

측정변형률을 이용한 RC 구조물의 변위 응답 특성분석에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Characteristic Analysis of Deflection Response of RC Structures using Measured Strain

박 흥 석* 박 기 태** 이 규 완***
Park, Hung-Seok Park, Ki-Tae Lee, Kyu-Wan

Abstract

In the past few years, the nondestructive inspection technology has greatly developed due to the increased necessity to gain a complete understanding of the bridge behavior. Especially, the deformations of bridges contain a lot of informations about its health state. By measuring these deformations it is possible to analyze the loading and aging behavior of the structure. However, the current methods (such as LVDT, dial gage, optical displacement transducer, etc) are often of changeable application on site and have the limitations of installation.

In this paper, the classical beam theory was reviewed and the deflections of structure are estimated using measured strain which is easy to acquire. The applicability of this algorithm is verified by laboratory (simple reinforced concrete beam) and field test. By this test, we proposed correction factor to estimate deflection of reinforced concrete beam after cracking, and analyze about the generation of correction factor.

Also fiber optic sensors as well as resistive strain gages were installed in the concrete beams to establish the applicability of fiber optic sensors in the field of civil engineering.

keywords : Fiber optic sensor, Deflection estimation, Strain measurement, Correction factor

* 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 구조안전그룹장, 공학박사
** 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원
*** 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

● 본 논문에 대한 토의를 2001년 9월 30일까지 학회로 보내
주시면 2002년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

중요한 사회기반 시설물중의 하나인 교량구조물은 지진, 태풍, 홍수 등 예상하지 못한 환경변화로 인하여 구조적인 손상을 받을 수 있으며, 이로부터 잔존수명이 현저히 저하되거나 붕괴될 위험을 가질 수 있다. 이러한 상황에서 최근 들어 구조물의 손상과 열화정도, 또는 구조적인 문제를 판단하는 기초자료를 습득하기 위한 비파괴 평가기술의 비약적인 발전이 이루어져 왔다.

특히, 교량 변위응답의 측정은 입력하중의 특성을 예측하거나, 교량의 상태평가를 결정하는데 매우 중요한 요소이며, 이 항목을 측정하기 위하여 다양한 기법들이 적용되고 있다.

레이저 등을 이용한 광학센서는 측정자의 숙련도가 측정결과에 미치는 영향이 크며, 주기적인 측정시 일관성이 결여된다는 단점이 있다. 또한, 다이얼게이지 또는 LVDT 등의 접촉식 센서를 이용한 측정은 광학센서에 비하여 각도 및 정밀도가 양호하다는 장점이 있지만, 교고가 높은 교량이나 교량하부로 선박 또는 차량이 통행하는 경우 설치에 어려움이 있다.^{(1),(2),(3)}

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로서, 탄성영역의 처짐-변형률 관계식을 이용하여 측정변형률로부터 처짐을 추정하는 알고리즘을 기술하였다. 또한, 전기저항식 변형률게이지와 전자기간섭이나 온도와 같은 외부환경에 영향을 받지 않고, 내구성이 뛰어나며, 응용방법에 따라 단일 광섬유로부터 다절점 측정이 가능한 광섬유센서를 적용하여 콘크리트 단순보와 PSC형교를 대상으로 실내 및 현장실험을 수행하였으며, 이로부터 균열발생 전·후의 처짐추정 알고리즘 검증과, 변형률을 이용한 공용교량의 처짐추정 가능성을 검토하였다.

이 과정에서, 실험결과에의 해석적 검토를 위하여 범용해석프로그램인 DIANA를 이용하여 균열을 고려한 비선형해석을 수행하였다.

2. 광섬유센서^{(4),(5)}

광섬유센서의 종류는 측정방식에 따라 OTDR(Optical

Time Domain Reflectometry), Micro-bend Type 등의 광강도센서(Intensity Sensor), 미하젠더, 마이켄슨, 페브리-페롯 등의 간섭형센서(Interferometric Sensor) 그리고 광섬유 브래그 격자센서(Fiber Bragg Grating Sensor) 등의 3가지로 구분된다.

