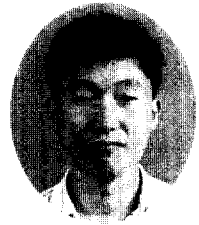


서해대교 사장교 주탑시공 —소성헌지에서의 철근배근 시공사례 검토 보고—



박찬민*

1. 서론

이론과 실제, 어느 한쪽이 부족해도 큰 문제가 발생할 수밖에 없는 서해대교 현장에 근무하는 기술자로서 우선은 자부심이 있으나 한편으로 너무나 부족한 능력에 자책감이 드는 것도 또한 이루 말할 수 없다. 그러나, 현장에서, 본사에서 발주자, 감리자, 시공자와 설계자가 모두 합심하여 일을 해결하려고 노력하고 협력하는 모습은 매우 자랑할 만하다.

현장에서 많은 것을 느꼈지만 이번 공사기사를 통해 꼭 우리 건설인들과 나누고 싶었던 이야기를 내진 설계시 소성헌지에서의 철근배근상세를 중심으로 간단히 소개하고자 한다.

2. 서해대교 개요

서해대교에 관하여는 여러차례 각종 학회지와 잡

지, 신문을 통하여 글이 실렸으므로 여기서는 간략히 소개하고자 한다.

2.1 공사개요

■ 교량 연장 : 7,310m

- 사장교 : $60+200+470+200+60=990\text{m}$

- P.S.M.교 : $39@60 + 13@60 + 45@60 = 5,820\text{m}$

- F.C.M.교 : $85 + 165 + 165 + 85 = 500\text{m}$

■ 교량 폭원 : 31.41m (왕복 6차선)

■ 총공사비 : 5,300억원

■ 공사기간 : '93. 11 - 2,000. 12

2.2 교량 개요

■ 사장교

* 정회원, 한국도로공사 서해대교건설사업소, 책임연구원

- 상부구조 : 강합성 사장교
- 통과높이 : 62m (5만톤급 선박출입 가능)
- 주탑높이 : 182m
- 하부구조 : 우물통 개념을 혼합한 직접기초
- 케이블 : 2면 배열 144본, Parallel Strand

■ P.S.M.교

- 상부구조 : 연속 프리캐스트 콘크리트 박스거더교
- 하부구조 : 대구경 현장타설 콘크리트 말뚝(φ 150cm)
- 세그먼트 제원
- 폭 : 15.7m
- 길이 : 3.0m
- 높이 : 3.5m
- 중량 : 70-80ton

■ F.C.M.교

- 상부구조 : 연속 현장타설 콘크리트 박스거더교
- 하부구조 : 대구경 현장타설 콘크리트 말뚝(φ 250cm)
- 통과높이 : 45m (2만톤급 선박출입 가능)

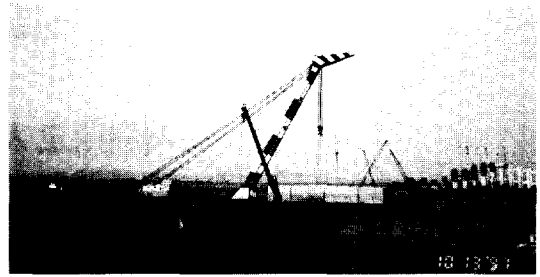


사진 2 F.C.M.교 현재 모습



사진 3 사장교 현재 모습

2.3 추진 현황

서해대교의 현재 추진 현황은 전체적으로 약 55%의 진행을 보이고 있다. 사장교 구간에서 두 개의 주탑 기초 중 안중축 기초는 기완료되었으며 당진축 기초는 전체 높이 33.9m 중 9.1m를 남기고 있다. F.C.M.교는 해상부에 위치하여 해상작업을 위해 PC House라는 프리캐스트 거푸집을 사용하여 현재 3기의 기초를 시공하고 있다.

