

온태리오형 교량床板 設計

金 巨 煥

韓國建設技術研究院

構造研究室 先任研究員, 工博

1. 序 言

1970년대 후반부터 北美지역에서는 철근콘크리트 교량床板의 耐荷力에 대하여 많은 研究가 수행되었다. 교량상판슬라브는 AASHTO⁽¹⁾나 우리나라 도로교표준시방서와 같이 彈性解析결과를 利用한 方法으로 설계하여 왔다. 그러나 최근 캐나다와 미국에서 수행된 연구결과에 의하면 교량상판의 내하력은 슬라브에 發生하는 面內壓縮應力에 의하여 증가되어 재래식 설계방법에 의하여 추정된 強度를 훨씬 초과하는 것으로 나타났다. 이러한 面內壓縮應力이 發生하는 現象을 “아치현상”이라고 하며 이것이 現行 캐나다온태리오州의 道路橋設計規準(Ontario Highway Bridge Design Code OHBDC)⁽²⁾에 規定되어 있는 교량상판슬라브의 經驗的設計方法의 根幹이 된다. OHBDC의 규정에 의하여 설계된 교량상판은 AASHTO 규정에 의한 것보다 철근이 적게 소요되어 경제적이며 이에 따라 철근부식의 우려가 감소되고 상판의 노후화를 지연시킬 수 있는 장점을 지니고 있다. 이 OHBDC 규정의 經驗的設計方法에 의하여 設計된 橋梁床板을 “온태리오형 橋梁床板”이라 부른다.

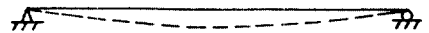
本橋에서는 “온태리오형 교량상판”이 개발된 理論的, 歷史的 背景에 대하여 說明하고 온태리오형 교량상판의 장점과 이용현황 및 추세에 대하여 기술하고자 한다.

2. 理論的背景

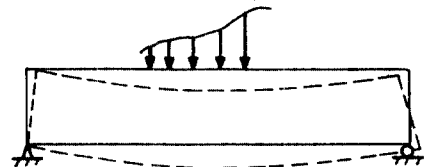
그림1과 같이 單純支持된 철근콘크리트 보는 수직하중에 대하여 보의 引張緣端이 자유롭게 伸張될 수 있다. 이러한 보는 보통의 경우 휨과 전단만을 받는 一次元의 線部材로 해석되기 때문에 軸方向力이 發生하지 않는다. 또한 그림 1.A와 같이 양쪽 支點의 휨방향 이동이 구속된다 하더라도 兩支點이 中立軸에 위치하면 역시 축방향력은 發生하지 않는다.

그러나 그림 2.B와 같이 양지점의 휨방향

A) SUPPORTS AT NEUTRAL AXIS (THICKNESS NEGLECTED)



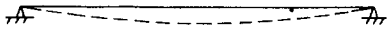
B) SUPPORTS AT BOTTOM FIBER (THICKNESS CONSIDERED)



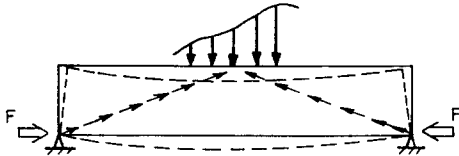
WITHOUT ARCHING ACTION

그림 1 단순지지보 지점의 휨구속이 없는 경우

A) SUPPORTS AT NEUTRAL AXIS
(THICKNESS NEGLECTED)



B) SUPPORTS AT BOTTOM FIBER
(THICKNESS CONSIDERED)



WITH ARCHING ACTION

그림 2 단순지지보 지점의 횡구속이 있는 경우 REINFORCEMENT

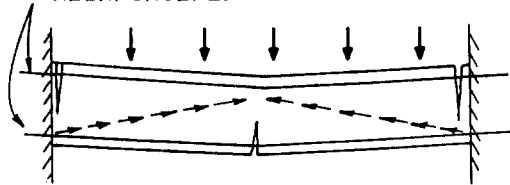


그림 3 균열된 보에서의 아치 현상

이동이 구속되고 지점이 중립축보다 아래에 위치하면 부재의 두께에 대한 효과로 휨모멘트와 전단력이외에 축방향력이 발생하게 된다. 이러한 현상을 많은 교량관계문헌에서는 일반적으로 “아치現象”(arching action)이라고 부르고 있으며 부재의 두께(높이)對 支間長의 비가 작은 細長한 부재에서도 발생한다.