본 연구에서는 구조물의 변형을 측정시 센서 및 데이터로거의 필수조건을 아래와 같이 정의하였으며, 이 항목에 가장 적합하다고 판단되는 페브리-페롯(BFPI, Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Sensor) 광섬유센서를 선정하여 실·내의 검증 실험시 적용하였다.

- 정·동적 및 다수의 채널측정 가능성
- 안정성, 내구성, 선형응답 및 신뢰성
- 설치 및 배치의 용이성, 확장성
- 적절한 민감도 및 동적측정 범위
- 온도 및 진자기간섭에 영향을 받지 않을 것

또한 측정 민감도의 향상과 균열발생 후에도 신뢰성 있는 변형률측정을 위하여 광섬유센서를 콘크리트 표면에 직접 부착하지 않고, 탄소섬유 플레이트(CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics)를 활용한 복합형센서를 구성하여 실내 및 현장검증실험에 적용하였다.

3. 측정변형률을 이용한 처짐추정 알고리즘

측정된 변형률을 이용한 처짐추정은 재료역학의 기본이론을 근거로 한 보의 곡률과 처짐의 관계로 도출된 식(1)의 공식을 이용하였으며, 측정된 변형률을 고려하여 식을 변환하면 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. 이 두 식으로부터 식(3)과 같은 처짐과 변형률의 관계를 도출해 낼 수 있다.^{(6),(7)}

$$x = \frac{1}{\rho} = -\frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (1)$$

$$\epsilon_x = -\frac{y}{\rho} = -\kappa y \quad (2)$$

$$\frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{\epsilon_x}{y} \quad (3)$$

단순보 유형의 경우 Fig. 1과 같이 측정변형률의 선형회귀분석 과정과 이중적분, 그리고 경계조건을 고

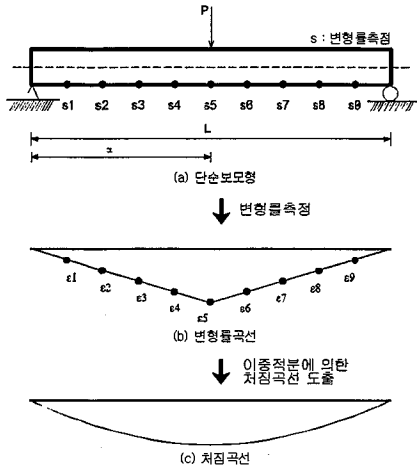


Fig. 1 단순보 처짐 추정

려하여 직분상수를 소거하므로써 처짐 곡선식을 얻을 수 있다.

4. 실내검증실험⁽⁸⁾

본 연구에서는 콘크리트 교량의 처짐추정 알고리즘에 대한 검증실험을 수행하기 위하여 단순보 유형의 시편을 대상으로 실내실험을 수행하였다. 하중재하시 적용한 액츄에이터의 용량은 50ton으로 각 경간의 중앙집에 재하되었으며, 재하(Loading), 제하(Unloading)를 반복적으로 수행하였다. 적용한 센서의 유형은 내부에 매설한 전기저항식 변형률게이지, 외부에 부착한 전기저항식 변형률게이지, CFRP 부착형 페브리-페롯 광섬유센서(성능검증시험시 적용) 등이며, 처짐을 측정하기 위한 변위계를 설치하였다(Photo 1). 대상 시편의 단면제원 및 센서 부착위치는 Fig. 2에 나타내었다.

4.1 균열발생 전의 거동특성

콘크리트 단순보의 균열발생 전 하중단계인 25kN 까지는 탄성거동을 보이며, 위에 기술한 탄성영역의 처짐-변형률 관계식으로부터 처짐을 추정할 수 있다. 일반적으로 낮은 하중단계에서는 1mm 미만의 미소한 처짐을 나타내어 변위계를 이용한 측정결과는 처짐값

