

KR C-10090

Rev.0, 5. December 2012

박스 거더교

2012. 12. 5



한국철도시설공단

경 과 조 치

이 “철도설계지침 및 편람” 이전에 이미 시행 중에 있는 설계용역이나 건설공사에 대하여는 발주기관의 장이 인정하는 경우 종전에 적용하고 있는 우리공단 “철도설계지침 및 편람”을 그대로 사용할 수 있습니다.

일 러 두 기

- 사용자의 이용 편의를 위하여 책 단위로 구성된 “철도설계지침” 및 “편람”을 국제적인 방식에 맞게 체계를 코드별로 변경하였습니다.
또한, 코드에 대한 해설 및 목차역할을 하는 KR CODE 2012, 각 코드별로 기준 변경사항을 파악할 수 있도록 Review Chart 및 Record History를 제정하였습니다.
- 이번 개정된 “철도설계지침 및 편람”은 개정 소요가 발생할 때마다 각 항목별로 수정되어 공단 EPMS, CPMS에 게시될 것이니 설계적용 시 최신판을 확인 바랍니다.
- “철도설계지침 및 편람”에서 지침에 해당하는 본문은 설계 시 준수해야 하는 부분이고, 해설(이전 편람) 부분은 설계용역 업무수행의 편의를 제공하기 위해 작성한 참고용 기술도서입니다. 여기서, 제목 부분의 편람은 각 코드에서의 해설을 총칭한 것입니다.

목 차

1. 용어의 정의	1
2. 일반사항	2
3. 박스거더교 설계일반	2
4. 구조 해석	3
5. 횡방향 설계	4
6. 지점 가로보 및 다이아프램의 설계	5
7. 구조상세	5
 해설 1. PSM	 7
1. 설계일반	7
1.1 공법개요	7
1.2 공법의 특징	7
1.3 시공순서	7
1.4 공법의 효과	9
1.5 PSM공법 가설장비의 비교	9
2. 종방향해석	10
2.1 설계일반	10
2.2 구조해석	11
2.3 하중	12
2.4 가설시 PSM 운반을 위한 Carrier 하중	12
2.5 시공단계해석	12
3. 횡방향해석	13
4. 단면설계	14
4.1 콘크리트의 응력 계산	15
4.2 PS강재의 응력 계산	15
4.3 휨에 대한 극한강도 검사	15
4.4 철근 및 PS강재의 제한	16
4.5 전단 및 비틀림설계	16
4.6 프리스트레스 도입시의 콘크리트 강도	17
5. 상세해석	17



5.1 지점 가로보 및 다이어프램의 설계	17
5.2 단부 스트럿(end strut)	18
5.3 하단 코너부의 안정성	20
6. 구조상세	22
6.1 PS강재의 배치	22
6.2 박스 거더의 단면	23
6.3 박스 거더 단면의 철근 보강	24
6.4 철근 및 PS강재의 피복두께와 간격	26
7. 설계흐름도	27
7.1 설계단계	27
7.2 설계단계별 고려사항	30
해설 2. FSM	38
1. 설계일반	38
1.1 하중	38
1.2 구조해석	38
2. 설계흐름도	40
2.1 설계흐름도의 구성	40
2.2 설계단계별 고려사항	43
RECORD HISTORY	50

1. 용어의 정의

- (1) 격벽 : 단면 형상을 유지시키기 위하여 거더에 배치하는 횡방향 보강재, 다이아프램, 또는 단일 박스 또는 다중 박스거더의 받침점부나 경간 내에 비틀림 등에 저항하기 위하여 설치하는 칸막이 벽
- (2) 배력철근(distributing bar) : 집중하중을 분포시키거나 균열을 제어할 목적으로 주철근과 직각에 가까운 방향으로 배치한 보조철근
- (3) 사인장철근 : 철근 콘크리트 보에 하중 작용으로 인해 사인장 균열이 발생하며 균열은 휨균열과 달리 주로 전단응력에 지배되어 갑작스런 파괴를 유발하므로 이를 방지하기 위하여 전단(보강)철근을 배근해야 한다. 이때 보에 배치하는 전단철근을 복부철근 또는 사인장철근이라 함
- (4) 설계단면력 : 하중작용에 의해 부재단면에 생기는 휨모멘트, 전단력, 축방향력 및 비틀림모멘트. 강도설계법에서는 계수하중작용에 의해 생기는 부재의 단면력이므로 소요강도라고도 함
- (5) 유효폭 : T형보의 플랜지 등에서 유효하게 작용한다고 보는 플랜지 등의 폭
- (6) 주철근 : 철근콘크리트 부재의 설계에서 하중작용에 의해 생긴 단면력에 대하여 소요단면적을 산출한 철근
- (7) 축방향철근 : 부재축 방향으로 배치하는 철근
- (8) 콘크리트의 건조수축 : 콘크리트의 건조 또는 수화반응에 의해 시간 경과에 따라 발생하는 수축 변형
- (9) 콘크리트의 크리프 : 콘크리트에 일정한 응력이 장기 지속적으로 작용하는 상태에서 시간의 경과와 더불어 변형이 증가하는 현상
- (10) 콘크리트 피복두께 단면(concrete covering area of section) : 단면외곽선과 PS강재에서 PS강재의 최소 피복두께(c) 만큼 떨어진 휨 축에 평행한 두 직선으로 이루어진 단면
- (11) 프리스트레스 : 외력의 작용에 의한 인장응력을 상쇄할 목적으로 미리 계획적으로 콘크리트에 준 응력
- (12) 프리스트레스 힘 : 프리스트레싱에 의하여 부재의 단면에 작용하고 있는 힘
- (13) 프리스트레스 힘의 전달(prestress transfer) : 정착단면으로부터 일반단면으로 프리스트레스 힘이 전달되면서 단면 내에서의 응력분포곡선은 비연속 분포로부터 점차적으로 선형 연속 분포로 바뀌게 되는데 이 과정에서 단면 내에 수직응력(f)과 전단응력(r)이 발생하는 3차원적인 현상
- (14) 프리스트레싱 : 프리스트레스를 주는 일
- (15) 횡방향철근 : 부재축에 직각방향으로 배근하는 철근으로 기둥부재의 띠철근이나 보부재의 스테럽 등



2. 일반사항

- (1) 이 지침은 단면이 박스 모양으로 구성된 철도교량의 설계에 적용된다.
- (2) 박스거더교의 기본적인 단면형상에는<그림 1>에 보인 것처럼 단일박스 거더교, 다열박스 거더교 및 다중박스 거더교가 있다.
- (3) <그림 2>에는 상자단면의 특성을 갖는 여러 가지 형상의 박스거더교를 보여준다.

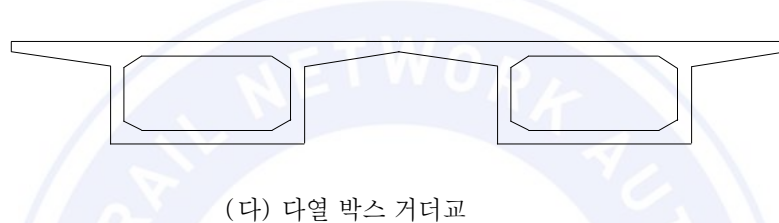
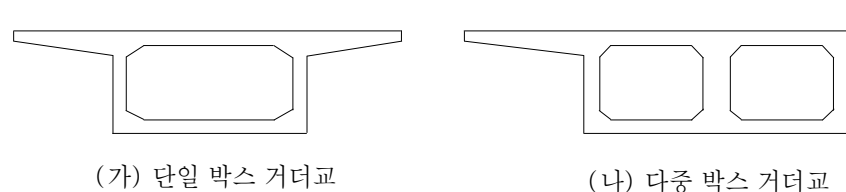


그림 1. 박스거더교의 기본 단면 형상

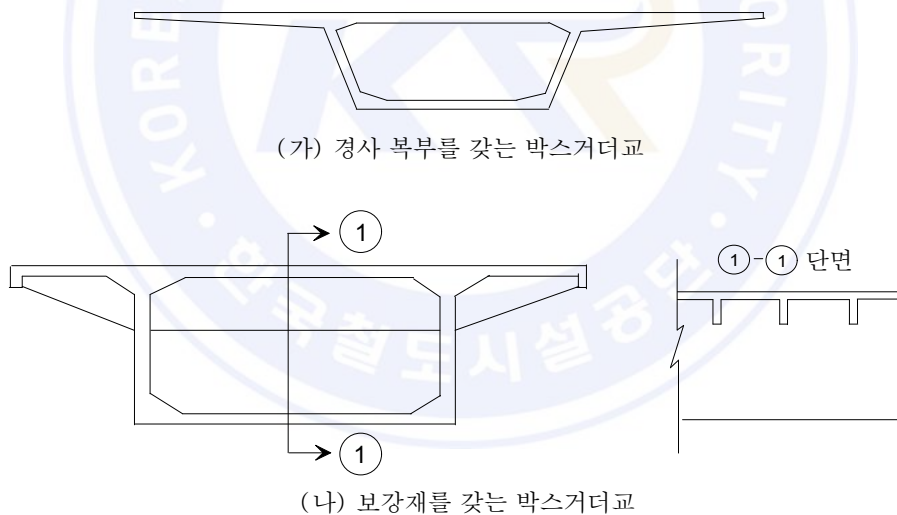


그림 2. 여러 가지 형상의 박스거더교

3. 설계일반

- (1) 주거더의 받침점상에는 가로보 및 격벽을 둔다.
- (2) 지간이 24m 이상인 다열형 박스거더에서는 중간 가로보 및 중간 격벽을 설치한다.
경간 내에 가로보를 둘 경우에는 휨모멘트가 가장 큰 위치에 배치하는 한다.
- (3) 단일 및 다중 박스거더로서 직선교이거나 내측 곡률반경이 240m 이상인 곡선교일 경우에는 중간 격벽을 설치할 필요가 없다.

- (4) 단일 및 다중 박스거더의 곡률반경이 240m 미만일 경우에는 중간 격벽이 필요할 수 있으며 중간 격벽 간격과 강도는 설계 시에 신중히 검토해야 한다. 이 경우에 중간 격벽의 간격은 12m 이하로 하는 것이 바람직하다.
- (5) 전단응력의 계산에 쓰이는 복부의 폭은 복부 축선의 직각방향의 두께로 해야 한다. 예를 들면 경사진 복부의 경우에는 <그림 3>에 보인 것과 같이 전단류의 직각방향의 폭을 사용하면 된다.

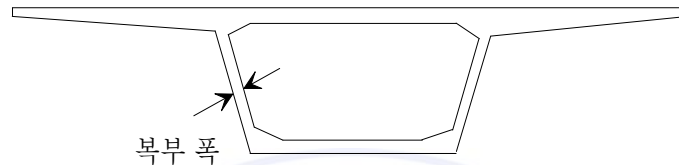


그림 3. 전단응력의 계산에 쓰이는 복부의 폭

- (6) 플랜지 폭이 복부 또는 플랜지의 두께에 비하여 클 때에는 플랜지에 생기는 전단력에 대하여 검토하는 것이 좋다. 특히 복부폭이 플랜지 두께의 4배를 넘거나, 보강 리브가 있는 박스거더교 등에 대하여는 플랜지에 생기는 수평전단응력에 대하여 조사를 하는 것이 좋다.

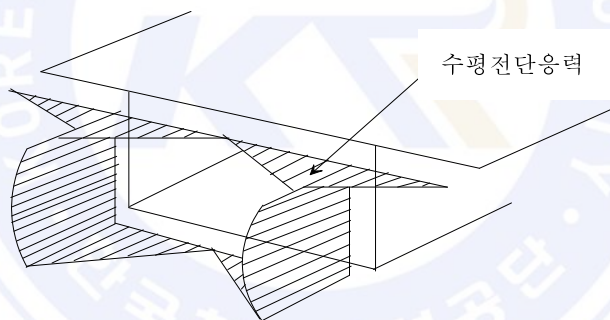


그림 4. 플랜지에 생기는 수평전단응력의 분포

- (7) 박스거더의 압축플랜지의 유효폭
전체 슬래브 폭이 압축에 유효하다고 가정해야 한다.

4. 구조 해석

- (1) 단일박스 거더교 및 다중박스 거더교의 단면력은 보이론에 따라 계산하면 된다. 일반적으로 단일박스 거더교 및 다중박스 거더교는 교축 직각방향의 강성이 크고 하중분배작용이 좋기 때문에 박스거더 전단면을 하나의 보로 보고 해석하여도 된다. 그러나 지간에 대한 전체폭의 비(전체폭/지간)가 0.5를 넘는 비교적 폭이 넓은 다중박스 거더교는 격자이론에 따라 단면력을 계산하는 것이 좋다.
- (2) 사각이 있는 박스거더교 및 다열 박스거더교의 단면력은 격자이론에 따라 계산해야



한다. 다만 단일 박스거더교 및 다중 박스거더교에서 사각이 20° 미만이면 격자이론을 따르지 않고 보이론에 따라 해석하는 것도 좋다.

5. 횡방향 설계

- (1) 하부플랜지 및 복부의 응력은 박스거더를 복부 및 상하 플랜지로 구성된 라멘 구조로 보고 해석하여도 좋다. <그림 5>에 보인 것처럼 교축방향으로 1m의 두께가 있는 박스 라멘 구조로 모델링하여 계산하여도 실제적으로 충분한 정도의 해를 얻을 수 있기 때문에 일반적인 경우에 이 방법을 써서 구하여도 좋은 것으로 하였다. 프리스트레스 이외의 하중에 의하여 부재에 생기는 축방향력은 일반적으로 작기 때문에 하부 플랜지 및 복부를 설계할 때에 축방향력은 고려하지 않아도 좋다.

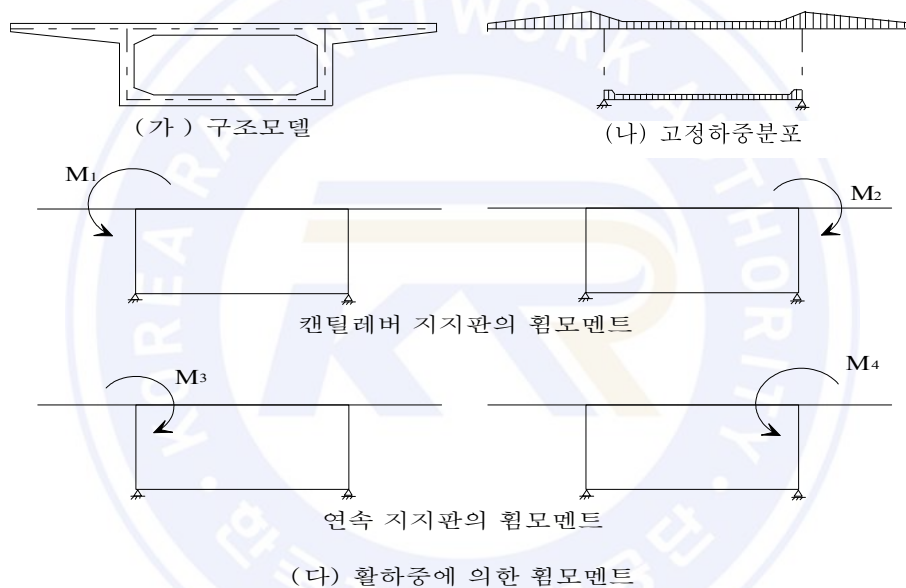


그림 5. 하부플랜지 및 복부의 휨모멘트

- (2) 경사진 복부 및 보강 리브가 있는 박스거더교의 하부플랜지 및 복부의 단면력은 복부의 경사와 보강 리브의 영향을 고려하여 구해야 한다. 경사진 복부가 있는 박스거더교에서 복부에 배치된 교축방향의 PS강재가 위로 휘어진 경우 프리스트레스 힘의 연직방향분력에 의하여 생기는 단면력 등에 대하여 검토해야 한다. 다만 보강 리브가 있는 박스거더교의 단면력은 리브의 영향을 고려하여 계산한다. 거더 높이의 변화가 있는 박스거더교는 하부플랜지에 작용하고 있는 수직응력 및 프리스트레스 힘의 수직분력에 의하여 단면력이 생기게 된다. 따라서 하부플랜지의 폭이 넓고 그 영향을 무시할 수 없는 경우에는 설계시 이를 고려해야 한다.
- (3) 복부의 휨모멘트에 대하여 배치된 철근량의 1/2은 교축방향의 설계를 할 때 사인장철근으로 간주하여도 된다. 사인장 철근량을 계산할 때의 재하상태가 「(1)항」에 규정된 재하

상대인 복부에 최대휨모멘트가 생기는 재하상태와 반드시 일치하는 것은 아니기 때문에 복부에 생기는 휨모멘트에 저항하기 위하여 필요한 철근량의 1/2까지 사인장철근으로 볼 수 있도록 하였다.

$$A_s = A_{s1} + 0.5A_{s2} + A_t \quad (1)$$

여기서, A_s : 1개의 복부에 배치된 철근량

A_{s1} : 복부 1개당 필요한 사인장 철근량

A_{s2} : 복부에 생기는 휨모멘트에 저항하는데 필요한 철근량(복부 내측 또는 외측의 것 중 큰 값)

A_t : 비틀림모멘트에 대한 복부 1개당의 횡방향 필요철근량

그러나 복부 내측 및 외측에 대하여는 복부에 생기는 정·부모멘트에 대하여 각각 필요한 철근량 이상의 철근을 배치해야 한다.

