

파형 강판 Web을 사용하는 Prestress Concrete교의 계획 및 설계

- Plan and Design of Prestressed Concrete Bridge
with Corrugated Steel Webs -



임호상*



박명균**

1. 서 언

교량의 사용 재료로 초기에는 돌이나 나무를 사용했었는데 재료의 발달로 콘크리트, 강재 등을 사용하게 되면서 교량 공학은 획기적인 발전을 하게 되었다. 콘크리트의 사용도 초기에는 철근 콘크리트 위주로 사용되어 오다가 고강도 콘크리트와 P.S 강선을 사용하게 되면서 좀더 장경간의 교량 가설이 가능하게 되었고, 또한 가설 공법도 일반 동바리 지지 공법에서 압출 공법, 내민보공법, Precast 공법 등 많은 공법으로 가설되게 되었다.

이러한 공학적 발전은 콘크리트와 강재를 혼합하여 사용하는 강합성형교로 발전하게 되었다. 현재까지 주로 사용되어 오던 강합성교의 형식은 철근 콘크리트 바닥판과 강거더를 사용하는 방식이 주종을 이루고 있으며, P.S 콘크리트와 강재의 합성형교 형식은 20세기 후반에 들어오면서 선진국에서 계속하여 연구 개발

되고 있는 실정이다.

P.S 콘크리트와 강재의 합성형교 형식은 강과 콘크리트의 특성을 최대한 발휘할 수 있는 교량 형식으로써 기존의 강합성교에 비해 장경간 교량의 가설이 가능하고, P.S 콘크리트 교량의 많은 가설 공법을 그대로 사용 가능하므로 기존의 강합성교보다는 진일보한 교량 형식으로 자리매김할 수 있는 교량 형식으로 판단된다. P.S 콘크리트와 강재의 합성형교 형식은 휨 모멘트에 의해 발생하는 인장, 압축 응력을 받는 상·하 플랜지는 P.S 콘크리트 구조로 하고, 전단력에 의해 발생하는 전단 응력을 받는 Web을 강재로 사용함으로써 주형의 자중을 경량화시켜 기초와 하부 구조에 상부 구조로부터 작용하는 하중을 저감시킬 수 있는 구조 형식이다.

현재까지 선진국에서 설계, 시공되어진 P.S 콘크리트와 강재의 합성형교 형식은 강재를 사용하는 Web을 강재 Truss 구조로 한 형식과 파형 강판을 사용한 형식이 있는데, 여기에서는 후자인 파형 강판 Web을 사용한 Prestress Concrete교(이하 파형 강판 Web P.S.C교라 칭함)에 대해서 그 특성과 구조 계획 및

* 진화엔지니어링 전문

** 진화엔지니어링 이사

설계 방법에 대해서 기술하고자 한다.

2. 파형 강판 Web P.S.C교의 특성

파형 강판 Web P.S.C교는 <그림 1>에 표시한 것과 같이 P.S.C교의 Web을 콘크리트에서 파형 강판으로 대체한 콘크리트와 강재의 복합 구조이다.

일반 P.S.C교의 Web은 철근과 PC 강재가 복잡하게 배치되어 콘크리트 타설이 곤란하고 시공이 어려운 부재로서 주형자중의 약 30~40%를 점유하고 있다. 또한, Web에 내부 강선이 배치되어 Web의 두께를 줄이는 데 제한이 있고 큰 Web 단면이 중립 축 근처에 위치하여 구조적 효율성을 저하시킨다.

그러나 파형 강판 Web P.S.C교는 Web을 경량의 파형 강판으로 대체하여 자중을 10~30% 경감시키고 상·하 바닥판을 그대로 유지하여 주형 전체의 휨 강성을 저하시키지 않으면서 기초와 하부 구조에 상부로부터의 하중 부담을 저감시킬 수 있다.

파형 형상으로 Web을 입체화하여 전단 좌굴 강도를 향상시키고 동시에 보강재를 생략하여 시공성을 높이고 <그림 2>와 같이 Accordion처럼 신축하여 Prestress 도입에 의한 콘크리트의 탄성 변형이나 Creep 건조 수축 등의 변형에 자유로이 대처할 수 있는 장점이 있다.