P.S.M.교는 전체 97경간 중 현재 25경간이 완료되고 2경간을 가설 중에 있다.

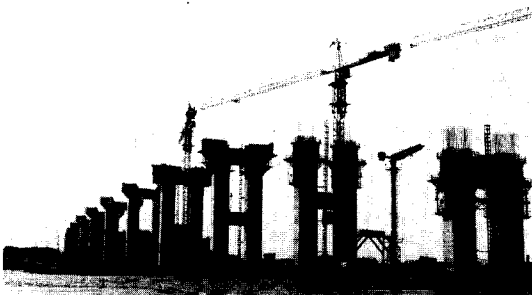


사진 1 P.S.M.교 현재 모습

3. 사장교 주탑

본 교량에는 약 182m 높이의 콘크리트 주탑이 2개 있으며 주탑의 상단부에는 케이블을 인장하고 고정시켜주는 정착부가 있어 케이블을 통하여 상부구조의 사하중 및 활하중이 주탑기초로 전달된다.

주탑은 크게 하단부, 중간부 및 상단부의 3부분으로 나뉘어 있는데 하단부는 기초 상단 EL. 5.5m에서부터 가로보1(CB1) 위치 EL. 63.3m까지로써 주탑의 양쪽 축이 1:13.2의 기울기로 경사져 있고 주탑

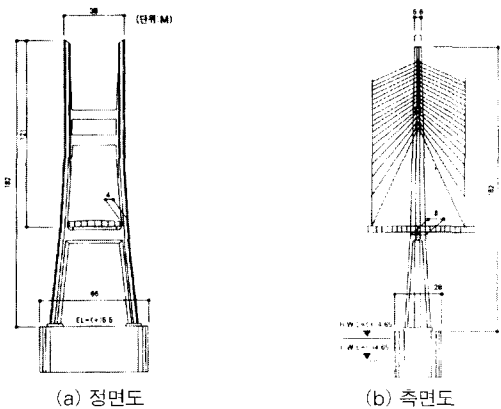


그림 1 주탑 개요도

의 4면중 2면은 그 폭이 줄어들면서 올라간다.

중간부는 가로보2(CB2) 위치 EL. 121.3m까지의 높이이고 주탑의 기울기는 하단부와 동일하다. 상단부는 가로보2 위치로부터 주탑 정점 EL. 187.8m까지로 연직의 기울기를 가지며 이 구간에서 케이블이 정착된다.

전체적인 주탑의 형상은 케이블면이 연직을 유지하여 상부구조에 불필요한 횡방향 수평분력을 없애도록 한 것이 특징이다. 본 교량의 시공시 허용오차는 주탑정점에서 최대 9cm의 수평변위이다.

구조물의 연성(ductility)은 내진설계를 위한 기본적인 요소이다. 도로교시방서에서는 교량에서 기둥, 교각, 확대기초와 연결부 등의 설계를 전체 설계 원리와 일관성을 유지시키고 과거 지진에서 관찰된 파괴가능성이 최소가 되도록 보장할 것을 요구한다.

현재 국내 모든 교량에서 내진설계가 이루어지고 있지만, 필자의 경험으로 볼 때, 시방서의 요구사항을 제대로 적용하거나 시행에 옮기는 경우는 매우 드물다. 이는 내진설계 개념이 도입된 시점도 오래지 않거니와 내진에 대한 교량피해가 없어 그에 별 관심이 없는 탓이기도 하다. 그러나, 기왕 지진의 중요성이 부각되고 우리나라에 합당한 규모의 지진강도를 결정하여 시방서에 언급한 이상 설계자들과 시공자들은 이를 준수할 의무가 있다.

다음에서는 소성힌지에서의 철근배근에 관한 시방 규정과 서해대교 사장교 주탑에 적용된 설계산 예를 소개하고자 한다.

