

# 오차보정기법을 이용한 벽강관말뚝식 안벽 설계 변경 사례

Design Improvement Case of Quaywalls Constructed by Steel-pipe-sheetpiling using Error Correction Technique



조 현 준\*



우 동 인\*\*



정 옥 현\*\*\*

\* 쌍용건설 토목기술팀 과장  
 \*\* 쌍용건설 토목기술팀 부장  
 \*\*\* 쌍용건설 KAPO2현장 차장

## 1. 머리말

오차보정기법은 구조물의 목표치와 측정치 또는 해석치의 차이를 줄이기 위한 설계 변수값을, 하중, 부재력, 변위 등의 상호 연관된 구조계의 응답을 통해 수학적 연산으로 찾는 방법이며, 교량에서는 사장교의 형상관리를 위한 케이블 장력의 보정량을 산정할 때 주로 사용된다. 이는, 단위하중에 대한 구조물의 응답으로 구성된 영향행렬을 구성하여 행렬 연산을 통해 보정치를 산정하기 때문에 고차의 부정정 구조물에서도 비교적 손쉽게 설계자가 원하는 부재력이나 형상을 구할 수 있다.

본 기사에서는 항만 구조물인 벽강관말뚝식 안벽의 시공에 있어 오차보정기법을 적용한 사례를 소개하고자 한다. 당초에는 벽강관말뚝과 타이로드(Tie-rod)를 개별 시공한 후 Capping-beam 콘크리트를 타설하기로 설계하였던 것을, 시공 중 현장 여건에 맞추어 벽강관말뚝과 하부 Capping-beam을 시공하고 타이로드에 긴장력을 도입하도록 시공순서를 변경하였다. 시공 순서가 변경된 구조계에서는 Capping-beam과 벽강관이 일체화되며, 매번 도입되는 타이로드의 긴장력이 전 후 단계에 영향을 미치기 때문에 단계별 해석을 통해 적정 장력을 산정하여야 한다. 이를 위해 오차보정

기법을 적용함으로써 최종 단계에서 작용되는 장력값이 목표치에 부합되도록 하였다.

## 2. 공사 및 설계 변경 개요

### 2.1 공사 개요

벽강관말뚝식 안벽이 적용된 현장은 쌍용건설이 2012년 4월에 준공한 파키스탄 최대 규모의 항구인 카라치항(Karachi Port) 부두 재건공사 현장(KAPO현장)이다. 파키스탄은 전체 인구 1억 5천만명으로 면적은 우리나라의 약 8배에 달한다. 아라비아해를 접하고 있는 카라치시는 인구 약