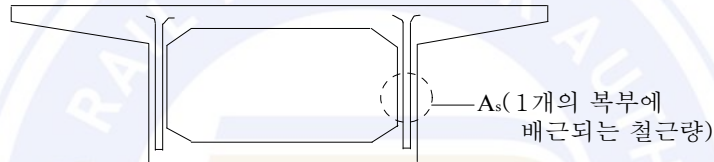


그림 6. 복부에 배치되는 철근량

6. 지점 가로보 및 다이아프램의 설계

- (1) 지점 가로보 및 다이아프램의 단면력은 지점과 부재의 결합조건에 따라 해석모델을 설정하고 보이론에 의하여 계산하는 것이 좋다.
- (2) 가로보 및 다이아프램의 단면력을 계산할 때, 플랜지의 유효폭은 시방서의 규정에 따라 구하면 된다. 다만 지점 가로보 및 다이아프램에 개구부가 있을 때에는 그 영향을 고려하여 구조모델을 설정하고 단면력을 계산해야 한다.

7. 구조상세

- (1) 열차하중을 받는 박스거더의 상부슬래브 및 하부슬래브의 두께는 200mm 이상으로 해야 한다.
- (2) 플랜지의 두께를 주거더방향으로 변화시킬 경우에는 1/5보다 완만한 경사로 하는 것이 좋다. 다만 그 이상의 급한 경사로 할 필요가 있는 경우의 설계계산에 사용되는 유효단면적은 1/5 이하의 완만한 경사내의 부분으로 해야 한다.

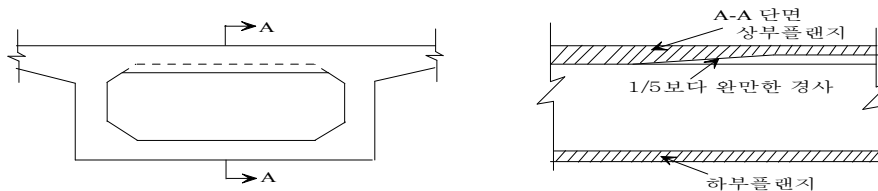


그림 7. 플랜지 두께의 변화

- (3) 복부의 종방향 철근은 건조수축 및 온도철근(0.2%) 이상으로 전단면에 걸쳐서 균등하게 배치해야 하고, 하부슬래브의 종방향 및 횡방향 철근의 배근은 「KR C-10040 4항」에 따라야 한다.
- (4) 철근콘크리트 박스거더교의 주거더에 배치하는 주철근은 복부 및 현치부 내에서 2단 이하로 배치하는 것이 좋다. 그러나 부득이 플랜지 내에 배치할 경우에는 복부의 측면에서 주거더의 지간의 1/10의 범위 내에 배치하고, 철근 중심간격의 최대값은 250mm하는 것이 좋다.

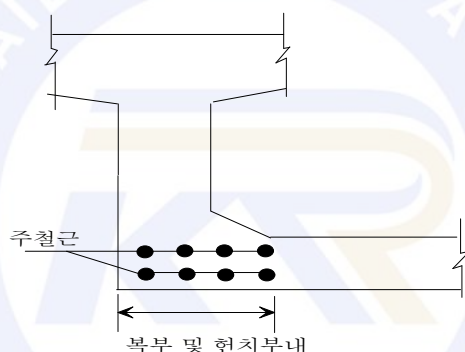


그림 8. 주철근의 배치

- (5) 개구부를 둘 경우에는 그 주위를 보강해야 한다. 개구부는 될 수 있으면 응력의 크기가 작은 곳에 두며, 개구부에 의하여 절단된 철근량 이상의 철근을 보강철근으로 배치하는 것으로 해야 한다. <그림 9>과 같이 PS강재의 정착은 개구부로부터 충분히 떨어진 곳에 하도록 해야 한다.

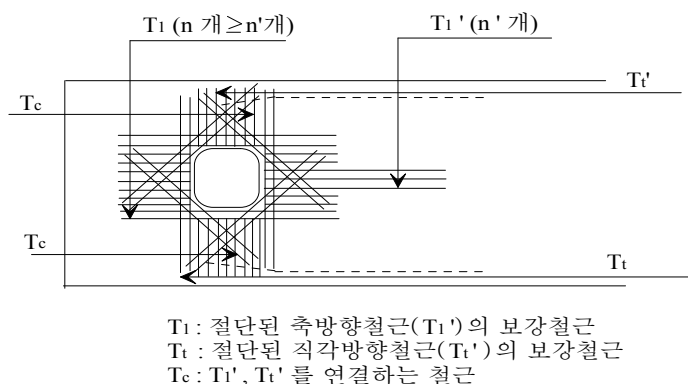


그림 9. 하부플랜지 개구부 구조의 한 예

해설 1. PSM

1. 설계일반

1.1 공법개요

프리캐스트 세그먼트 공법은 제작장에서 균일한 품질과 일정한 길이로 제작된 교량 상부 구조물(Segment)를 적당한 운반용 트레일러로 가설현장으로 운반 후 가설장소에 각종의 가설 장비를 사용하여 소정의 위치에 거치한 후 상부구조를 완성시키는 공법이다.

1.2 공법의 특징

- (1) PSM공법은 취급이 용이한 크기 및 경량의 Segment를 분할하여 시공하므로 대형구조물 또는 복잡한 형태의 상부 구조물도 비교적 쉽게 적용할 수 있는 공법이다.
- (2) Segment는 지정된 제작장에서 연속적으로 제작하므로 콘크리트의 품질관리가 용이하고, 거푸집 전용이 가능하여 인력관리 및 제작관리가 확실하다.
- (3) Segment제작 및 보관을 위한 야적을 하기 위해서는 넓은 장소가 필요하다.
- (4) 상부구조 가설시에는 Segment를 제작한 콘크리트가 상당한 재령에 도달해 있으므로 가설 후에 발생하는 크리프, 건조수축등에 의한 소성변형이 작게 발생하여 Prestress의 감소량이 적어져 유리한다.
- (5) Segment 접합용 에폭시수지접착제를 사용하므로 교량 가설시간이 현저하게 단축되어 공사 기간을 단축할 수 있지만 에폭시 작업시 온도 및 기후에 따라 영향이 있다.

1.3 시공순서

제작장의 구성은 <그림 10>과 같이 양생막적재장, 철근조립장, 콘크리트타설장으로 구성되어 있으며 시공순서는 <그림 11>과 같다.

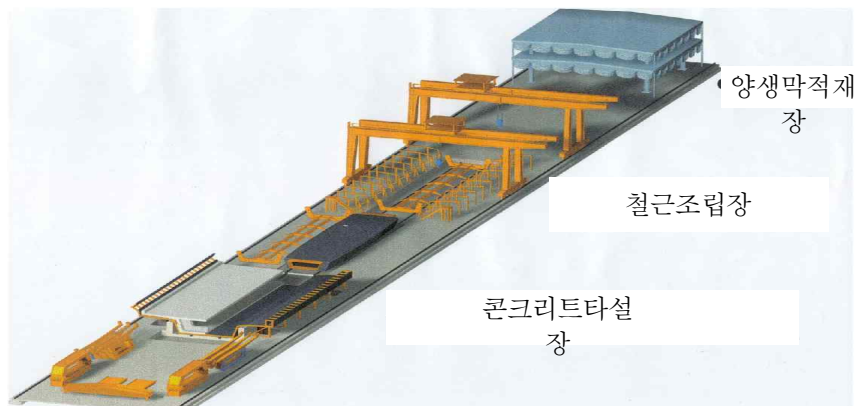


그림 10. PSM 제작장 전경



① 바닥 및 벽체(Bottom/Web) 철근 조립



② 쉬스관(Post-Tension용 Sheath관) 설치



③ 콘크리트 타설



④ 콘크리트 양생



⑤ PC Box Girder 인양



⑥ PC Box Girder 운반차량(Carrier)에 적재



⑦ PC Box Girder 운반



⑧ PC Box Girder 인양



⑨ PC Box Girder 가설



⑩ PC Box Girder 가설완료

그림 11. PSM 시공순서

1.4 공법의 효과

(1) 안정적 공기확보 가능

PSM은 공장화로 전천후 작업, 기계화에 의한 대량생산설비, 자동화조립 설비 등을 갖추어 안정적인 공기 확보가 가능하며, 기계화로 인력투입이 적고, 자원공급의 가변성이 적어 안정적 공기확보가 가능하다.

(2) 하중구조 특성에 적절히 대응하는 Prestressing 채택

교량 가설전 Pre-tensioning과 가설 후 Post-Tensioning방식을 병행하는 Tensioning 방식으로 Prestressed Concrete의 효과를 극대화 시킨다.

(3) 균일한 품질관리가 가능

- ① 최상의 품질관리로 정도가 높고 요소별로 일관된 품질관리가 가능하다.
- ② 전천후 작업시설을 갖춘 공장작업을 수행함으로써 우수한 품질을 확보할 수 있다.

(4) 공정의 자동화에 따른 안전시공

시공을 Precast화, 기계화, 공장화 작업에 의해 수행함으로써 각종 설비 및 공정관리를 자동화, System화하여 철저한 안전관리의 효과가 우수하다.

1.5 PSM공법 가설장비의 비교

가설장비는 Launching Girder+Tire Trolley+Lifting 시스템과 Special Trolley+Under-Bridge 시스템이 있으며, 각각의 특징점은 다음과 같다.

(1) Launching Girder+Tire Trolley+Lifting 시스템

Launching Girder+Tire Trolley+Lifting 시스템은 <그림 12>과 같으며, 경부고속철도 및 대만고속철도, 중국고속철도등 적용실적이 풍부하며 최대 적용경간장은 35.0m의 실적이 있다. PSM 거더의 운반은 Tire Trolley로 가설장소까지 운반하여 Launching Girder에 의해 가설된다. 장비의 특성으로는 운반 및 가설이 각각의 다른 장비에 의해 운영된다.

(2) Special Trolley+Under-Bridge 시스템

Special Trolley+Under-Bridge 시스템은 <그림 13>와 같으며 중국고속철도, 이탈리아고속철도등에 시공실적이 있으며 최대 적재중량은 9,000kN의 시공실적이 있다. PSM 거더의 운반은 Special Trolley에 의해 가설장소까지 운반하며 Under-Bridge를 이용하여 Special Trolley가 가설위치로 이동하여 시공하는 시스템으로 Special Trolley에 자체 인상기능이 있으며, Special Trolley에 의해 인상 및 운반, 가설이 시행되므로 시공속도가 높다.



그림 12. Launching Girder+Tire Trolley+Lifting 시스템



그림 13. Special Trolley+Under-Bridge 시스템

2. 종방향해석

2.1 설계일반

- (1) 주거더의 받침점상에는 가로보 및 격벽을 두는 것을 원칙으로 한다.
- (2) 지간이 24m 이상인 다열형 박스거더에서는 중간 가로보 및 중간 격벽을 설치하는 것을 원칙으로 한다. 경간 내에 가로보를 둘 경우에는 휨모멘트가 가장 큰 위치에 배치하는 한다.
- (3) 단일 및 다중 박스거더로서 직선교이거나 내측 곡률반경이 240m 이상인 곡선교일 경우에는 중간 격벽을 설치할 필요가 없다.
- (4) 단일 및 다중 박스거더의 곡률반경이 240m 미만일 경우에는 중간 격벽이 필요할 수 있으며 중간 격벽 간격과 강도는 설계 시에 신중히 검토해야 한다. 이 경우에 중간 격벽의 간격은 12m 이하로 하는 것이 바람직하다.

- (5) 전단응력의 계산에 쓰이는 복부의 폭은 복부 축선의 직각방향의 두께로 하여야 한다. 예를 들면 경사진 복부의 경우에는 <그림 14>에 보인 것과 같이 전단류의 직각방향의 폭을 사용하면 된다.

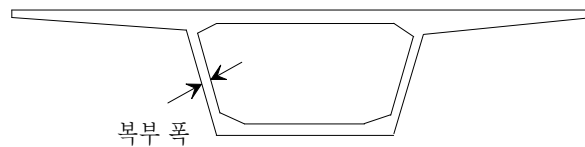


그림 14. 전단응력의 계산에 쓰이는 복부의 폭

- (6) 플랜지 폭이 복부 또는 플랜지의 두께에 비하여 클 때에는 플랜지에 생기는 전단력에 대하여 검토하는 것이 좋다. 특히 복부폭이 플랜지 두께의 4배를 넘거나, 보강 리브가 있는 박스거더교 등에 대하여는 플랜지에 생기는 수평전단응력에 대하여 조사를 하는 것이 좋다.

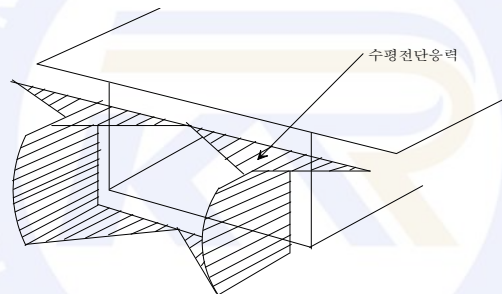


그림 15. 플랜지에 생기는 수평전단응력의 분포

- (7) 박스거더의 압축플랜지의 유효폭은 전체 슬래브 폭이 압축에 유효하다고 가정하여야 한다.
- (8) 정착부나 긴장재의 굴곡부 또는 절곡부 등에는 프리스트레스에 의한 응력이 집중되게 된다.
- 이 응력집중이 부재에 주는 영향을 설계시 검토하여 이에 대한 적절한 보강을 하여야 한다.

2.2 구조해석

단일박스 거더교 및 다중박스 거더교의 단면력은 보이론에 따라 계산하면 된다. 일반적으로 단일박스 거더교 및 다중박스 거더교는 교축 직각방향의 강성이 크고 하중 분배작용이 좋기 때문에 박스거더 전단면을 하나의 보로 보고 해석하여도 된다. 그러나 지간에 대한 전체 폭의 비(전체폭/지간)가 0.5를 넘는 비교적 폭이 넓은 다중박스 거더교는 격자이론에 따라 단면력을 계산하는 것이 좋다.



사각이 있는 박스거더교 및 다열 박스거더교의 단면력은 격자이론에 따라 계산하여야 한다. 다만 단일 박스거더교 및 다중 박스거더교에서 사각이 20° 미만이면 격자이론을 따르지 않고 보이론에 따라 해석하는 것도 좋다.

2.3 하중

적용하중은 「KR C-008020」에 따라 산정한다.

2.4 가설시 PSM 운반을 위한 Carrier 하중

가설하중은 PSC BOX가 적재된 Carrier하중을 바퀴하중으로 분배하여 Moving Load로 재하한다. 다만 Carrier하중과 PSM거더하중의 합계가 활하중보다 클 경우 비경제적인 설계가 되므로 주의하여야 한다.

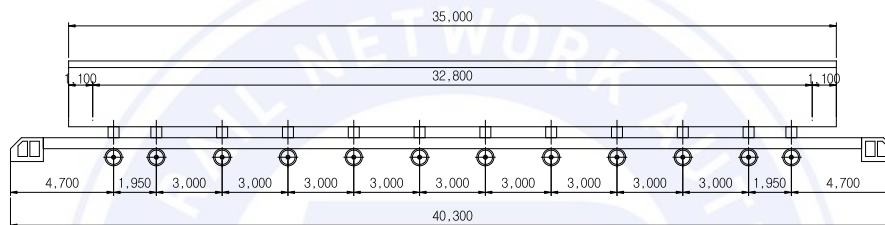


그림 16. PSM 운반을 위한 Carrier 하중

2.5 시공단계해석

종방향해석을 위한 모델링시 프리텐션방법을 고려하여 BOX GIRDER의 시공을 4단계로 구분하여 적용하며, 각 단계별로 적용하중 조합에 따라 응력을 검토한다.

(1) 제 1단계 : 콘크리트 타설 및 PS 도입(2일 경과)

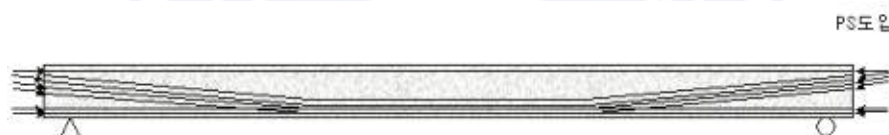


그림 17. 콘크리트 타설 및 PS 도입(2일 경과)

(2) 제 2단계 : 교각에 거치 후 다음 경간 가설(15일 경과)

PSC BOX가 적재된 Carrier를 이동하중으로 고려한다.