3.1 소성힌지에서의 심부구속을 위한 횡방향철근

이 절에서 규정되는 기둥의 횡방향철근의 주기능은 기둥에 있어서 콘크리트의 덮개가 부서진 후, 기둥이 지지하는 축방향력이 덮개가 부서지기 이전의 하중과 최소한 동일하도록 하며 종방향 철근의 좌굴을 방지하게 하는 것이다. 즉, 축방향 압축력을 받는 나선철근 기둥에 있어서 콘크리트 덮개가 파괴되기 이전의 최대 하중 지지능력은 덮개파괴 후 나선철근 응력이 사용한계에 도달한 상태에서의 하중지지능력과 같도록 철근량을 산정한다. 이렇게 구속해주는 횡방향 철근의 간격이 또한 중요하다.

도로교시방서에서는 내진설계범에서 다음과 같이 횡방향 철근량을 구하도록 규정하고 있다.

3.1.1 원형 기둥의 나선철근비

$$-p_s = 0.45 \left[\frac{A_g}{A_c} - 1 \right] \frac{\sigma_{ck}}{\sigma_y}$$

또는,

$$-p_s = 0.12 \frac{\sigma_{ck}}{\sigma_y}$$

이들 값 중 큰 값을 취한다.

3.1.2 사각형 기둥의 띠철근량

$$-A_{sh} = 0.30ah_c \frac{\sigma_{ck}}{\sigma_y} \left[\frac{A_g}{A_c} - 1 \right]$$

또는,

$$-A_{sh} = 0.12ah_c \frac{\sigma_{ck}}{\sigma_y}$$

이들 값 중 큰 값을 취한다.

여기서,

a : 띠철근의 수직간격, 최대 15cm

A_c : 기둥심부의 면적(cm^2)

A_g : 기둥의 전단면적(cm^2)

A_{sh} : 수직간격이 a 이고, 심부의 단면치수가 h_c 인 단면을 가로지르는 보강철근(cross ties)을 포함하는 횡방향철근의 총단면적(cm^2).

직사각형 기둥의 두 주축 모두에 대하여 별도로 계산하여야 한다.

σ_{ck} : 콘크리트의 설계기준강도(kg/cm^2)

σ_y : 띠철근 또는 나선철근의 항복강도(kg/cm^2)

h_c : 띠철근 기둥의 고려하는 방향으로의 심부의 단면치수(cm)

p_s : 콘크리트 심부전체의 부피에 대한 나선철근 부피의 비

횡방향 철근은 하나 또는 중복된 띠로 구성할 수 있으며 띠철근과 같은 크기의 보강철근을 사용할 수 있다.

3.2 설계산 예

소성힌지에서의 횡방향 철근배근의 이해를 돕기 위해 서해대교 사장교 주탑에 적용된 구조계산 예를 소개하고자 한다.

본 주탑은 콘크리트 설계강도가 $\sigma_{ck} = 400\text{kg}/\text{cm}^2$, 철근의 항복응력이 $\sigma_y = 400\text{kg}/\text{cm}^2$ 인 철근콘크리트 구조이다. 실제 구조계산시에는 콘크리트의 강

도를 350kg/cm²으로 가정하여 약간의 안전치를 확보하였다. 단면은 그림 2와 같이 변형된 육각형이고 소성현지 구간은 기초 상단으로부터 16m까지이다.

본 교량에서 사용된 주탑의 주철근은 H35, 띠철근은 1122. 보강철근은 H19이며 피복으로부터 외측 주철근 중심까지의 거리는 12cm, 내측의 주철근 중심까지의 거리는 8.5cm이다.