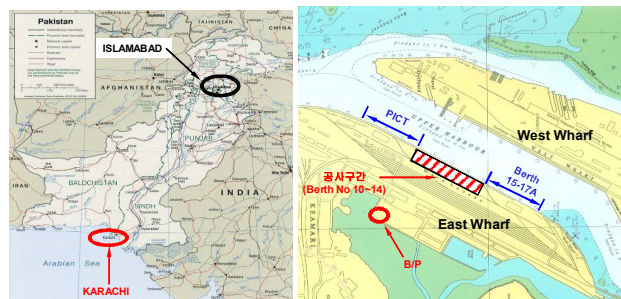


그림 1 현장 위치도

표 1 프로젝트 개요

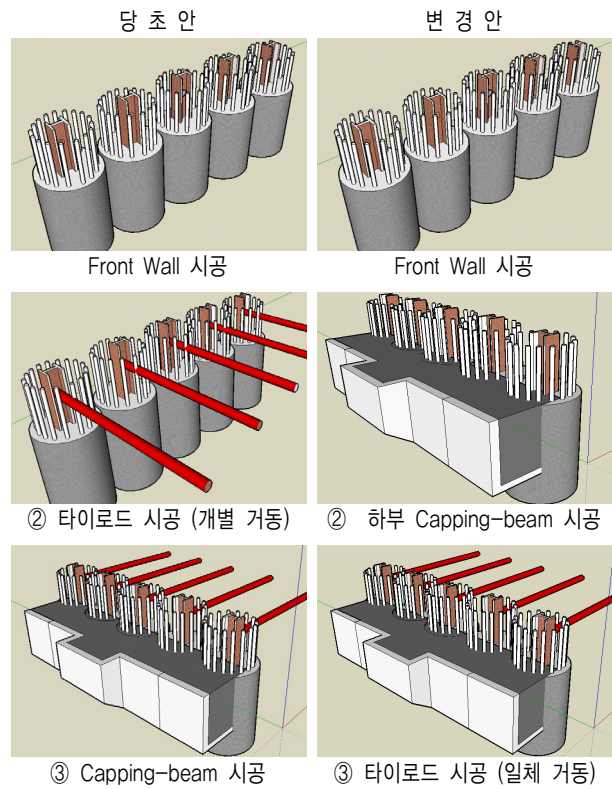
공사명	Reconstruction of Berth 10 to 14 on East Wharves at Port of Karachi
현장위치	East Wharves of Karachi Port
공사기간	2008. 3. 21 ~ 2012. 4. 30 (50개월)
발주처	Karachi Port Trust (KPT)
설계감리	Scott Wilson(영) & Zaheeruddin(파) J/V
시공감리	Lyon(미) & Techno(파) J/V
시공사	Ssangyong(50%) & Usmani(50%) J/V - Ssangyong 100% 위임 시공

1300만명이 살고 있는 파키스탄 제1의 도시로, 카라치항은 연간 컨테이너 화물 117만 박스를 처리할 수 있는 파키스탄 최대 규모의 항구이다. 그러나 지난 수년간 지속되는 호우와 강한 태풍으로 선석 10~14구간이 붕괴되어 카라치 항 만창에서는 이를 복구하고 재건하기 위한 항만 공사를 발주하였다.

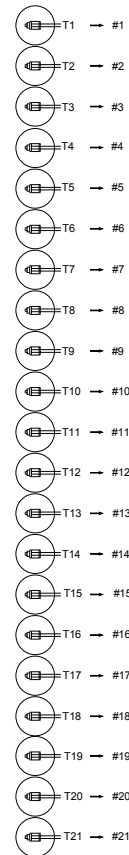
부두 재건을 위해 당 현장에 적용한 안벽 형식은 벽강관말뚝식으로, 케이슨식, 잔교식 안벽을 주로 적용하는 국내에서는 그 실적이 저조하다. 벽강관말뚝식 구조물은 1960년대에 개발되어 주로 항만구조물(안벽, 호안, 방파제)이나 교각기초, 토류벽, 가물막이 등 여러 방면에 적용되고 있다. 이음부를 가진 강관말뚝을 지지층까지 타입하고 이음부를 일체화하여 연속벽체를 형성하는 구조체로서, 시공성과 차수성이 뛰어나고 강관을 이용하므로 강널말뚝에 비해 단면 계수가 크기 때문에 수평저항력이 크고 내진성능이 우수하다. 따라서, 수심의 변동이나 지반조건 등과 같은 불확실한 시공환경에서 타 구조물에 비하여 경제적인 측면과 시공적인 측면에서 유리하다.

## 2.2 설계 변경 배경 및 목적

설계 변경을 수행하게 된 계기는 발주처에서 항구의 조기 운영을 위해 지속적으로 공기 단축을 요구하였고, 발주처의 요구를 적극 수렴하고자 당초 설계에 대한 경제성 및 타당성 등을 기능별, 대안별로 검토하여 새로운 기술 및 공법을 제안함으로써 공사비 절감 및 시공기간 단축 등의 효과를 얻고자 하였다. 그 일환으로, 안벽 시공시 벽강관말뚝과 타이로드를 개별로 시공하고 Capping-beam 콘크리트를 일괄 타설하기로 한 당초안을 벽강관말뚝을 근입한 후 하부 Capping-beam을 시공하고 타이로드를 단계적으로 시공하도록 변경하였다. 이 변경안은 상부 Capping-beam 타설 동안에 타이로드를 긴장하는 것이 가능하여 공기를 단축시킬



< Tie-rod 긴장 순서 >



< Tie-rod 긴장 순서 >

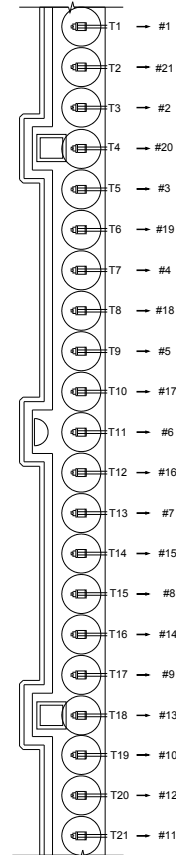


그림 2 벽강관말뚝식 안벽 시공 순서 변경

수 있고 타이로드에 작용하는 긴장력을 적절히 조절하므로써, 설계자가 원하는 부재력을 산출하는 것이 가능하다.