이 외에 콘크리트 Web의 철근 조립, P.S 강선의 배치, Web 콘크리트의 타설을 생략할 수 있어 시공이 간편하며 공기를 단축시킬 수 있다.

이러한 이유로 파형 강판 Web P.S.C교는 시공성, 경제성면에서 우수한 교형이며, 강과 콘크리트의 특성을 가장 효율적으로 접목시킨 P.S.C교의 새로운 구조 형식으로 주목받고 있다.

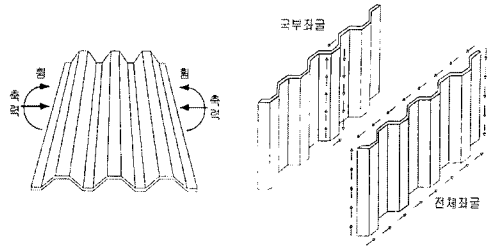


그림 2 파형 강판의 성질

최근 파형 강판 Web에 대한 연구는 프랑스와 일본 등의 선진국에서 수행되고 있는데, 크게 3가지로 분류할 수 있다.

첫째, 여러 형태의 파형 강판을 Web으로 사용한 복합 교량에 대한 강성 및 강도의 평가로서, 대표적인 파형 강판 형태는 지그재그형 파형 강판(WWW)과 곡률을 가진 파형 강판(〰)이 있으며 실용화 과정에서 연결부 처리에 유리한 곡률을 가진 파형 강판이 많이 사용되고 있다.

둘째, 곡률을 가진 파형 강판을 사용하여 단면을 여러 형태로 변형하고 다른 재질의 부재를 조합한 단면에 대한 강성 및 강도를 평가하는 연구로서 대표적 단면 형태는 BOX형과 삼각형이 있으며 재료의 조합 형태는 파형 강판 Web + Prestress와 파형 강판 Web + Prestress + 합성 강판이 있다.

셋째는 P.S.C 구조와 파형 강판 Web의 합성에 필요한 전단 연결재에 대한 연구로서 스티드를 사용한 구조, Web 상·하부를 천공하여 철근을 관통시킨 후 매입하는 구조, 앵커에 의한 구조 형식이 있다.

파형 강판 파형 형상의 현재까지 실적은 국부 좌굴에 대하여 합리적인 형상으로 축방향 패널 폭과 사방향 패널 폭이 같은 형상을 주로 사용하여 왔으나, 파형 강판간의 집합에 연결판을 사용하는 구조에는 볼트 배치상의 제약으로 축방향 패널 폭을 사방향 패널 폭보다 길게 하는 형상을 고려할 수 있다.

파형 강판의 길보기 영계수는 식 (2.1)과 같이 축방향 강성이 현저히 저하되며 이로 인한 Accordion 효과로 신축이 자유로워 보의 Web으로서 역할을 할 경우 전단력은 전달하지만 축력과 휨 모멘트에는 저항하지 못한다.

$$E_x = \frac{a+b}{3a+c} E_o \left(\frac{t}{d}\right)^2 \dots\dots\dots (2.1)$$

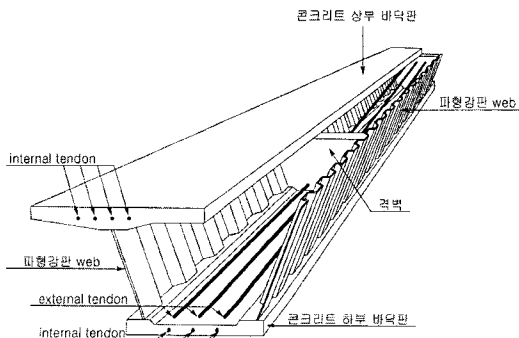


그림 1. 파형 강판 Web P.S.C교의 개념도

여기서, E_o : 강재의 탄성계수
 t : 강판의 두께
 d : 파형 강판의 파의 높이 ($d > t$)