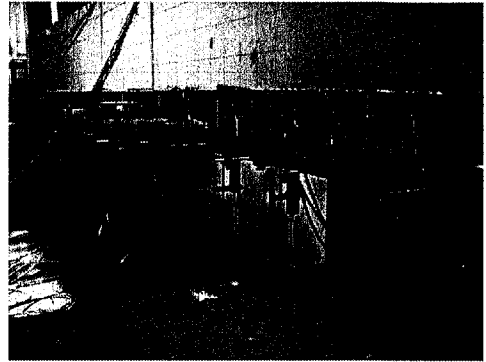


Photo 1 실험현경

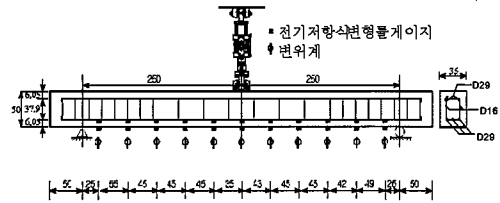


Fig. 2 단순보 단면제원

비교시 제외하였으며, Fig. 3에는 하중단계 25kN 일 때의 내·외부 측정변형률로부터 추정된 처짐과 구조 해석에 의한 처짐을 비교하여 나타내었다. Table 1에는 하중단계 25kN일때의 대상시편체 위치별 추정처짐의 오차율을 해서처짐을 기준으로 나타내었으며, 내부 측정변형률로부터 추정된 처짐이 외부 측정변형률로부터 추정된 처짐에 비하여 오차율이 상대적으로 낮게 산정되었다. 이는 표면 재질의 불균질성과 타설시 발생한 공극, 그리고 골재노출로 인한 표면의 요철 등으로 인하여 정확한 변형을 측정이 어려운 외부부착형에 비하여 내부 매설형 변형률게이지가 더 정확한 변형을 측정이 가능함을 입증하는 것이다. 균열이 발생하기 전 단계에서의 추정처짐은 해석처짐과 비교하였을 때 비교적 유사한 값을 나타내고 있으므로, 추정처짐량은 합리적으로 산정되었다고 판단된다.

4.2 균열발생 후의 거동특성

균열이 발생한 후에는 균열발생 전의 단순보 유형에

Table 1 하중단계 25kN일때의 위치별 오차율(%)

측정위치	내부	외부
1/4	-0.22	2.73
2L/4	-0.45	2.93
3L/4	-0.99	1.77

$$\text{오차율}(\%) = 100 \times (\text{해석치점} - \text{추정치점}) / \text{해석치점}$$

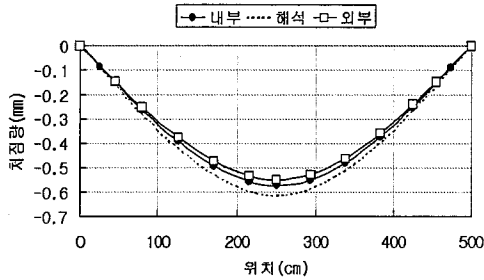


Fig. 3 하중단계 25kN일 때 처짐비교

서 적용한 일반적인 선형회귀분석 방법을 이용하면 식지 않은 오차를 유발시킬 수 있다. Fig. 4는 하중단계 40kN일때의 측정위치별 내부매설형 변형률게이지의 측정값을 나타낸 것이다. 탄성영역의 측정변형률은 Fig. 1의 (b) 변형률곡선과 같이 하중새하점을 기준으로 좌우 선형양상을 보이나, 균열발생 후 측정변형률은 균열의 발생위치 및 양상에 따라 좌우 선형성을 보이지 않는다. 즉, 다른 측점에 비하여 균열발생 인근의 측정변형률은 상대적으로 급격히 증가하여 탄성영역의 치짐-변형률 관계식을 더 이상 적용할 수 없으므로, 중앙점에서의 평균변형률 응답값에 보정계수를 적용하여 치짐을 추정하여야 한다. 여기에서 보정계수란 중앙점에서의 평균변형률 응답값과 실제 측정된 변형률의 비로 정의될 수 있다.