### 3. 설계 변경 현황

변경된 시공순서는 그림 2와 같다. 당초에는 벽강관말뚝 1본을 타입하고 말뚝상단에 타이로드를 체결, 500kN까지 긴장하는 작업으로 21본의 벽강관말뚝과 타이로드를 시공한 후, Capping-beam 콘크리트를 일체 타설하기로 하였으나, 현장의 여건에 맞추어 벽강관말뚝을 시공하고 Capping-beam 하부 콘크리트를 먼저 타설한 후, 타이로드를 단계적으로 긴장하도록 변경하였다. 당초 설계는 벽강관말뚝과 Capping-beam이 타이로드의 장력 변동에 영향을 받지 않아 타이로드 긴장력 도입시 목표치대로 단일 구조체의 단순한 긴장 작업을 수행하면 되었으나, 변경안에서는 Capping-beam과 벽강관말뚝이 일체가 된 상태에서 타이로드를 시공하므로, 전체 구조체가 모든 타이로드의 장력 변동에 영향을 받게 된다. 이는 Capping-beam이 타이로드에 의해 지지된 부분을 지점으로 구성되어 있는 연속보와 같은 거동을 하며, 초기에 도입한 장력값은 최종 단계에서의 장력값과 다르게 산출된다. 따라서 이를 적절히 반영하기 위해서는 실제 시공순서를 모사한 단계별 해석을 수행하여야 하며, 각 단계 시 도입되는 타이로드 긴장력에 의한 구조물의 거동을 적절히 파악하여 장력값을 산정하고, 이를 바탕으로 안벽 구조물에 대한 검토가 이루어져야 한다.

### 4. 단계별 해석을 통한 타이로드 장력 결정

#### 4.1 개요

벽강관말뚝식 안벽의 설계변경에 대한 안전성을 검토하기 위해 단계별 해석을 수행하였으며, 그 절차는 그림 3과 같다. 그림 4의 단면도를 보면 이전 구조물 일부가 그대로 존치되고 있어 해당 지반의 수평방향 스프링 상수를 설계 기준의 제안치대로 산정하여 적용하기에는 실제 현장 상황과 다르다. 따라서, 설계변경시에서는 지반조건과 해수조건 및 이전 안벽 구조물을 고려한 2차원 유한요소해석을 통해 벽강관말뚝의 수평변위를 산정하고, 힘-변위 관계식을 적용하여 벽강관말뚝의 축직각방향 스프링강성을 추정하였다.

당초 설계안에 타이로드 장력을 500kN까지 긴장하도록 되어 있어서, 변경 설계안에 적용된 타이로드의 최종 목표장력은 500kN으로 설정하였다. 즉, 단계별 해석을 통해 타이로드가 최종 단계에서는 목표장력인 500kN가 작용되도