그림 18. 가설하중(15일 경과)

(3) 제 3단계 : 2차 고정하중 적용(200일 경과)

2차고정하중 재하 완료



그림 19. 2차 고정하중(200일 경과)

(4) 제 4단계 : 모든 손실이 완료되었다고 추정되는 시기(5000일 경과시)

3. 횡방향해석

(1) 하부플랜지 및 복부의 응력은 박스거더를 복부 및 상하 플랜지로 구성된 라멘 구조로 보고 해석하여도 좋다. <그림 20>에 보인 것처럼 교축방향으로 1m의 두께가 있는 박스 라멘 구조로 모델링하여 계산하여도 실제적으로 충분한 정도의 해를 얻을 수 있기 때문에 일반적인 경우에 이 방법을 써서 구하여도 좋은 것으로 하였다. 프리스트레스 이외의 하중에 의하여 부재에 생기는 축방향력은 일반적으로 작기 때문에 하부 플랜지 및 복부를 설계할 때에 축방향력은 고려하지 않아도 좋다.

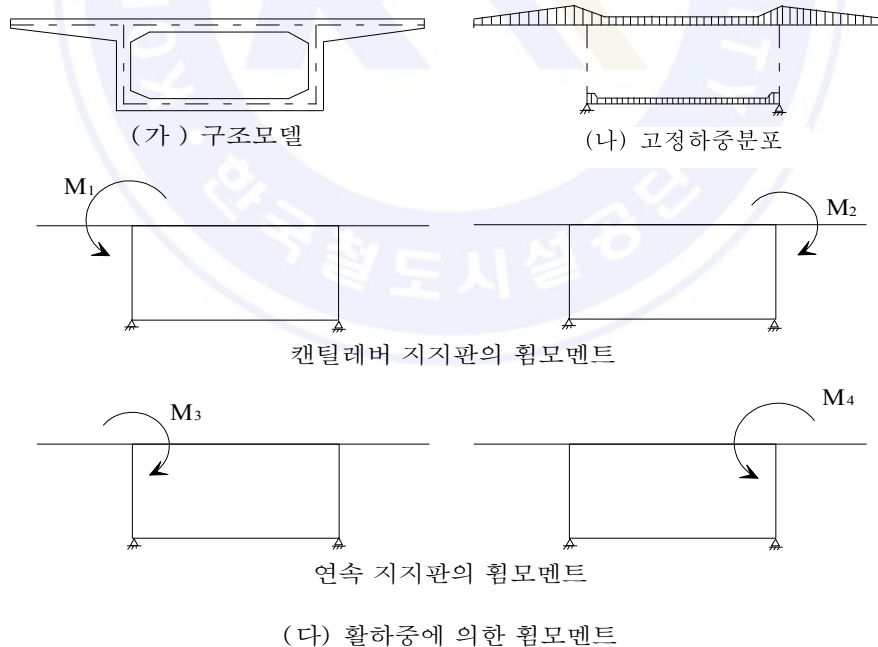


그림 20. 하부플랜지 및 복부의 휨모멘트

(2) 경사진 복부 및 보강 리브가 있는 박스거더교의 하부플랜지 및 복부의 단면력은 복부의 경사와 보강 리브의 영향을 고려하여 구하여야 한다. 경사진 복부가 있는 박스



거더교에서 복부에 배치된 교축방향의 PS강재가 위로 휘어진 경우 프리스트레스 힘의 연직방향분력에 의하여 생기는 단면력 등에 대하여 검토할 필요가 있다. 다만 보강 리브가 있는 박스거더교의 단면력은 리브의 영향을 고려하여 계산하여야 한다. 거더 높이의 변화가 있는 박스거더교는 하부플랜지에 작용하고 있는 수직응력 및 프리스트레스 힘의 수직분력에 의하여 단면력이 생기게 된다. 따라서 하부플랜지의 폭이 넓고 그 영향을 무시할 수 없는 경우에는 설계시 이를 고려하는 것이 좋다.

- (3) 복부의 휨모멘트에 대하여 배치된 철근량의 1/2은 교축방향의 설계를 할 때 사인장 철근으로 간주하여도 된다. 사인장 철근량을 계산할 때의 재하상태가 「해설 1의 3의 (1)항」에 규정된 재하상태인 복부에 최대휨모멘트가 생기는 재하상태와 반드시 일치하는 것은 아니기 때문에 복부에 생기는 휨모멘트에 저항하기 위하여 필요한 철근량의 1/2까지 사인장 철근으로 볼 수 있도록 하였다.

$$A_s = A_{s1} + 0.5A_{s2} + A_t$$

여기서, A_s : 1개의 복부에 배치된 철근량

A_{s1} : 복부 1개당 필요한 사인장 철근량

A_{s2} : 복부에 생기는 휨모멘트에 저항하는데 필요한 철근량(복부 내측 또는 외측의 것 중 큰 값)

A_t : 비틀림모멘트에 대한 복부 1개당의 횡방향 필요철근량

그러나 복부 내측 및 외측에 대하여는 복부에 생기는 정·부모멘트에 대하여 각각 필요한 철근량 이상의 철근을 배치하여야 한다.

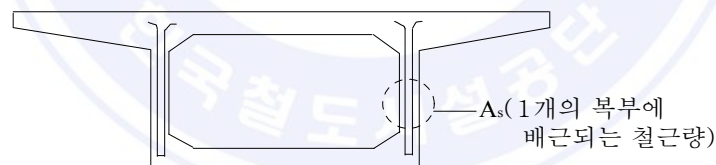


그림 21. 복부에 배치되는 철근량

4. 단면설계

PSC 박스거더교의 휨에 대한 설계방법은 허용응력 설계법을 기본으로 하고 있으므로 사용하중하에서의 콘크리트 및 PS강재의 응력을 구하여 각 경우에 대한 허용응력보다 작도록 설계하며, 설계하중보다 큰 계수하중에 대하여는 구조물이 파괴가 발생하지 않도록 파괴에 대한 안전도를 검토하여야 한다. 또한 설계된 PSC 박스거더교가 취성파괴를 일으키지 않도록 철근 및 PS강재의 사용량에 대한 검토가 필요하다.

일반적으로 PSC 구조물의 전단 또는 비틀림에 의한 파괴는 휨파괴에 비하여 매우

취성적이다. 따라서 구조물의 휨과괴 되기 전에 전단파괴가 먼저 발생하는 것은 바람직하지 못하다. 철도교설계기준에서는 전단 및 비틀림에 대한 설계는 휨설계에 적용하고 있는 허용응력 설계법 대신에 파괴에 대한 안전도 확보에 중점을 두어 강도설계법을 따르도록 하고 있다.

단면설계 시 각 항목별 고려하여야 할 사항 및 요령에 대하여 기술하면 다음과 같다.

4.1 콘크리트의 응력 계산

교량가설공법을 충분히 고려한 가설단계와 가설 완료 후 설계하중에 의한 콘크리트 응력을 계산하여야 하며, 또한 크리프와 건조수축에 의한 프리스트레스의 손실이 일어나기 전의 일시적 응력과 모든 손실이 일어난 후 사용하중 상태에서의 응력 및 균열 응력, 정착부의 지압응력 등을 계산한다. 각 하중단계 및 조건에서 하에서 계산된 콘크리트의 응력은 각 조건에서의 허용응력을 넘지 않도록 설계하여야 하는데 허용응력에 대한 규정은 「KR C-10050의 3.9의 (1)항」에 제시되어 있으므로 이를 적용한다.

4.2 PS강재의 응력 계산

PS강재의 응력 계산에 있어서는 PS강재의 릴랙세이션, 콘크리트의 탄성변형 및 이에 따른 PS강재의 인장응력의 감소, 콘크리트의 크리프 및 건조수축, PS강재와 쉬스의 마찰, PS강재의 정착시 슬립량, 하중에 의한 PS강재의 응력 등에 대하여 고려하여야 한다.

프리스트레스의 손실의 계산은 「KR C-10050의 3.6의 (4)항」에서 제시한 방법을 따르며, 하중에 의한 PS강재의 응력을 계산하는 경우 콘크리트에 인장균열이 발생하게 되면 PS강재의 응력이 급격히 증가하는 경우가 있으니 이에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

각 하중단계 및 조건에서 계산된 PS강재의 응력은 콘크리트의 경우와 마찬가지로 각 조건에서의 PS강재의 허용응력을 넘지 않도록 설계하여야 하는데 PS강재의 허용응력에 대한 규정은 「KR C-10050의 3.9의 (1)항」에 제시되어 있으므로 이를 적용한다.

4.3 휨에 대한 극한강도 검사

전 절의 방법에 따라 콘크리트 및 PS강재의 응력을 검토하면 사용하중하에서의 안전도는 확보할 수 있지만 구조물의 수명동안에 설계하중보다 큰 하중이 작용할 수 있으며 이러한 하중이 작용하는 경우에도 그 구조물은 파괴되지 않아야 하는데 이러한 경우에 대하여도 소정의 안전도를 확보하고 있어야하므로 이를 확인하기 위하여 극한강도의 검사가 필요하다.

「KR C-10050의 3.9항」에 제시된 방법에 따라 구한 부재의 휨강도는 계수하중을 작용시켜 구한 부재의 휨 소요강도보다 큰 값이어야 한다.



4.4 철근 및 PS강재의 제한

프리스트레스트 콘크리트 부재는 극한상태에 도달할 때 콘크리트의 압축 축이 먼저 파괴되는 취성파괴가 발생하여서는 안 된다. 따라서 프리스트레스트 콘크리트 부재의 인장축 보강재가 먼저 항복강도에 도달한 다음 충분한 연성이 발휘되도록 설계가 되었는지를 확인하여야 하는데 확인 방법 중에서 가장 간단한 방법은 설계에 사용된 강재량에 의한 방법이다. 철도교의 설계에는 「KR C-10050의 3.11항」 기준에 따라 사용 강재량을 검토하여야 한다.

일반적으로 설계기준의 최대 강재량보다 사용 강재량이 많으면 콘크리트의 압축 축이 먼저 파괴되는 취성파괴가 발생할 위험이 있지만, 사용 강재량이 너무 적어도 균열발생 후 콘크리트가 가지고 있던 인장응력을 강재에 전달할 여유도 없이 급작스러운 휨파괴가 발생할 수 있다. 이와 같은 파괴가 발생하여도 구조물에는 치명적이므로 이러한 파괴를 방지하기 위하여 최소 강재량에 대한 검토도 하여야 한다.

4.5 전단 및 비틀림설계

프리스트레스트 콘크리트 부재는 휨 이외의 다른 원인에 의한 파괴에 대하여도 안전하여야 한다. 전단 또는 비틀림에 의한 파괴는 잘 설계된 부재의 휨파괴와는 달리 일반적으로 취성파괴로 되는 경향이 있어서 이러한 파괴가 부재의 휨파괴보다 먼저 발생하도록 설계하여서는 안되며, 따라서 전단 또는 비틀림에 대하여는 사용성의 확보보다는 파괴에 대한 안전도 확보가 우선 요구된다. 위와 같은 이유로 현행 설계기준에서는 휨에 대한 설계법으로 허용응력설계법을 채택하였다 하더라도 전단 또는 비틀림에 대한 설계는 강도설계법을 따르고 있는 것이 일반적이다.

프리스트레스트 콘크리트 박스거더교의 전단 및 비틀림설계 시 고려하여야 할 사항은 다음과 같다.

- (1) 속 칸 슬래브와 기초를 제외한 PSC 휨부재는 전단과 사인장응력에 대해 보강하여야 한다. 중공 슬래브에 대해서는 전단에 대해 검토를 하여야하며, 계수전단력이 콘크리트가 부담하는 전단강도의 1/2보다 작으면 전단에 대한 보강은 생략해도 좋다.
- (2) 전단철근은 부재축에 직각방향으로 있는 스티럽 또는 부재축에 직각방향으로 위치한 용접된 강선으로 이루어진다. 전단철근은 압축연단으로부터 d만큼 연장되어야 하고 피복규정은 다른 철근과의 근접이 허용되는 한도내에서 부재의 압축면 및 인장면에 가깝게 배근하여야 한다. 전단철근이 설계항복 강도를 발휘하도록 전단철근의 양끝을 철근의 정착규정에 따라 정착하여야 한다.
- (3) 작용하중에 의한 반력이 부재의 단부 부근에 압축력을 유발할 때 지점면으로부터 1/2h 보다 작은 거리에 위치한 단면은 1/2h 지점에서 계산한 극한전단력에 대한 전단설계를 한다.

- (4) 프리캐스트 세그멘탈 상자형 거더의 복부에 가설하중에 의한 전단력을 전달하기 위해서 전단 연결재를 설치한다. 특히 교각 근처에 있는 세그먼트에서는 전단연결재의 반대의 전단응력이 발생할 수 있으므로 주의를 요한다.
- (5) 전단력을 받는 부재는 위험단면에서의 계수 전달력이 콘크리트가 부담하는 설계전단강도와 전단철근이 부담하는 설계전단강도의 합보다 크지 않도록 설계하여야 하며 여기서 콘크리트 및 철근이 부담하는 설계전단강도는 「KR C-10050의 3.12항」의 기준을 따르도록 한다.
- (6) 비틀림에 대한 설계는 박벽관(thin-walled tube), 즉 공간트러스 해석에 의하며 이에 대한 설계는 「KR C-10020의 8항」의 기준을 따르도록 한다.

4.6 프리스트레스 도입시의 콘크리트 강도

프리스트레싱을 도입할 때의 콘크리트의 압축강도는 프리스트레싱 직후의 최대 압축응력에 대하여 어느 정도 안전도를 갖고 있지 않으면 안된다. 이 최대압축응력은 PS강재의 릴랙세이션, 콘크리트의 크리프, 건조수축 및 고정하중 등에 의해 감소되는 것이므로 이 경우의 안전도는 설계하중작용시의 안전도보다 작아도 좋다. 그러나 콘크리트 강도에 대한 최대압축응력비가 과대하면 콘크리트의 크리프가 매우 크게 발생하므로 프리스트레스의 도입시 콘크리트의 최대압축응력이 콘크리트 압축강도의 60%이하가 되는 지를 검토하여야 한다.

또한, PS강재의 정착에 의하여 발생하는 정착부 부근의 국부적인 지압응력이나 인장응력은 정착장치의 종류, 정착장치의 간격 및 피복두께 등에 따라 다르므로 정착장치 부근의 콘크리트 강도가 각 PSC공법의 설계지침 등에서 규정되어 있는 콘크리트 강도에 도달한 후에 PS강재를 긴장하여야 한다. 특히, 콘크리트의 재령이 조기일 때 PS강재를 긴장하는 경우에는 정착장치의 간격이나 피복두께에 대하여 충분한 주의를 필요로 하고, 필요에 따라서는 시험에 의하여 그의 안전성을 확보하도록 한다.

5. 상세해석

5.1 지점 가로보 및 다이아프램의 설계

- (1) 지점 가로보 및 다이아프램의 단면력은 지점과 부재의 결합조건에 따라 해석모델을 설정하고 보이론에 의하여 계산하는 것이 좋다.
- (2) 가로보 및 다이아프램의 단면력을 계산할 때, 플랜지의 유효폭은 시방서의 규정에 따라 구하면 된다. 다만 지점 가로보 및 다이아프램에 개구부가 있을 때에는 그 영향을 고려하여 구조모델을 설정하고 단면력을 계산하여야 한다.



5.2 단부 스트럿(end strut)

- (1) 거더에서 작용하는 힘은 거더의 종방향 축으로부터 β_u 도 경사진 하나의 스트럿 m-n 을 통하여 받침에 전달된다. 여기서 β_u 는 30° 보다 작아서는 안 된다.

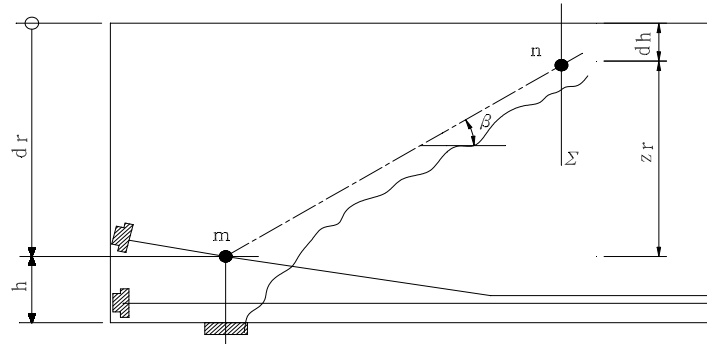


그림 22. 단부 스트럿

- (2) 여러 PS강재를 가지는 거더에서, 블록 내부의 압력선은 거더의 각 끝단에서 정착된 PS강재의 각 작용선을 보여주는 점선이다.

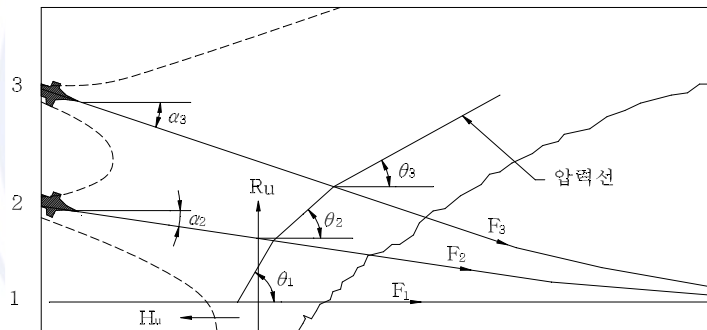


그림 23. 압력선

- (3) 단부스트럿은 다음에 따라 설계하여야 한다.