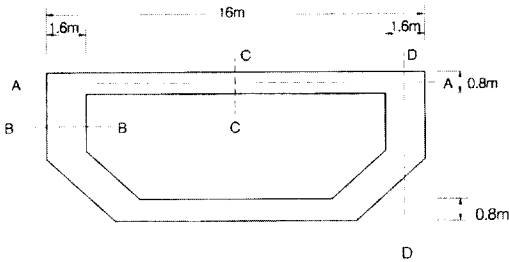


그림 2 주탑하단(소성현지)의 단면

1) 단면 A-A

띠철근의 수직간격을 10cm로 하였을 때 단위 폭 1m에 대한 보강철근의 요구량은 다음과 같다.

$$A_{sh} = 0.30ah_c \frac{\sigma_{ck}}{\sigma_y} \left[\frac{A_g}{A_c} - 1 \right] \quad \text{또는}$$

$$A_{sh} = 0.12ah_c \frac{\sigma_{ck}}{\sigma_y}$$

이 때,

$$a = 10\text{cm}, h_c = 100\text{cm}, \sigma_{ck} = 350, \sigma_y = 4,000$$

$$A_g / A_c = 100 * 80 / 1100 * (80 - 12 - 8.5 + 3.5 + 1.9 * 2) = 1.197$$

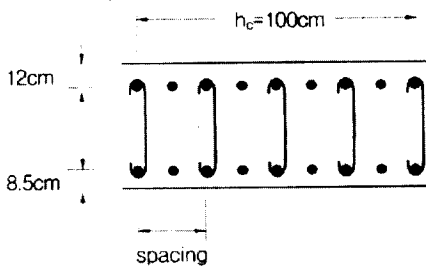
따라서,

$$A_{sh} = 0.3 * 10 * 100 * (350 / 4,000) * (1.187 - 1) = 4.909 \text{ cm}^2 \text{ 또한}$$

$$A_{sh} = 0.12 * 10 * 100 * (350 / 4,000) = 10.5 \text{ cm}^2$$

결국, 보강철근(H19, A_s = 2.865cm²)의 횡간격은,

$$\text{spacing} = 100 / (10.5 * 2.865) = 27.3 \text{ cm} \rightarrow 25 \text{ cm}$$



2) 단면 B-B

여기서의 각 제원은 다음과 같다.

$$a = 10, h_c = 160 - 12 - 8.5 + 3.5 + 2.2 * 2 = 146.8 \text{ cm}$$

$$A_g / A_c = 160 / 147.4 = 1.09$$

따라서,

$$A_{sh} = 0.3 * 10 * 146.8 * (350 / 4,000) * (1.09 - 1) = 3.47 \text{ cm}^2 \text{ 또는,}$$

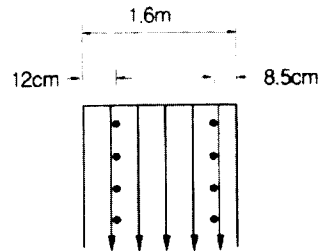
$$A_{sh} = 0.12 * 10 * 146.8 * (350 / 4,000) = 15.414 \text{ cm}^2$$

주탑 벽체의 외측과 내측에 배근되는 띠철근량 (H22, A_s = 3.871 cm²)을 제외한 필요한 보강철근량은,

$$A_{sh} = A_{sh} - 2 * 3.871 = 7.672 \text{ cm}^2$$

결국, 필요한 보강철근(H19, A_s = 2.865cm²)의 개수는,

$$n = 7.672 / 2.865 = 2.7 \rightarrow 3 \text{ 개}$$



3) 단면 C-C

이 단면에서의 각 제원은 다음과 같다.

$$a = 10, h_c = 80 - 12 - 8.5 + 3.5 + 2.2 * 2 = 67.4 \text{ cm}$$

$$A_g / A_c = 80 / 67.4 = 1.187$$

따라서,

$$A_{sh} = 0.3 * 10 * 67.4 * (350 / 4,000) * (1.187 - 1) = 3.31 \text{ cm}^2 \text{ 또는,}$$

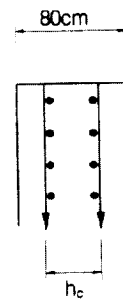
$$A_{sh} = 0.12 * 10 * 66.8 * (350 / 4,000) = 7.01 \text{ cm}^2$$

주탑 벽체의 외측과 내측에 배근되는 띠철근량 (H22, A_s = 3.871 cm²)을 제외한 필요한 보강철근량은,

$$A_{sh} = A_{sh} - 2 * 3.871 = 1.284 \text{ cm}^2$$

결국, 필요한 보강철근(H19, A_s = 2.865cm²)의 개수는,

$$n = 0.0 / 2.865 = 0.0 \rightarrow 0 \text{ 개}$$



4) 단면 D-D

단위 폭 1m에 대한 보강철근의 요구량은 다음과 같다.