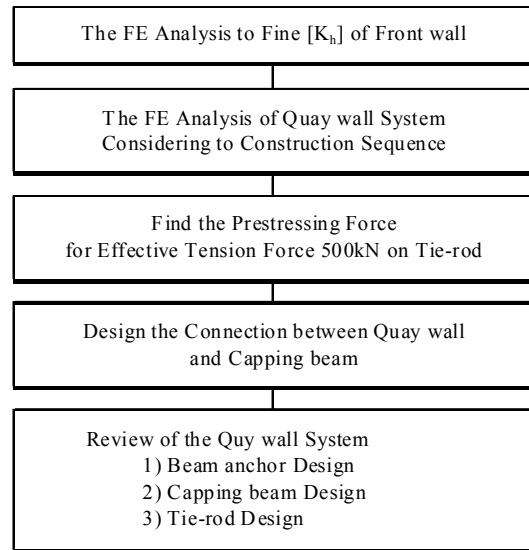


그림 3 설계 순서도

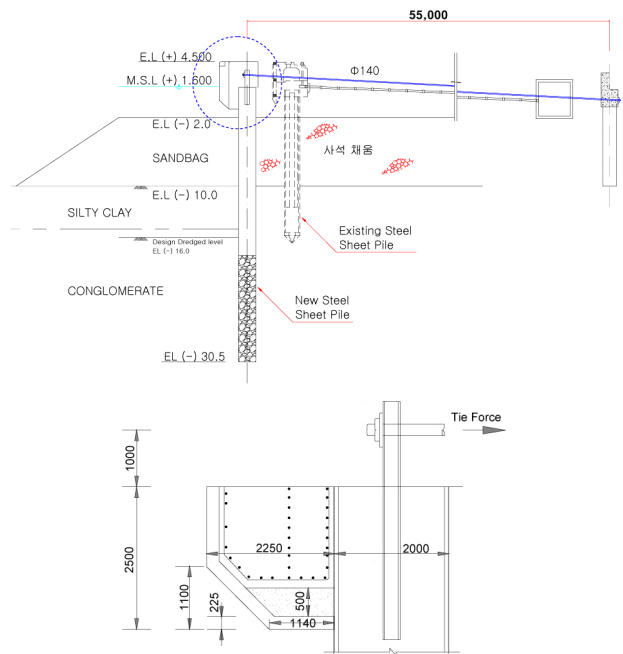


그림 4 안벽 시공 단면도

록 하는 단계별 도입 긴장력을 결정하고, 결정된 단계별 타이로드 장력을 이용하여 부재별 단면검토를 수행하였다.

#### 4.2 강관말뚝의 수평방향 스프링 상수 추정

당초 설계에서 타이로드에 도입되는 긴장력은 500kN이 있으므로, 2차원 유한요소 모델링시 타이로드에 500kN의 인장력을 재하하였을 때 발생하는 수평방향 변위를 지반 유한요소해석(PLASIX)을 통해 산정하여 벽강관말뚝의 축

표 2 지반 정수

Soil	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	$\phi$ (degree)	E (MPa)
Rock fill	17	10.0	40.0	42
Dense sand	19	0.0	35.0	80
Clay shale	21	20.0	27.5	40
Sand gravel	19	0.0	37.5	38
Sand Bag	18	0.0	30.0	40

※ Water Level : (+)1.7m

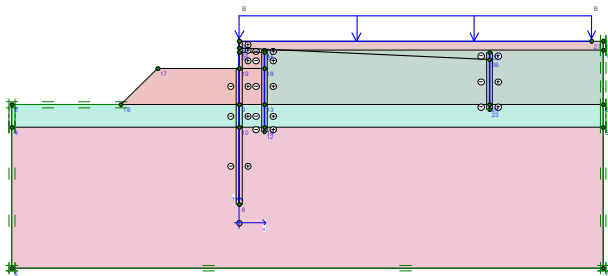


그림 5 벽강관말뚝 수평변위 추정을 위한 유한요소 모델링

직각방향 스프링 강성을 계략적으로 추정하였다. 이때 사용된 지반정수와 수위조건은 표 2와 같다.

해석값을 이용하여 식 (1)의 일반적인 힘-변위 관계식으로부터 벽강관말뚝의 축직각방향 스프링 상수를 구할 수 있다.

$$P = k \cdot \delta h \quad (1)$$

$$500 \text{ kN} = k \times [1.09\text{mm} - (-15.23\text{mm})]$$

$$\therefore k = \frac{500.0}{16.32} = 30.637 \text{ kN/mm}$$

#### 4.3 오차보정기법을 적용한 타이로드의 시공 장력 결정

시공순서를 변경하여, 벽강관말뚝이 Capping-beam에 의해 구속되면 한 개의 타이로드에 도입되는 장력은 전체 구조물에 영향을 미친다. 따라서, 순차적으로 긴장되는 타이로드가 전체 구조계에 미치는 영향을 고려하여 최종적으로 작용하는 인장력이 당초 설계값인 500kN이 되도록 시공중 도입해야 하는 타이로드의 긴장력을 산정하여야 한다.