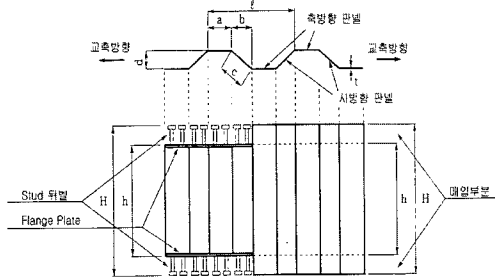
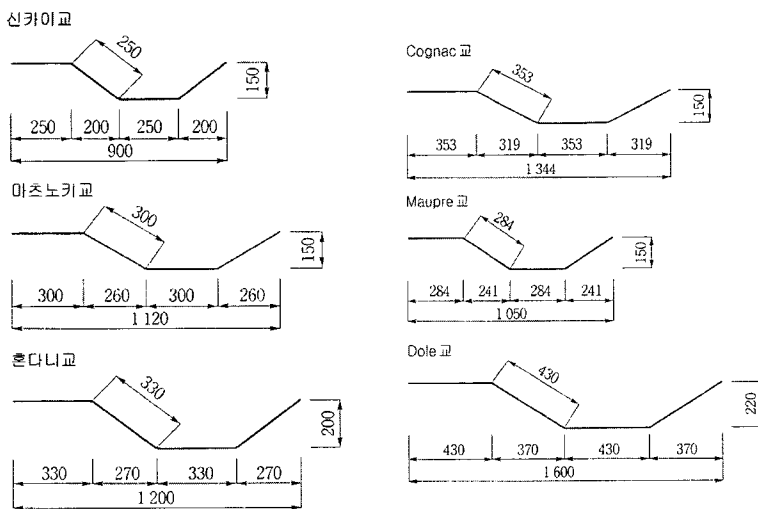


그림 3. 파형 강판의 형상

파형 강판의 파고를 필요 이상으로 적게 할 경우 Web의 휨 방향 강성이 저하되어 콘크리트 바닥판에 발생하는 휨 방향의 정모멘트가 크게 되고 Web의 축 방향 강성이 크게 됨으로써 파형 강판의 Accordion 효과에 악 영향을 미치는 것으로 생각되어진다. 따라서 파형 강판의 파고를 <그림 4>의 사용 실적보다 극단적으로 작게 하는 것은 바람직하지 않다.

파형 강판의 재질은 도로교 표준시방서에서 제시하고 있는 <표 1>에 나타난 구조용 강재의 규격에 적합한 것을 원칙으로 하고, 용접을 행하는 경우에는 SS 400을 사용할 수 없다.



(단위 : mm)

그림 4. 파형 강판 형상의 시공 실적

표 1. 파형 강판 Web에 표준으로 사용되는 강재

규격	구조기호
KSD 3505	일반 구조용 강재 SS400
KSD 3515	용접 구조용 압연 강재 SM400, SM490, SM490Y, SM520, SM570
KSD 3529	용접 구조용 내후성 열간 압연 강재 SMA41, SMA50, SMA58

파형 강판의 Web P.S.C교의 경우 Web가 콘크리트와는 다른 강판으로 구성되어 있기 때문에 P.S.C교에서 배치하는 Web 내의 Tendon 배치를 할 수 없다. 이러한 이유로 상·하 Flange는 휨 모멘트에 의한 인장 응력에 저항하기 위해 일반적인 P.S.C교와 마찬가지로 Internal Tendon을 배치하지만 Web 내에는 Tendon 배치가 불가능하므로 External Tendon을 병용 배치한다. 배치 형상은 직선 형상으로 배치되며 정착부, 편향부의 대부분은 BOX 내부의 다이어프램 등에 설치되므로 BOX의 휨 방향 강성과 비틀림 강성에 의해 배치 형상이 결정된다.

설계 하중에 대한 Internal/External Tendon의 병용 비율은 하중의 종류, 구조물의 형상과 가설 공법 등을 충분히 고려한 후 최적의 비율을 결정하여야 하는데 일반적으로 Internal Tendon은 사하중을 External Tendon은 활하중을 분담하는 경우가 많다.

콘크리트 바닥판과 파형 강판 Web의 접합부는 파형 강판 Web 합성 구조에서 가장 중요한 구성 요소로서 파형 강판 Web의 상하에 용접된 Flange Plate에 Stud를 설치하여 합성하는 방법(<그림 5>)과 파형 강판 상·하단에 축 방향 철근을 용접한 후 파형 강판에 구멍을 만들어 여기에 교축 직각 방향의 철근을 관통하여 콘크리트에 매입하는 접합 방법(<그림 6>)과 파형 강판 Web의 상·하에 용접된 Flange에 앵커를 접합하여 합성하는 방법(<그림 7>)이 있으며 일반적으로 Stud에 의한 합성 방법을 많이 사용하고 있다.

