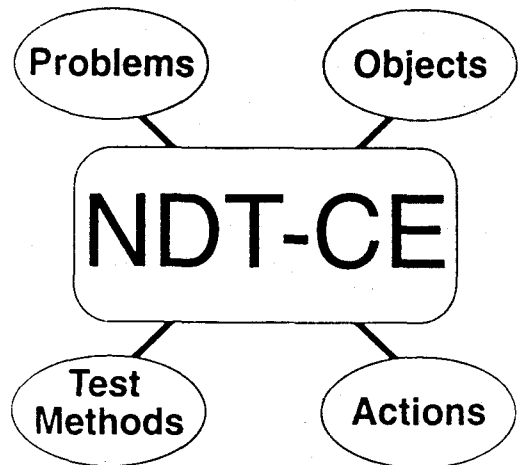


Fig. 3. 토목공학에서 비파괴검사의 구성 요소들

NDT-CE	Contributions on Testing Objects	
	<i>many</i>	<i>some</i>
Historical Buildings, Masonry	Concrete Structures	Natural Stones
Bridges	Piles	Soils
Reinforcements	Wood	Asphalt
Pavements	Prestressing Bars	Roads

Fig. 4. 검사 대상을 기준으로 분류한 발표문들

2. 검사 대상들

역사적 건축물들과 석조물

석조 건물에서 불균질을 검출할 경우 충격시험에 의한 mechanical wave의 속도가 초음파 속도보다 더 적절한 것으로 입증되었다. 일반적으로 석조 건물의 검사에서 주요 목표는 습한 부위를 찾아내는 것이다. 이러한 관점에서 레이더에 의한 방법과 단일 주파수 전자파 검사법이 비교되고 있다. 습기는 소위 "dielectric 혹은 electric capacity method"에 의하여 간단히 찾아 낼 수 있다. 벽들과 몰탈 및 그 계면과 같은 다공질 건축 재료에서 젖고 마름에 의한 습기의 윤곽을 핵자기 공명법을 사용해 알아낼 수 있다. 그의 나머지 변수로는 두께, 기공 그리고 몰탈 충전이 있다. 여기서도 레이더는 적절한 시험 도구가 된다는 것이 밝혀졌다. 오래된 자연석을 새로운 석재로 교체해야 할 때 문제들이 발생하는데 이것은 오래된 돌들이 열, hygric, 기계적 응력을 받게 되기 때문이다. 실시간 holographic 간섭계를 사용하면 수 μm 크기의 변형을 형상화시킬 수 있다. 넓은 의미로 묘비 역시 역사적 건축물이다. 여태까지는 대개 초음파 펄스 속도법을 적용해 대리석이 나 다른 자연석 등의 내부 불균질, 동공, fissure와 손상 부위를 평가하였다. 역사적 건축물들의 경우 고대

벽돌의 채색 변화로 말미암은 문제들이 있다. 관련된 측정 기술은 "적외선 thermography"에 기초하고 있다. 단층촬영술에 의한 영상은 검사법에서 놀라운 발전을 가져왔다. 두 개의 탐촉자(source, receiver)가 검사체 주위를 움직인다. 대상체의 최대 직경과 길이는 측정 장치의 성능에 달렸다. 직경 1.5m의 기둥을 레이더를 이용한 단층촬영술로 검사하였다.

교 량

교량의 상태를 총체적으로 평가하기 위해서는 무엇을 측정할 것인가는 물론이고 무엇보다도 비파괴 검사를 받아야 될 특별한 영역들이 좁혀져야 된다. 원칙적으로 교량 검사에 적절한 방법으로 충격-반향법, 레이더법, X-선, 초음파법 그리고 적외선 thermography 등이 있다. 감시 시스템에 관해서는 가능하다면 교통하중, 온도, 그리고 균열 전파와 같은 모든 관련된 매개 변수들을 측정하는 것이 중요하다. Post tension grout duct 내의 공동과 관련해서 종종 문제가 발생한다. 충격 반향법과 레이더법 기술에 관해서는 결함 검출에 대하여 이론적이고 실험적인 관점 양자로부터 조사되었다. 특히 관심있는 것들은 주변의 세굴(sub-surface 레이더), ground anchor의 가동 안전성 평가

(초음파) 및 손상됐거나 과부하 상태의 구조물에 대한 평가이다. 교량 갑판의 콘크리트와 그 아래의 방수막은 ground penetrating radar와 적외선 thermography를 사용해 조사한다.

보강재

콘크리트, 석조물 등에서 보강재(reinforcement)를 조사하는데 여러가지 검사법들을 적용하는데 자기법, 레이더법, 방사선투과법, 적외선 thermography 등이 사용되고 있다. 또한 초음파 펄스-에코 기술을 철근의 직경과 위치를 알아내는데 사용하여 좋은 결과를 얻었다. 철근이 심하게 밀집된 상황으로 몇 가지 문제들이 발생할 수가 있다. 자기법의 경우 이러한 혼란의 영향에 대해서 연구가 이뤄지고 있다. 여러 층의 rebar 아래에 프리스트레스 부재나 보강재가 배치되어야 하는 어려운 상황에서 레이더 시스템과 cover-meter와 같은 검사 방법의 결합은 신경회로망의 사용과 같은 놀라운 개선을 가져왔다. 초음파 펄스 에코법과 유사하게 충격-반향법으로 페로시멘트 층 내의 철망의 철선 직경을 측정할 수 있으며 철망 보강재 위의 덮개를 결정할 수 있다. 또한 특수한 종류의 보강재로 포장도로의 dowel 막대가 있다.

콘크리트 구조물

교량 갑판, 활주로, 교량의 빔, 칼럼과 같은 콘크리트 구조물의 결함 검출에 충격-에코법을 종종 사용하고 있다. 이 방법을 사용하여 또한 콘크리트 파이프와 터널 line의 건전성을 조사하였다. 콘크리트와 암반 계면 내의 동공과 바리를 확인할 수 있었다. 레이더를 적용해 동공, 결합 부위의 노후된 위치를 파악해 왔다.

파일

초음파 펄스 속도법을 사용해 다양한 크기의 파일들을 검사한 경우는 많다. 신호들은 컴퓨터를 사용해 동시에 분석할 수 있다. 파일의 길이나 결함 존재와 같은 기하학적인 데이터를 얻기 위해 충격 하중을 가하는 동적시험을 수행하였다.