##### 4.3.1 오차보정기법의 적용

부재의 생성 및 소멸과 구조물 변화에 따른 강성행렬의 모사가 가능하다면 단계별 해석에서의 최종 부재력 값은 각 단계에서 발생한 부재력값의 누적으로 산정할 수 있다. 따라서, 최종 목표치에 대한 필요한 장력의 관계는 다음 식

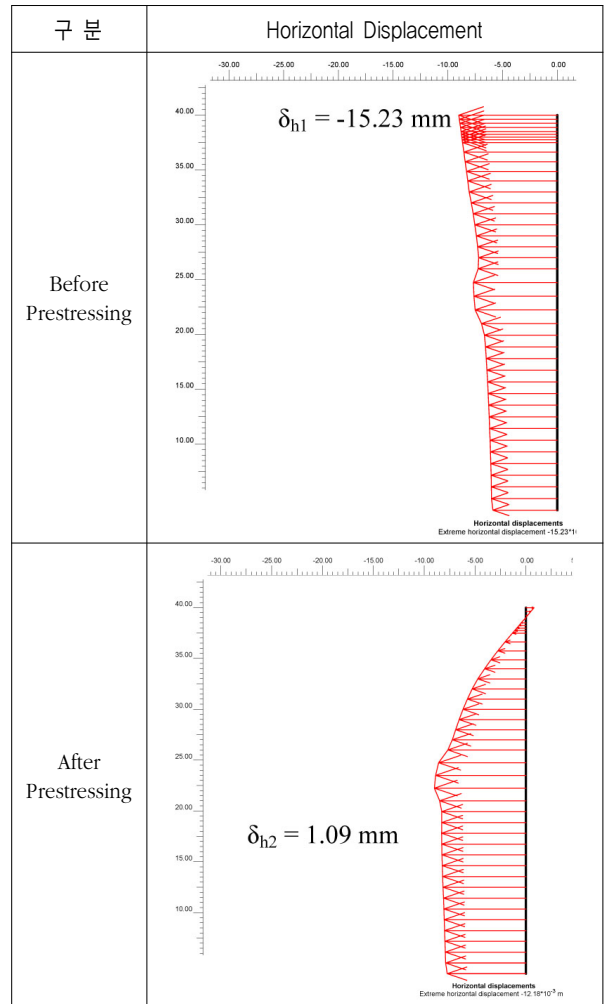


그림 6 타이로드 긴장력에 의한 벽강관말뚝의 수평변위

(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$r_i = \sum_{j=1}^n f_{ij} \Delta T_j^i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

여기서,  $f_{ij}$ 는 타이로드 장력이 도입되는  $i$ 번째 단계 중  $j$ 번째 타이로드 장력의 변동량  $\Delta T_j^i$ 가 단위값을 가질 때 최종 단계에서  $i$ 번째 위치의 타이로드의 장력의 응답을 의미하며, 1개의 미지력 변화에 의한  $i$ 항의 최종단계에서의 보정된 장력값은  $r_i$ 가 된다. 그리고  $m$ 은 타이로드 장력으로 구성된 미지력의 수가 되고,  $n$ 은 제어점 또는 오차항목수가 된다.

이를  $n \times n$ 의  $f_{ij}$ 를 요소성분으로 하는 영향행렬  $[F]$ 를 이용하여 미지력 벡터  $\{\Delta T\}$ 와 보정치 벡터  $\{R\}$ 사이의 관계를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{R\} = [F]\{\Delta T\} \quad (3)$$

여기서,  $\{\Delta T\}$ 는 타이로드 장력의 보정량이고,  $\{R\}$ 은 장력의 보정에 의한 최종 단계에서 타이로드에 작용하는 장력 변화량이다.

식 (3)의 행렬식을 풀어서 쓰면 다음 식 (4)와 같다.

$$\begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & f_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \\ \vdots \\ \Delta T_n \end{Bmatrix} \quad (4)$$

최종 단계에서의 목표 장력을  $\{T^*\}$ 라 하고 해석을 통해 얻어진 최종 장력의 벡터를  $\{T\}$ 라 한다면  $\{R\}$ 은 두 값의 차이므로 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\{R\} = \{T^*\} - \{T\} \quad (5)$$

식 (3)으로부터 필요한 장력의 보정량은 식 (6)과 같이 영향행렬  $[F]$ 의 역행렬로부터 구할 수 있다.

$$\{\Delta T\} = [F]^{-1} \{R\} \quad (6)$$

식 (6)에 식 (5)를 대입하면 최종적으로 보정되는 장력량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\{\Delta T\} = [F]^{-1} (\{T^*\} - \{T\}) \quad (7)$$

### 4.3.2 단계별 장력 산정

타이로드의 적정 장력을 산정하기 위해 대상 구조물을 전산 모델화하고 오차보정기법을 적용한 단계별 해석을 수행하였다.