- ① 압력선의 각 θ_k 를 구하여야 한다.

가. 받침에서 가까운 순으로 PS강재의 번호를 매기면, 압력선의 각 θ_k 는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\tan \theta_k = \frac{R_u - \sum_{i=1}^k F_i \sin \alpha_i}{\sum_{i=1}^k F_i \cos \alpha_i - H_u}$$

여기서, α_i : PS강재 i의 각

F_i : PS강재 i의 인장

H_u : 받침에서 수평력(존재하면)

R_u : 받침에서 수직력

나. 실제의 설계에서는 위 식의 F_i 는 $F_{i,lim}$ 로 치환할 수 있으며, $F_{i,lim}$ 는 $f_{i,lim}$ 에 PS강재 i 의 단면적을 곱한 힘이다.

$$\text{여기서, } f_{i,lim} = \min \begin{cases} 1.2f_{pm} \\ \frac{f_{py}}{\gamma_p} \end{cases}$$

f_{pm} : 긴장 후 PS강재의 예상응력

f_{py} : PS강재의 항복강도

$\gamma_p = 1.15$ (사용하중 조합의 경우)

$\gamma_p = 1.00$ (계수하중조합의 경우)

② 압력선의 각이 β_u 보다 작게 되는 PS강재 r 의 위치를 찾는다.

가. PS강재 r 에서 다음의 조건을 만족하면 압력선의 각이 β_u 보다 작게 된다.

$$\begin{cases} \tan\theta_k \leq \tan\beta_u \\ \tan\theta_{k-1} > \tan\beta_u \end{cases}$$

나. PS강재 r 의 위치는 다음 식을 만족할 때에만 존재하여야 한다.

$$\sum_i F_{i,lim} \cos\alpha_i - H_u \geq \left(R_u - \sum_i F_{i,lim} \sin\alpha_i \right) \cot\beta_u$$

③ 수직력에 대한 평형방정식을 세운다.

가. 단부 스트럿 높이(z_r)를 다음 식으로부터 구하여야 한다.

$$z_r = d_r - d_b$$

여기서, d_r : 받침축에서의 거더 위에서 PS강재 r 까지의 거리

d_b : 일반적으로 $\frac{h}{10}$ 이며, h 는 거더의 높이이다,

나. 수직력에 대한 받침면적의 일반적인 평형식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W = R_u - \sum_i F_i \sin\alpha_i - \frac{z_r A_s f_{sy} \sin(\alpha + \beta_u)}{s_s \gamma_s \sin\beta_u}$$

여기서, W : 콘크리트에 의하여 전달된 수직력

f_{sy} : 철근의 항복강도

α : 스테럽의 경사각으로 45도와 90도 사이의 값

s_s : 스테럽의 간격

A_s : 스테럽 한개의 단면적

④ 수직철근의 양을 산정하여야 한다.

가. 위 식의 양변을 $b_n z$ 으로 나누어 정리하면 다음 식과 같이 된다.



$$\frac{W}{b_n z} = \tau_{u, red} - \frac{z_r A_s f_{sy} \sin(\alpha + \beta_u)}{z b_n s_s \gamma_s \sin \beta_u}$$

$$\text{여기서, } V_{u, red} = R_u - \sum_i F_{i, \lim} \sin \alpha_i$$

$$\tau_{u, red} = \frac{V_{u, red}}{b_n z}$$

$$z = \frac{I}{Q}$$

나. 콘크리트가 부담하는 전단력(W)은 다음 식과 같다.

$$W \leq b_n z \frac{f_{tj}}{3}$$

다. 다음 식으로부터 수직철근의 양을 구할 수 있다.

$$\tau_{u, red} - \frac{z_r A_s f_{sy} \sin(\alpha + \beta_u)}{z b_n s_s \gamma_s \sin \beta_u} \leq \frac{f_{tj}}{3}$$

⑤ 위에서 산정한 수직철근의 양을 $\frac{z}{z_r}$ 의 크기에 따라 다음과 같이 조정하여야 한다.

가. $z_r \geq z$ 인 경우: 수직철근의 양은 충분하므로 조정할 필요가 없다.

나. $z_r < z$ 인 경우: 받침 축으로부터 $z_r \cot \beta_u$ 구간에서, 수직철근의 양을 $\frac{z}{z_r}$ 배 만큼 증가시킨다.

5.3 하단 코너부의 안정성

- (1) 하단코너부는 받침 안쪽에서 시작하여 하단코너부를 분리시키려는 힘에 저항하도록 설계하여야 한다.
 - (2) 예상 파열면에 작용하는 모든 힘의 합력이 파열면의 수직축과 이루는 각 α 가 콘크리트의 내부마찰각 β 보다 크지 않으면 파열은 발생하지 않으므로 하단 코너부는 다음에 따라 설계하여야 한다.
- ① 예상 파열면에 작용하는 모든 힘에 대한 안정방정식을 세운다.

$$\frac{A_l f_{sy}}{\gamma_s} \geq \lambda(R_u + F_{v, \lim}) + H_u - F_{H, \lim}$$

여기서, A_l : 수평 철근량

R_u : 받침에서의 수직력

H_u : 받침에서의 수평력

$F_{H, \lim}$: 코너에서 정착된 프리스트레스 힘의 수평부분

$F_{v, \lim}$: 코너에서 정착된 프리스트레스 힘의 수직부분

θ : 예상 파열면과 연직축과 이루는 각

$\beta = \arctan \frac{2}{3}$ 는 콘크리트의 내부마찰각

$$\lambda = \frac{\cot\beta - \tan\theta}{1 + \cot\beta \tan\theta}$$

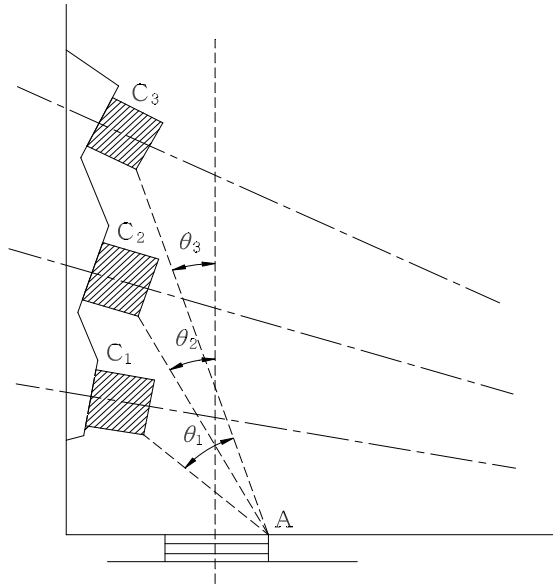
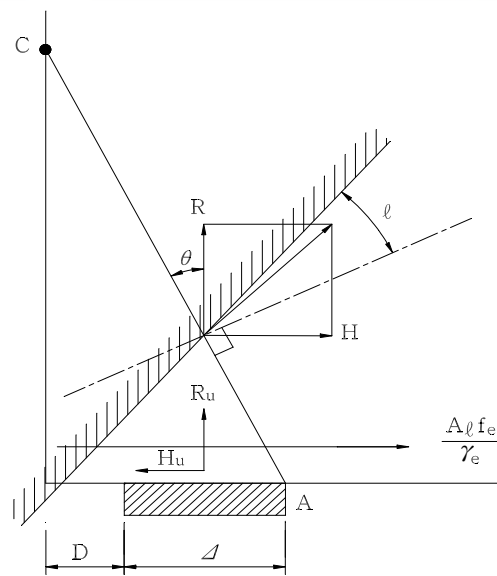


그림 24. 계산방법



$$R = R_u + F_{v,\text{lim}}$$

$$H = \frac{A_l f_e}{\gamma_s} + F_{H,\text{lim}} - H_u$$

그림 25. 계산 방법

- ② 위 식으로부터 수평 철근량(A_l)을 산정하여야 한다.
- ③ 수평철근량은 다음 식으로 산정된 최소철근량($A_{l,\text{min}}$) 이상이어야 한다.



$$A_{t,\min} = \frac{0.04 R_u}{f_{sy}} \times \gamma_s \times (5 - 4k)$$

여기서, k 는 다음과 같이 결정된다.

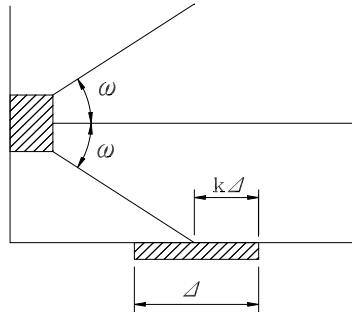


그림 26. 최소 보강 계산 방법

6. 구조상세

6.1 PS강재의 배치

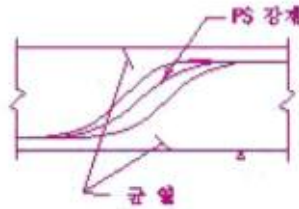
(1) PS강재는 마찰에 의한 손실이 작아지도록 배치함과 동시에 부재 전체에 걸쳐 PS강재 단면적의 급격한 변화가 없도록 다음 사항에 주의하여 배치하여야 한다.

- ① PS강재는 될 수 있으면 직선에 가까운 형상으로 배치한다.
- ② 1개의 PS강재를 배치하는데 많은 S자형의 곡선이 나오지 않도록 보의 중간에 정착한다. 다만, 보의 중간에 많은 정착장치를 한 단면에 집중시키면 그 단면에 큰 국부인장응력이 일어나서 그 단면의 취약부가 될 수 있기 때문에 많은 정착장치를 한 단면에 집중시키는 것은 피하여야 한다.

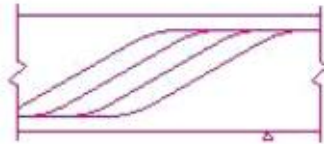
평면 형상에 대해서도 되도록 한 연직면 내에 있도록 직선모양으로 배치한다.

이에 따라 PS강재는 정착장치의 지압면으로 부터 소정의 구간까지 직선형태로 배치하여야 하며 그 길이는 400 mm 이상으로 하되 일반구역을 벗어나도록 하는 것이 바람직하다.

- (2) PS강재를 곡선형태로 배치할 때는 강재의 반지름을 쉬스사용시는 쉬스지름의 100배, 쉬스를 사용하지 않을 때는 PS강재 지름의 40배, PS강봉 사용시는 강봉 지름의 700배 이상으로 하되 원적으로 변곡점부에 대해 면내 및 면외력을 검토하여 곡선긴장재의 영향을 확인하여야 한다.
- (3) 연속보 등과 같이 하중조합에 따라 휨 모멘트의 부호가 달라지는 부재 단면에서는 PS강재를 단면의 도심위치에 집중시키지 말고 부재의 상하연단 부근에 분산 배치하여 균열발생을 방지하고, 보의 단부위치에서는 PS강재의 일부를 하면에 따라 연장시켜 단부의 하연단 부근에 정착시키는 것이 좋다.



(a) 균열이 발생하기 쉬운 PC강재의 배치



(b) 균열이 발생하기 어려운 PC강재의 배치

그림 27. 하중상태에 따라 휨모멘트의 부호가 바뀌는 부분의 PS강재 배치

- (4) 곡선 긴장재로 인한 면내력 및 면외력에 의한 콘크리트의 파괴를 방지하기 위해 필요 철근으로 횡구속 시키고 콘크리트의 전단강도 만으로 지지될 수 없는 경우에는 나선 철근 등으로 보강하여야 한다.
- (5) 직선으로 배치되는 포스트텐션 덕트의 순간격은 포스트텐션 강재의 순간격이상으로 하고, 곡선 덕트는 여기에 긴장재 횡구속을 위해 요구되는 철근의 배치에 지장이 없도록 하여야 한다.

6.2 박스 거더의 단면

- (1) 상부플랜지의 최소두께는 현치 또는 복부 사이의 순길이의 1/30이상이어야 하고, 160 mm 이상이어야 한다. 다만 공장에서 생산된 프리캐스트 프리텐션 요소에 대한 최소두께는 140 mm 이상이어야 한다. 상부플랜지의 최소두께는 「KR C-10050 6항」의 규정을 만족시켜야 한다.
- (2) 하부플랜지는 직접 활하중이 작용하지 않기 때문에 상부플랜지보다 얇게 해도 좋다. 하지만 하부플랜지의 최소두께는 현치 또는 복부 사이의 순길이의 1/30 이상이어야 하고, 160mm 이상 이어야 한다. 다만 공장에서 생산된 프리캐스트 프리텐션 요소에 대한 최소두께는 140mm 이상 이어야 한다. ([KR C-10050의 3.4의 (6)항] 참조).
- (3) 플랜지의 두께를 주거더 방향으로 변화시킬 경우에는 1/5보다 완만한 경사로 하는 것이 좋다. 다만 그 이상의 급한 경사로 할 필요가 있는 경우의 설계계산에 사용되는 유효단면적은 1/5 이하의 완만한 경사내의 부분으로 한다. <그림 28> 플랜지 두께의 변화 참조.
- (4) 복부두께의 변화는 복부두께 차이의 12배 이상이 되는 길이에 걸쳐서 점차적으로 변해야 한다.



- (5) 열차하중을 받는 박스거더의 상부슬래브 및 하부슬래브의 두께는 200mm 이상으로 하여야 한다

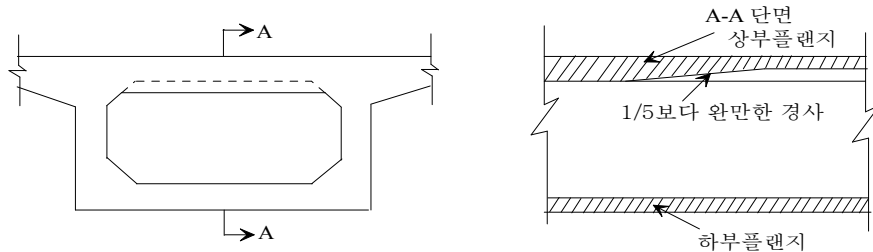


그림 28. 플랜지 두께의 변화

6.3 박스 거더 단면의 철근 보강

- (1) 박스거더의 특성이 발휘되려면 비틀림모멘트에 대하여 충분한 저항능력을 갖도록 하여야 한다. 따라서 복부의 교축방향 및 하부플랜지 상하면의 교축방향 및 교축직각 방향에는 지름 13mm 이상의 철근을 250mm 이하의 중심간격으로 배치하고, 동시에 하부플랜지 및 복부의 모서리부에 헌치를 두어 철근의 정착을 확실히 한다.

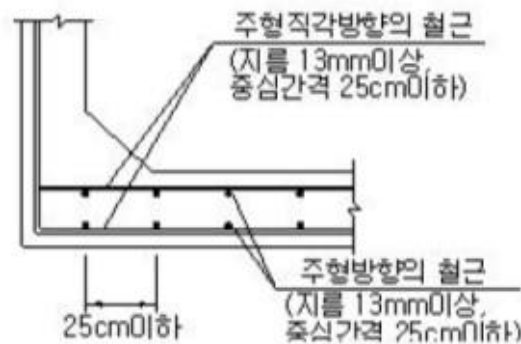


그림 29. 하부플랜지의 철근의 배근

- (2) 복부의 종방향 철근은 건조수축 및 온도철근(0.2%) 이상으로 전단면에 걸쳐서 균등하게 배치해야 하고, 하부슬래브의 종방향 및 횡방향 철근의 배근은 「KR C-10090의 7항」에 따라야 한다.
- (3) 철근콘크리트 박스거더교의 주거더에 배치하는 주철근은 복부 및 헌치부 내에서 2단 이하로 배치하는 것이 좋다. 그러나 부득이 플랜지 내에 배치할 경우에는 복부의 측면에서 주 거더 지간의 1/10의 범위내에 배치하고, 철근 중심간격의 최대값은 250mm로 하는 것이 좋다.

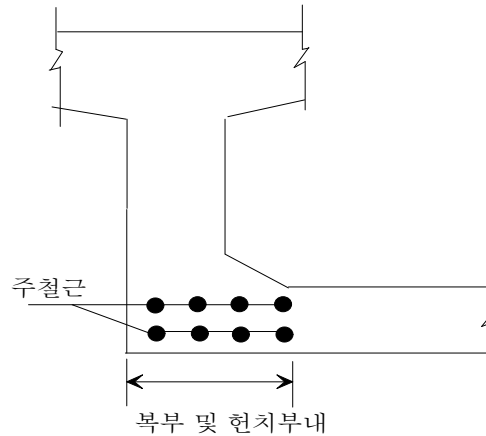


그림 30. 주철근의 배치

- (4) 하부슬래브에는 거더의 지간과 평행한 방향으로 플랜지 단면적의 최소 0.4%에 해당하는 배력철근을 한 층으로 배근하여야 하며, 거더의 지간에 직각방향으로 슬래브 최소 두께로부터 계산한 플랜지 단면적의 최소 0.5%에 해당하는 배력철근을 상하 양면으로 배근하여야 한다. 하부 슬래브의 모든 횡철근은 외측 거더 복부의 외측 면까지 연장되어야 하고 90도 표준갈고리로 정착하여야 한다.
- (5) 개구부를 둘 경우에는 그 주위를 보강하여야 한다. 개구부는 될 수 있으면 응력의 크기가 작은 곳에 두며, 개구부에 의하여 절단된 철근량 이상의 철근을 보강철근으로 배치하는 것으로 하여야 한다. <그림 31>과 같이 PS강재의 정착은 개구부로부터 충분히 떨어진 곳에 하도록 하여야 한다.