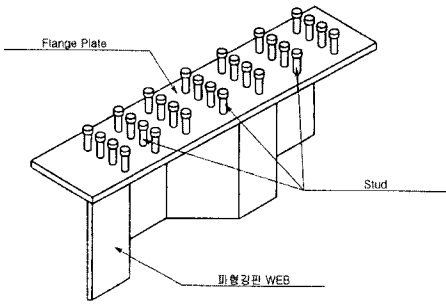


그림 5. Stud에 의한 합성

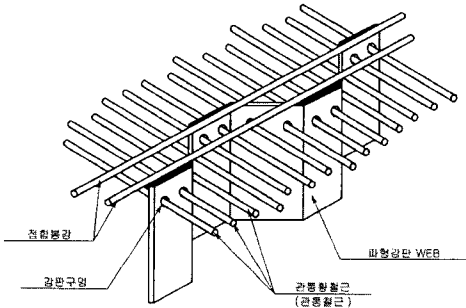


그림 6. 강판 매입 합성

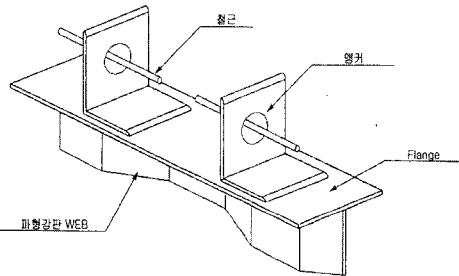


그림 7. 앵커에 의한 합성

3. 구조 계획

현재 선진국에서 사용되고 있는 파형 강판 Web P.S.C교의 교량 형식은 단순형교, 연속형교, 연속라멘교 등이 있다.

파형 강판 Web P.S.C교의 가설 공법은 본 교량 형식이 일종의 P.S.C교이므로 P.S.C교에서 사용되는 모든 가설 공법으로 시공이 가능하며 일반적 P.S.C교에 비해 주형 자중이 경감되기 때문에 각종 공법에 대

해서 다음과 같은 장점이 있다.

- 전지보가설공법(F.S.M) : 주형 가설재 설비의 소형화
- 연속압출가설공법(I.L.M) : 압출 장비가 소형화
- 내민보가설공법(F.C.M) : 1개 블록의 시공장을 길게 할 수 있어 공기 단축 가능

또한, Precast Segment 공법에 대해서도 접합부의 구조에 유의하면 시공이 가능한 공법으로 현재 일본에서 이미 시공 중에 있다.

파형 강판 Web P.S.C교의 적용 지간장은 일반적인 P.S.C교의 적용 지간장과 비슷하며, 중량이 경감되었기 때문에 일반적인 P.S.C교보다 장지간에 사용할 수 있다.

가설 공법	적용 지간
전지보가설공법 (F.S.M)	25 ~ 60 m
연속압출가설공법 (I.L.M)	30 ~ 60 m
내민보가설공법 (F.C.M)	60 ~ 250 m

파형 강판 Web P.S.C교의 형고는 형고를 높게 설정함으로써 주형 자중을 증가시키지 않고 강재의 편심량 확보가 가능하므로 일반적 P.S.C교의 형고의 상한치를 사용하는 것이 유리하다.

일반적인 P.S.C교의 형고는 형고/지간장 비가 형고 변화가 없는 직선으로 하는 구조계에서는 1/15 ~ 1/20를 사용하고, 변단면 구조계에서는 지간 중앙부는 1/30 ~ 1/40, 중간지점부 1/13 ~ 1/16을 사용하고 있다.

4. 구조 설계

파형 강판 Web P.S.C교는 일반적으로 P.S.C교로 계획, 설계되어지기 때문에 도로교 표준시방서의 콘크리트교편을 기준으로 하여 설계하고 기타 강교편의 내용을 일부 추가하여 검토하는 것도 가능하다.

