

1 측량데이터를 이용한 구조물의 형상오차 원인 추정

글 조현준 \ 토목기술부 대리 \ 공학박사 \ 전화 02-3433-7918 \ E-mail hjcho@ssyenc.com

1. 머리말

형상오차란 구조물의 형상이 목표형상과 일치하지 않는 오차를 말하며, 실무와 관련해서는 설계형상과 완공 후의 형상 차이라 할 수 있다. 여러 가지 자연적 또는 인위적 하중에 대한 하중조합을 예측하고 이를 적용하게 되는 토목구조물에서는 이러한 형상오차가 필연적인데, 그 원인으로는 크게 설계시의 가정에 의한 오차, 가설 중 발생하는 시공오차, 완공 후 발생하는 영구적 변형 등이 있다.

이 중에서 시공오차는 시공단계별 측량을 통해 정이가 가능하지만, 설계상의 가정 오차와 완공 후 발생한 영구 변형에 대해서는 그 원인 분석이 쉽지 않다. 일반적인 원인에 대해 살펴보면, 설계시의 가정오차는 1) 하중 산정 오차, 2) 부재 강성의 산정 오차, 3) 지반조건 또는 경계조건 가정 오차 등이 있으며, 완공 후 또는 공용 중에 발생한 변형 요인으로는 1) 포장의 덧씌우기나 부속 구조물 변경 등에 의한 공용 중 하중의 변동, 2) 지반의 침하나 크리프로 인한 기초의 변형, 3) 부재의 시간의존 특성에 의한 변형 등이 있다.

이러한 오차발생 원인을 파악하는 것은 구조물의 현재 상태와 추후 거동을 예측할 수 있는 중요한 자료가 되고, 필요에 따라서 이를 바탕으로 적합한 보강 방안을 수립할 수 있을 것이다.

보통 설계기준이나 시방서에서는 구조물의 내구성에 영향을 미치지 않는 범위에서 허용치를 두어 설계 및 시공단계에서 사용성 및 안전성을 확보하도록 하고 있다. 그리고 공용 중인 구조물에 대해서는 일반적으로 비파괴 시험이라든지 실제 차량의 정·동적하중에 대한 응답을 이용하여 건전성을 평가한다. 또한, 사장교나 현

수교와 같은 케이블 교량에 대해서는 케이블 부재의 장력 추이를 측정하기 위해 부재의 진동수를 이용하기도 한다.

본 기고에서는 구조물의 형상 측량 데이터를 이용하여 설계 시 하중 산정 오차 및 공용 중에 발생된 변형의 원인을 추정하는 방법(박용명 등, 2007)에 대해 소개하고 간단한 구조물에 적용하여 그 타당성을 검증하고 사용방법을 살펴보고자 한다.

본 방법은 측정에서 측량된 데이터와 설계시의 형상과의 차이를 형상오차(geometry error)로 정의하고 그 원인이 되는 주요 오차 항목을 현장 여건(고정하중의 변동, 지반의 변형 등)에 따라 설정하여 구조계의 영향행렬을 이용하는 방법이다. 여기서, 측정수를 오차원인 항목수와 동일하게 선정한 경우와 다르게 선정한 경우로 나누어 해석을 수행하여 형상오차 원인 분석에 적용하였다.

이는 측량을 통해 형상 변형의 원인을 간단히 추정할 수 있어, 후속 공정이나, 건전성 평가 등에 유용하게 활용할 수 있다.

2. 측량데이터를 이용한 형상오차 원인 분석

2-1. 형상오차 원인 분석 기법

구조물의 설계 형상(design geometry)에서의 좌표로 구성된 벡터를 $\{X_0\}$ (이하 설계 좌표벡터)라 하고 측량으로부터 구한 형상(measured geometry)에서의 좌표로 구성된 벡터를 $\{X_m\}$ (이하 측량 좌표벡터)이라 한다면, 이 두 좌표벡터는 설계상의 가정오차, 시공 중의 오차 및 공용 중의 여러 가지 사건으로 인해 그 형상의 차이가 발생하게 되는데, 이로 인해 발생하는 형상 차이를 다음 식의 형상오차 벡터(E)로 정의하기로 한다.

$$\{E\} = \{X_D\} - \{X_M\} \text{----- (1)}$$

한편, 형상오차의 발생원인(예를 들어, 고정하중의 변동량 또는 지반의 변형 등)으로 구성된 오차원인 벡터를 {S}라 정의한다.