목재

목재의 경우 습기에 의한 손상을 찾아내기 위해 적외선 thermography가 적절하다. 동공이나 다른 결함들은 충격-에코법으로 찾을 수 있고 나무의 습기는 γ -선으로 찾을 수 있다. 역사적인 roof truss에 있는 나무의 상태를 어떻게 평가할 것인가에 관한 연구도 이루어져 있다.

NDT-CE	Contributions on Actions	
	<i>many</i>	<i>some</i>
Quality Control	Building Inspection	Neural Networks
	Regulations	International Cooperation
		Education
		Research Policies

Fig. 5. NDT-CE의 활동 영역을 기준으로 분류

3. Actions

품질 관리

그라우트의 주입(injection of grouts)과 같은 석조건물에 대한 보수 기술의 유용성을 컨트롤하기 위하여 음파 전파 절차법을 적용하여 어느 정도 성공하였다. 벽돌을 로(furnace)에서 굽는 동안에 생겨나는 균열을 impulse-echo 기술을 사용해 연속적으로 탐지할 수 있다. 현무암 골재를 연속적으로 시험하는데 초음파 펄스 속도법에 의한 품질관리가 요구되어왔다. 생산 공정 중에 기술적 완전성을 보증하고자 콘크리트의 경화 과정을 모니터하기 위해 음향방출 기술을 적용하였다. 게다가 경화과정 동안에 전기 전도도를 측정하면 콘크리트의 품질과 내구력에 대한 단서를 얻을 수 있을 것이다. 콘크리트의 표면 근처나 다른 재료 내부의 감춰진 결함들은 실-시간으로 간섭계를 사용해 검출할 수 있다. 또한 기체 침투율을 측정하여 콘크리트의 성능을 평가하는 것도 실제적인 것으로 보인다. 손쉽게 운반할 수 있는 고 에너지의 X-선 베타트론은 특히 콘크리트 보강재에 대한 품질관리의 새 측면을 제시하고 있다. 경화된 콘크리트에서 frost resistance에 대한 하나의 특성

인 기공을 air-void analyzer를 사용해 결정할 수 있다. 건설 중인 콘크리트 고속도로의 carriageway slab에 잘못 놓여진 dowel bar를 즉시 알아내는데 사용하는 NDT-CE 기술이 개발 중이다.

Building Inspection

도로 포장의 장시간 관측에 초음파 종파 전파가 분석되었다. 무엇보다 보강된 구조물이나 프리스트레스 구조물들에서 부식 여부를 알아내기 위하여 다수의 NDT-CE 기술들을 결합시키고 또한 단일 위치들을 평가하는 것이 아니라 측정 부위를 중첩시켜 비교하는 것이 바람직하다. 콘크리트나 혹은 다른 재료의 표면에 존재하는 화학 물질을 규명하기 위하여 즉, 부식이나 열화에 영향을 미칠수 있는 철, 탄소, 칼슘 등을 확인하기 위하여 고 출력 레이저 펄스에 의해 기화된 재료의 형광 스펙트럼을 분석한다. Modal analysis는 교량을 평가할 수 있는 동역학 도구이다.

Regulations

거의 모든 국제 기구들이 rebound 햄머에 의한 강도 시험에 관한 표준들과 콘크리트에서 초음파 펄스

NDT-CE	Contributions on Problems	
	<i>many</i>	<i>some</i>
Strength	Cover	Density
Cracks, Fracture	Durability	Maintenance or Replacement
Thickness	Delamination	Hidden Objects
Internal Condition, Voids and similar Defects	Hardening	Subsurface Detection, Position Finding
Water Content	Defects in general	Thermal Conductivity
Moisture	Integrity	Aging
Corrosion	Inhomogeneities	

Fig. 6. Testing problems을 기준으로 분류한 발표문들

속도의 측정에 관한 표준들을 공식화하였다. 초음파를 사용한 여러 표준을 비교한 연구가 이루어졌고 초음파를 사용한 측정치의 정확성을 개선시키고 그러한 연구의 비교를 보증하기 위한 문제점들과 제안들에 대한 토론이 이루어지고 있다..

Neural Network

신경회로망은 실례를 통해 학습시킬 수 있으며 그 경험을 나중의 사용을 위하여 축적해 둘 수 있다. 신경회로망이 ground penetrating radar을 사용한 연구에 어떻게 도움을 줄 수 있는 지에 관한 연구와 다층의 보강재 조사에서 신경회로망의 지원에 관한 연구가 이뤄졌다.

National and International Cooperation

최근 초음파 펄스 에코법에 관한 협력의 놀라운 결과들이 보고되었다. 이 외에도 Wiggenhause는 최근 컴퓨터 네트워크 전자출판을 이용하여 NDT-CE에서 보다 신속한 국제 협력을 실현시키기 위한 단계를 제안하였다.

4. Testing problems

강도

과거와 마찬가지로 콘크리트는 여전히 분명한 측정 기술과 함께 압도적으로 많이 연구되고 있다. 그러나 콘크리트의 강도를 구조물에서 직접 단일 동역학적 행위로 결정할 수 있다는 것은 완전히 새로운 것이다. 경화 과정 동안의 강도값의 증가는 초음파 펄스 속도 시험으로 기록할 수 있다. 800°C에 이르는 고온에 노출된 콘크리트의 강도 저하는 sclerometric method와 초음파 측정 장치에 의하여 측정할 수 있다. 고강도의 콘크리트에 대해서는 break-off method를 사용하였다. 압축 강도의 in-situ 측정을 위하여 rebound 햄머와 초음파 펄스 속도법의 동시 적용은 여러 해 동안 잘 문서화되어 왔다. 그럼에도 불구하고 이 방법은 의심할 여지없이 콘크리트 시험에서 가장 보편적으로 적용되는 기술이다. 따라서 실험의 교환은 언제나 필요하고 흥미로운 것이다. Sclerometer 검사의 정확성은 인발법과 결합시켜 개선할 수 있다. 스틸 보강재의 항복점과 UTS는 와전류와 휴대용 microprocessor 장치를 사용해 측정할 수 있다.