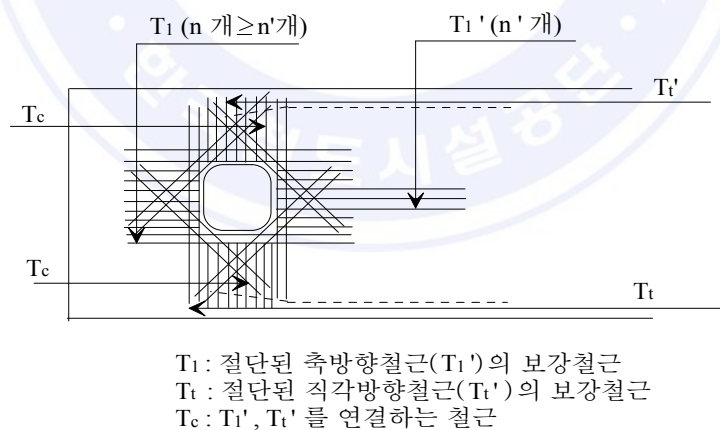


그림 31. 하부플랜지 개구부 구조의 한 예

- (6) 별도의 설계계산을 하지 않은 경우에 지간에 두는 다이아프램에는 <그림 32>에 보인 철근을 배치하는 것으로 한다. 다만 개구부를 둘 때에는 <그림 33>을 따르는 것으로 한다.

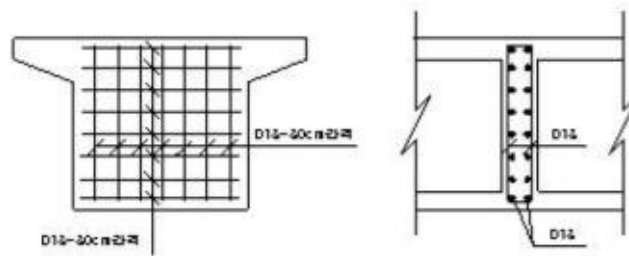


그림 32. 다이아프램의 배근(일반부)

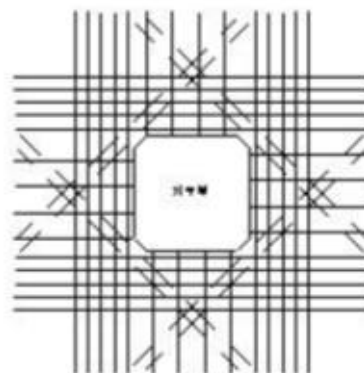


그림 33. 다이아프램의 배근(개구부 근처의 가외철근)

6.4 철근 및 PS강재의 피복두께와 간격

(1) 다음의 콘크리트 최소 피복두께는 철근 및 PS강재 모두에 적용된다.

① PS강재 및 주철근 : 40mm

② 슬래브 보강철근

가. 슬래브의 상두 : 50mm

- 제빙장치(deicer)가 사용되었을 경우 : 40mm

나. 슬래브의 하부 : 25mm

③ 스티럽, 전단철근, 띠철근 : 25mm

④ 해빙제가 사용될 때는 해빙제가 녹은 물이 프리스트레스트 거더와 지속적으로 접촉하지 않고 배출되도록 배수계획을 하여야 한다. 이러한 지속적 접촉을 피할 수 없는 곳이나 부재가 염수, 또는 화학물질에 노출되는 곳에서는 콘크리트의 피복두께를 증가하여야 한다.

(2) 철근 및 PS강재의 최소 간격

① 보의 단부에서 PS강재의 최소 순간격은 다음과 같다.

가. 프리텐션 강재 : 강재지름의 3배 또는 콘크리트 골재 최대치수의 4/3배 중에서 큰 값

나. 포스트텐션 강재 : 40mm 또는 콘크리트 골재 최대치수의 1.5배 중에서 큰 값

② 바닥판에서의 PS강재는 바닥판의 폭에 걸쳐 대칭이며 균등하게 배치한다. PS강재의 간격은 합성되는 슬래브 전체 두께의 1.5배 또는 400 mm보다 커서는 안 된다.

(3) 다발

① 포스트텐션 강재가 늘어지거나 편향되는 경우에 포스트텐션 덕트는 최대 3개의 다발로 묶어도 된다. 그러나 부재의 끝에서 1m 내에서는 PS강재의 최소간격을 40mm 또는 콘크리트 골재 최대치수의 1.5배 중에서 큰 값 이상으로 유지시켜야 한다.

② 프리텐션 강재가 다발로 묶이는 경우에는 보 길이의 중간 1/3구간 내에서만 묶음이 이루어져야하고, 변곡점은 2차 응력에 대해 검토하여야 한다.

(4) 덕트의 크기

① 여러 개의 강선, 강봉, 그리고 스트랜드로 이루어진 긴장재 덕트 내부의 단면적은 PS강재 순 단면적의 2배 이상이어야 한다.

② 단일 강선, 강봉, 그리고 스트랜드로 이루어진 긴장재 덕트의 내부지름은 강선, 강봉, 그리고 스트랜드의 공칭지름보다 최소한 7mm 이상 커야 한다.

7. 설계흐름도

7.1 설계단계

7.1.1 주설계단계

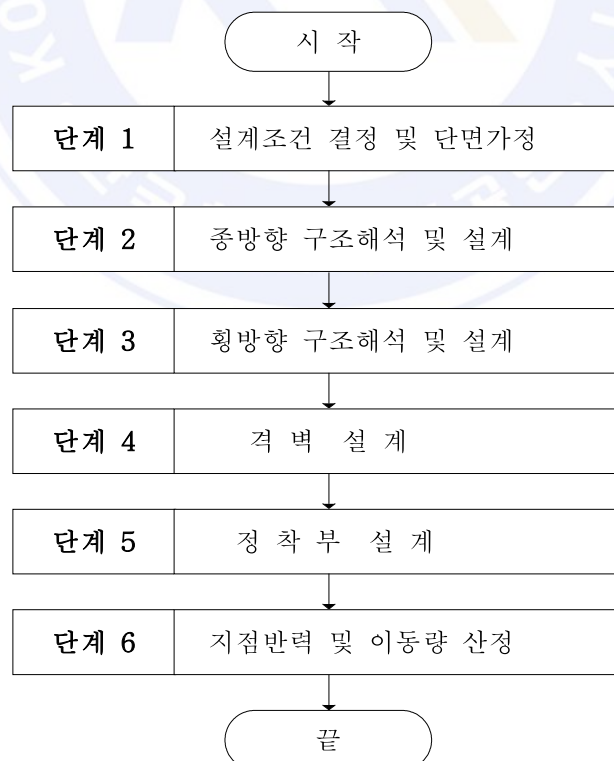


그림 34. 주설계 흐름도



7.1.2 [단계 1] 설계조건 결정 및 단면가정

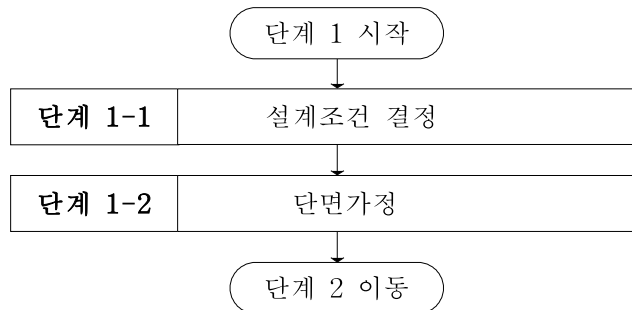


그림 35. 단계조건 결정 및 단면가정

7.2.3 [단계 2] 종방향 구조해석 및 설계

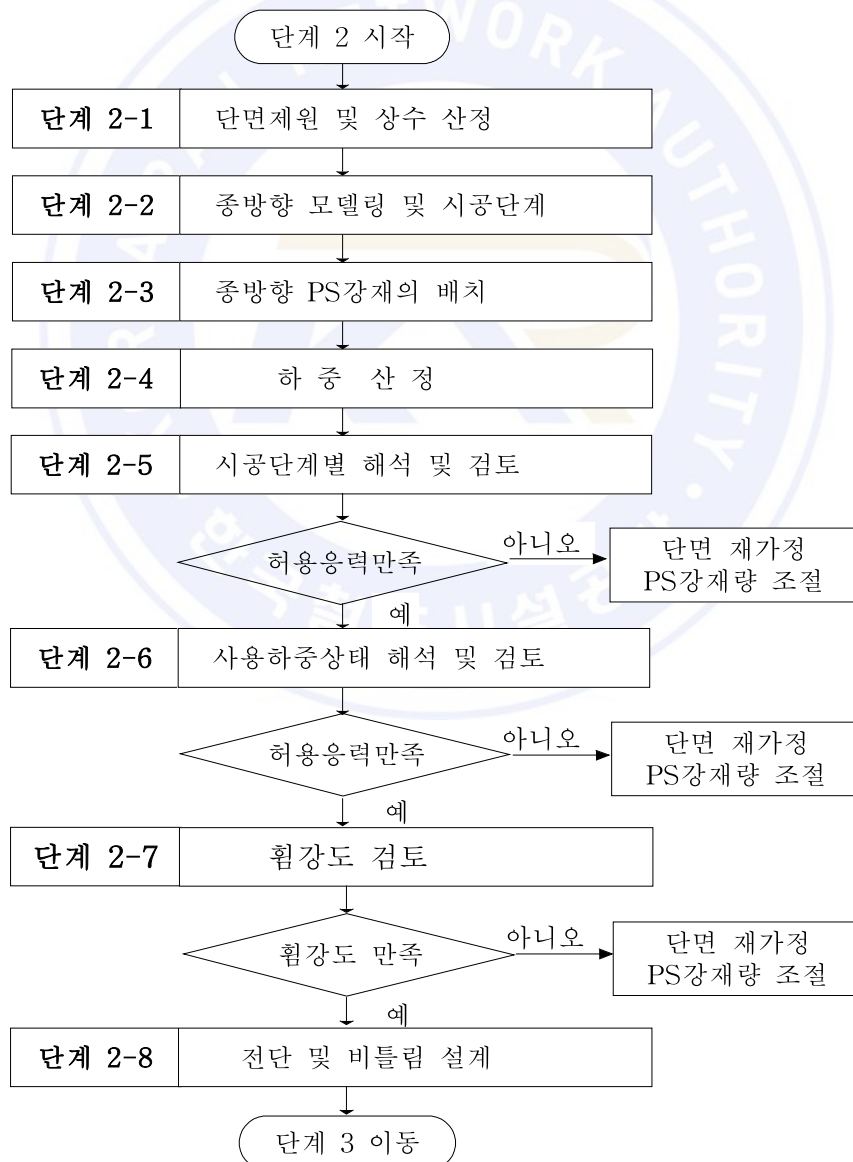


그림 36. 종방향 구조해석 및 설계

7.2.4 [단계 3] 횡방향 구조해석 및 설계

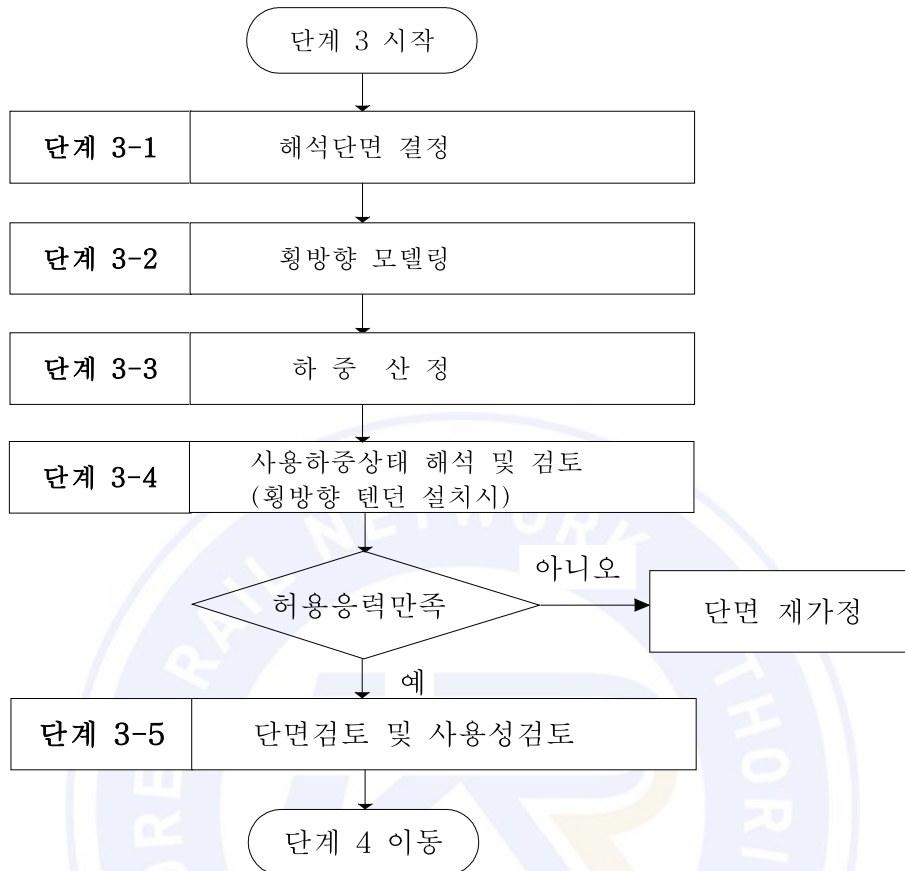


그림 37. 횡방향 구조해석 및 설계

7.2.5 [단계 4] 격벽 설계

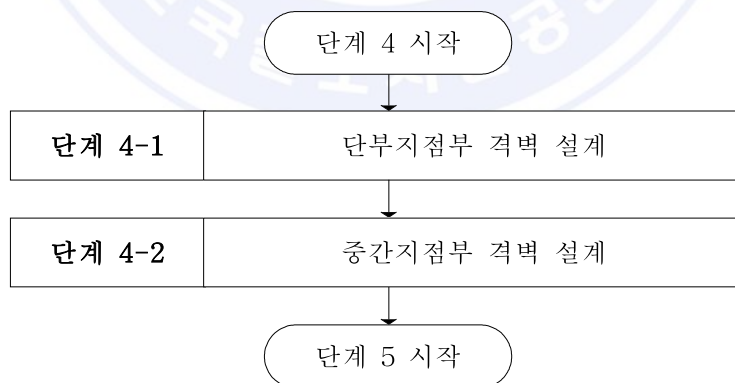


그림 38. 격벽 설계



7.2.6 [단계 5] 정착부 설계

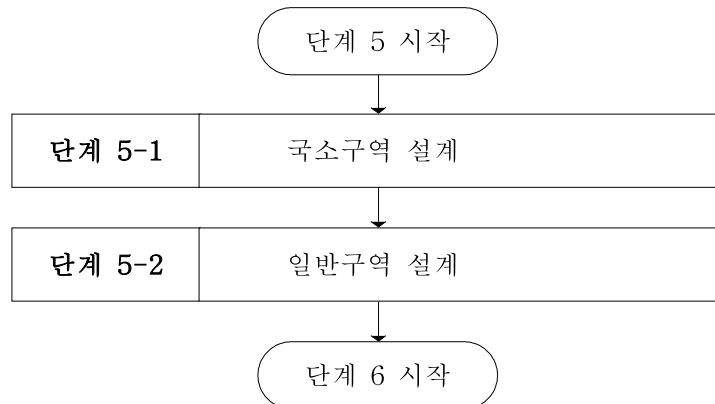


그림 39. 정착부 설계

7.2.7 [단계 6] 지점반력 및 이동량 산정

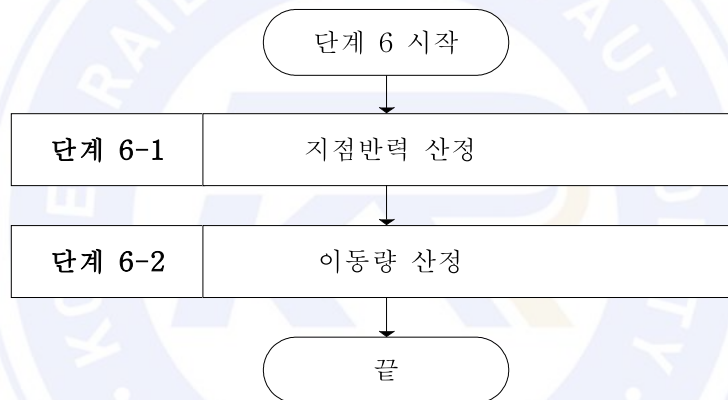


그림 40. 지점반력 및 이동량 산정

7.2 설계단계별 고려사항

7.2.1 [단계 1] 설계조건 결정 및 단면가정

(1) [단계 1-1] 설계조건 결정

- ① 선로등급은 「KR C-08020의 4항」의 규정에 따른다.
- ② 콘크리트, PS강재, 철근 등 주요 사용재료 및 규정을 따른다.
- ③ 설계방법은 「KR C-08020」의 설계하중조합과 허용응력 증가계수를 사용한 허용응력 설계법이다. 그러나 초과하중에 대한 검토 및 진단설계는 강도설계법에 따른다. [KR C-10020]
- ④ 사용전산프로그램은 프리스트레스의 영향을 고려할 수 있고 그 신뢰성이 검증된 프로그램이어야 한다. 따라서 프리스트레스를 고려할 수 있는 PSC 교량 전문 해석 프로그램을 사용하는 것이 바람직하다.