형상오차 벡터와 오차원인 벡터의 관계는 오차원인 항목에 대한 응답으로 구성되는 영향행렬 [F] 를 사용하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있고, 영향행렬 [F]는 식 (3)과 같이 구성된다.

$$[F]\{S\} = \{E\} \text{----- (2)}$$

$$[F] = \begin{bmatrix} F_{S11}^1 \cdots F_{S1N}^1, & F_{S21}^1 \cdots F_{S2N}^1, & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{S11}^K \cdots F_{S1N}^K, & F_{S21}^K \cdots F_{S2N}^K, & \cdots \end{bmatrix} \text{----- (3)}$$

여기서,

M : 오차원인 항목 종류 수

K : 축점 수

N : 오차원인 항목 수

원인항목의 수와 오차항목의 수(즉, 축점의 수)가 같다면 영향행렬 [F]는 정방행렬이 되고, singular하지 않을 때 구하고자 하는 오차원인량들은 단순 행렬의 계산으로부터 다음과 같이 직접 구할 수 있다.

$$\{S\} = [F]^{-1}\{E\} \text{----- (4)}$$

일반적으로 축점의 수가 오차의 원인이 되는 항목의 수보다 많으면 영향행렬 [F]는 정방행렬이 되지 않고, 식 (4)는 부정방정식이 되므로 이 경우에는 최소자승법을 적용한 다음 식으로부터 오차원인에 해당되는 값들을 구할 수 있다.(Tanaka 등, 1987)

$$\{S\} = ([F]^T[F])^{-1}[F]^T\{E\} \text{----- (5)}$$

한편, 식 (5)로 형상오차 원인을 분석하고자 할 때, 다음 사항을 생각할 필요가 있다. 즉, 오차원인이 되는 항목이 서로 다른 차원을 가지므로 차원에 대한 보정이 필요하거나, 또는 측량 결과 중 신뢰도가 높은 측정좌표에 대해 가중치를 부여할 경우이다. 이러한 문제의 해결을 위해 가중행렬 [ρ]를 도입하면 식 (5)는 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며(조서경, 2002), 가중치를 적절히 설정함으로써 상황에 따라 좀 더 적합한 값을 추정하는 것이 가능하다.

$$\{S\} = ([F]^T[\rho][F])^{-1}[F]^T[\rho]\{E\} \text{----- (6)}$$

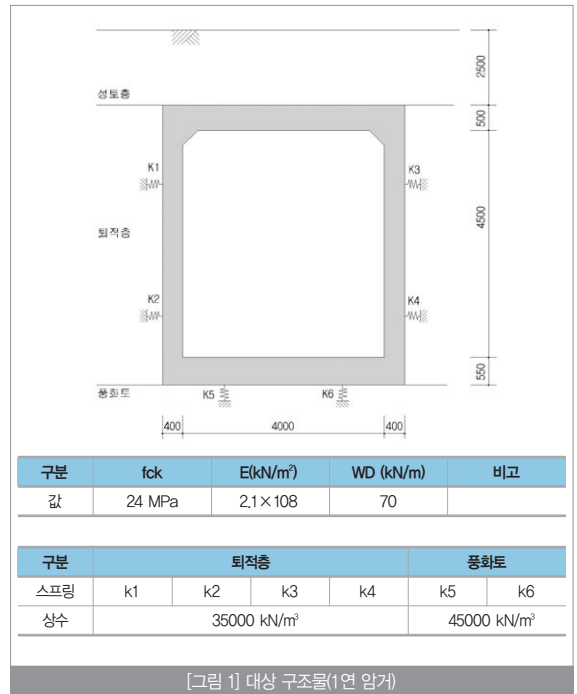
2-2. 형상오차 원인 분석 기법의 타당성 검증

앞서 설명한 형상오차 원인 분석 기법의 타당성을 알아보기 위하여 간단한 검증 절차를 진행해 보기로 한다.