균열과 파괴

보강된 콘크리트 빔을 사용하고 있는 동안 균열 생성 전 단계와 생성 후 단계를 구별하기 위하여 망치에 의한 충격으로 생기는 종파의 진동을 damping 상수와 decaying 속도에 대해서 분석하였다. 벽돌이나 콘크리트 부재와 구조물의 균열을 strain wave나 충격-반향법에 의한 과도파를 이용하여 검출하고 위치를 포정하였다. 유사한 것으로 충격 음향법이 있다. 균열과 delamination을 찾아내기 위하여 망치에 의한 충격 음향을 콘크리트 표면에 발생시켰다. 콘크리트 시험편과 구조물의 균열은 초음파 resonance spectroscopy나 holography 기술을 사용해 검출할 수 있다. 콘크리트 내 강화재의 파손을 탐지할 도구인 와전류에 관해서는 콘크리트(cover)와 시험 주파수, 탐촉자의 기하학적 형태에 의한 영향을 조사하였다. 프리스트레스 강선의 파괴는 파단에 형성되는 누출 자장에 기초한 잔류 자기법을 사용해 위치를 잡을 수 있다.

두께

구조물을 가로질러 측정하는 것과는 달리 echo법은 구조물의 한 면에 대한 접근만을 필요로 할 뿐이다. 초음파 펄스 에코 법은 예를 들어 콘크리트의 두께를 측정한다. 충격-반향법은 속이 빈 실린더 형의 콘크리트 구조물의 두께를 측정하는데, 토양이나 바위와 접촉하고 있을지라도 상관이 없다. 도로포장의 두께는 ground penetrating radar system을 사용해 측정할 수 있다. Radar는 석조 건물의 벽두께를 측정하는데 또한 효과적이며 벽 뒤의 성분(비었는지 또는 채워졌는지)에 대한 정보를 얻을 수 있다. 토양과 도로포장과 같이 층이 진 시스템의 두께는 "spectral-analysis wave"로 불리는 seismic method를 사용해 측정할 수 있다.

재료의 내부 상태

영상처리법과 결합한 초음파 impulse-echo법을 적용해 콘크리트의 내부 상태에 대한 정보를 얻을 수 있다. Ultrasonic impulse의 시간과 진폭이 공동이나 honeycomb 구조와 같은 콘크리트의 결함들에 관한 충분한 자료를 제공하지 못할 경우 주파수 스펙트럼의 분석으로 더 많은 정보를 얻을 수 있다. 일반적으로 초음파 impulse-echo법은 콘크리트 내의 동공과

honeycomb을 찾아내는데 좋은 분해능을 보여주고 있다. Post tension duct에 존재하는 동공은 침수가 가능해 부식이 일어나도록 할 것이다. 충격-반향법은 현재까지 위의 동공과 같은 결함들을 찾아내는데 향후 가장 유망한 전략으로 보여지지만 “결함 없음”이라는 탐상 결과가 잘못된 것일 수가 있다. 콘크리트에서 혹은 콘크리트와 바위의 계면에서 공기나 물로 채워진 동공은 충격-반향법을 사용해 찾아낼 수 있다. River bed 내의 세굴 역시 일종의 동공이다. 이러한 것들은 sub-surface radar를 사용해 찾아낼 수 있다. 그러한 결함들을 직접 찾아낼 수 없는 경우에는 측정과 계산을

결합시킨 방법을 적용하면 성공적일 수 있다. 따라서 탄소섬유로 강화된 플라스틱 내의 결함들을 적외선 영상을 사용해 두께와 깊이에 따라 특성지을 수 있을 것이다. 초음파 탐촉자를 부착한 고속 시스템에 의해 측정되는 종파 속도의 tomography 분석을 이용해 콘크리트 내부 상태나 결함의 이차원적 영상을 얻을 수 있다.

Water content (수분 함량)

Drilled borehole에 여러개의 고리형 전극을 설치하여 콘크리트 표면 근처의 수분 함량을 측정하고 보강재의 부식을 방지하기 위한 코팅의 효과를 알아낼

NDT-CE	Contributions on Testing Methods	
	<i>many</i>	<i>some</i>
Ultrasonic Pulse Velocity	Building Dynamics	Nuclear Magnetic Resonance (NMR)
Acoustic Emission	Laser Applications	Time Domain Reflectometry (TDR)
Electrical and Electro-Chemical Methods	Traditional Testing Methods	Electro Acoustical Methods
Interferometry	Radiography, Radiometry	Ultrasonic Resonance Spectroscopy
Impact Echo	Computer Tomography	Gas Permeability
Magnetic Methods		Heat Transmission
Microwaves		Optical Methods
Radar		Endoscopy
Infrared Thermography		
Supporting Processes		
Simulation	Monitoring	Robot Techniques
	Instrumentation	

Fig. 7. 검사 방법을 기준으로 분류한 발표문들

수 있다. 콘크리트 혼합물과 비금속 주형 내의 수분 함량을 약 1GHz 주파수의 전자파(radar)를 사용해 측정할 수 있다. 핵자기 공명 기술(NMR) 을 사용하면 물의 함량과 물의 이동, 물/시멘트 비에 대해서 알 수 있다. 벽들의 제조를 위해서는 원재료의 물 함량이 매우 중요하다. 제작 공정 동안 특수한 초단파 습도계에 의해 물의 함량을 그때 그때 기록하는 것이 가능하다. Bulk 재료의 수분 혹은 물 함량을 측정하는 데는 TDR(time domain reflectometry)와 radiometric method가 적절하다. 다진 토양에 적용하는 기술로는 dual-energy 컴퓨터 단층촬영 기술이 있다.

Moisture

대다수 건축 재료에 비해 물의 상대 유전율은 10배에 이른다. 이것은 여러 수분 측정 기술들, 예를 들면 간단한 dielectric method나 borehole에도 적용할 수 있는 위상과 진폭의 평가를 사용하는 전자파 기술들에 대한 물리적 기반이 된다. Radar 기술을 사용하면 거의 정확하게 전체 단면적의 수분 함량치를 알아낼 수 있다. 물론 기온이 낮아 찬 상태에 있는 건축물 벽 내의 수분 분포를 조사할 때는 특별한 고려가 필요하다. 공간과 시간에서 높은 분해능은 초단파 투과법을 적용하면 구할 수가 있고 γ -선을 사용하면 최대의 분해능을 얻을 수 있다. 부피가 큰 재료에 대해서는 TDR과 초단파 반사법을 적용하여 성공적인 결과를 얻었다. 핵자기 공명법은 완전히 다르게 사용하는 데 이것은 콘크리트 같은 다공질의 재료에서 수분함량과 수분 침투 깊이의 윤곽을 알아낼 수 있는 강력한 도구이다.