#### ① 유한요소 모델

벽강관말뚝식 안벽의 단계별 해석을 위한 유한요소 모델의 형상은 그림 7과 같다. Capping-beam은 보요소로, 벽강관말뚝은 스프링요소로, 타이로드는 트러스 요소를 사용하였으며, 각 부재의 제원은 표 3에 나타내었다. 구조물의 자

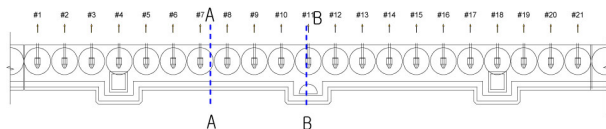


그림 7 벽강관말뚝식 안벽 평면도

표 3 벽강관말뚝식 안벽 제원

Part (Section)	A (m <sup>2</sup> )	E (MPa)	I(m <sup>4</sup> )
Capping-beam(AA)	1.773	28,401	0.6988
Capping-beam(BB)	4.002	28,401	1.781
Tie-rod	0.0154	200,000	-
Horizontal Spring Constant	$k_h = 30,637 \text{ N/mm}$		

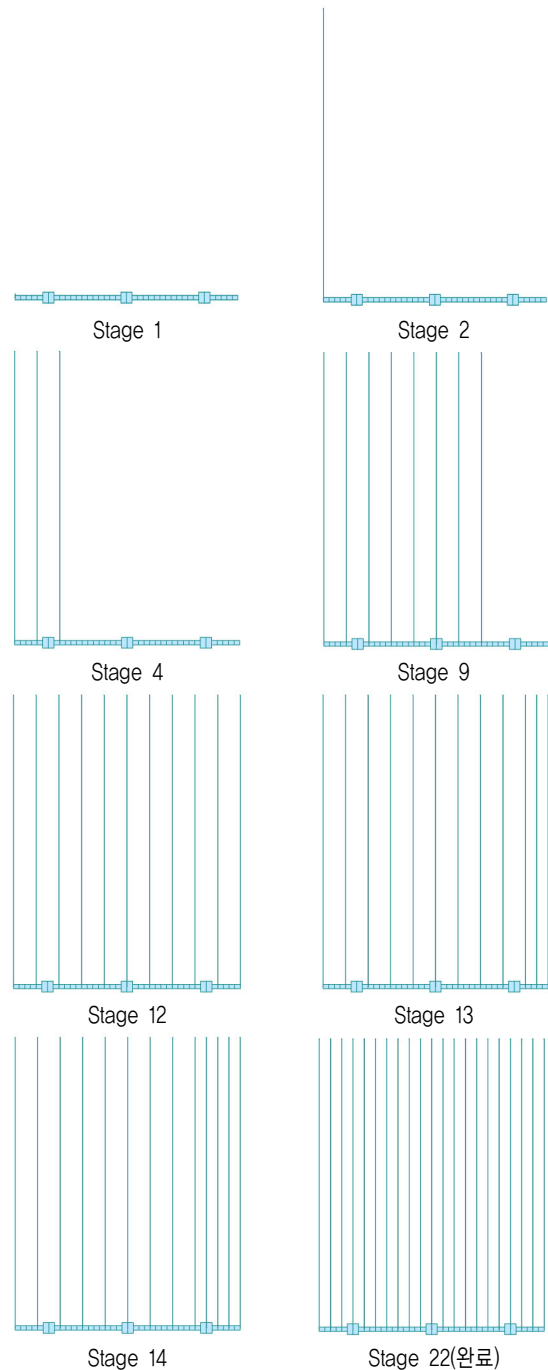


그림 8 시공단계별 형상

표 4 타이로드 시공 장력

Tie-rod No	Tension (kN)	Tie-rod No	Tension (kN)	Tie-rod No	Tension (kN)
1	551.62	8	516.49	15	570.39
2	500.00	9	572.38	16	515.86
3	565.69	10	516.77	17	569.91
4	513.78	11	573.86	18	516.82
5	573.24	12	515.69	19	570.29
6	515.36	13	571.53	20	513.01
7	573.49	14	515.42	21	535.64