Fig. 5는 실험적 보정계수와 해석적 보정계수를 비교한 것이다. 실험적 또는 해석적 보정계수란 측정 또는 해석된 변형률과 치짐의 상관관계를 통하여 Fig. 4에서 설명한 방법으로 산정한 것이며, 실험적 보정계수/해석적 보정계수의 비가 0.91~1.12로 비교적 유사한 값을 나타내고 있다. 이는 실험을 통한 보정계수가 아닌 해석적인 보정계수를 적용하여 실측된 변형률로부터 비교적 정확하게 치짐을 추정하는 것이 가능하

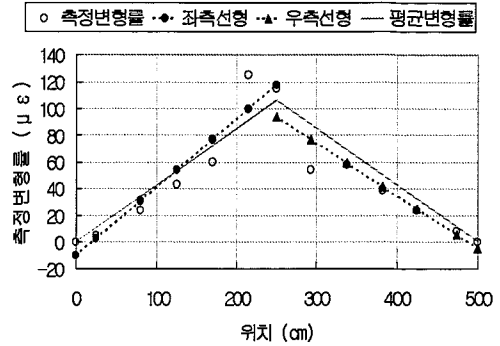


Fig. 4 균열발생 후 변형률 처리방법

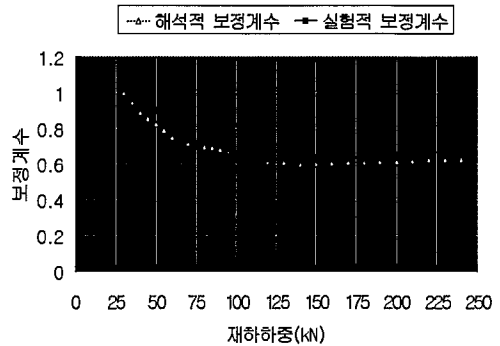


Fig. 5 실험적 보정계수와 해석적 보정계수

다는 것을 입증하는 것이다.

이상에서 제시한 보정계수의 일반화 가능성을 검토하기 위하여 Fig. 2에 제시한 단면제원을 기준으로 하여 지간장(L=500cm), 단면높이(h=50cm), 철근량(As) 등의 변화에 따른 보정계수의 변화추이를 해석적으로 검토하였다.

Fig. 6, Fig. 7에 나타난 바와 같이 지간장 및 단면높이가 변화할 때 재하하중에 대하여 곡선분포를 하던 보정계수는 일정한 시점이 지나면서 하중에 대하여 직선분포를 나타내었다. 지간장별 하중에 대한 보정계수의 절대값은 다르지만 보정계수 분포양상은 동일하며, 단면높이가 10cm 변할 때마다 보정계수가 직선분포를 보이는 시점은 30kN씩 차이를 보이고 있었다.

철근량변화에 따른 보정계수는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 철근의 항복발생시점이 철근 단면적이 증가하

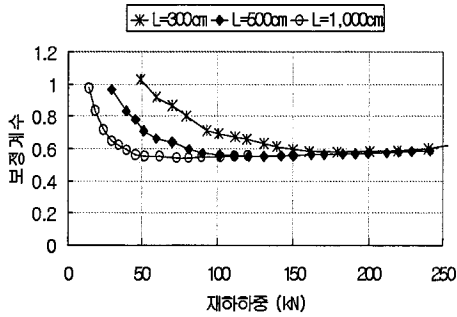


Fig. 6 지간장에 따른 보정계수 변화

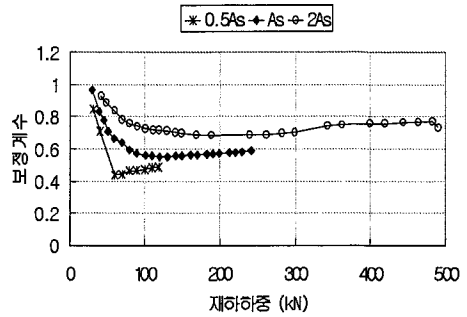


Fig. 8 철근량 변화에 따른 보정계수 변화

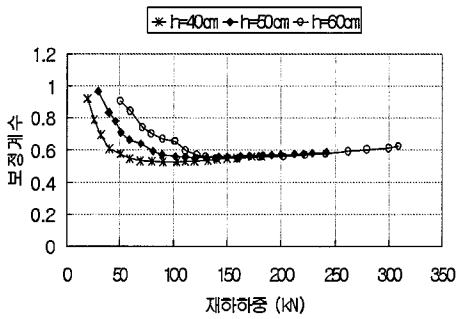


Fig. 7 단면높이 변화에 따른 보정계수 변화

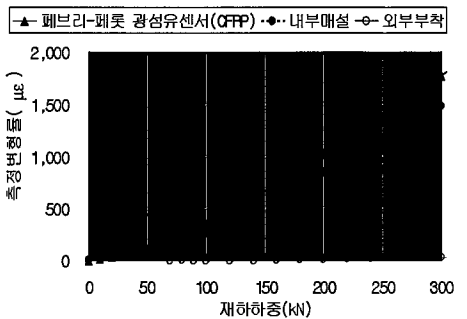


Fig. 9 센서유형별 측정결과

면서 짐차로 큰 하중단계에서 발생하였다.