부식

콘크리트의 전기적 비저항은 보강재의 부식 속도에 큰 영향을 미친다. 따라서 유전적 성질들의 측정과 결합된 전기적 비저항의 측정으로 수분에 의한 부식 영향에서 porosity의 효과를 분리해 낼 수 있다. 일반적으로 부식은 전위를 측정해 파악할 수 있으며 AC impedance method에 의해 감시할 수 있다. 부식 계면은 하나의 galvanostatic pulse perturbation에 의해 반응하기 때문에 측정할 수 있다. 염소의 침투는 보강재의 부식 위험을 심각하게 증대시킨다. 임계 염소 함량 깊이를 모니터링하기 위한 하나의 시스템이 개발되었다. 지하 배관들 중에서 부식이 일어날 만한 위치는 전기장

을 측정하여 찾고 있으며 콘크리트의 코팅된 보강재의 부식 위치는 잔류 자기법을 사용해 찾아내고 있다.

Cover

Cover 측정장치는 철근의 직경을 알고 있는 경우 콘크리트 cover를 측정하기 위한 것이다. 그러나 보강 막대의 크기에 대한 지식이 없어도 철근 중심까지의 거리를 측정할 수 있는 절차서가 나와 있다.

내구력

내구력은 구조물의 사용 수명의 측면에서 아주 중요한 성질이다. 서리에 관해서는 잘 분포된 공기가 필수적이다. 생 콘크리트(fresh concrete)의 공기 함량을 측정하는 대신 air-void analyzer라는 새 장비를 이용하면 경화된 콘크리트 내의 공기의 크기 및 부피를 알아낼 수 있다. 기체의 투과율 측정을 통해 콘크리트의 내구력 정도를 분류할 수 있다. 콘크리트의 내구력에 대한 특성치는 투과율 계수로 나타낼 수 있다. 전기화학적 잠음 분석은 강 막대의 부식에 대한 보수용 재료의 효율을 측정하는데 유효한 것으로 드러났다.

Delamination

일반적으로 바위와 콘크리트의 계면의 delamination은 충격-반향법을 사용해 찾을 수 있다. 클래딩 판넬의 손상을 찾기 위해 레이저 간섭계를 이용한 동역학적 시험을 수행하였다. 매우 작은 delamination과 탄소 섬유강화 플라스틱 등을 찾는 데는 impulse thermography가 적절하다.

밀도

밀도 측정은 방사선을 이용한 시험법의 한 분야이다. 예를 들면 특수한 radiation density gaugy를 사용해 콘크리트의 밀도와 표면 아래 층들의 공기 등에 관해서 측정할 수 있으며 즉각적인 평가가 가능하다.

열전도

열 투과에 대해서는 막대한 경비가 소요되어 극히 적은 수의 측정이 수행되어 왔다. 시험체에 대해 열전도도를 측정할 수 있는 매우 빠른 방법이 보고되었다. 그러나 예를 들어 heat flux sensor에 의한 in-situ 측정은 시간이 많이 소요되며 정상상태(steady state)와 변화하는 기상 상태 및 센서가 환경과 상호작용하

는 방법에 대한 포괄적인 이해가 필요하다. In-situ 측정치에 대한 동역학적 분석으로 측정 기간을 몇 일 내로 단축시킬 수 있으며 특수한 Monte-Carlo 기술을 사용하면 콘크리트 벽 내의 종류가 다른 층들의 thermal property를 알아낼 수가 있다. 아마 문제를 해결하는 가장 좋은 방법은 열과 수분을 측정하여 수치적으로 이들의 분포와 이동을 계산해 내는 것이 될 것이다.

Hidden objects

Utility unit, 지하철, 기초 등과 같은 지하 장애물들이 지진 측정에 미치는 영향에 관해서 연구되고 있다. 특수한 문제들을 풀기 위해서는 종종 여러 측정 방법들을 결합시켜야 한다. 이를테면 아치 교량의 교대에 존재하는 컨테이너를 찾아내야 하는 경우다.

Surface detection, position finding

석조담 내의 공동과 빈 공간을 도시하거나 혹은 교량 교대 주변의 세굴을 찾아내기 위한 sub-surface radar의 성능을 조사하였다. 100MHz-500MHz 주파수의 안테나를 사용해 측정하였다. 지하 배관의 위치와 깊이는 자기장을 이용해 알 수 있다. Seismic tomography를 사용해 2차원 혹은 3차원 물체의 내부를 가시화시킬 수 있다.

유지 혹은 교체

대형 구조물의 경우 유지와 교체의 선택은 경제적으로 매우 중요한 문제이다. 적외선 thermography와 ground penetrating radar를 개별적으로 사용하거나 혹은 결합시켜 사용하면 교량, 고속도로, 공항의 다양한 포장 상태를 조사할 수 있다. 전쟁과 같은 사건 뒤에는 상황은 극단적인데 건축물들을 완전히 없애버릴 것인가 아니면 보수해서 사용할 것인가 혹은 교통량 따위를 줄일 것인가를 결정하기 위해서 적외선 thermography, 동적 시험, 내시경과 초음파 진단을 사용할 수 있다.