예제 구조물에 오차발생 원인에 해당되는 하중 또는 변위를 가정하여 구조물에 재하한 후, 설계시의 형상과 변형 형상과의 차이를 산정하고, 앞서 설명하였던 기법을 적용하였을 때 처음 가정하였던 그 원인값이 도출되는지 알아본다.

구조물의 형상오차를 발생시키는 요인에는 여러 가지가 있을 수 있다고 앞서 기술한 바 있다. 본 고에서는 그 원인으로 고정하중의 변동에 의한 영향, 그리고 지반의 변형에 의한 영향의 두 가지를 주요 원인으로 적용하여 앞서 설명한 형상오차 원인 분석 기법의 타당성을 고려하여 본다.

검증 모델은 [그림 1]과 같은 풍화토 상에 시공된 1연 도로 암거를 적용하였으며, 지반은 탄성스프링으로 모사하였다.



1) 고정하중 변동만 고려한 경우

고정하중의 변동은 설계시의 고정하중 산정이 실제 시공과 다르게 적용되어 발생한 고정하중 산정 오차라든지, 구조물이 완공된 후 공용 중에 첨가물의 설치나 포장의 덧씌우기 등에 의한 자중의 변동 등을 오차원인으로 고려하기로 한다. 이러한 고정하중의 변

동량은 공사 중이나 완공된 후에도 지속적으로 발생할 수도 있고 여러 가지 작업공정을 거치면서 그 값을 추정하기에 어려움이 따르므로 제시한 기법을 사용하여 자중변동의 추정이 가능한지에 대해 검증해 보도록 한다.

우선 고정하중 변동에 의한 형상변화를 모사하기 위해 대상구조물의 고정하중 변동량을 오차원인 항목으로 설정하고, 목표형상 모델에 [그림 2]와 같이 임의로 $\Delta W_1 = 50 \text{ kN/m}$, $\Delta W_2 = 20 \text{ kN/m}$ 의 고정하중 변동량을 추가로 재하한다. 이 때 변형 형상과

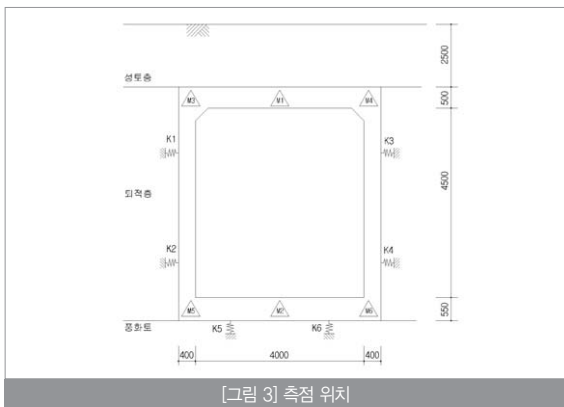
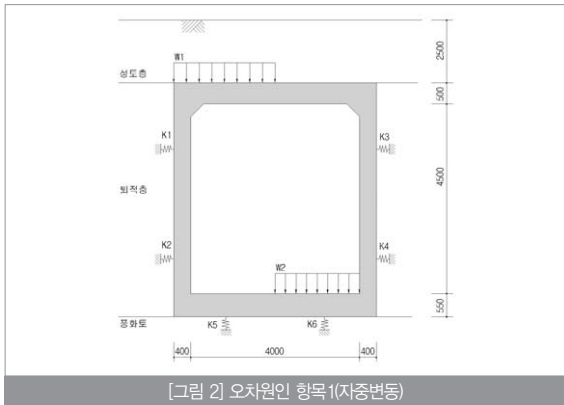