위 세가지 인자에 대한 분석 결과만으로는 보정계수의 일반화를 유도하기는 어려우며, 이를 위해서는 전술한 바와 같은 해석 및 실험적 연구가 계속적으로 진행되어야 할 것이다. 이로부터 측정되는 데이터에 대하여 다양한 분석을 수행한다면, 현장 여건을 고려한 최적의 보정계수 체계를 확립할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 CFRP 부착형 광섬유센서의 성능검증

본 연구에서 적용한 CFRP 부착형 광섬유센서의 성능검증을 위하여 내부 매설 및 외부 부착형 전기저항식 변형률게이지, 그리고 CFRP 부착형 광섬유센서로부터 측정된 하중단계별 변형률을 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 그림과 같이 외부에 부착한 전기저항식 변형률게이지의 변형률 측정결과는 균열이 발생한 이

후에는 더 이상 신뢰할 수 없었다. 그러나 CFRP를 적용하여 외부에 부착한 광섬유센서로부터 측정된 변형률은 중립축으로부터 센서 부착위치까지의 거리 차이를 감안할 때 균열 발생후에도 내부에 매설한 변형률게이지의 측정결과에 비하여 약 10% 미만의 오차를 나타내고 있었으며, 이는 변형률 측정용 센서를 외부에 부착하더라도 CFRP를 이용하는 경우에는 내부에 매설한 변형률 측정용 센서와 유사하게 측정이 가능하다는 것을 입증하는 것이다.

현재까지 가장 이상적인 변형률 측정을 위하여 많이 적용되고 있는 센서 부착 형태는 시공 당시 절근 표면에 부착하는 것이다. 그러나 이미 준공된 구조물의 변형률을 효과적으로 측정하기 위하여 임의로 절근을 노출시키는 것은 한계가 있을 뿐만 아니라 구조물의 내력을 저하시킬 가능성이 있다. 그러므로 시공이 완료되어 구조물 내부 절근에 변형률 측정용 센서를 부착하기 어려운 경우에는 콘크리트 표면에 센서를 직접

부착하는 것보다는 CFRP를 이용하여 센서를 부착하는 것이 측정 변형률의 신뢰성 확보 측면에서 매우 효과적이라고 판단된다.

5. 현장적용실험

현장실험은 실통행 차량에 의하여 측정되는 각 센서 유형별 성능비교, 그리고 측정된 변형률-처짐의 상관관계를 비교·분석하는 것을 목적으로 실시하였다. 현장실험을 위하여 적용한 센서는 CFRP에 부착한 페브리-페롯 광섬유센서, 전기저항식 변형률게이지, 그리고 변위계이다(Fig. 10).

L/2지점의 광섬유센서와 전기저항식 센서의 응답결과를 비교·분석한 결과, CFRP에 부착한 페브리-페롯 광섬유센서의 최대 응답값은 Fig. 11의 약 $73\mu\epsilon$ 이며, 콘크리트 표면에 부착한 전기저항식 변형률게이지의 최대 응답값은 약 $62\mu\epsilon$ 으로, 탄소섬유 플레이트에 부착한 페브리-페롯 광섬유센서의 최대 응답값이

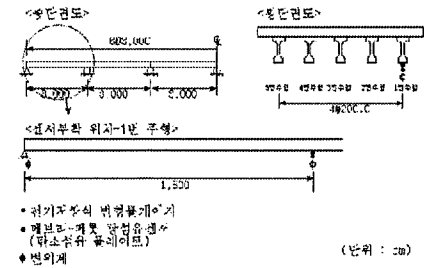


Fig. 10 대상교량의 센서 부착 위치 (PSC교량)