여기서,

$$a = 10\text{cm}, h_c = 100\text{cm}$$

$$A_s / A_c = 100 * 160 / 100 * (160 - 12 - 8.5 + 3.5 + 2.2 * 2) = 1.09$$

따라서,

$$A_{sh} = 0.3 * 10 * 100 * (350 / 4,000) * (1.09 - 1) = 2.36\text{cm}^2 \text{ 또는,}$$

$$A_{sh} = 0.12 * 10 * 100 * (350 / 4,000) = 10.5\text{cm}^2$$

결국, 보강철근(H19, $A_s = 2.865\text{cm}^2$)의 횡간격은,

$$\text{spacing} = 100 / (10.5 * 2.865) = 27.3\text{cm} \rightarrow 25\text{cm}$$

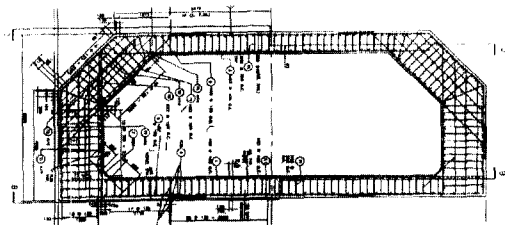
이상의 계산 결과를 바탕으로 소성 힌지에서의 철근 배근은 그림3(a)와 같이 된다.

5) 소성힌지 이외의 단면

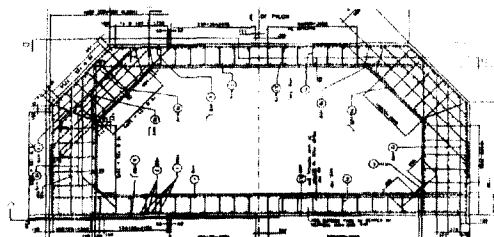
콘크리트시방서에서는 압축부재의 띠철근에 대해서 다음 규정을 준수할 것을 요구한다(설계편 8.7.3).

- 띠철근의 수직간격은 축방향철근지름의 16배 이하, 띠철근지름의 48배 이하, 기둥단면의 최소 치수 이하라야 한다.
- 띠철근의 배치는 모든 귀에 있는 축방향철근과 하나 건너 있는 축방향철근이 135° 이하로 구부린 띠철근의 귀에 의해 횡방향으로 지지되어야 한다.

그러나, 압축부재가 횡철근이 없이도 충분한 강도



(a) 소성한지 단면



(b) 소성한지 이외의 단면

그림 3 주탑의 횡방향 철근

를 갖고, 시공이 가능할 경우에는 적용하지 않아도 좋다고 언급되어 있어 정확히 그 구분을 짓기가 어려웠다. 본 현장에서는 시방서의 취지를 충분히 반영하고자 소성한지 이외의 구간에 대해서도 그림 3(b)와 같이 배근하도록 하였다.(보강철근의 횡간격 50cm)

3.3 철근배근

소성한지에서의 내진설계시 국내 설계자들이 전반적으로 오류를 범하는 구조물은 중공교각이다(그림 4). 즉, 중공단면의 내,외측을 둘러싸는 띠철근만을 염두에 두고 추가의 보강철근은 무시한다. 간혹 보강철근이 그림 4와에서와 같이 어느 정도 설계되기는 하지만 그 정착형태나 간격이 구조적인 역할을 한다고 보기에는 부족하므로 간격재라고밖에 볼 수 없다.