표 1 고정하중 변동이 발생한 경우

Case	도입 변동량 (kN/m)		측점에서의 오차량 (mm)		산출 변동량 (kN/m)	
	항목	가정값	측점	오차량	항목	산출값
1-A	ΔW_1	50.0	M1	-1.357	ΔW_1	50.0
	ΔW_2	20.0	M2	-0.728	ΔW_2	20.0
1-B	ΔW_1	50.0	M3	-1.727	ΔW_1	50.0
	ΔW_2	20.0	M4	-0.434	ΔW_2	20.0
	-	-	M5	-1.690	-	-
	-	-	M6	-0.419	-	-

설계시의 형상과의 차이를 형상오차벡터로 산정하게 되며, 다음의 두 가지 경우를 고려하기로 한다.

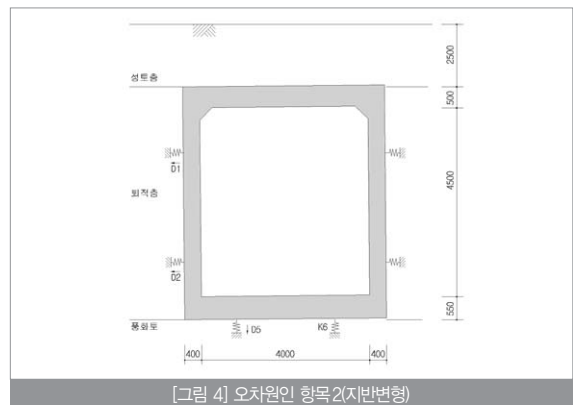
먼저, Case 1-A는 측정수가 오차원인 항목 수와 같은 경우로 [그림 3]에서 M1, M2에서의 좌표 차이를 형상오차벡터로 선정하였다. 두 번째 경우인 Case 1-B는 측정수가 4개(M3, M4, M5, M6)로서 측정수가 오차원인 항목 수보다 많은 경우로 고려하였다. 식 (4) 또는 식 (5)로부터 오차원인을 분석하기 위해 필요한 영향행렬은 각 경간에 단위 분포하중을 작용시켰을 때 해당 측정에서의 처짐으로부터 구성하며, 본 예의 경우 Case 1-A에서는 2(측점수)×2(고정하중 변동량수)인 정방행렬로, Case 1-B에서는 4(측점수)×2(고정하중 변동량수)인 비정방행렬이 된다.

<표 1>은 가정한 고정하중의 변동량에 의해 발생된 변형을 이용하여 오차량을 설정하고 그 오차량을 제시한 기법으로 산출했을 때 처음 가정한 자중 변동량과 일치한다는 것을 보여 주고 있다. 그리고, 측정수와 오차항목수가 같은 경우와 측정수가 많은 경우 모두 동일한 결과를 보였다. <표 1>에서 부호규약은 하중은 하향이 정(+)이고 연직변위는 상향이 정(+)이며, 수평변위는 우측 방향이 정(+)이다.

2) 지반의 변형만 고려한 경우

일반적으로 구조물은 암반층에 시공하기 때문에 대형 지진과 같은 큰 사건이 발생했을 경우를 제외하고는 갑작스러운 기초의 변형은 발생하지 않는다. 그러나 일반 퇴적층상에 시공된 경우, 지반의 크리프나 장기하중에 의한 압밀침하 등으로 인한 변형이 발생할 수 있다.