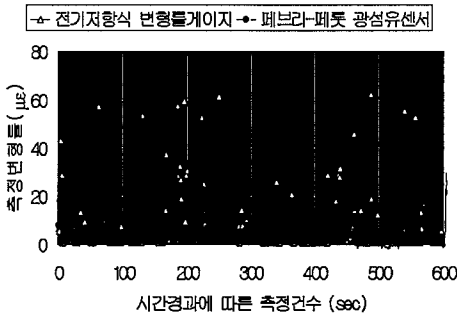


Fig. 11 계속센서별 측정 변형률 (L/2지점)

전기저항식 변형률게이지에 의한 최대 응답값에 비하여 $10\mu\epsilon$ 정도 더 크게 발생됨을 알 수 있었다. 또한, 중차량 통과시 페브리-페롯 광섬유센서의 평균 변형률은 $60\sim 70\mu\epsilon$ 사이의 응답결과를, 그리고 전기저항식 변형률게이지의 경우는 일반적으로 $50\sim 60\mu\epsilon$ 사이의 값을 나타내었다.

대상구조물에 균열이 거의 발생하지 않았고, 대상 PSC 주형의 센서부착위치와 중립축 위치까지의 거리를 1.2m로 가정한 상태에서 기본적인 구조역학적인 곡률-처짐관계와 단순보의 중앙점 하중재하시의 처짐 및 발생모멘트 세산식을 이용하여 측정변형률을 처짐과 비교할 수 있도록 환산하였다.

처짐추정 결과는 Fig. 12와 Fig. 13에 나타난 바와 같이 추정처짐과 측정처짐의 퍼크를 보이는 시간축은 약간 다르게 나타났으나, 실제 처짐측정결과와 변

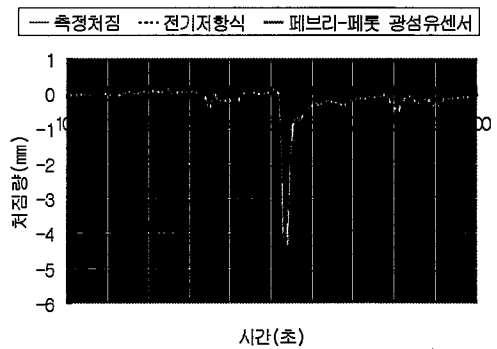


Fig. 12 추정 처짐과 측정 처짐 (1)

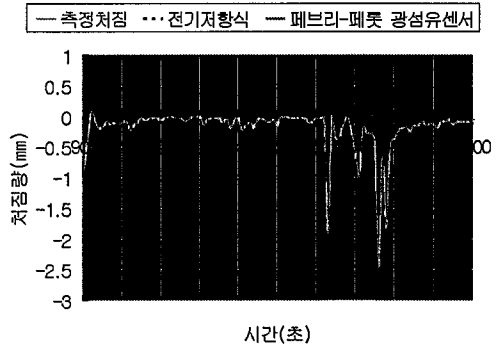


Fig. 13 추정 처짐과 측정 처짐 (2)

형틀로부터 추정 한 처짐의 양상은 거의 유사하다는 것을 알 수 있다. 시간축의 차이는 데이터측정을 위한 광섬유센서용 데이터로거를 전기저항식 측정용 로거와 독립적으로 운영함으로써 발생하는 미세한 시간차에 의하여 발생한 현상으로 판단된다.