한편으로 내진설계 개념에 관심을 둔 일부 설계자들이 시방규정에 충실히 입각하여 설계를 하였을 때 전에 없이 많이 설계된 보강철근 때문에 이에 익숙치 않은 시공자들로부터 저항을 받게 된 경험담도 있다.

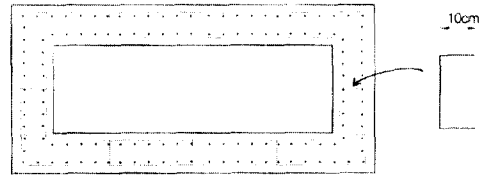
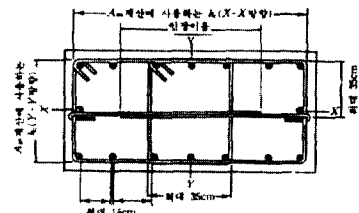
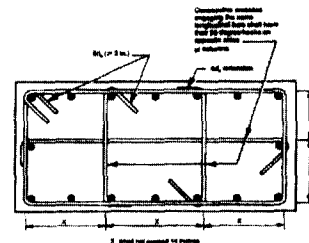


그림 4 잘못 설계된 철근배근

그러나, 지진이 일어날 때 보강철근의 역할을 생각하여 그 중요성을 인식한다면 보강철근의 철저한 배근



(a) AASHTO 개념



(b) ACI 개념

그림 5 보강철근 배근 상세

이야말로 내진설계의 핵심이라 할 수 있다. 이 때 세심한 철근배근의 기술이 필요한데 자칫 철근배근의 취지를 살리지 못하고 시공성만 저해하게 되는 결과를 초래한다. 더욱이, 보강철근의 상세는 우리 도로 교시방서가 원용하는 AASHTO 개념과 ACI 개념이 서로 상이하여 실제 서해대교 현장에서 큰 논란이 되었다(그림 5).

즉, ACI에서는 축방향 주철근만을 감싸는 개념이며 AASHTO는 띠철근만을 감싸는 개념이다. 전자는 주철근의 좌굴방지가 우선인 듯한 인상이며 후자는 심부구속이 우선인 듯한 인상이다.

실제 본 현장에서는 교량의 중요성을 감안하여 두 시방규정을 모두 충족시키기 위하여 다음과 같은 배근방법을 적용하였다. 즉, 축방향 주철근과 횡방향 철근을 모두 감싸므로써 확실한 구속을 보장하였다.

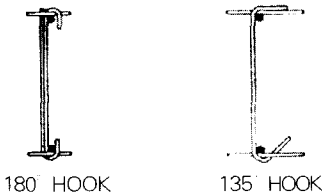


그림 6 보강 철로 정착 상세

또한, 보강철근의 배근과 아울러 현장에서 논란이 되었던 다음 두가지를 소개하여 토목인들의 실무에 도움이 되고자 한다.

3.3.1 간격재와 보강철근

현장감독자들은 철근공들에게 보강철근과 간격재의 차이점에 대해 확실한 개념을 설명해 줄 필요가 있다. 즉, 보강철근은 축방향 주철근의 좌굴방지와 심부의 구속에 있으므로 확실한 정착을 필요로 한다.

도로교시방서에서도 이에 대해서 자세히 언급하고 있다(V. 8.3.1(3)). 즉, 띠철근은 135°의 갈고리로 축방향 철근에 걸리게 하여야 한다. 이 때 갈고리는 띠철근 지름의 10배와 15cm 중 큰 값 이상의 연장길이 이를 가져야 한다. 실제 현장에서는 타설을 용이하게 하기 위하여 180°로 굽히는 경우가 더 흔하다.