본 예에서는 지반의 변형을 가정하여 형상오차 원인 분석을 실시한다. 즉 주어진 대상구조물에 임의의 수평방향 변위와 기초 저면부의 연직방향 변위를 오차원인항목으로 설정하여 분석한다. 앞의 고정하중 변동량을 추정할 경우와 마찬가지로 지반의 가상



변형을 추정하기 위해 두 가지 경우를 고려하였다. 먼저, Case 2-A는 측량 측정수가 지반반력계수 변동 항목수(ΔD_1 , ΔD_2 , ΔD_5) 3개와 같은 일반 방정식이 구성되는 경우로 측정점 M2, M3, M5의 3개로 선택한 경우이고, Case 2-B는 측량 측정수가 지반 반력계수 변동 항목수보다 많아서 최소사승법을 사용하는 경우로 측정점 M1~M6의 6개로 선택한 경우이다. 측정점의 위치는 앞의 [그림 3]과 같으며, 변위에 대한 부호는 앞의 고정하중 변동량 검증의 경우와 동일하다.

형상오차벡터의 구성시 측정 M1~M4는 수평 변위차, 측정 M5, M6는 연직 변위차를 사용하였다. 영향행렬은 각 지반반력계수를 단위량 만큼 변경시켰을 때 해당 측정에서의 처짐으로부터 구성하며, Case 2-A에서는 3(측점수)×3(지반변위 변동수)인 정방행렬로, Case 2-B에서는 3(측점수)×6(지반변위 변동수)인 비정방행렬이 된다.

〈표 3〉은 지반의 가상변형을 도입하였을 때 발생한 변형 형상과 설계 형상과의 차이, 즉 형상오차를 본 기법으로 역추정해 산출한 결과로서, 산출된 지반의 변형량이 처음에 가정한 값과 일치함을 보여준다. 따라서 설계 형상 대비 측량 형상과의 차이로부터 변형이 어느 정도 발생하였는가를 추정하는데 본 기법이 적절히 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

표 2 지반 변형이 발생한 경우

Case	도입 변동량 (kN/m)		측점에서의 오차량 (mm)		산출 변동량 (kN/m)	
	항목	가정값	측점	오차량	항목	산출값
2-A	ΔD_1	-20.0	M2	-16.2	ΔD_1	-20.0
	ΔD_2	-12.0	M3	-25.9	ΔD_2	-12.0
	ΔD_5	-25.0	M5	3.9	ΔD_5	-25.0
2-B	ΔD_1	-20.0	M1	-21.7	ΔD_1	-20.0
	ΔD_2	-12.0	M2	-16.2	ΔD_2	-12.0
	ΔD_5	-25.0	M3	-25.9	ΔD_5	-25.0
	-	-	M4	-25.8	-	-
	-	-	M5	3.9	-	-
	-	-	M6	4.0	-	-

3) 고정하중 변동 및 지반 변형을 동시에 고려한 경우

본 기법의 타당성을 검토하기 위한 마지막 예로 고정하중의 변동과 지반의 변형이 동시에 발생한 경우를 고려한다. [그림 2]에서 고정하중 변동량의 미지수가 2개, [그림 4]에서 지반 변위에 대한 미지수가 3개로 총 미지수는 5개의 오차 원인 항목으로 구성된다. 본 예에서도 측량 측정수와 오차원인 항목 수가 같은 경우 (Case 3-A)와 측정수가 오차 원인항목 수보다 많은 경우(Case

3-B)를 고려하였다. Case 3-A에서는 측정점 5개([그림 3]에서 M2~M5), Case 3-B에서는 측정점 6개([그림 5]에서 M1~M6)를 선택하였다. 따라서 Case 3-A에서는 영향행렬이 5(측점수)×5(형상오차 원인 항목수)인 정방행렬로, Case 3-B에서는 5(측점수)×6(형상오차 원인 항목수)인 비정방행렬로 구성된다.

앞의 검증 예와 마찬가지로 고정하중 변동량으로는 상부슬래브에 $\Delta W_1 = 50\text{kN/m}$, 하부슬래브에 $\Delta W_2 = 20\text{kN/m}$ 를 적용하였고 지반의 변위는 각각 $\Delta D_1 = -20\text{mm}$, $\Delta D_2 = -12\text{mm}$, $\Delta D_5 = -25\text{mm}$ 를 적용하였다. 하중 및 변위에 대한 부호 규약은 앞 절에서 기술한 바와 같고, 측정 M3~M6에서는 수평변위차, M1~M2에서는 연직변위차를 고려하였다.