Fig. 12에 도시된 처짐값을 비교하면, 변위계를 이용한 측정치짐은 4.26mm, CFRP에 부착한 페브라-페롯 광섬유센서를 이용한 추정치짐은 4.31mm, 그리고 전기저항식 변형률계기지를 이용한 추정치짐은 3.88mm로 측정되었다. 변위계를 이용한 측정치짐에 각각의 오차율은 CFRP에 부착한 페브라-페롯 광섬유센서의 경우 -1.2%, 전기저항식 변형률계기지는 8.9%로, CFRP에 부착한 페브라-페롯 광섬유센서의 경우 전기저항식 변형률계기지에 비하여 비교적 정확하게 측정이 가능하다는 것을 알 수 있으며, 이를 활용하면 신뢰성 있는 교량 구조물의 처짐추정이 가능하다고 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 측정변형률을 이용한 처짐추정의 가능성을 검토하기 위하여 단순 RC보 및 PSCI형교를 대상으로 내부매설 및 콘크리트 표면부착 전기저항식 변형률계기, CFRP에 부착한 페브라-페롯 광섬유센서, 그리고 변위계를 적용하여 실·내외 검증실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 균열이 발생하기 전의 탄성거동 단계에서는 하중별 측정 변형률과 보의 처짐-변형을 관계식을 이용하여 측정변형률로부터 처짐형상을 추정할 수 있으나, 균열이 발생한 이후의 비탄성거동 영역에서는 측정변형률에 대하여 보정계수를 적용하여야 처짐추정이 가능하였으며, 주로 탄성거동을 나타내는 강교의 경우에는 측정변형률로부터 효과적으로 처짐을 추정할 수 있을 것이라고 판단된다.
- 2) 변형률로부터 정확한 처짐을 추정하기 위해서는 변형률 측정결과와 신뢰성 확보가 매우 중요하다. 본 연구에서 변형률 측정을 위하여 적용한

외부부착형 센서 중 CFRP에 부착된 광섬유센서의 측정값은 균열발생의 영향을 거의 받지 않았으며, 외부부착 전기저항식 변형률계기지에 비하여 처짐추정 오차율이 낮아 신뢰성 있는 변형률 측정이 가능한 것으로 나타났다. 공용중인 PSCI 교량에 대하여 현장적용실험을 수행한 결과, 측정변형률로부터 산정된 처짐이 실제 측정 처짐과 거의 유사한 양상을 나타내고 있는 것을 감안할 때 변형률을 이용한 공용중인 교량의 처짐추정이 가능하며, 이미 시공된 교량에 대한 장기적인 측정이 요구되는 경우에는 CFRP에 부착된 광섬유센서를 적용하는 것이 합리적이라고 판단된다.

- 3) 본 연구에서는 일부조건(단순 RC보, 균열이 발생하지 않은 PSCI형교)에 국한하여 검증실험을 실시하였으며, 측정변형률을 이용한 효과적인 처짐추정을 위해서는 향후 다양한 해석 및 실험적 연구가 지속적으로 이루어져야 한다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 '99 산학연 공동연구개발사업의 1차년도 연구내용의 일부이며, 이에 대한 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. (주)동아건설산업 외, 광섬유센서를 이용한 교량 안전진단 기술개발 1차년도 연차보고서, 건설교통부, 2000. 11
2. 김남식, 광섬유 변형률계를 이용한 교량의 수직처짐 추정, 대형구조물의 건전성 감시 및 평가기술 워크샵, 2000. 2, pp. 31~37
3. 정법식 외, 교량상부구조의 가속도 실측치를 이용한 동적변위응답의 추정, 대형구조물의 건전성 감시 및 평가기술 워크샵, 2000. 2, pp. 125~130
4. 한국표준과학연구원, 트목구조물 계측용 광섬유 간섭형 변형률 센서시스템의 개발, 과학기술부, 1999
5. Special Issue - Structural Control : Past, Present, and Future, Journal of Engineering Mechanics, Vol 123., 1997. 11, pp 930~936
6. D. Inaudi, Vertical Deflection of a Pre-Stressed Concrete Bridge Obtained Using Deformation

-
- Sensors and Inclinometer Measurements. ACI Structural Journal, 1998. 9, pp 518~526
7. S. Vurpillot, D. Inaudi, A. Scano, Mathematical Model for the Determination of the Vertical Displacement from Internal Horizontal Measurements of a Bridge. Smart Structures and materials. Vol. 2719, SPIE. San Diego. 1996. 2, pp 46~53
8. D. Inaudi, N. Casanova, P. Kronenberg, S. Marazzi, S. Vurpillot, Embedded and Surface Mounted Fiber Optic Sensors for Civil Structural Monitoring. Vol. 3044, SPIE. San Diego. 1997. 3, pp 236~243

(접수일자 : 2001년 3월 9일)