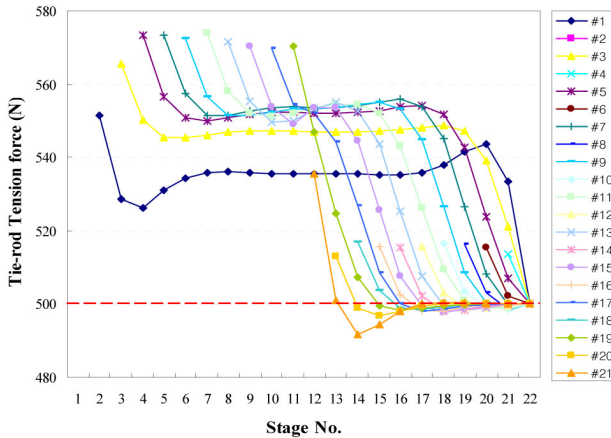


그림 9 시공단계별 타이로드 장력

중과 시간 효과에 따른 타이로드의 긴장력 손실 효과는 무시하고 해석을 수행하였다.

시공단계는 총 22단계로 나누었으며, 타이로드의 긴장 순서에 따른 시공단계별 모델 형상을 그림 8에 나타내었다.

② 해석결과

표 4는 시공단계해석을 적용하여 산정한 타이로드의 각 단계별 긴장력으로, 장력의 변동값은 그림 9에 나타내었다. 최종 단계에서 타이로드 전체에 작용하는 긴장력이 목표치인 500kN로 수렴하는 것을 알 수 있으며, 이는 장력값이 적절히 산정되었음을 확인할 수 있다.

5. 구조 검토

설계변경으로 인한 안벽 구조물의 안전성 검토는 각 긴장 단계 중 발생하는 최대 모멘트와 최대 전단력에 대하여 수행하였으며, 표 5에 나타난 바와 같이 주부재력에 대해서 충분한 안전성을 확보함을 확인하였다.



그림 10 시공단계 중 최대 부재력

표 5 벽강관말뚝식 안벽 설계 사항

항목	검토 사항
Moment	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>M_{max} = 758 \text{ kN} \cdot \text{m}</math></li> <li><math>A_{sreq} = 4,027 \text{ mm}^2 &lt; A_{suse} = 4,908.7 \text{ mm}^2</math></li> </ul>
Shear Force	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>V_{max} = 272 \text{ kN}</math></li> <li><math>A_{sreq} = 1,620 \text{ mm}^2 &lt; A_{suse} = 3,272 \text{ mm}^2</math></li> </ul>
Tie-rod	$T_{max} = 574 \text{ kN} < T_a = 3,750 \text{ kN}$

6. 맺음말

본 기사에서는 벽강관말뚝식 안벽의 적정 타이로드 장력을 결정하는데 있어 오차보정기법을 적용한 사례를 소개하였다.

시공성과 경제성을 개선하기 위한 설계 변경 과정에서 실제 구조물의 거동을 현장 여건을 반영하여 예측하고 오차보정기법을 단계별 해석에 접목하여 목표치에 부합하는 시공 장력값을 산정하였다.

당 프로젝트에서는 타이로드 장력만을 오차항목으로 설정하였으나, 부재력이나 처짐 등을 오차항목과 목표치로 설정한다면 좀더 다양한 목적으로 활용할 수 있을 것이다. 본 기법은 복잡한 구조물에서도 설계자가 조정 가능한 변수의 적정값을 비교적 쉽게 산출할 수 있으므로 실무 적용에 있어서 유용한 방법인 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Tanaka H., and Kamei M. (1987) Cable Tension adjustment by Structural System Identification, Proceedings of the International Conference on Cable-Stayed Bridges, Bangkok, Thailand.
2. 김제춘, 장승필(1999) 초기부재력을 이용한 사장교의 초기 형상 및 캠버량 결정, 대한토목학회논문집, 제19권, 제1-3호.
3. 나승민, 김태진 (1999) 벽강관말뚝식 항만구조물의 적용방안, RIST 연구논문 제13호 제2권.
4. 조서경 (2002) 사장교 캔틸레버 가설공법에서의 형상관리, 특집 장대교량의 설계와 시공, 대한토목학회지 제50권, 제12호.