본 구조의 종방향의 설계는 크게 종방향의 휨 부재가 되는 콘크리트 부재의 설계와 전단 저항 부재가 되는 파형 강판의 설계로 나누어질 수 있으며 어느 경우나 부재를 설계함에 있어 허용 응력 설계법을 사용하고, 설계 하중 작용시와 극한 하중 작용시의 부재의 안전성을 검토하여야 한다.

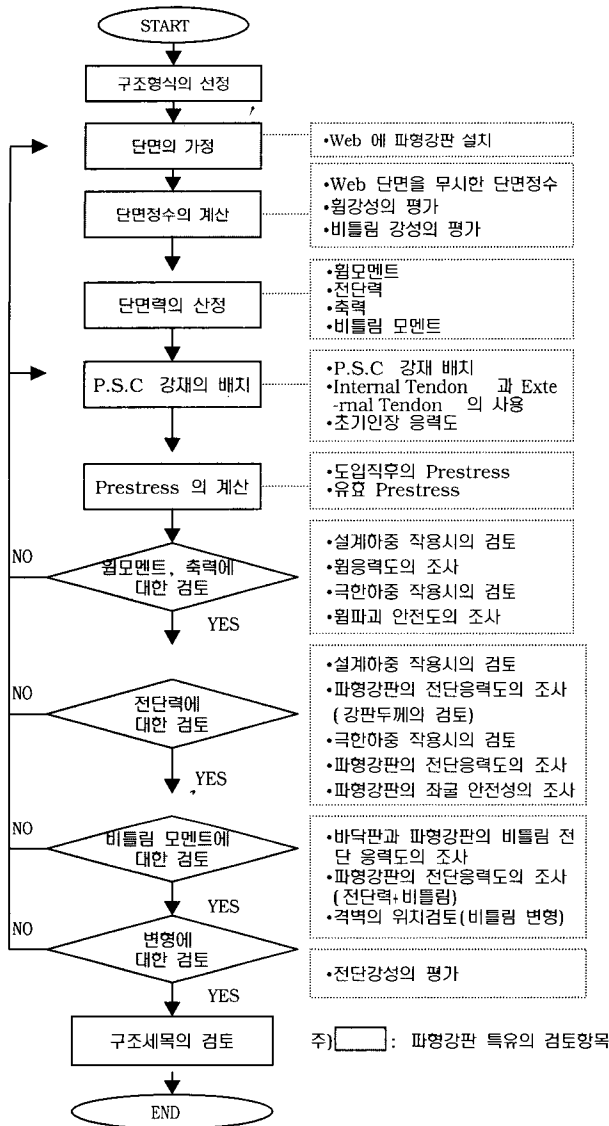


그림 9. 주형의 설계 흐름도

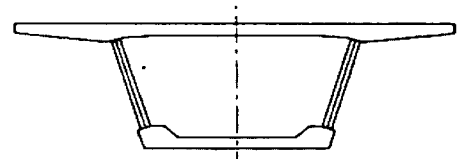
4.1 부재 강성의 평가

휨, 축력 부재의 단면력을 계산하는 경우 일반적으로 부재 강성으로서 휨 강성과 전단 강성을 평가하는 것이지만, 일반적인 P.S.C교에서는 전단 강성의 평가에 의한 변형량은 휨 강성에 비해 극히 적으므로 전단 강성의 평가에 수반되는 변형량과 단면력의 영향을 무시하여 전단 강성을 무한대로 계산하고 있다.

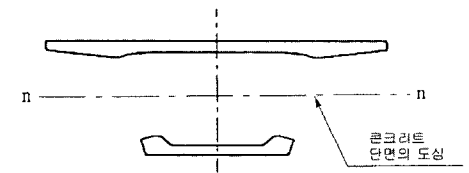
파형 강판 Web P.S.C교에서는 Web에 파형 강판

이 사용되고 있기 때문에 일반적인 P.S.C교에 비해 전단 강성이 적으므로 전단 강성 평가의 영향이 커져서 변형량의 계산에서는 전단 강성을 적절히 평가하여야 한다. 교축방향의 휨 및 축력에 대해서는 파형 강판은 공학적으로 저항하지 않는 것으로 생각하여도 좋고 콘크리트 부재에 전달된 휨 응력 분포는 평면 유지의 법칙에 따르는 것으로 생각하면 된다.