5. Testing method (검사방법)

초음파 펄스 속도법

이 방법은 일반적으로 core를 함께 조사하여 콘크리트의 강도를 측정하는데 적용하며 콘크리트 두께는 4.5m 까지 한한다. 또한 석조물, 파일이나 보강된 콘

크리트 post의 안전성 여부를 검사하며 특히 석조담을 조사하는데 이 방법이 적용되었다. 이 방법을 사용해, 만약 결과들을 grid-constellation이나 3차원 상으로 나타낸다면 동공이나 다짐 불량 부위와 저장도 부위들을 보다 쉽게 찾아낼 수 있다. 초음파의 파형은 속도나 감쇠, 주파수와 같은 다양한 측면을 띠고 있다. 이것들을 분석하여 다짐 불량 콘크리트 및 저장도의 콘크리트를 포함한 내부 결함들에 대한 감도를 알아낼 수 있다. 반복적인 inversion method는 초음파 단층 촬영으로 대상체의 3차원 상을 재구성할 수 있도록 해준다. Plaster, 콘크리트, 시멘트의 경화 과정은 펄스 진행시간과 진폭 그리고 초음파 펄스의 주파수를 분석하여 모니터링할 수 있다. 건설 공사 동안 생 콘크리트에 대해서는 탐촉자를 formwork로부터 얼마간 떨어져 있는 생 콘크리트에 집어 넣어 경화에 의한 강도 증가를 측정한다. 안전을 위해서는 교량의 ground-anchor의 작동이 유지되어야 하는데 초음파 측정이 한 해결책이 되었다. 이 측정법은 또한 해로운 zeolite로 포화된 현무암 골재들의 품질관리를 하는데 적용해 왔다.

초음파 펄스-에코

지난 1991년 베를린에서 개최되었던 NDT-CE 심포지움 이후에 초음파 펄스 에코법의 적용이 무엇보다 성공적으로 향상되었다. 이에 관한 개괄 및 차이점의 비교와 측정법 상호간 협력에 의한 이점에 관한 연구가 이루어졌다. 임의의 시점과 장소에 존재하는 콘크리트의 초음파 속도를 알고 있다면 콘크리트 구조물의 두께를 측정하는데 초음파 펄스-에코법을 사용하면 대단히 유리하다. 두께를 측정하거나 동공과 honeycomb 구조를 찾아내는데 한쪽 벽에 대한 접근만으로도 충분하다. Anchoring 부재의 부착 위치는 정면에서 찾을 수 있다. 게다가 매우 흥미로운 기술은 철근 위치와 직경을 알아내기 위해 초음파 펄스-에코법을 특수 처리 알고리즘과 함께 사용하는 것이다. 새로운 측정용 탐촉자(source and receiver)들과 레이저 검출기의 사용은 놀랄만한 개선을 가져왔는데 콘크리트 구조물의 두께 측정뿐만 아니라 내부 상태에 대해서도 알수 있게 되었다.

음향방출

음향방출 기술은 정확하게 말하면 응력과 방출 기

술이라 하는데, 이것은 주파수가 가칭 주파수 영역을 훨씬 더 초과할 수도 있기 때문이다. 음향 방출률은 콘크리트나 콘크리트 구조물 각각의 가장 중요한 변형 단계와 부응한다. 이것은 섬유 보강된 시멘트 기지재의 계면 성질을 정량화하고 콘크리트와 철강 혹은 탄소 섬유로 보강된 콘크리트 부재의 내부 상태를 평가하는데 사용되며 파괴 혹은 rebar의 부식원을 찾아내는데도 쓰인다. 기록한 파형의 해석으로 많은 정보를 얻을 수 있다. 이 기술은 또한 콘크리트 복합재의 균열 발생 거동을 평가하는데도 사용된다.

전기적 방법과 전기화학적 방법

와전류 탐상법을 사용하면 보강재의 파괴를 알 수 있으며 철근의 직경에 관계없이 콘크리트 카바의 두께를 측정할 수 있고 역으로 두께에 관계없이 보강막대의 직경을 알아낼 수 있다. 전기적 측정은 시멘트 페이스트와 콘크리트의 임피던스와 유전적 성질에 의해 가능하며 반대로 이런 수치들은 보강재의 부식 위험과 연결되어 있다. 전위 측정으로 강 보강재의 부식 상태를 조사할 수 있다. 그러나 측정값의 정확한 해석을 위해서는 큰 갈바닉 전류로 지시되는 심한 부식이 일어나고 있는 강과 부동태 상태의 강 막대를 구별하는 것이 중요하다. Half-cell에 의한 전위 측정은 또한 EPN(전기화학적 전위 잡음)으로 알려져 있다. EPN 분석으로 강의 부식을 예방하는 수단의 효과를 점검할 수 있는 가능성을 얻게 되었다. 콘크리트 내 수분이 half-cell의 감도에 미치는 효과에 대해서 연구하였다. 콘크리트 내 강 보강재의 부식 속도를 결정하는 것에 관해서 작은 galvanostatic pulse perturbation을 사용한 새로운 transient method가 보고되었다. 전기 전도도를 측정하면 초기 콘크리트의 염소 확산 계수를 추정할 수 있으며 이는 콘크리트 구조물의 수명예측에 중요한 것이다. Electro-chemical impedance spectroscopy는 보강된 콘크리트의 음극 방식을 감시하는데 적용한다.

간섭계

간섭계는 재료의 표면 상태에 무관하게 적용할 수 있는 유효한 비접촉 측정법으로 입증되었다. 변형 gradient를 측정하여 표면 아래 결함들 및 응력 분포에 대해서 알 수 있다. 이 검사법은 CD 카메라와

함께 사용할 수 있다. 레이저 speckle 간섭계는 감도가 더 좋아 종종 파괴 역학에 적용된다. ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)를 사용하면 대상체의 정면에 존재하는 변형의 세 성분을 측정할 수 있다. 예를 들어 하나의 검출기로서 아르곤 레이저는 약 0.5m²의 측정 면적에 대해 적용해 왔다. 이와 같은 기술은 역사적 건축물에서 원래의 자연석과 대체한 재료의 상호 거동을 조사하는데 사용되었다. 이와 유사하게 압축 상태 하의 벽돌과 몰탈 연결부 사이의 상호 작용을 파악하고 석조물에서 변형 분포를 찾아내는데 electronic speckle 간섭계를 사용하였다. 작은 강철 선과 돌레의 시멘트 기지 사이의 점증하는 하중으로 인한 일련의 debonding 단계들은 holographic 간섭계로 알아낼 수 있다.

