

프리캐스트 세그멘탈 교량의 선형관리와 세그먼트 제작에 관한 연구

A Study on the Geometry Control of the Precast Segmental Bridges and the Fabrication of Precast Segments

이환우*
Lee, Hwan Woo

이만섭**
Lee, Man Seop

이경철**
Lee, Kyoung Cheol

Abstract

In this study, an investigation on the geometry control of the precast segmental method(PSM) was performed and GEOCON was developed. It is an interactive software to control the 3-dimensional geometry of precast segmental bridges during the construction progress. Specially, this paper emphasized that the fabrication stage of the precast segment is the most important for the geometry control in the PSM and also discussed about some problems which can be overlooked in developing and using the geometry control softwares by explaining the GEOCON's characteristics.

GEOCON was successfully applied to the surrounding road of Pusan harbor.

1. 서 론

서울시 내부순환선의 건설을 계기로 우리나라에 도입된 프리캐스트 세그멘탈 교량공법에서 선형관리(geometry control) 기술은 가장 핵심이 되는 기술 중의 하나이다^{(1)~(6)}. 프리캐스트 세그멘탈 교량의 선형관리는 그 공법의 특성상 교량상부가 건설되기 이전의 상태인 세그먼트 제작 중에 선형관리의 성패가 결정된다는 점에서 현장타설 공법과는 달리 세그먼트 가설단계보다는 세그먼트 제작 준비단계와 제작단계가 더욱 중요하다는 데에 큰 차이점이 있다. 즉, 프리캐스트 세그멘탈 교량은 교량상부 가설이전에 제작장(casting yard)에서 세그먼트의 제작과 동시에, 교량이 가설되었을 때의 교량선형을

* 정회원, 부경대학교 토목공학과 조교수

** 정회원, VSL 코리아 기술부 이사

*** 정회원, VSL 코리아 기술부 차장

예측하고 보정하는 기술이 요구된다. 이를 위해서는 제작될 세그먼트의 3차원 형상을 나타내고 제작 과정에서 발생하는 오차에 따라 다음 세그먼트에 반영해야 할 보정량을 계산하고 제작된 세그먼트들의 조합된 형상을 제공할 수 있는 3차원 선형관리용 S/W가 필요하다.

현재, 국내 현장에서는 프리캐스트 세그멘탈 교량의 선형관리를 위해 해외의 선진기술이 개발한 S/W 및 기술에 의존하거나 일부 현장에서는 자체적으로 개발한 S/W를 사용하고 있기도 하다. 그러나, 세그먼트 제작의 효율성을 위해 제한된 검측값만으로 세그먼트의 3차원 형상을 규정지을 수 밖에 없고, 검측값 자체에도 여러 가지 요인들에 의한 오차가 내재될 수 있다는 점을 간과하여 개발한 S/W를 사용하거나, 검측값에 대한 분석작업을 철저히 수행하지 않고 단순한 입력에 의해 선형관리용 S/W를 운영할 때는 수치 계산상으로는 마치 정확한 관리가 이루어진 것으로 판정되나 실제로는 그렇지 못한 경우가 종종 발생하게 된다.

본 논문에서는 국내 현장에서 몇몇 기술자들에게만 경험적으로 이해되고 있는 프리캐스트 세그멘탈 교량의 선형관리 기술에 대한 소개와 부산항 배후도로에서 성공적으로 적용되고 있는 3차원 선형관리용 S/W인 GEOCON의 개발과정에 도입된 기술적인 특성에 대한 설명을 통하여 선형관리용 S/W의 사용과 개발과정에서 간과하기 쉬운 문제점들에 대하여 논하고자 한다.

2. 프리캐스트 세그멘탈 교량의 선형관리

2.1 세그먼트 제작 준비단계

현장타설 공법과 마찬가지로 프리캐스트 세그멘탈 교량의 선형관리를 위해서도 우선적으로 부재단면의 실제가 이루어진 후에 솟음량(camber) 계산결과와 설계선형 조건을 조합하여 그림 1과 같은 설계 제작곡선(theoretical casting curve)을 결정하여야 한다. 솟음량 계산을 위해서는, 크리프와 건조수축 및 P.S 강선의 릴렉세이션 효과를 고려한 시공단계별 구조해석이 이루어져야 한다.