따라서 주형 단면의 휨 강성 또는 신축 강성을 계산하는 경우에 부재의 유효 단면은 파형 강판 Web을 무시한 콘크리트의 전단면을 유효한 것으로 한다.



(a) 파형 강판 Web P.S.C 단면



(b) 강성 평가 단면

그림 8. 주형 단면의 휨 유효 단면

4.2 단면력의 계산

파형 강판 Web P.S.C교는 Web가 파형 강판이지만 휨 거동에 대한 구조 특성은 일반적인 P.S.C교와 마찬가지로 평면 유지의 가정을 따르기 때문에 부재를 설계할 때의 단면력 해석에 사용되는 해석 Model은 상부 Flange 하부 Flange로 구성된 일종의 보부재로써 골조 해석 모델을 사용한다.

단면력의 해석 방법은 탄성 이론에 따르는 것을 기본으로 하고, 하중의 계산, 충격계수 및 크리프 및 건조 수축의 영향은 도로교 표준시방서의 공통편에 준하여 설계토록 한다.

4.3 휨 모멘트 및 축력에 대한 검토

파형 강판 Web P.S.C교는 파형 강판의 Accordion

효과에 의해 휨 모멘트 및 축력에 대한 파형 강판의 저항력에 대해서는 공학적으로 무시하여도 된다.

따라서 휨 모멘트 및 축력에 의한 합성 단면에 발생하는 응력의 산정은 상·하 콘크리트 Flange만을 고려하여 평면 유지의 가정에 따라 설계토록 한다.

$$f_c = \frac{P}{A_c} \pm \frac{M}{Z_c} \dots\dots\dots (4.1)$$

- 여기서, f_c : 콘크리트의 휨 응력
 P : 작용 축력 (Prestress력을 포함)
 M : 작용 휨 모멘트
 A_c : 콘크리트 단면적
 Z_c : 콘크리트 단면의 단면계수

4.4 전단력에 대한 검토

파형 강판 Web P.S.C교는 전단력의 대부분을 파형 강판이 지지한다고 생각되기 때문에 전단에 대한 검토 부재는 파형 강판만으로 한다.

$$\tau_{ws} = \frac{S_{ws}}{A_w} = \frac{S - S_p}{A_w} \dots\dots\dots (4.2)$$

- 여기서, τ_{ws} : 파형 강판 Web에 작용하는 설계 하중 작용시의 전단 응력
 S_{ws} : 파형 강판 Web에 작용하는 설계 하중 작용시의 설계 전단력
 S : 하중에 의한 설계 전단력
 S_p : P.S 강선의 연직분력
 w : 파형 강판 Web의 단면적(파형 강판의 두께 × Web 높이)

파형 강판의 전단 검토에서 파형 강판 Web의 패널 폭 및 파고를 결정하는 데 중요한 요소인 좌굴에 대한 검토를 시행하여야 한다. 좌굴에 대한 검토는 국부 좌굴에 대한 검토와 전체 좌굴에 대한 검토가 있는데 종래의 좌굴에 대한 검토는 탄성 좌굴 강도에 의해 행하여졌지만, 최근의 연구 결과 비탄성 영역을 고려한 산정식을 기초로 한 새로운 전단 좌굴에 대한 검토 방식을 사용하고 있다. 그 검토 방식을 소개하면 다음과 같다.

국부 전단 좌굴은 파형 강판 Web의 절곡부와 절곡부

간에 발생하는 좌굴 현상으로서 탄성 좌굴 강도 $\tau_{ecr.L}$ 은 전단 응력 하에 2개의 절곡부간에 단순 지지된 강판으로서 식(4.3)에 의해 계산할 수 있다.

$$\tau_{ecr.L} = k \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \cdot Y^2 \dots\dots\dots (4.3)$$

- 여기서, k : 전단 좌굴 계수($k=4.0+5.34/a^2$)
 a : 종횡비($a = a/h$ (단, $a \leq h$))
 a : 파형 강판 Web의 판넬 폭
 h : 파형 강판 Web의 높이
 E : 파형 강판 재료의 탄성계수
 (= $2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$)
 μ : 파형 강판 재료의 포아슨비
 ($\mu = 0.3$)

전단력에 대한 파형 강판 Web을 최대한 유효하게 할 수 있도록 하기 위해 좌굴 강도가 상시 항복 영역 위에 있도록 파형 형상을 제한하려면 국부 좌굴의 전단 항복 응력 하에 발생하지 않는 조건은 식(4.5)와 같다.

$$\tau_{ecr.L} \geq \tau_y / 0.36 \dots\dots\dots (4.5)$$

식(4.3)과 식(4.5)에 강재의 제원과 각 강종의 전단 항복 응력을 대입하여 파형 강판 Web의 판넬 폭(절곡부와 절곡부 사이의 간격)을 결정한다.