충격 에코 (Impact echo)

충격 에코법은 거의 만능 기술이다. 여러 경우에 매우 효과적으로 쓰이고 있으며 재료 내의 균열과 동공, delamination의 깊이와 크기 확인, grouted tendon ducts 내의 동공 등의 연구에 사용되어 왔으며 또한 결합 특성과 보강된 석조물과 구조용 목재의 연구에도 사용하고 있다. 석조 구조물을 조사하고 교량 갑판, 교량 빔, 활주로와 칼럼 등과 같은 콘크리트 구조물의 균열을 검출하는데 과도 탄성파를 사용한다. 콘크리트 구조물의 표면을 망치로 두들겨 충격을 유발하는 충격 음향법(impact-acoustic method)은 표면의 진동과 밀접한 관련이 있다. 균열과 delamination과 같은 결함들은 주파수 스펙트럼을 저주파수 영역으로 이동시킨다. 충격-반향법의 발전으로 회전 탐촉자를 사용할 수 있게 되었다. 한 점씩 검사할 경우에도 시간 당 30-60번만 측정할 수 있었는데 비해 시간 당 3,000번 이상 측정 가능해 엄청나게 빨라졌으며, 평평한 콘크리트 구조물에 대한 검사 결과를 그림으로 나타낼 수 있게 되었다. 마지막으로 콘크리트와 ferrocement에 심어진 폴리스틸렌 laminate에 대한 충격-반향 응답이 강선망(steel wire mesh)의 모양과 laminate의 형상에 영향을 받는다는 것도 알 수 있다.

자기적 방법

자기적 방법은 보강재와 결부되어 있다. 보강재의

건전성과 표면으로부터 위치를 측정하는데, 부분적으로 원거리 조종 로봇을 이용한다. 간혹 대상체를 자화시킬 필요가 있는데 펄스에 의한 자화가 가장 적절한 것으로 드러났다. 프리스트레스 강선의 파괴가 일어난 곳을 찾아내고 부식된 부위를 찾아내는데 적절한 방법이 잔류 자기법이다. 이 방법은 두께 18 cm의 콘크리트에 적용할 수 있다. 교량 보강재의 형태를 조사하기 위하여 자분을 공기 중에 산포시켜 찾아내는 예외적인 방법도 있다.

마이크로파

부피가 큰 재료에서 수분을 찾아내는데 사용하는 마이크로 반사법과 마이크로 투과법은 뚜렷한 차이가 있다. 후자는 두 개의 버전이 있는데 하나의 borehole을 사용하는 기술과 두 개의 borehole을 사용하는 기술로 나뉘어 있다. 양쪽 모두 현장(in-situ)에서 연속적이며 프로파일한 측정에 적합하다. 첫번째 방법은 벽 속으로 방사시키는 microwave field를 사용한다. 12mm borehole 내부에서 전자기파를 주사시킨다. 두번째 방법은 두 borehole 중 하나에서 특정한 깊이로 microwave들을 투과시키는 것이다. 따라서 습한 부위를 쉽게 찾아낼 수 있다. 초고속 전자파 진단은 극초단파 보다 더 높은 주파수를 사용하여, 서로 다른 재료로 만들어진 다층의 코팅을 측정하기 위해 사용한다. 극초단파는 또한 벽돌을 제작하는 동안 진흙의 수분 함량을 감시할 수 있다. 그러나 무엇보다도 놀라운 것은 극초단파를 사용해 세라믹과 시멘트류의 재료에서 응력을 측정하는 것이다.

레이다

구조물과 역사적 건축물 및 석조물에서 습한 부위를 레이다를 사용해 찾아낼 수 있고 마찬가지로 방법으로 동공과 몰탈의 충전 상태 및 재료 두께와 보강재의 위치를 알아낼 수 있다. 레이다는 또한 river bed 내의 세굴을 찾아내고 정량화 할 수 있는 상당한 잠재력을 보유하고 있다. Ground penetrating radar는 교량과 고속도로 그리고 공항의 단단하면서도 휨성이 있는 거대한 포장도로를 평가하는데 성공적으로 사용하고 있다. 교량의 갑판 위에서 레이다 시스템을 운반하는 차량은 시속 10 km로 달리면서 방수막과 방수막 아래에 있는 콘크리트의 상태를 조사한다. 만

약 대성당의 대들보같은 대상체 주변으로 레이다의 안테나를 움직이게 되면 내부의 돌 사이의 연결부와 손상당한 영역을 보여주는 real-tomography 영상을 얻을 수 있다. Ground penetrating radar는 오래된 석조 독 내의 동공과 빈 공간을 지도로 나타내는데 사용할 수 있다. 특히 지하에 매설된 파이프와 하수관 및 그 주변을 검사하기 위해 ground probing radar기술이 개발되었다. 이것은 하나의 유연한 로봇과 지능 센서들로 구성되어 있다. 손상당한 위치와 종류 및 원인을 알아낼 수 있으며 손상의 정도도 물론 알 수 있다. 생 콘크리트의 수분 함량을 측정하는데도 레이다는 유용한 것으로 드러났다.

Infrared thermography

적외선은 다른 무엇보다도 목재의 파손 과정같은 시간 의존 과정을 관찰하는데 사용할 수 있는, 널리 알려지고 입증된 비접촉 측정법이다. 고속도로나 공항의 거대한 도로 포장부를 신속하고 효율적이며 경제적으로 평가할 수 있다. 적외선 영상은 교량 갑판의 도면으로 변환되어 손상당한 영역과 그렇지 않은 영역을 보여주게 된다. 다층의 건축 재료 혹은 구조물에서 결합 및 dowel은 무엇보다도 영상처리나 혹은 수치 시뮬레이션과 결합시켜 찾아낼 수 있다. 적외선 thermography는 역사적 건축물의 고대 벽돌의 채색 변화를 조사하는데 사용할 수 있다. 열을 유발시켜 사용하는 능동 열적 시험법으로 서로 다른 재질 내의 표면 아래 결합들을 찾아낼 수 있다. 이와같은 종류의 특별한 검사법으로 impulse 혹은 transient thermography라고 불리우는 것이 있는데 탄소 섬유화 플라스틱과 각 구조물 사이의 접착(adhesion) 혹은 구부러짐(bending)을 검사하거나 특수한 anchor 부재를 끼워 넣은 위치를 알아내는데 적절하다.