설계 제작곡선이 결정된 후, 기본설계에서 결정된 세그먼트의 크기(통상적으로 40~70ton 내외)에 따라 세그먼트 분할을 실시한다. match casting 방법으로 제작되는 세그먼트의 분할은 상부 가설시 조립되는 방향과 동일한 방향으로 진행하면서 실시한다. 이때, 세그먼트 제작시 제작용 거푸집의 bulk head에 접하는 면은 그림 1과 같이 반드시 상부 슬래브의 면과 연직이 되도록 한다.

세그먼트 분할이 완료된 후에 분할된 세그먼트들에 대한 각 각의 제작도면이 만들어진다. 제작도면에 따라 낱날의 세그먼트를 개별적인 거푸집으로 정확히 제작하는 것은 현실성이 없으므로 일반적으로 프리캐스트 세그먼트는 match casting 방법으로 제작한다.

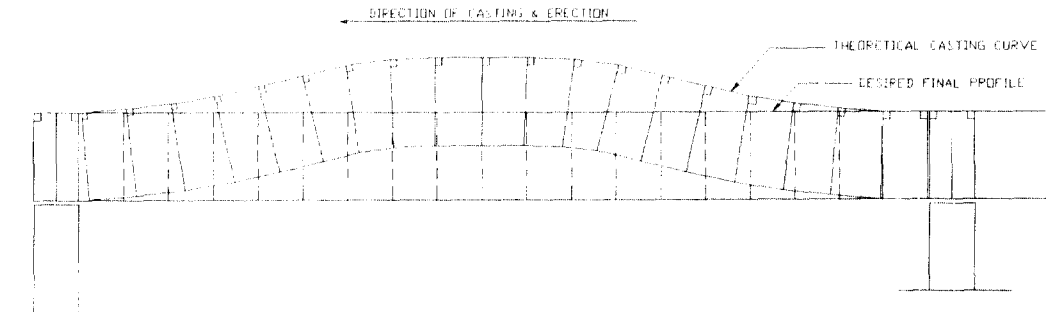


그림 1 세그먼트 분할과 설계 제작곡선

2.2 세그먼트의 제작단계

match casting에 의한 세그먼트 제작방법은 일반적으로 long line method와 short line method를 사용한다⁽³⁾. 주형의 형고가 일정하거나, 제작장이 long line bed를 설치하기에 협소할 경우에는 short line method가 주로 사용된다. short line method는 새로운 세그먼트(new segment)를 제작하기 위하여 고정된 거푸집과 바로 전에 제작된 세그먼트(old segment 또는 match cast segment)를 사용한다. 현재까지 우리나라에서 시공되어진 모든 프리캐스트 세그멘탈 교량들의 세그먼트들은 short line method에 의해 제작되었다.

그림 2는 short line method에 의한 match casting 방법으로 제작되는 종단 곡선구간(그림 2.a), 평면 곡선구간(그림 2.b) 및 편구배 변화구간(그림 2.c)등 각각의 경우에 대한 기본 제작원리를 보여주고 있다. 이 그림에서 보는바와 같이 교량의 선형은 제작장에서 기준면이 되는 bulk head 면과 old 세그먼트의 상대적인 위치에 따라 결정되는 것을 알 수 있다.

그러나, 실제의 선형은 그림 2와 같이 개별적으로만 이루어지는 것이 아니고 이들의 조합된 형태로 나타나며, 현실적으로 매번 세그먼트를 제작할 때마다 오차가 발생할 수 있다. 프리캐스트 세그멘탈 교량에서 이러한 제작상의 오차는, 세그먼트의 가설진행에 따라 현장에서 곧바로 선형관리의 오차를 확인할 수 있는 현장타설공법과는 달리, 초기의 간과된 1mm의 오차가 지간의 끝단에서는 수 십mm의 오차로 나타남을 가설 후이나 확인할 수 있게 된다. 따라서, 프리캐스트 세그멘탈 교량의 선형관리에 대한 성패는 제작장에서 결정되며 세그먼트 제작을 관리하는 S/W와 운영 그리고 검측 등에 대한 현장수준이 변수가 된다고 해도 과언은 아니다.