(2) [단계 1-2] 단면가정

- ① PSM에 의해 가설되는 교량의 단면은 일반부, 중간지점부, 단부지점부 등으로 구성된다.

7.2.2 [단계 2] 종방향 구조해석 및 설계

(1) [단계 2-1] 단면제원 및 상수 산정

- ① 보통콘크리트를 사용하고 종방향, 횡방향 포스트텐션 방식을 도입한 프리캐스트 콘크리트의 단일박스거더교, 다중박스거더교의 단순교와 연속교의 설계에서 구조해석, 휨모멘트 및 전단력의 영향을 계산하기 위한 단면의 성질은 유효플랜지폭을 사용한다. 유효플랜지 폭상의 비대칭하중의 영향은 무시해도 좋다.
- ② 슬래브가 거더와 일체로 간주되는 보통의 슬래브 지간과 거더간격을 갖는 현장치기박스거더에서는 슬래브의 전폭이 압축에 유효하다고 본다.[KR C-10050의 3.4의 (5)]
- ③ 단면의 유효폭은 「KR C-10050의 3.4의 (5)」의 규정에 따라 계산한다.

(2) [단계2-2] 종방향 모델링 및 시공단계

- ① 교량의 선형 및 단면 형태를 고려하여 해석 모델을 결정한다.
- ② 종방향 시스템 모델링 방법은 각 단면모양(단일박스거더, 다주형박스거더, 다중박스거더) 및 교폭과 지간의 비에 따라 달라질 수 있다. 판이론을 적용하면 모든 경우에 적합한 설계가 가능하다.
- ③ PSM에 의해 가설되는 교량은 시공단계를 고려하여야 한다. 그리고 시공단계를 고려하며 매경간 상부구조 운반하중을 경간진행 단계별로 구조해석을 수행한다.
- ④ 지간내의 각 위치에 따라 일반부, 중간지점부, 단부지점부 등으로 구성되므로 각 위치에 따라 해당단면의 단면상수에 대한 정확한 입력이 필요하다.

(3) [단계 2-3] 종방향 PS강재의 배치

- ① 종방향으로 필요한 PS강재량을 가정하고 이에 따라 PS강재의 배치계획을 세운다.

(4) [단계 2-4] 하중 산정

PSM으로 시공되는 PSC 박스거더교는 FSM공법으로 시공되는 박스거더교와 달리 특별한 하중(경계조건 변화, 가설장비에 의한 하중 등)을 고려하여야 한다.

① 고정하중

- 자중 : 콘크리트 박스의 자중 및 다이어프램 하중을 산정
- 2차 고정하중 : 자갈도상, 궤도하중, 통신관로, 포장, 방호벽, 난간 등을 산정
- 고정하중의 적용은 「KR C-08020의 3.2항」에 따른다.

② 프리스트레스

- 가정한 PS강재량에 대하여 초기 프리스트레스 도입력을 결정
- 프리스트레스 손실을 고려
 - 즉시손실 : 정착장치에서의 슬립량, PS강재와 쉬스와의 마찰, 콘크리트의 탄성수축



- 장기손실 : 콘크리트의 크리프, 콘크리트의 건조수축, PS강재의 릴랙세이션

- ▷ 프리스트레스의 적용은 「KR C-08020의 3.8항」에 따른다.

- ▷ 구조적 효율성을 고려하여 최적의 프리스트레스 강선량을 결정

③ 크리프 및 건조수축

- 시공단계에 따라 각 부재가 서로 다른 재령을 갖는 경우의 크리프 및 건조수축 효과 고려
- 콘크리트의 크리프계수 및 건조수축변형률 산정을 위한 각 시공단계별 시공일수 계산
- 각 시공단계별 콘크리트의 크리프계수 및 건조수축변형률 산정
- 콘크리트의 크리프 및 건조수축에 대한 영향은 「KR C-08020의 3.9항 및 3.10항」을 따르며, 크리프계수 및 건조수축변형률 산정은 「KR C-10010의 4항」에 따른다.

④ 활하중

- 선로등급에 따른 표준활하중을 산정
- 하중재하는 휨모멘트가 최대인 경우와 비틀림모멘트가 최대인 경우로 구분
- 활하중의 적용은 「KR C-08020의 4항」에 따른다.

⑤ 온도의 영향

- 상하연 온도변화 : $\Delta T = \pm 5^{\circ}\text{C}$
- 종방향 온도변화 : $\Delta T = \pm 15^{\circ}\text{C}$
- 온도변화의 적용은 「KR C-08020의 5.2항」에 따른다.

⑥ 지점이동

지점이동의 적용은 「KR C-08020의 3.11항」에 따른다.

⑦ 풍하중

- 상부구조에 작용하는 풍하중 산정 : 교축직각방향으로 수평재하
- 풍하중의 적용은 「KR C-08020의 5.1항」에 따른다.

⑧ 장대레일 중하중

자갈도상은 3.0KN/m(1레일), 콘크리트 도상은 6.0KN/m(1레일)로 하고 작용위치는 레일면상으로 하며 「KR C-08020의 5.3항」에 따른다.

⑨ 차량횡하중

- 횡하중은 연행집중이동으로 하고 레일면상의 높이에서 교축에 직각이고 수평으로 작용하는 것으로 한다.
- 복선이상 선로를 지지하는 구조물인 경우 차량횡하중은 1레도에 대한 것만을 고려하는 것으로 한다.
- 차량횡하중의 적용은 「KR C-08020의 4.6항」에 따른다.

⑩ 시동하중 및 제동하중

- 시동하중 또는 제동하중은 레일면상 2.0 m높이에서 교축방향으로 수평으로 작용하는 것으로 하며 충격은 고려하지 않는다.
- 제동하중 : LS하중의 15%
(장대레일 축력해석시 국외(UIC, 일본)규정에 의하면 제동하중의 적용은 등분포 수직하중의 25% 적용이 적절한 값으로 추천된다.)
- 시동하중 : 동륜하중의 25%
- ▷ 시동하중 또는 제동하중의 적용은 「KR C-08020의 4.9항」에 따른다.

⑪ 기타하중

위의 하중 이외에 추가로 고려할 필요가 있는 하중(예 : 가설시 하중, 충돌하중)은 「KR C-08020의 5항」에 따른다.

(5) [단계 2-5] 시공단계별 해석 및 검토

- ① PSM에 의해 가설되는 교량은 경간단위별로 가설하며 가설하중을 고려하여 해석하여야 한다.
- ② 시공단계에 따라 구조계의 변화가 일어나고 하중조건이 변화한다. 따라서 시공순서에 따라 각 시공단계별로 고려해야 할 하중을 구분하고 시공단계별 해석시 고려한다.
- ③ 각 시공단계에 따라 교량 시공위치에서의 단면력도를 나타낸다.
- ④ 시공단계에 따라 콘크리트 박스단면의 상연응력과 하연응력을 나타내고 콘크리트의 허용응력을 만족하는지에 대한 검토를 수행한다. 시공단계에 따라 콘크리트의 허용응력을 초과하는 경우에는 단면을 재가정하거나 PS강재량을 조절하여 시공단계에서의 응력에 대한 안전을 만족하도록 한다.

(6) [단계 2-6] 사용하중상태 해석 및 검토

- ① 사용하중별로 단면력도를 나타낸다.
 - 자중, 2차 고정하중, 프리스트레스, 크리프 및 건조수축, 활하중, 온도하중, 지점침하, 장대레일종하중, 시동하중 및 제동하중
- ② 사용하중상태에서 콘크리트 박스단면의 상연응력과 하연응력을 구하고, 허용응력을 만족하는지 여부를 검토한다. 콘크리트의 허용응력을 초과하는 경우에는 단면을 재가정하거나 PS강재량을 조절하여 사용하중상태에서 응력에 대한 안전을 만족하도록 한다.
- ③ 각 하중에 대하여 조합하고 하중조합은 「KR C-08020」에 따른다.
- ④ 또한 다음과 같은 방식으로 하중조합을 할 수 있다.
 - 주하중
 - 주하중+지점침하+온도변화의 영향
 - 주하중+지점침하+차량횡하중



- 주하중+지점침하+시동하중 또는 제동하중
- 주하중+지점침하+풍하중
- 주하중+지점침하+차량횡하중+풍하중
- 주하중+지점침하+시동하중 또는 제동하중+풍하중

건조수축 및 크리프가 일어나기 전과 후에 대하여 각각 응력을 검토한다. 이때 각각 하중의 하중 계수는 1.0이다.

(7) [단계 2-7] 휨강도 검토

- ① 계수하중을 조합하여 하중조합중에 가장 불리한 상태의 최대·최소 단면력(계수 모멘트, 전단력, 비틀림모멘트)을 결정한다.
- ② 하중계수를 사용한 계수하중의 하중조합은 「KR C-08020의 9항」에 따른다.
- ③ 하중계수를 사용하여 하중조합을 수행한 후 이에 따른 휨, 축방향력, 전단 및 비틀림에 대한 극한 외력을 적용하여 최대 부재력을 계산한다.
- ④ 휨강도 검토는 「KR C-10050의 10항」에 따라 수행하고 철근량을 산정한다.
- ⑤ 최대/최소 PS강재량 검토는 「KR C-10050의 11항」에 따라 수행한다.

(8) [단계 2-8] 전단 및 비틀림 설계

- ① 전단 및 비틀림 설계는 「KR C-10050의 12항」과 「KR C-10020의 5항」에 따라 수행한다.
- ② 전단 및 비틀림에 대하여 검토를 수행하고, 필요한 철근량을 산정한다.

7.2.3 [단계 3] 횡방향 구조해석 및 설계

(1) [단계 3-1] 해석단면 결정

- ① 단면이 위치에 따라 시간내에서 변화하는 경우, 단면변화가 크게 발생하거나 큰 하중이 작용하는 단면을 해석단면으로 한다.

(2) [단계 3-2] 횡방향 모델링

- ① 횡방향 해석은 상부구조의 횡단면을 교축방향으로 단위길이를 갖는 뼈대(Frame)구조로 모델링하여 해석하는 방법 외에 유한요소법(FEM)이나 격자해석(grillage analysis) 등으로 해석하는 방법이 있다.
- ② 일반적으로 횡방향 해석을 위하여 충분한 정확도를 가지면서 계산이 간편한 뼈대구조 해석법이 사용되고 있다. 따라서 교축방향으로 단위길이를 갖는 뼈대구조로 모델링한다. 그러나 보다 정밀하고 정확한 해석이 요구되는 경우에는 유한요소법 등의 정밀해석방법을 사용하여 해석을 수행한다.

(3) [단계 3-3] 하중산정

- ① 고정하중
 - 자중 및 2차 고정하중을 고려한다.
 - 고정하중의 적용은 「KR C-08020의 3항」에 따른다.

② 활하중

도상케도 및 슬래브케도를 지지하는 방향, 또는 2방향 슬래브의 열차하중에 의한 휨모멘트의 설계에 있어서는 환산등분포하중을 사용한다. 즉, 슬래브의 계산에 집중하중을 사용하는 것은 계산이 매우 복잡하므로 보통 등분포하중으로 환산하여 사용한다. 케도상의 열차하중을 등분포하중으로 환산하는 방법은 여러 가지가 있지만 가장 단순하고도 충분히 안전한 방법에 의한 것이다. 따라서 이 환산등분포하중을 사용할 때 바닥판의 지간을 침목길이 b보다도 지나치게 크게 하는 것은 하중을 과다하게 계산하게 되어 비경제적인 설계가 되기 때문에 등분포하중을 재하해서 계산하도록 한다.

③ 풍하중

- 상부구조에 작용하는 풍하중 산정 : 교축직각방향으로 수평재하
- 풍하중의 적용은 「KR C-08020의 5.1항」에 따른다.

④ 탈선하중

- LS하중 또는 HL하중의 집중하중을 선로중심에서 1.5 m씩 편기하여 작용시켜 단면 검토한다.
- 탈선하중의 적용은 「KR C-08020의 6.2항」에 따른다.

⑤ 온도의 영향

상 하연 온도변화 : $\Delta T = \pm 5^{\circ}\text{C}$

⑥ 기타하중

위의 하중 이외에 추가로 고려할 필요가 있는 하중(예 : 가설시 하중, 충돌하중)은 「KR C-08020의 6항」에 따른다.

(4) [단계 3-4] 사용하중상태 해석 및 검토 (횡방향 텐던 설치시)

① 사용하중별 단면력도

- 자중, 2차 고정하중, 활하중, 풍하중, 탈선하중
- 사용하중상태 응력 검토 : 상연응력, 하연응력

(5) [단계 3-5] 단면검토 및 사용성검토

- ① 계수하중을 조합하여 가장 불리한 상태의 최대·최소 단면력을 결정한다.
- ② 계수하중의 하중조합은 「KR C-08020의 9항」에 따른다.
- ③ 휨강도 검토는 「KR C-10020의 5항」에 따라 수행하고 철근량을 산정한다.
- ④ 전단 검토는 「KR C-10020의 5항」에 따라 수행하고 철근량을 산정한다.
- ⑤ 균열 검토는 「KR C-08040」에 따라 수행한다.
- ⑥ 처짐 검토는 「KR C-08050」에 따라 수행한다.



7.2.4 [단계 4] 격벽 설계

(1) [단계 4-1] 단부지점부 격벽 설계

- ① 콘크리트 박스거더는 T형 거더에 비하여 횡방향 강성이 강하나 격벽이 없으면 주형직각방향의 강성감소로 인하여 바닥판, 받침 등의 구조에 해로운 영향을 미칠 수 있으므로 단부와 중간지점부에는 격벽을 설치하는 것을 원칙으로 하며 충분한 폭을 가져야 한다.
- ② 일반적으로 50m 지간의 교량에 대하여 단부지점에서는 2.0m 정도의 구간에 격벽을 설치한다.
- ③ 격벽을 해석하기 위하여 대체로 유한요소법에 의하여 격벽의 주압축응력과 주인장응력의 궤적을 구하고 스트럿-타이 모델을 구성한다. 해석 모델링으로 구한 단면력을 토대로 수평, 수직 방향 철근량을 산정한다.
- ④ 2차원 스트럿-타이 모델 구성이 어려운 3차원 구조의 경우에는 유한요소해석법에 의하여 소요철근을 산정할 수 있다.

(2) [단계 4-2] 중간지점부 격벽 설계

- ① 일반적으로 50m 지간의 교량에 대하여 중간지점에서는 1.5m 정도의 구간에 격벽을 설치한다.
- ② 중간지점부의 경우도 단부지점부와 유사한 방법으로 스트럿-타이 모델을 구성하여 단면력을 구하고 수평, 수직 방향 철근량을 산정한다.

7.2.5 [단계 5] 정착부 설계

(1) [단계 5-1] 국소구역 설계

- ① PS강재의 정착구역은 국소구역과 일반구역으로 구분되는데, 국소구역이란 각 정착장치를 둘러싸고 있는 부분이고, 일반구역이란 단부로부터 거더높이만큼 떨어진 구간이다. 따라서 정착부 설계는 정착구 배면의 콘크리트 지압응력과 정착부의 국부인장력 검토를 실시하여 보강철근을 배근하는 것으로 이루어 진다.

(2) [단계 5-2] 일반구역 설계

- ① PS강재 정착장치 부근의 콘크리트는 PS강재에 직각방향으로 생기는 인장응력과 정착장치 뒷면의 콘크리트가 압축을 받기 때문에 정착장치와 콘크리트 상하연단사이의 콘크리트에 인장응력이 발생하여 콘크리트에 균열이 생긴다든지 모서리의 콘크리트가 떨어져 나갈 염려가 있으므로 이에 대한 보강이 필요하다.
- ② 부재 중간에 정착장치를 둘 때에는 정착장치 부근의 콘크리트를 철근으로 보강하여야 하며 돌출부에 정착하는 경우에는 PS강재에 직각방향으로 생기는 인장응력, 정착장치와 콘크리트 상하연단 사이의 인장응력, 정착장치 전면에 발생하는 인장력, PS강재 곡률에 의한 인장력 및 전단 마찰력에 대한 보강철근을 배근하여야 한다.