그림 3과 같이 兩端固定된 철근콘크리트 보로 外力이 設計荷重에 달하면 콘크리트에 미세하나마 균열이 발생한다. 이 보를 일차원의 線部材로 해석하면 균열의 발생여부에 관계없이 축방향력, 즉 아치현상이 일어나지 않으나 부재의 두께를 고려하면 콘크리트의 균열로 인하여 축방향력이 생기게 된다. 왜냐하면 휨에 의한 균열로 인하여 부재 中立軸이 支點部에서는 보의 下部緣端쪽으로, 中央部에서는 보의 下部緣端쪽으로 이동하게 되며 이로 인하

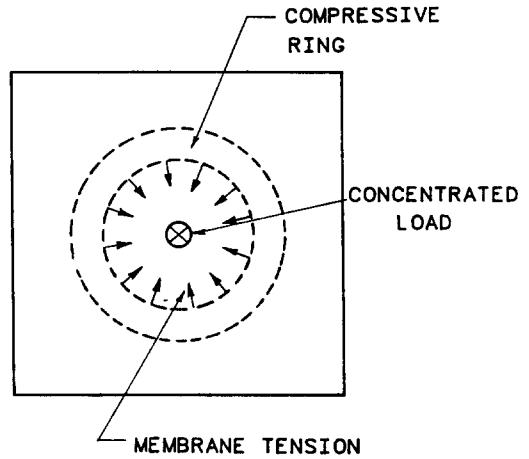
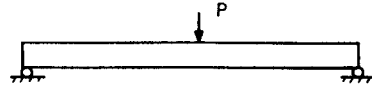


그림 4 정방형슬라브의 면내인장응력

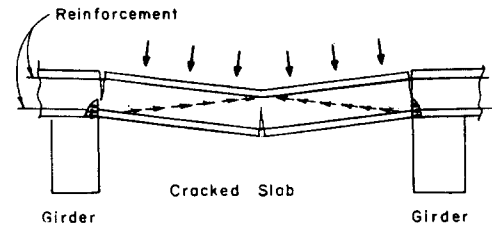
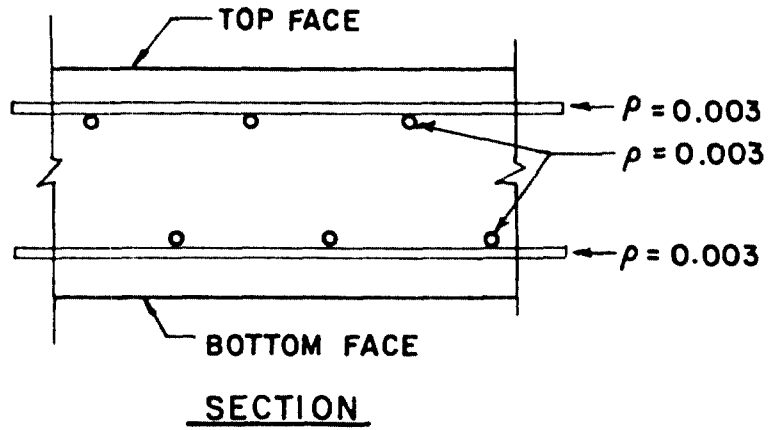


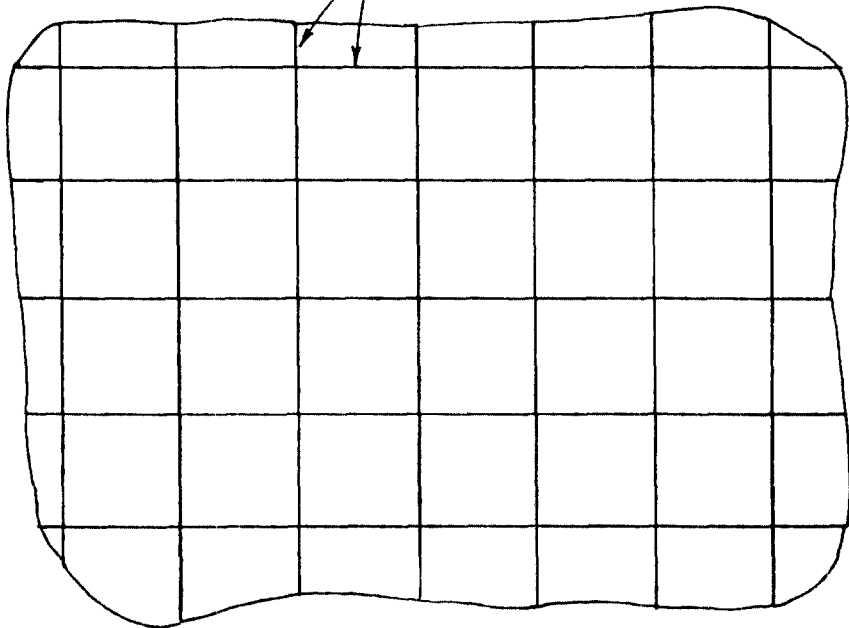
그림 5 균열된 슬라브에서의 아치현상

여 작은 처짐에 의해서도 아치현상이 일어나게 된다.