한편, 선형관리를 위한 주된 관리항목도 그림 2의 기본 제작원리에 따라 종단선형관리(vertical alignment)와 평면선형관리(horizontal alignment) 그리고 비틀선형관리(twisting alignment) 등이 된다⁽⁴⁾. 또한 검측을 위한 측량은 1/100mm의 수준측량과 각도상으로는 1초의 정확도를 갖는 장비를 사용하여야 하며 모든 측량 및 계산은 1/10mm의 유효자리 범위에서 수행되어야 한다.

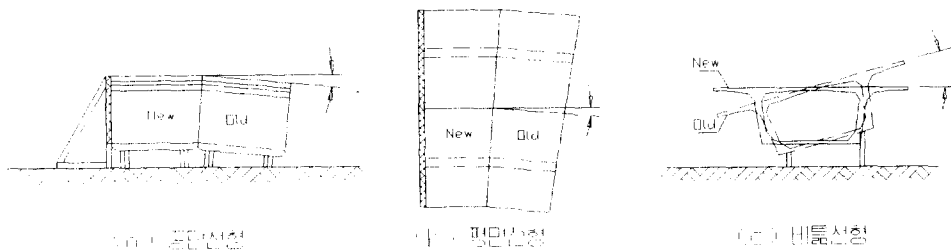


그림 2 Short line method에 의한 기본 제작원리

2.3 세그먼트의 가설단계

기본적으로 프리캐스트 세그멘탈 교량은 제작장에서 운반해 온 세그먼트를 가설현장에서 그대로 하나씩, 하나씩 세그먼트 제작순서에 따라 접합해 가면 된다. 그러나, 제작장에서 아무리 정확한 세그먼트를 제작하였다 하더라도 가설현장에도 기준 세그먼트(일반적으로 pier 세그먼트)의 설치오차 및 임시 고정장치의 고정력 부족, 긴장력의 불균형, 솟음량 계산의 오차등 선형에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 요인들이 존재한다. 따라서 세그먼트 접합과정에서도 정밀한 검측과정, 오차의 원인 및 영향분석

그리고 조정과정이 필요하다.

현재, 국내에서 주로 가설되고 있는 대표지간 50m를 갖는 프리캐스트 세그멘탈 교량의 경우에 세그먼트 제작시 관리가 성공적으로 수행되었고, 가설시에 기준 세그먼트의 설치오차와 임시 고정장치의 고정력 부족을 최소화하였을 경우, 가설현장에서의 오차의 크기는 1개 지간당 최대 수 십mm내 이었다. 이 정도의 오차는 별다른 어려움없이 조정할 수 있었다.

3. GEOCON

3.1 GEOCON의 구성 및 기능

본 연구에 의해 개발된 프리캐스트 세그멘탈 교량용 선형관리를 위한 GEOCON은 크게 GEOCON-A, GEOCON-B등 2개의 모듈로 구성되어 있다.

1) GEOCON-A

GEOCON-A는 P.S콘크리트의 시간의존적 재료특성과 시공단계별 구조해석을 통해 얻어진 설계 제작곡선으로부터 교량의 평면 및 종단선형, 편구배 등을 고려한 세그먼트의 분할을 수행한다. GEOCON-A에서는 프리캐스트 세그멘탈 교량에서 가장 많이 적용되는 3차원적인 박스거더의 형상을 그림 3과 같이 이상화 시켰으며 세그먼트의 분할 후에 점 1~8에 대한 최종 기준좌표계(3)에서의 좌표값을 계산, 출력하고 그 결과는 세그먼트 제작도면 및 GEOCON-B의 입력자료로 사용한다.

2) GEOCON-B

두 번째 모듈인 GEOCON-B에서는 먼저, 교량의 완성된 상태를 기준으로 하는 최종 기준좌표계에서 계산된 new 세그먼트와 old 세그먼트의 좌표값을 bulk head를 기준으로 하는 보조 기준좌표계에서의 좌표값으로 변환시켜 제작위치를 계산하여 출력한다.