Building dynamics

공진 주파수, 모드 형태 그리고 댐핑은 동적 시험의 기본 매개 변수들이다. 이 방법을 사용하여 구조물의 인성을 평가할 수 있으며 사용기간 동안 건축물에 일어날 변화를 알 수 있다. 충격파를 유발하는 것이 절대적으로 필요한 것은 아니다. 큰 구조물이나 교량에서 조차 자연 진동으로 충분하다. 동적 시험을 사용해 보강 콘크리트 빔에서 균열 부위를 찾을 수 있다. 또

한 TV 탑의 안전성을 평가하는데 동적 해석이 도움이 된다. 그러나 레이다 측정법과 비교하면 교량의 총체적 dynamic modal testing에 시간이 더 소요되는데 왜냐하면 레이다는 부가적으로 기하학적인 특징과 대상체 뒤의 구성에 대한 정보를 제공하기 때문이다.

Laser application

레이저 간섭계는 꽤 멀리 떨어진 거리에 걸쳐서, 예를 들면 런던의 국회의사당의 첨탑으로부터 클래딩 판넬에 이르는 한 구조물의 변형거리는 부위들을 모니터할 수 있다. 헬륨-네온 레이저를 사용하는 또 다른 간섭계는 보강된 콘크리트 부재의 변형과 균열을 측정할 수 있다. 더군다나 레이저는 고감도의 레이저 speckle 간섭계에는 필요불가결한 것이다. 분광학으로 재료의 화학 성분 분석과 관련한 새로운 고 출력 레이저는 미래에 기대되는 응용기술이다. 탄화된 콘크리트 부위의 깊이와 salt attack를 찾아낼 수 있다.

전통적인 측정 방법들

무엇이 전통적이나 아니냐 하는 것을 말하기는 매우 어려운 일이다. 그러나 무엇보다도 가장 중요한 것은 새로운 적용과 경험을 배우는 것이다. 이 점에서 sclerometer test는 인발법과 결합되며 break-off testing은 새롭게 개발된 고강도 콘크리트와 관련된 것이다.

방사선

γ -ray는 수분을 측정하는데 사용된다. 이 기술의 높은 해상도는 목재와 진흙과 같은 재료에서 수분 확산에 대한 in-situ 조사를 가능하게 한다. 쉽게 운반할 수 있는 고 에너지의 X-ray 베타트론은 이 기술의 in-situ 적용의 가능성을 확대시키고 있다. 밀도 측정을 하는데 radiometric gauge를 사용한다. 해저 100m와 같이 방사선 측정을 하는 극한 조건도 존재하였다.

Computer tomography (컴퓨터 단층 촬영)

대개 단층촬영이라면 방사선에 관련되어 있지만 초음파를 이용한 단층촬영이 NDT-CE분야에 또한 등장하고 있다. 컴퓨터 단층촬영술은 토양에서 물의 함량을 측정하는데 사용되고 있다. 원칙적으로는 콘크리트의 강 보강재나 혹은 프리스트레스 막대의 위치를

찾아내는데 적합한 기술이다. 그러나 이것은 multi-angle technique을 요구하며 따라서 대상체에 대한 접근이 용이해야 한다. 이러한 단점들은 단지 작은 수의 시야만 요구되는 "non-linear back projection"의 개념으로 극복되는데 이는 콘크리트 교량이나 구조물의 in-situ 측정에 적용된다.

핵자기 공명법 (NMR)

NMR은 재료 내부에서 수분 분포의 시간 변화를 알아낼 수 있는 강력한 기술이다. 그러나 대부분 직경이 2cm인 샘플을 채취해야 한다. 이 외에 시멘트 수화 작용과 물의 분자 결합 상태를 알 수 있으며 다공질 재료의 투과성과 세공의 크기 분포를 평가할 수 있다. 한쪽 면에만 갖다대는 NMR장비를 사용해 1mm의 깊이 분해능으로 최대 깊이 26mm까지 수분의 profile을 측정할 수 있다.

Time domain reflectometry (TDR)

현재까지 TDR은 도로 구조물의 깨어진 콘크리트나 혹은 조대한 모래 층과 같은 부피가 큰 재료 내의 수분 함량을 측정하는데 사용해 왔다. 이 시스템은 또한 감시용으로 안전맞춤이며 따라서 향후 놀라운 발전 잠재력을 갖고 있다.

Electro-acoustical methods

프리스트레스 강에서 발생한 균열은 일반적인 음향 측정법에서 하듯이 망치에 의한 충격으로 생긴 진동을 분석하여 찾을 수 있다.

Ultrasonic resonance spectroscopy

콘크리트같은 상대적으로 음향 흡수가 낮은 재료의 기계적 성질을 평가하고 결합 존재 유무를 알아낼 수 있다.

기체 투과율

기체의 투과율 측정은 콘크리트 cover의 내구력과 콘크리트 성능을 평가할 수 있는 강력한 도구이다. 콘크리트 표면층의 투과율은 표면에 진공 상태를 형성시켜 측정할 수 있다.

열투과

비교적 얇은 코팅 두께를 측정하는데 적절하다.

광학적인 방법

종종 사용하는 것이 내시경이다. 토양 압력에 의한 배수구 시스템(culvert)의 변형을 알아내기 위해 stereo-photogrammetric technique을 적용한다. optical shape-metry법은 간접계 기술의 원리와 비슷하다. 이것은 대상체의 형태나 혹은 profile에 관한 정보를 얻기 위해 slide projector와 CD 카메라를 사용한다. 광섬유 센서에 대한 연구도 보고되었다.