〈표 3〉은 가정한 고정하중의 변동량과 지반의 변형에 인한 수평 수직변위를 도입하였을 때 전산해석에서 도출된 변형 형상과 설계 형상과의 오차량을 구한 후, 다시 본 기법을 이용하여 고정하중의 변동량과 변위량을 역추정한 결과이다.

표 3 고정하중 변동과 지반 변형이 동시에 발생한 경우

Case	도입 변동량 (kN/m)		측점에서의 오차량 (mm)		산출 변동량 (kN/m)	
	항목	가정값	측점	오차량	항목	산출값
3-A	ΔW_1	50	M2	3.94	ΔW_1	49.7
	ΔW_2	20	M3	-16.25	ΔW_2	20.2
	ΔD_1	-20	M4	4.08	ΔD_1	-20.0
	ΔD_2	-12	M5	-25.72	ΔD_2	-12.0
	ΔD_5	-25	M6	-25.58	ΔD_5	-25.0
3-B	ΔW_1	50	M1	3.94	ΔW_1	50.0
	ΔW_2	20	M2	-16.25	ΔW_2	20.2
	ΔD_1	-20	M3	4.08	ΔD_1	-20.0
	ΔD_2	-12	M4	-25.72	ΔD_2	-12.0
	ΔD_5	-25	M5	-25.58	ΔD_5	-25.0
	-	-	M6	-22.35	-	-

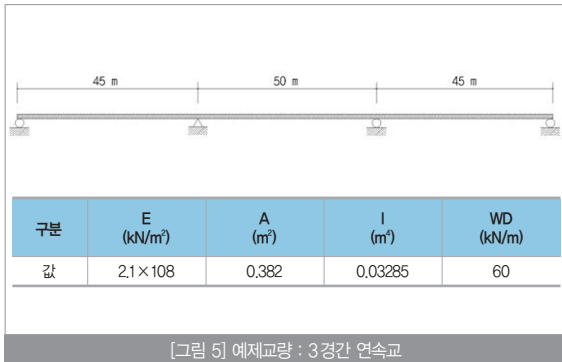
이로부터 측량 측정수가 오차 원인의 항목수와 같을 경우든 많은 경우든 모두 제시된 기법으로 구한 원인 항목에 해당되는 값들이 처음에 인위적으로 도입한 오차 값들과 동일하게 산출됨을 알 수 있다. 따라서 좀 더 복합적인 원인에 의한 형상 변형에 대해서도 제시한 기법을 적용하여 형상오차 원인을 추정할 수 있다고 판단된다.

3. 교량에서의 적용 예

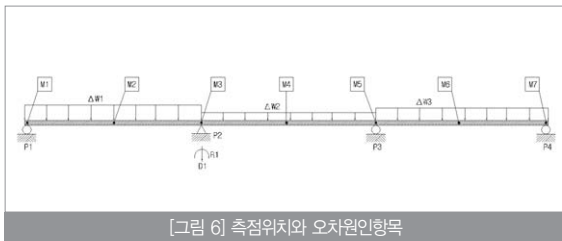
좀 더 다양한 구조물에서의 적용성을 확인하기 위해 3경간 연속교

에 대해서도 검토해 본다. 실제 교량의 형상은 캔버나 예상 신축량 등을 통해 결정하나, 본 예제에서는 형상과 제원을 [그림 5]와 같이 단순화하여 가정하였다.

측량 위치와 가정한 오차원인항목수는 [그림 6]에 나타내었다. 즉, 오차원인항목으로는 각 경간에서의 고정하중 변동과 교각 지점의 변위발생을 고려하였으며 측량 측정수가 오차 원인의 항목수와 같을 경우(Case 4-A)와 많은 경우(Case 4-B), 두 가지의 경우를 설정하여 그 적용성을 알아보았다.