이때, 보조 기준좌표계에서의 좌표값이 계산되는 점을 control point라 하며 GEOCON-B에서는 좌표값이 계산되는 가상의 위치이지만 실제 제작장에서는 이 위치에서 GEOCON-B의 계산결과에 따라 세그먼트의 제작위치가 관리되고 또한 제작오차에 대한 측정도 이루어진다. 따라서, control point의 설치개수와 위치는 제작의 정확성, 효율성 등을 고려하여 결정되어야 한다. 본 연구에서는 보조 기준좌표계와 new 세그먼트를 기준으로 하는 기본 기준좌표계를 일치시키므로 해서 1개의 세그먼트 당 control point의 개수를 6개로 최소화하였다. 이들 control point들은 모두 세그먼트의 상부 슬래브에 설치하였으며 종단선형 및 비틀선형 조정을 위해 슬래브 변형 등의 영향이 적은 세그먼트의 web쪽에 4개, 평면선형 조정을 위해 세그먼트의 중심선에 2개를 설치하였다. 그림 3에서 점 13~18(또는 A~F점)이 control point들이며 이들의 위치는 가능한 한 세그먼트의 앞, 뒷쪽 면에 근접시키는 것이 좋다.

한편, 출력된 제작위치에 따라 세그먼트를 제작하는 과정에서 오차가 발생할 수 있다. 잘못 제작된 세그먼트가 검측을 통하여 확인되었을 때 이러한 오차가 다음 세그먼트들에서 적절

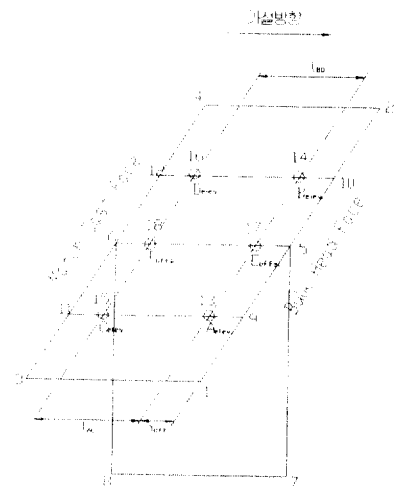


그림 3 GEOCON에서 이상화된 박스거더의 모습

히 보정될 수 있는 정도의 크기이고, 이에 따라 전체적인 선형에 큰 영향을 주지 않다면 다음번 세그먼트 제작시에 이 오차를 반영하여 보정 할 필요가 있다. GEOCON-B의 또 하나의 중요한 기능은 검측된 세그먼트의 종단 및 평면, 비틀선행에 대한 제작오차를 GEOCON-A에서 제공한 설계 제작곡선에 반영하여 수정하고 이로부터 다시 제작장에서 필요한 다음번 세그먼트의 보정된 제작위치를 계산하여 출력하는 것이다.

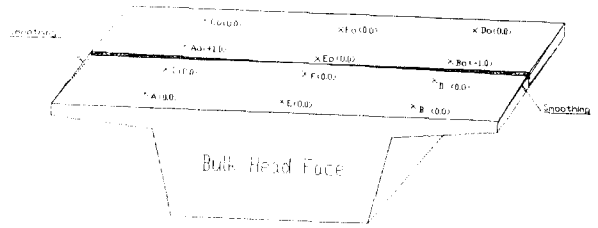


그림 4 검측오차

3.2 GEOCON의 특징

1) 본 연구에서는 세그먼트의 제작중에 거푸집은 변형(침하, 뒤틀림, bulk head의 수평, 수직도)이 발생하지 않는 것으로 가정하여 교량의 평면선형을 결정하는 데이터로서 new 세그먼트의 offset은 무시하였다. 즉, new 세그먼트의 중심선과 거푸집의 중심선은 항상 일치하는 것으로 가정하였다. 다만, 수준(elevation)측량값은 상부슬래브의 경우 거푸집으로 제어하지 않고 있으므로 그대로 사용하였다. 이와같은 개념을 사용한 GEOCON으로 부산항 배후도로의 R=300m구간(구간길이=240m)을 성공적으로 시공하였다.

2) control point에서 검측된 수준측량값을 단순히 연장하여 세그먼트의 상부슬래브 면을 결정하면 계산상으로 match cast 면에서 old 세그먼트와 단차가 저 제작된 것으로 판단될 수 있다. 그러나, 실제 제작과정에서는 new 세그먼트의 상부 슬래브 최종 끝면을 old 세그먼트 면에 일치시키므로, control point의 검측값을 기준으로 한 계산상으로는 match cast 면에서 단차가 발생하는 것으로 나타나지만 실제적으로는 발생하지 않는다. 한편, bulk head면에서는 new 세그먼트의 콘크리트 타설면이 항상 수평면이 되도록 계획되어 지고, 작업자는 bulk head면이라는 수평기준면을 타설 작업중에 항상 확인하면서 작업할 수 있으므로, control point의 검측값을 기준으로 한 계산상으로는 슬래브면이 종단 및 비틀경사도를 갖고 있더라도 bulk head면에서의 슬래브 최종 끝면은 수평면으로 마무리 지어진다.