7.2.6 [단계 6] 지점반력 및 이동량 산정

(1) [단계 6-1] 지점반력 산정

- ① 지속하중과 변동하중에 대하여 교대 및 교각에 발생하는 반력을 산정한다.
- ② 지점반력을 사용받침의 용량을 결정하는데 사용된다.

(2) [단계 6-2] 이동량 산정

신축이음의 이동량은 이 편람의 받침 및 신축이음장치를 참조하여 산정한다. 다만, 산정된 이동량은 「KR C-08100의 3.5항」의 기준에 따라 수행한다.





해설 2. FSM

1. 설계일반

PSC교의 설계는 프리스트레스를 도입할 때부터 구조물의 수명기간 동안 작용할 수 있는 모든 위험한 하중단계에서의 강도(강도설계)와 사용상태에서의 거동(허용응력설계)을 기초로 수행한다. PSC교의 상세설계와 관련된 설계기준은 [철도설계지침]에 제시되어 있으며, 설계이론 및 일반 고려사항과 기본가정 등에 대해서는 [철도설계지침]에 제시되어 있다.

1.1 하중

PSC 박스거더교의 설계에 적용되는 하중은 [철도설계지침]을 참고한다. 특수한 경우에는 각각에 맞는 하중의 종류와 크기를 결정할 필요가 있다. 특히, 부정정구조물의 경우 온도변화, 크리프, 건조수축 등에 대해서 반드시 고려하여야 하며, 가설공법에 따라 교량 가설 중에 발생 가능한 가장 불리한 하중조합에 대하여 안전성을 검토하여야 한다.

1.2 구조해석

구조해석은 설계시 가정된 구조물이 설계기준의 요구조건을 만족하는지 검사하기 위해 필요한 필수적인 과정이다. 특히, PSC 박스거더교는 시공 단계별 구조해석이 필요하며, 현장치기 포스트텐션 교량의 경우에는 작업하중으로 인해 응력이 발생하므로 이를 계산에 고려하여야 하며, 또한 프리스트레싱에 의한 2차모멘트의 영향을 고려해야 한다.

PSC 박스거더교는 판구조 요소들의 복합체이므로 실제 거동은 매우 복잡하고, 횡방향과 종방향의 거동이 상호 연계되어 나타나지만 일반적으로는 종방향과 횡방향 거동을 분리시켜서 구조해석을 실시한다.

1.2.1 종방향 구조해석

박스거더교의 대표적인 단면형상에는 단일박스거더, 다중박스거더, 다주형박스거더의 3종류가 있다. 각 단면형상, 교폭 및 지간의 비에 따라 주거더의 단면력을 산출할 때의 해석이론이 다르므로 기본 설계된 박스거더에 적합한 해석이론을 이용하는 것이 가장 중요하다. 판이론을 적용하면 모든 경우에 적합하지만 실무에서는 일반적으로 단순한 해석이론을 적용할 수 있다.

- (1) 단일박스거더교 : 단일박스거더교는 비틀림강성이 크고 활하중에 대한 하중분배도 양호하므로 박스거더 전단면을 하나의 거더로 보고 교축방향 단면력을 산출할 수 있다. 사각이 20° 이하인 경우는 단일박스거더교에도 격자구조이론을 이용하거나 판요소를 이용해서 단면력을 산출하는 것이 좋다.

- (2) 다주형박스거더교 : 다주형박스거더교는 판이론을 적용하지 않는다면 격자구조이론을 적용하여 주거더 단면력을 산출하는 것이 원칙이다. 이 경우 각 박스거더를 하나의 거더로 하고 격벽이 각 박스거더를 연결하는 격자구조로 모델링하는 것이 일반적이다. 따라서 단면정수의 산정은 각 박스거더마다의 단면적, 단면2차모멘트 이외에 비틀림강성을 계산할 필요가 있다. 또한 격벽에 관해서도 단면정수를 구해야만 한다. 다주박스거더교의 경우 지점상 및 지간내에 격벽을 설치해야 한다. 격벽이 없으면 주거더 직각방향의 강성이 작아져 하중분배가 나쁘고, 주거더 상호의 처짐 차이 및 비틀림에 의한 변형에 의해 바닥판에 균열이 발생할 가능성이 매우 높다. 곡선교에서는 일반적으로 활하중 편재시의 비틀림모멘트에 의한 휨응력의 검토는 생략해도 좋으나, 비틀림모멘트에 의해 추가되는 전단응력은 반드시 고려해야 한다.
- (3) 다중박스거더교 : 다중박스거더교에서는 교량의 전폭과 지간의 비(전폭/지간)가 0.5 이하인 경우에 박스거더 전단면을 하나의 보로 보고 교축방향 단면력을 산출할 수 있다. 그러나 0.5 이상의 비교적 폭이 큰 다중박스거더의 경우는 판요소를 사용하여 유한요소해석을 실시하거나, 직교이방성판이론 또는 격자구조이론에 의해 단면력을 산출하는 것이 원칙이다.

1.2.2 횡방향 구조해석

횡방향 구조해석시 PSC 합성거더교에서는 풍하중, 지진하중, 지점침하, 원심하중 및 제동하중 등은 고려하지 않으며 온도하중에 대한 검토는 일반적으로 생략한다.

그러나 PSC 박스거더교에서는 온도하중을 고려하여 해석하여야 한다. 또한 교면에 방음벽 등 특수 가설물이 영구적으로 설치되는 경우에는 이에 대한 하중을 고려하여 부재 검토를 실시하여야 한다. 활하중은, 일반적으로 특수한 경우를 제외하고는 LS하중에 대해서 검토한다.

박스거더의 바닥판 슬래브를 설계할 경우 프리스트레스 하중은 횡방향 프리스트레스를 도입할 경우에만 고려하여도 무방하나, 종방향 긴장재의 만곡으로 인한 연직방향 분력이 클 경우에는 횡방향 박스거더의 구조해석 시 긴장재의 만곡으로 인한 연직방향 분력을 고려하여 해석해야 한다.



2. 설계흐름도

2.1 설계흐름도의 구성

(1) 주설계단계

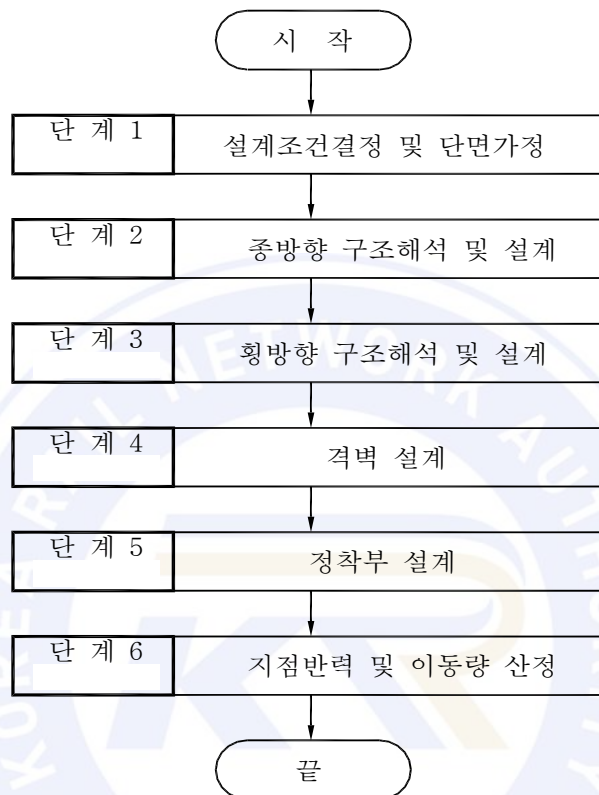


그림 41. 주설계흐름도

(2) [단계 1] 설계조건결정 및 단면가정

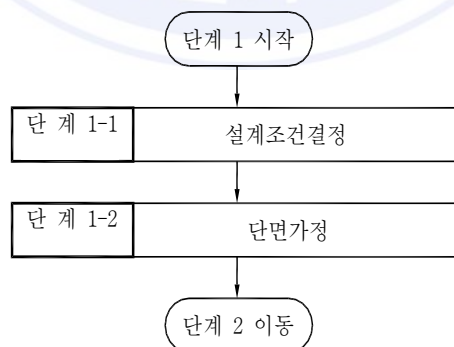


그림 42. 설계조건결정 및 단면가정

(3) [단계 2] 종방향 구조해석 및 설계

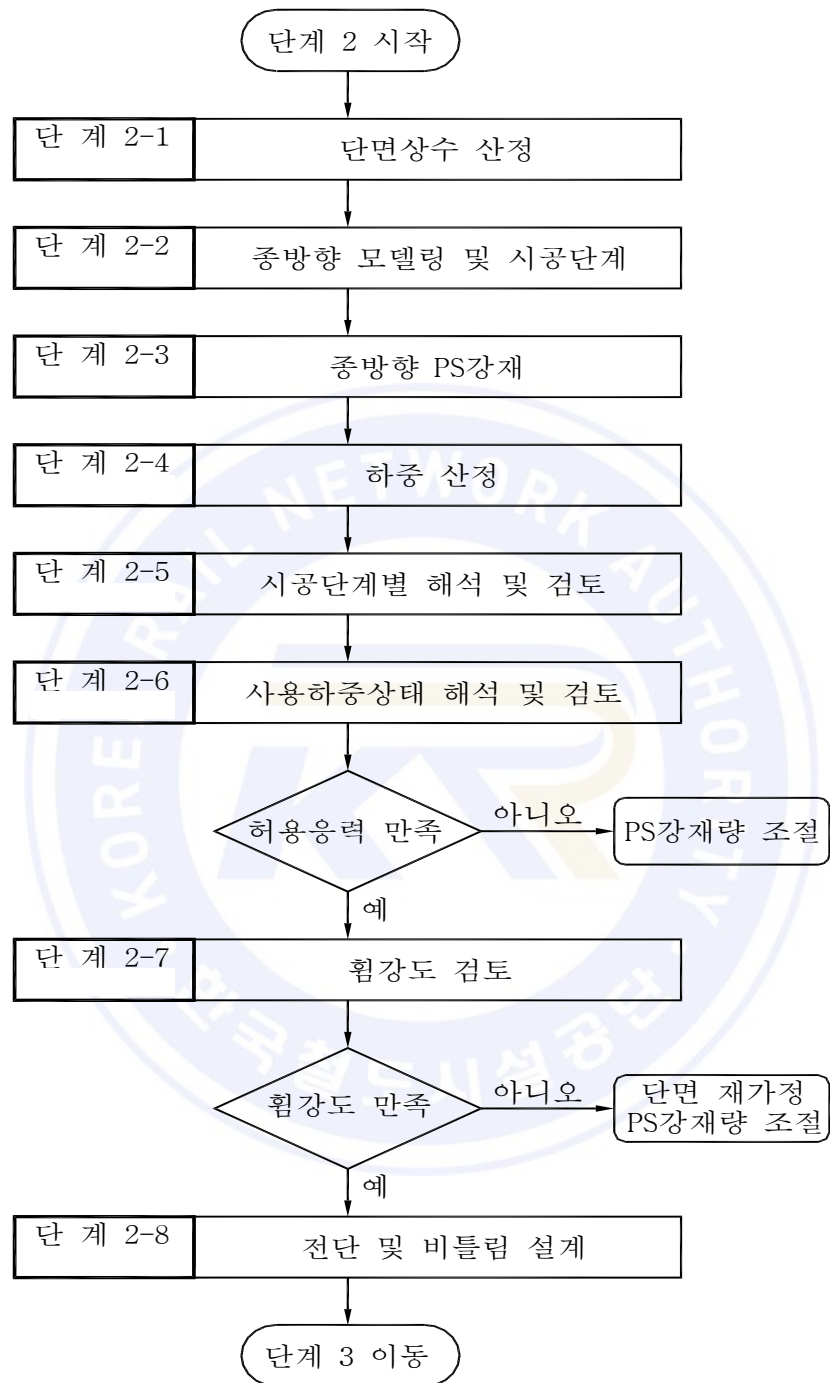


그림 43. 종방향 구조해석 및 설계



(4) [단계 3] 횡방향 구조해석 및 설계

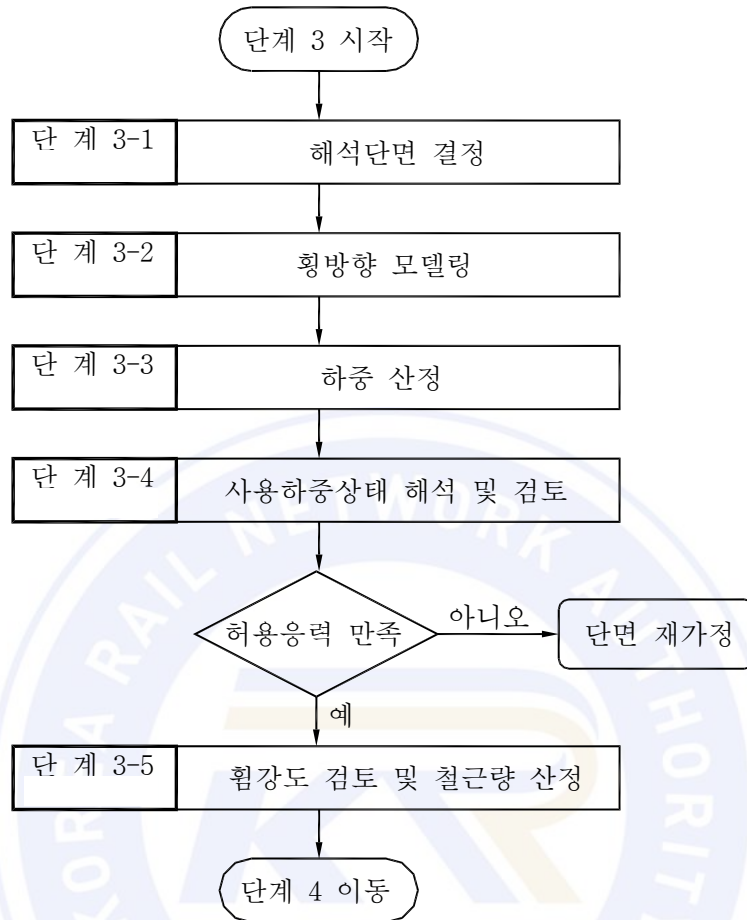


그림 44. 횡방향 구조해석 및 설계

(5) [단계 4] 격벽설계

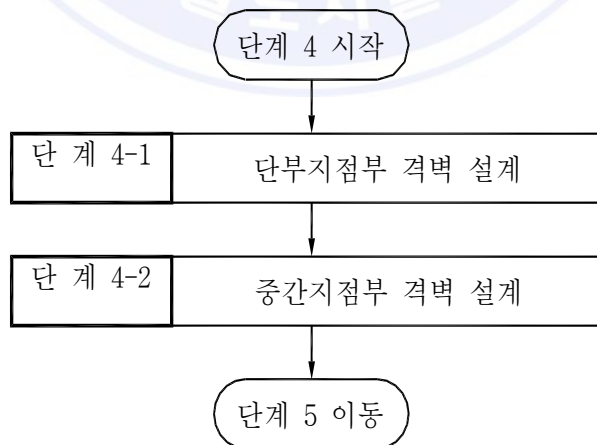


그림 45. 격벽 설계

(6) [단계 5] 정착부설계

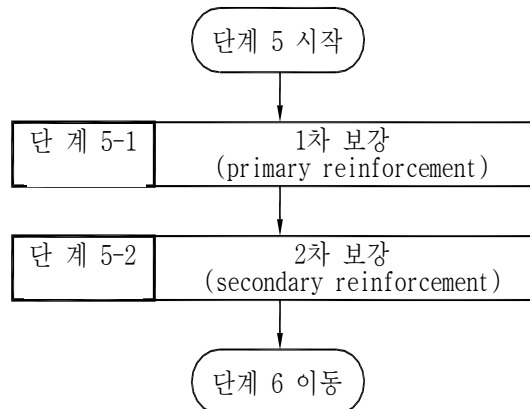


그림 46. 정착부 설계

(7) [단계 6] 지점반력 및 이동량 산정

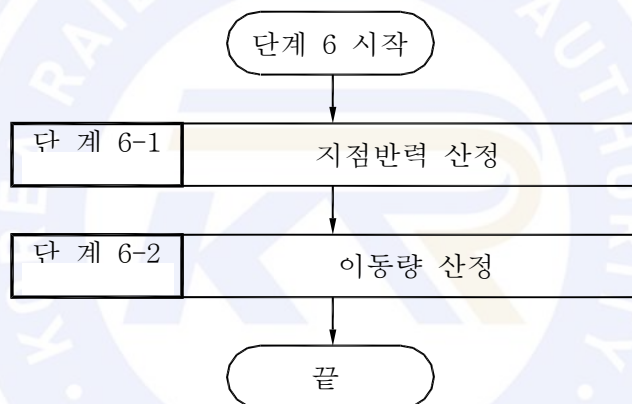


그림 47. 지점반력 및 이동량 산정

2.2 설계단계별 고려사항

2.2.1 [단계 1] 설계조건 결정 및 단면가정

(1) [단계 1-1] 설계조건 결정

- ① 선로등급은 [철도설계지침]의 규정에 따른다.
- ② 콘크리트, PS강재, 철근 등 주요 사용재료 및 사용재료의 허용응력은 「KR C-10010의 4항」의 규정을 만족해야 한다.
- ③ 설계방법은 허용응력설계법 및 강도설계법을 적절하게 선택하여 적용한다. 즉, 종방향 설계는 허용응력설계법 및 강도설계법을 적용하고, 횡방향 설계는 원칙적으로 강도설계법을 적용하나, 횡방향 텐던 설치시 두 설계법을 모두 적용하여야 한다.
- ④ 사용 전산프로그램은 프리스트레스의 영향을 고려할 수 있고 그 신뢰성이 검증된 프로그램이어야 한다. 따라서 프리스트레스를 고려할 수 있는 PSC교 전용 해석프로그램을 사용하는 것이 바람직하다.