[그림 5] 예제교량 : 3경간 연속교



[그림 6] 측정위치와 오차원인항목

표 4 교량에서의 적용 결과값

Case	도입 변동량 (kN/m)		측점에서의 오차량 (mm)		산출 변동량 (kN/m)	
	항목	가정값	측점	오차량	항목	산출값
4-A	Δ W ₁	-12.8	M2	0.0928	Δ W ₁	-12.8
	Δ W ₂	-6.8	M3X	-0.0273	Δ W ₂	-6.8
	Δ W ₃	-16.1	M3Y	0.0407	Δ W ₃	-16.1
	Δ D ₁	0.0273	M4	0.00134	Δ D ₁	-0.0273
	Δ D ₂	-0.0407	M6	0.0748	Δ D ₂	-0.0407
4-B	Δ W ₁	-12.8	M1	0.0	Δ W ₁	-12.8
	Δ W ₂	-6.8	M2	0.0928	Δ W ₂	-6.8
	Δ W ₃	-16.1	M3X	-0.0273	Δ W ₃	-16.1
	Δ D ₁	0.03	M3Y	0.0407	Δ D ₁	-0.0273
	Δ D ₂	-0.04	M4	0.00134	Δ D ₂	-0.0407
	※ D ₁ : dx D ₂ : dy		M6	0.0748	-	-
		M7	0.0			

측점은 각 지점부와 경간 중앙부에 위치시켰으며, 오차원인항목으로는 각 경간에서의 고정하중 변동량(Δ W₁, Δ W₂, Δ W₃)과 교각 P1 지점의 수직변위(Δ D₁) 및 수평변위(Δ D₂)를 적용하였다. 좌표계는 측점 M1을 원점으로 설정하였다.

교량의 예에서도 <표 4>에서 알 수 있듯이 적절한 오차원인 항목의 설정과 측량 자료를 이용하여 본 기법에 적용하게 되면, 도입된 변동량이 잘 추정됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 기고에서 형상 측량 데이터를 이용하여 구조물의 형상 변동 원인을 추정하는 기법을 소개하고 간단한 구조물의 예를 통해 그 타당성을 보였다. 당초 설계에서 목표로 하였던 형상에 비해, 설계상 가정에 의한 오차, 시공오차, 그리고 공용 중에 발생된 사건 등에 의해 형상에 차이가 발생하게 되는 형상오차의 원인을 분석하기 위하여 형상 측량 데이터와 단위 원인항목에 대한 구조물의 응답으로 구성된 영향행렬을 이용하였다.

본고에서는 기존의 연구내용을 참고하여 오차원인 항목을 지중의 변동과 지반의 변형에 국한하였는데, 보강형 강성의 변동, 구조제원의 변동 등을 오차원인 항목으로 추가하여 보다 다양한 원인에 대해 적용이 가능할 것으로 판단된다.

본 방법을 이용한다면, 구조물 형상 변화의 원인을 측량 데이터를 이용하여 간편하고도 적절히 추정할 수 있으므로 형상 계측을 실시한 후 본 기법을 적용한다면 목표 시점과 측량 시점간의 형상 차이로부터 구조물 변형이나 지반 변형 등의 원인을 역추정할 수 있어 시공이나 유지보수와 관련된 유용한 자료로 활용이 가능할 것이다. S

참고문헌

- ① 측량 데이터를 이용한 현수교의 형상오차 원인 추정, 한국강구조학회논문집, 제19권 3호, 2007.
- ② 행거의 고유진동수를 이용한 현수교의 구조적 성능평가, 한국강구조학회논문집, 제16권, 2호, 1998.
- ③ 현수교의 계획과 해석, 한기술, 2000.
- ④ 사장교 캔틸레버가설공법에서의 형상관리, 특진장대교량의 설계와 시공, 대한토목학회지 제50권, 제12호, 2002.
- ⑤ Cable Tension adjustment by Structural System Identification, Proceedings of the International Conference on Cable-Stayed Bridges, Bangkok, Thailand, 1987.