따라서, 본 연구에서는 다음의 new 세그먼트 제작을 위한 설계 제작곡선의 수정에 영향을 주는 bulk head면에서의 슬래브 최종 끝면을 현장의 실제 상황을 고려하여 처리하였다. 즉, 다음 식 (1)과 같이 control point인 그림 3의 점13, 14에서 측정된 수준값의 평균에 new 세그먼트의 평균 종단경사도를 고려한 높이로 bulk head면에서 슬래브 최종 끝면이 수평을 유지하는 것으로 가정하였다.

Bulk Head면에서의 세그먼트 높이=

$$(A_{elev.} + B_{elev.})/2 + YOFF \times \left(\frac{A_{elev.} - C_{elev.}}{l_{AC}} + \frac{B_{elev.} - D_{elev.}}{l_{BD}} \right) / 2 \quad (1)$$

3) 그림 4에서와 같이 old 세그먼트가 new 세그먼트 위치에서는 모든 control point에서의 검측값이 0.0이었는데 현재의 old 세그먼트 위치에서는 A, B, C, D점이 각각 +1.0, -1.0, 0.0, 0.0으로 검측되는 경우가 발생할 수 있다. 만약, C, D점도 각각 +1.0, -1.0으로 검측되었다면 분

명히 old 세그먼트가 일정한 비틀림각도를 갖고 회전되어 setting된 것으로 판단할 수 있다. 그러나 현재는 A, B점의 검측이 잘못되었는지 아니면 C, D점의 검측이 잘못되었는지 또는 A, B 면에서 일정시간이 경과된 old 세그먼트가 뒤틀렸는지 쉽게 판정하기가 어렵다. 본 연구에서는 설계 제작곡선의 수정에 필요한 match cast면의 경사도 결정시 검측결과로부터 얻어지는 old 세그먼트 좌, 우측면의 종단경사도와 앞, 뒤쪽 면의 비틀림각도에 대하여는 그 값을 평균으로 환산하여 해당 세그먼트의 대표값으로 사용하였다. 따라서, 위와같은 검측오차 발생시 GEOCON에서는 보정의 필요성과 정확한 보정량에 대한 계산과정에서 유발될 수 있는 또 다른 오차에 대한 위험도를 분산시키고 있다.

4. 결 론

- 1) 프리캐스트 세그멘탈 교량의 3차원 선형관리용 S/W인 GEOCON을 개발하였다.
- 2) 프리캐스트 세그멘탈 교량의 선형관리는 어느 한 공정에만 국한되는 기술은 아니나, 그 공법의 특성상 제작장에서의 관리가 가장 중요하다.
- 3) 성공적인 선형관리를 위해서는, 실제의 현장상황을 고려하여 제한된 검측값을 보완할 수 있도록 합리적으로 가정된 선형관리용 S/W의 사용 및 운영이 이루어져야 한다. 특히, 검측자와 S/W 운영자는 검측결과와 제작오차의 주된 발생요인에 대해 끊임없는 검토자세가 필요하다. 또한, 검측 결과의 입력에 대하여도 반복적인 확인작업이 필요하다.
- 4) 개발된 GEOCON은 R=300m구간이 포함된 부산항 배후도로 교량의 2109m(세그먼트 수량,1434개)의 프리캐스트 세그멘탈 구간에 성공적으로 적용되고 있다.

● 참고문헌 ●

1. Bender, Brice F., and Janssen, H. Hebert, "Geometry Control of Precast Segmental Concrete Bridges," *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, Vol.27, No.4, July-August 1982, pp.72-86.
2. Moreton, Alan J., "Segmental Bridge Construction in Florida—A Review and Perspective," *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, Vol.34, No.3, May-June 1989, pp.36-77.
3. Podolny, Walter, Jr., and Muller, Jean M., *Construction and Design of Prestressed Concrete Segmental Bridges*, John Wiley & Sons, New York, N.Y., 1982.
4. Breen, John E., "Controlling Twist in Precast Segmental Concrete Bridge," *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, Vol.30, No.4, July-August 1985, pp.86-111.