간격재의 경우 보통 “I”자형의 철근을 사용하는데 이는 주로 강박스로나 PC교의 바닥판, 또는 벽체 구조물에서 쉽게 볼 수 있는 형태들이다. 그러나, 경우에 따라, 예를 들어 사장교의 바닥판과 같이 큰 압축

력을 받는 구조일 때에는, 시공상 필요에 의해서 이러한 바닥판에 간격재를 배치하면서 어느 정도 구조재로서의 역할을 기대하기도 한다. 즉, 바닥판의 얇은 두께 때문에 시방서에서 필요로 하는 기본 정착장을 확보하지 못하여 부득이 간격재의 형태를 택하는 경우이다. 이 경우에는 철근공들에게 그 중요성을 잘 설명하여서 철근을 4가닥 이상으로 간격재를 주철근과 견고하게 결속시키도록 확인하여야 한다.

3.3.2 철근덮개

서해대교 현장에서는 해안에 위치한 점을 들어 엄격한 내염대책을 시행중에 있으며 철근의 덮개 확보는 기본적인 검측사항이다.

기둥에서 보강철근을 배근하거나 바닥판에서 간격재를 사용할 때 현장에서 가장 논란이 되는 것도 철근의 덮개문제이다. 철근의 덮개란 최외측 철근의 표면으로부터 콘크리트 표면까지의 두께를 말한다. 이 때, 최외측 철근은 콘크리트 표면과 연해 있는 철근을 말하며 보강철근과 같이 콘크리트 표면에 직각으로 배치된 철근을 말하는 것은 아니라고 판단한다. 시방서에서 언급한 철근의 산화방지, 내화성 확보, 부착성 확보를 위한 목적으로 철근의 덮개를 산정할 때, 보강철근과 같이 극히 일부만 콘크리트 표면에 접하는 경우에는 별도로 취급해야 할 것이다. 이에 대한 개념이 도로교시방서의 내진설계편 그림 8.3.4에 언급되어 있다

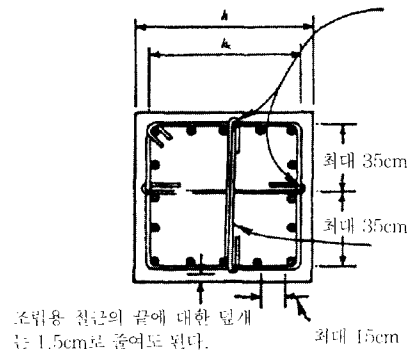


그림 7 기둥 띠 철조 상세로

4. 맺음말

국내 경제의 위기 속에 건설현장에도 위기감이 확산되고 있다. 이 시점에서 아쉬운 것은 국내 대형 공사 현장에서는 여김없이 고가의 외국인 기술자들이

투입되어 있을 수밖에 없는 우리의 현실이다.

필자가 현장에서 외국 설계자의 구조계산서와 설계도면을 보거나 외국 감리원의 현장해결 능력을 지켜보면서 철저히 기본에 익숙해 있는 모습을 발견한다. 그들은 시방규정에 얽매이지 않고 그 의미를 충분히 준수하며 시공자의 편의를 최대한 배려할 수 있는 능력을 가지고 있다. 불필요한 균열시비에 휘말리지 않으나 철근배근의 상세에 매우 엄격하다.

본 기사에서 소개한 내용은 전혀 새로운 것이 아니며 어려운 것도 아니다. 다만, 현장에서 익숙치 않은 사항에 대한 언급이다. 내진설계의 개념이 아직 정착되지 않은 우리의 현실에 참고가 되도록 한 예로서

소개한 것이다.

앞으로 서해대교 현장에서 느끼고 배운 바를 소개할 수 있는 기회를 많이 가질 수 있기를 바란다.

참고문헌

1. 한국 콘크리트학회지, '97년 2월호, 서해안 고속도로 서해대교 PC박스거터 교량
2. 한국 강구조공학회지, '97년 3월호, 서해대교 설계와 시공
3. 대한토목학회지, '97년 6월호, 서해대교 공사현황 