(2) [단계 1-2] 단면가정

- ① FSM에 의해 가설되는 교량의 단면은 일반부, 시공이음부, 중간지점부, 단부지점부 등으로 구성된다.
- ② 시공이음부 단면은 프리스트레스 도입을 위하여 정착단을 설치해야하므로 이를 고려하여 단면을 가정한다.

2.2.2 [단계 2] 종방향 구조해석 및 설계

(1) [단계 2-1] 단면상수 산정

- ① 보통콘크리트를 사용하고 종방향, 횡방향 포스트텐션 방식을 도입한 프리캐스트 및 현장치기 콘크리트의 단일박스 거더교, 다중박스 거더교의 단순교와 연속교의 설계에서 구조해석, 휨모멘트 및 전단력의 영향을 계산하기 위한 단면의 성질은 유효플랜지폭을 사용한다. 유효플랜지폭상의 비대칭하중의 영향은 무시해도 좋다.
- ② 슬래브가 거더와 일체로 간주되는 보통의 슬래브 지간과 거더 간격을 갖는 현장치기 박스거더에서는 슬래브의 전폭이 압축에 유효하다고 본다.

(2) [단계 2-2] 종방향 모델링 및 시공단계

- ① 교량의 선형 및 단면 형태를 고려하여 해석 모델을 결정한다.
- ② 종방향 시스템 모델링 방법은 각 단면 모양(단일 박스거더, 다주형 박스거더, 다중 박스거더) 및 교폭과 지간의 비에 따라 달라질 수 있다. 판이론을 적용하면 모든 경우에 적합한 설계가 가능하다.
- ③ FSM에 의해 가설되는 교량은 매 경간별로 시공단계를 결정하여야 한다. 그리고 시공단계를 고려하여 매 경간 상부구조 시공이 진행되는 동안의 해석이 필수적이고 또한 이러한 해석결과를 조합하여 최대·최소 단면적 등을 찾아서 설계하여야 한다. 따라서 교량 구조물 전체를 모델링하여 콘크리트 박스 세그먼트를 활성화(Activation) 시켜가며 경간진행 단계별로 구조해석을 수행한다.
- ④ 지간 내의 각 위치에 따라 일반부, 시공이음부, 중간지점부, 단부지점부 등으로 구성되므로, 각 위치에 따라 해당 단면의 단면상수에 대한 정확한 입력이 필요하다.

(3) [단계 2-3] 종방향 PS강재의 배치

- ① 종방향으로 필요한 PS강재량을 가정하고, 이에 따라 PS강재의 배치계획을 세운다.
- ② FSM에 의한 교량의 상부구조에 대한 PS강재 배치방법은 MSS의 경우와 유사하며 다음과 같은 유형이 있다.
 - 모든 텐던을 동일한 위치에서 접속장치(Coupler)를 사용하여 접속시키는 방법
 - 텐던 일부만 시공이음부에서 정착시키고, 나머지는 연속으로 배치하는 방법
 - 지점부 위에서 텐던을 엇갈리게 중복 배치하는 방법
 - 혼합배치 방법
- ③ 일반적으로 혼합배치 방법을 사용하여 PS강재의 배치를 단순하면서도 효율적으로

하여 마찰손실을 감소시킨다.

(4) [단계 2-4] 하중 산정

FSM으로 시공되는 PSC 박스거더교는 MSS, ILM, FCM 등 특수가설공법으로 시공되는 박스거더교와 같이 특별한 하중(경계조건 변화, 가설장비에 의한 하중 등)을 고려하지 않아도 되므로 일반적으로 도로교설계기준 및 콘크리트구조설계기준의 하중을 적용한다.

① 고정하중

- 자중 : 구조물의 자중과 격벽, 정착블록 및 방향변화블록 등의 자중을 산정
- 2차 고정하중 : 도상, 레일, 침목, 전차선전주 등을 산정

② 프리스트레스

- 가정한 PS강재량에 대하여 초기 프리스트레스 도입력을 결정
- 프리스트레스 손실을 고려
 - 즉시 손실 : 정착장치에서의 슬립량, PS강재와 쉬스 사이의 마찰, 콘크리트의 탄성수축
 - 장기 손실 : 콘크리트의 크리프, 콘크리트의 건조수축, PS강재의 릴랙세이션
- 구조적 효율성을 고려하여 최적의 프리스트레스 강선량을 결정

③ 크리프 및 건조수축

- 공단계에 따라 각 부재가 서로 다른 재령을 갖는 경우의 크리프 및 건조수축 효과 고려
- 콘크리트의 크리프 계수 및 건조수축 변형률 산정을 위한 각 시공단계별 시공일수 계산
- 각 시공단계별 콘크리트의 크리프 계수 및 건조수축 변형률 산정

④ 활하중

- 선로 등급, 충격 하중, 원심하중, 시동·제동하중 등을 고려하여 산정
- 하중 재하는 휨모멘트가 최대인 경우와 비틀림 모멘트가 최대인 경우로 구분
- 활하중의 적용은 [철도설계지침]에 따른다.

⑤ 온도변화의 영향

- 상하연 온도변화 : $\Delta T = \pm 5^{\circ}\text{C}$
- 종방향 온도변화 : $\Delta T = \pm 15^{\circ}\text{C}$
- 가동받침의 이동량 산정시 종방향 온도변화 : $\Delta T = -5^{\circ}\text{C} \sim +35^{\circ}\text{C}$

⑥ 지점이동

지점이동의 적용은 [철도설계지침]에 따른다.

⑦ 풍하중

상부구조에 작용하는 풍하중 산정 : 교축직각방향으로 수평재하



⑧ 기타하중

위의 하중 이외에 추가로 고려할 필요가 있는 하중 경우(예 : 가설시 하중, 충돌하중)는 [철도설계기준]에 따른다.

(5) [단계 2-5] 시공단계별 해석 및 검토

- ① FSM에 의해 가설되는 교량은 경간 단위별로 가설하며, 이에 따른 시공 순서를 고려하여 시공단계별 해석을 수행한다. 따라서 경간단위별로 시공 순서를 가정한다.
- ② 시공단계에 따라 구조계의 변화가 일어나고 하중 조건이 변화한다. 따라서 시공 순서에 따라 각 시공단계별로 고려해야 할 하중을 구분하고, 시공단계별 해석시 고려한다.
- ③ 각 시공단계에 따라 교량 시공 위치에서의 단면력도를 나타낸다.
- ④ 시공단계에 따라 콘크리트 박스단면의 상연응력과 하연응력을 나타내고, 콘크리트의 허용응력을 만족하는지에 대한 검토를 수행한다. 시공단계에 따라 콘크리트의 허용응력을 초과하는 경우에는 단면을 재가정하거나 PS강재량을 조절하여 시공단계에서의 응력에 대한 안전을 만족하도록 한다.

(6) [단계 2-6] 사용하중상태 해석 및 검토

- ① 사용하중별로 단면력도를 나타낸다.
자중, 2차 고정하중, 프리스트레스, 크리프 및 건조수축, 활하중, 온도하중, 지점침하
- ② 사용하중상태에서 콘크리트 박스 단면의 상연응력과 하연응력을 구하고, 허용응력을 만족하는지 여부를 검토한다. 콘크리트의 허용응력을 초과하는 경우에는 단면을 재가정하거나 PS강재량을 조절하여 사용하중상태에서 응력에 대한 안전을 만족하도록 한다.
- ③ 각 하중에 대하여 조합하고, 하중조합은 [철도설계지침]에 따른다.
- ④ 건조수축 및 크리프가 일어나기 전과 후에 대하여 각각 응력을 검토한다. 이때 각각 하중의 하중계수는 1.0이다.

(7) [단계 2-7] 휨강도 검토

- ① 계수하중을 조합하여 하중조합 중에 가장 불리한 상태의 최대·최소 단면력(계수 모멘트, 전단력, 비틀림 모멘트)을 결정한다.
- ② 하중계수를 사용한 계수하중의 하중조합은 [철도설계지침]에 따른다.
- ③ 하중계수를 사용하여 하중조합을 수행한 후 이에 따른 휨, 축방향력, 전단 및 비틀림에 대한 극한 외력을 적용하여 최대 부재력을 계산한다.
- ④ 휨강도 검토는 [철도설계지침]에 따라 수행하고, 철근량을 산정한다.

(8) [단계 2-8] 전단 및 비틀림 설계

- ① 전단 및 비틀림 설계는 [철도설계지침]에 따라 수행한다.
- ② 전단 및 비틀림에 대하여 검토를 수행하고, 필요한 철근량을 산정한다.

2.2.3 [단계 3] 횡방향 구조해석 및 설계

(1) [단계 3-1] 해석 단면

- ① 단면이 위치에 따라 시간 내에서 변화하는 경우, 단면 변화가 크게 발생하거나 큰 하중이 작용하는 단면을 해석단면으로 한다.
- ② FSM에 의해 가설하는 교량의 경우는 일반부 단면에 대하여 횡방향 구조해석 및 설계를 수행한다.

(2) [단계 3-2] 횡방향 모델링

- ① 횡방향 해석은 상부구조의 횡단면을 교축방향으로 단위길이를 갖는 뼈대(Frame)구조로 모델링하여 해석하는 방법 외에 유한요소법이나 격자해석 등으로 해석하는 방법이 있다.
- ② 박스거더의 횡방향 구조해석에 대한 규정은 [철도설계지침]를 따라야 한다.
- ③ 횡방향 해석에 대하여 간편한 뼈대구조 해석법을 사용하는 경우가 많다. 이 경우 활하중에 대해서는 영향면 또는 부분 유한요소해석법 등을 적용하면 바닥판 부분은 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다. 하지만, 복부 및 하부플랜지의 경우에는 과도한 단면력이 산정되게 된다. 따라서 실제 교량의 일부분에 대하여 3차원 유한요소 해석을 실시함으로써 보다 정확한 단면력을 산정할 수 있다. 한편, 영향면 등을 이용한 뼈대해석을 행한 경우 복부 및 하부플랜지의 배근은 [철도설계지침]을 따라야 한다.

(3) [단계 3-3] 하중 산정

① 고정하중

자중 및 2차 고정하중을 고려한다.

② 활하중 : LS하중

세그먼트를 상자형 골조구조로 해석할 경우에는 플랜지와 복부 사이의 변단면까지 고려하여 플랜지를 변단면부재로 보고 해석해야 하며 다음을 따라야 한다.

- 기관차하중은 최대모멘트를 줄 수 있는 곳에 재하시켜야 하며, 탄성해석 결과에 의하여 각 재하 위치에 대한 기관차하중의 유효 종방향 분포를 구해야 한다.
- 편심재하 또는 구조의 비대칭 기하형상 때문에 생기는 복부전단 증가 및 기타 영향을 고려해야 한다.
- 박스형 단면의 상부플랜지에 미치는 활하중과 충격모멘트 효과를 평가할 때는 영향면을 사용하는 방법이나 기타 탄성해석방법을 사용해도 된다.
- 프리스트레싱에 의한 탄성 및 크리프 변형과 건조수축도 횡방향해석에 고려해야 한다.
- 사용하중하에서의 응력을 계산할 때는 프리스트레싱에 의한 2차모멘트의 영향을 포함시켜야 한다.



- 극한상태의 모멘트와 전단력을 계산할 때는 프리스트레싱(하중계수1.0)으로 인한 2차모멘트나 전단력을 계수고정하중 및 활하중 조합에 의한 모멘트와 전단력에 대수적으로 합해야 한다.

③ 온도하중

상하연 온도변화 : $\Delta T = \pm 5^{\circ}\text{C}$

- ④ 설계에 사용되는 하중은 철도교설계기준에 주어진 일반적인 하중 외에 가설방법이나 구조물의 기하형상 등에 의하여 추가로 발생하는 하중이 고려되어야 한다.

(4) [단계 3-4] 사용하중상태 해석 및 검토

① 사용하중별 단면력도

자중, 2차 고정하중, 횡방향 프리스트레스, 활하중, 온도하중

② 사용하중상태 응력검토 : 상연응력, 하연응력

(5) [단계 3-5] 휨강도 검토 및 철근량 산정

- ① 계수하중을 조합하여 가장 불리한 상태의 최대·최소 단면력을 결정한다.
- ② 계수하중의 하중조합은 [철도설계지침]에 따른다.
- ③ 휨강도 검토는 [철도설계지침]에 따라 수행하고, 철근량을 산정한다.

2.2.4 [단계 4] 격벽 설계

(1) [단계 4-1] 단부지점부 격벽 설계

- ① 콘크리트 박스거더는 T형거더에 비하여 횡방향 강성이 강하나, 격벽이 없으면 주형 직각방향의 강성감소로 인하여 바닥판, 받침 등의 구조에 해로운 영향을 미칠 수 있으므로 단부와 중간지점부에는 격벽을 설치하는 것을 원칙으로 하며, 충분한 폭을 가져야 한다.
- ② 일반적으로 40 m 지간의 교량에 대하여 단부 지점에서는 2.0 m 정도의 구간에 격벽을 설치한다.
- ③ 격벽을 해석하기 위하여 대체로 유한요소법에 의하여 격벽의 주압축응력과 주인장 응력의 궤적을 구하고 스트럿-타이 모델을 구성한다. 해석 모델링으로 구한 단면력을 토대로 수평, 수직 방향 철근량을 산정한다.
- ④ 2차원 스트럿-타이 모델 구성이 어려운 3차원 구조의 경우에는 유한요소해석법에 의하여 소요철근을 산정할 수 있다.

(2) 단계 4-2] 중간지점부 격벽 설계

- ① 일반적으로 40 m 지간의 교량에 대하여 중간지점부에서는 1.5 m 정도의 구간에 격벽을 설치한다.
- ② 중간지점부의 경우도 단부지점부와 유사한 방법으로 스트럿-타이 모델을 구성하여 단면력을 구하고 수평, 수직 방향 철근량을 산정한다.

2.2.5 [단계 5] 정착부 설계

(1) [단계 5-1] 1차 보강

- ① 정착장치를 포함한 국소구역의 단면과 보강철근은 긴장재의 힘을 주위의 콘크리트 구조에 안전하게 전달해야 하고, 이때의 하중의 전달을 위하여 지압판 형식이나 특수정착장치(나선철근, 스테럽, 기타)를 사용해도 좋지만, 어느 것이든 국소구역의 하중을 정착장치로부터 일반구역으로 안전하고 확실하게 전달할 수 있는 기능이 확인된 것을 사용해야 한다.
- ② 프리스트레스를 도입하기 위하여 정착구가 설치된 시공이음부에 대하여 정착부 보강에 대한 설계를 수행한다.
- ③ 정착부 설계는 [철도설계지침]의 규정에 따른다.
- ④ 일반적으로 정착부의 보강은 1차 보강(Primary Reinforcement)과 2차 보강(Secondary Reinforcement)으로 이루어진다. 이중 1차 보강은 정착부 주변의 최소 부재 치수와 관계된다.

(2) [단계 5-2] 2차 보강

- ① 정착부에서 프리스트레스 힘이 전단면에 분포하기까지의 구간에 대하여 2차 보강을 한다.
- ② 프리스트레스 힘에 의하여 정착부 주위를 보강하여 균열이 발생하지 않도록 복부, 상부슬래브, 하부슬래브에 대하여 작용하는 파열력(Bursting Force)을 구하여 보강 철근량을 산정한다.

2.2.6 [단계 6] 지점반력 및 이동량 산정

(1) [단계 6-1] 지점반력 산정

- ① 지속하중과 변동하중에 대하여 교대 및 교각에서 발생하는 반력을 산정한다.
- ② 지점반력은 사용받침의 용량을 결정하는데 사용된다.

(2) [단계 6-2] 이동량 산정

- ① 온도변화, 크리프 및 건조수축, 활하중, 프리스트레스의 영향을 고려하여 가동받침의 이동량을 산정한다.
- ② 가동받침의 이동량 산정은 [철도설계지침]의 규정을 따른다.



RECORD HISTORY

Rev.0('12.12.5) 철도설계기준 철도설계지침, 철도설계편람으로 나누어져 있는 기준 체계를 국제적인 방법인 항목별(코드별)체계로 개정하여 사용자가 손쉽게 이용하는데 목적을 둬.