전체 전단 좌굴은 상·하 Flange간의 파형 강판 Web 전체가 좌굴하는 현상으로 이때의 탄성 좌굴 강도 $\tau_{ecr.G}$ 는 Easley가 제시한 식(4.6)을 사용한다.

$$\tau_{ecr.G} = 36\beta \cdot \{(E \cdot I_y)^{1/4} (E \cdot I_x)^{3/4} / (h^2 \cdot t)\} \dots (4.6)$$

여기서, β : 부재 끝단의 고정도를 나타내는 계수 (고정 지지의 경우 $\beta = 1.9$)

I_x : 파형 강판 Web의 교축 방향 중립 축에 대한 단위 길이당 단면 2차 모멘트

$$I_x = t^3 \cdot (\delta^2 + 1) / (6\eta)$$

δ : 파고와 판 두께비 ($\delta = d/t$)

η : 길이 감소율(파형 강판의 교축에 접한 길이와 파형에 접한 길이의 비)

I_y : 파형 강판 Web의 높이 방향 중립 축에 대한 단위 길이당 단면 2차 모멘트

$$I_y = t^3 / \{12(1 - \mu^2)\}$$

또한, 국부 좌굴의 경우와 동일한 식(4.5)를 적용하면 전체 좌굴이 전단 항복 응력 이하에서 발생하지 않는 조건은 식(4.7)과 같다.

$$\tau_{cr,G} \geq \tau_y/0.36 \dots\dots\dots (4.7)$$

식(4.5)와 식(4.7)에 강재의 제원과 각 강종의 전단 항복 응력을 대입하고 길이 감소율 η 을 안전하게 $\eta = 1.0$ 으로 가정하여 파형 강판 Web의 파고를 결정한다.

5. 결 언

교량의 형식은 구조적 안전성, 시공성, 유지 관리, 미관, 경제성 등을 고려하여 결정하게 되는데, 파형 강판 Web P.S.C교는 구조적 안전성에서 P.S.C교와 동일한 효과가 있고, 시공성 면에서는 P.S.C교보다 시공이 간편하고, 외적 미관에서도 파형 강판에 색채 효과를 낼 수 있으므로 미관이 우수하며 상부 중량이 경량화됨에 따라 하부 시공비가 절감되어 경제성 면에서도 우수한 교량 형식이다.

콘크리트와 강재의 특성을 가장 효율적으로 조합시킨 본 교량 형식은 새로운 21세기에 가장 각광을 받을 수 있는 교량 형식으로 판단되므로 국내에서도 많은 시공 경험을 통하여 더욱 진일보된 교량의 형식이 되도록 많은 연구와 개발이 필요할 것으로 사료된다. □

참고문헌

1. 일본 파형강판웹 합성구조연구회, "파형강판웹 PC교 계획 매뉴얼(안)", 1998. 12.
2. 일본 Prestressed Concrete 기술협회, "외 케이블구조·Precast Segment 공법 설계시공 기준(안)", 1996. 3.
3. 依田, 大浦 : 波形鋼板ウェブを用いた合成PC箱桁のねじり特性について, 日本土木學會, 構造工學論文集, Vol.39A, pp.1251~1258, 1993. 3.
4. 加藤 鈴木, 芦 : 波形鋼板ウェブPC箱桁橋(本谷橋)の設計・施工について, 日本土木學會第53回年次學術講演會講演概要集, 1998. 10.
5. 芦, 水口, 田, 日高 : 本谷橋(波形鋼板ウェブPC箱桁橋)の實橋載 實驗, プレストレストコンクリート技術協會, 第8回プレストレストコンクリートの發展に關するシンポジウム論.