6. Supporting processes

시뮬레이션 (모의 실험)

시뮬레이션법은 NDT-CE 분야에서 더욱 더 컴퓨터에 의한 지원을 받는 보충 수단 같은 것으로 되고 있다. 콘크리트의 초음파 검사에 관한 보다 깊은 이해가 초음파 진행 및 불균질 재료에서 특수한 산란에 대한 모델을 세우고 있다. 공동과 보강재를 지닌 콘크리트의 신호 scan 및 레이더에 의한 영상은 예상할 수 있다. 이것에 의한 장점은 결코 간과할 수 없는 것으로 실제 측정된 것을 관리하고 불균질한 환경에도 불구하고 결합들을 찾아낼 수 있는 가능성에 있다. 이것은 레이더 측정법에도 동일하게 적용된다. 레이더 측정 매개 변수들의 최적화는 콘크리트의 전자기적 성질들에 대한 이해를 통해 이뤄질 수 있다. 이러한 관점으로 이론 및 실험적 연구가 보고 되었다. 마지막으로 또한 초음파 펄스-에코법의 경우 콘크리트 같은 불균질 재료에서 특수한 효과들과 측정 데이터들의 영상에서 그것들의 영향을 분석하였고 결론적으로 이 방법의 효율에 대한 특성값을 공식으로 나타내었다. 레이더 측정의 해석을 개선시키기 위하여, 건축 재료들의 permittivity의 영향을 연구하고 있으며 태양에 의한 열이나 재료의 열적 성질과 같은 변수와 다른 기하학적 요인이 적외선 thermography의 결과에 미치는 영향에 대해서 연구하고 있다. 언젠가는 교량 및 다른 거대 건축물들은 이를테면, 점증하는 교통량으로 말미암아 반드시 보강되거나 혹은 다른 방법으로 개조되어야 할 것이다. 그러한 경우 building dynamics의 실제 측정 결과를 통해 복잡한 시뮬레이션을 사용해, 앞으로의 내하중 거동을 예측할 수 있고 최적화할 수 있다.

시뮬레이션에 본래부터 고유한 것이 아니라 이 기

술에 어떻게 하여 연관된 것이 수치에 의한 재구성법인데 이것은 부식된 부위를 찾아내기 위해 자화분포 계산과 같은 문제들에 적용하는 것이다.

감시 전화나 혹은 원거리에서 제어되는 데이터 logging 시스템에 의해 데이터 수집장치와 계공장치가 연결된다면 장기간에 걸친 감시에 의해 시간을 적게 들이고 구조물의 관리가 가능하다. 결합들을 찾아내고자 할 때는 광섬유 센서들이 변위를 측정하고 변형률이 크거나 작은 위치를 찾아낸다. 특히 모니터링 시스템을 콘크리트 구조물에 설치해 일반적으로 강도의 부식을, 특수하게는 음극방식의 효율을 감시하게 되며 특히 염분 침투에 의한 부식 우려를 감시한다. 도로 구조물에서는 용적 수분 함량과 bulk 전기 전도도가 감시 대상이다. 교량의 경우 모니터링 시스템은 정적, 동적 하중을 계속적으로 측정하며 균열과 균열 전파를 감시한다.

장 치

오늘날엔 최소한 고공력을 받는 구조물의 경우 적절한 검사법으로 쉽게 검사하고 모니터링할 수 있게 건설하도록 강력하게 권유하고 있다. 예를 들어 콘크리트 구조물의 한 부재가 tendon과 나란히 비어 있는 하나의 duct를 지니고 있다면 균열과 부식은 언제든 일종의 원격 자기 측정법으로 찾아낼 수 있을 것이다. 부식 문제의 경우 여러 개의 고리형 전극을 사용해 보강재와 강 표면 사이의 콘크리트 cover 내의 물의 분포를 알아낼 수 있다.

Robot 기술

Scanning 유도 센서를 자동차에 부착해 콘크리트 표면을 주행하게 되면 보강재를 영상으로 나타낼 수 있다. 보통 알려진 것들이 수년 뒤에 등장하게 된 하수관에 관련된 문제들이다. 레이더의 경우 유연한 로봇이 개발되었다.

7. 향후 전망

지난 여러 해 동안 NDT-CE 분야에서 엄청난 발전이 이루어졌고 이러한 경향은 아마 계속될 것이며 더욱 가속화 될 것이다. 비록 많은 새로운 생각과 접근이 이루어지고 개선된 장비들이 개발되고 있지만

새로운 기술들은 끊임없이 연구되고 있다. 이러한 발전은 “보전, 교체, 품질관리, 감시, building inspection” 등과 같은 주요 어휘들로 부각된다.

NDT-CE는 의심할 여지 없이 미래의 과업에 대한 윤곽을 그리고 시험할 대상체를 밝히는데 도움을 줄 것이다. 유용한 해결책들은 최적화되어야 한다. 여러 다른 기술들을 어떻게 사용할 것인가, 수치 계산과 신경회로망에 그것들을 어떻게 결합시킬 것인가, 측정 결과의 정확성을 어떻게 검증하며 그것들을 어떻게 해석할 것인가와 같이 특별한 문제에 대한 적용을 위한 시험 전략을 수립해야 할 것이다. 이것이야말로 정확하게 “엔지니어링”이 실제로 의미하는 바이며 나는 이러한 활동들을 NDCE (Non-destructive Civil Engineering) 라고 부르고 싶다. NDT 방법의 잠재적 사용자들은 여러 다른 기술들과 측정 장비들의 장점을 판단할 수 있어야 한다. 이런 목적을 위해 80 여개의 NDT-CE 방법에 관한 설명과 토론이 담긴 개론서가 1991년에 출판되었고 전 세계로부터 뛰어난 전문가들이 참여하는 심포지움이 조직되었다. 이번 회의가 NDT 기술 발전에 기여하고 국제 협력에 대한 자극제가 되기를 바라마지 않는다.

8. 참고 문헌

1. V. M. Malhotra, (editor): In-Situ/Nondestructive Testing of Concrete. aci SP-82(1984)
2. J. H. Bungey, (editor): Nondestructive Testing in Civil Engineering. Proceedings Int. Conference, Liverpool, April 1993. The British Institute of NDT
3. G. Schickert, NDT in Civil Engineering in Germany. pp. 45-64 in 2.
4. Proceedings 4th International Conference on Non-Destructive Testing of Works of Art, Berlin, October 1994, DGZFP, Berlin, Vol. 45
5. Feuchtag'95, Moisture in Masonry, BAM/Berlin + FMFA/Weimar
6. Forschungsbericht 200 (Research Report Vol.200): Zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Bestimmung der Mauerwerksfeuchte, BAM/Berlin (1994)
7. G. Schickert, (editor): Tagungsberichte Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen (Proceedings NDT-CE), Berlin 1985 + Berlin 1991, DGZFP, Berlin
8. G. Schickert, M. Krause H and Wiggenhauser: ZFPBau-Kompendium (NDT-CE Compendium), BAM Vol. 177, Berlin (1991)