위와같은 아치현상은 슬라브의 경우에도 마찬가지로 원리로 발생하게 된다. 일반적인 板理論은 모든 荷重과 支持點이 板의 中央에 作用하고 위치하며, 하중이 加해져도 변형되지 않는다고 가정하고 있다. 그러나 이 가정은 특수한 경우에만 사실이며 일반적인 板의 경우에는 中立面에 引張變形이 생기게 된다. 예를들어 그림4와 같이 中央에 集中荷重을 받는 정방형 슬라브는 휨에 의한 처짐과 함께 슬라브의 중앙부분이 신장되어 面內引張應力이 생기게 되며 이 인장응력은 주위의 압축고리(Com-

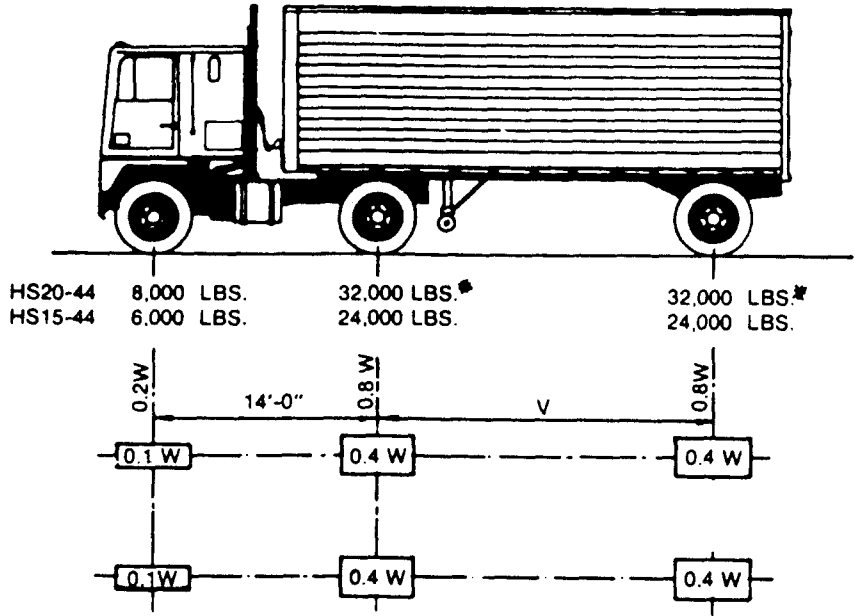


Equal Reinforcement in Both Directions (Top and Bottom)

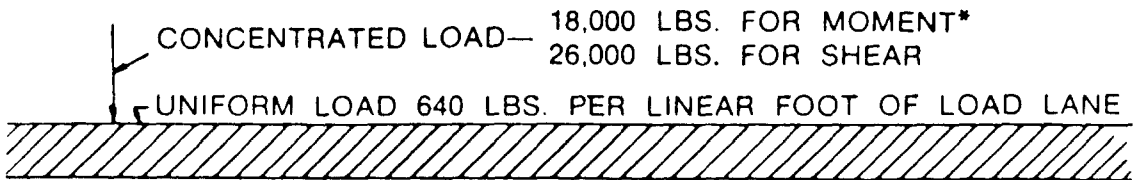


PLAN

그림 6 경험적설계방법에 의한 철근 배근도



(A) Truck Loading



(B) Lane Loading

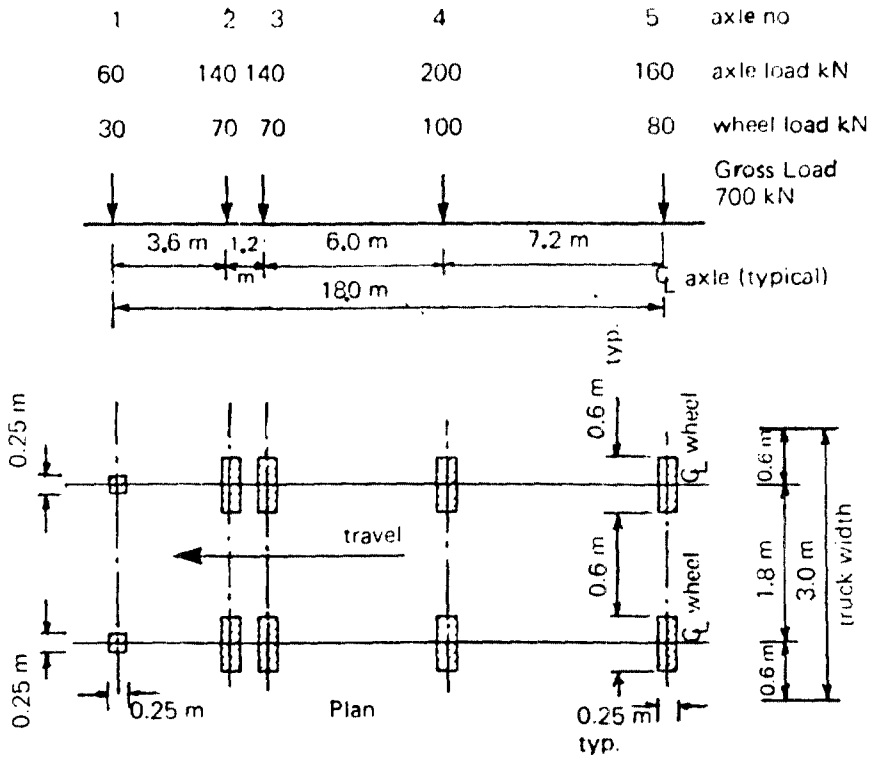
그림 7 AASHTO 기준의 설계하중

pressions ring)에 의하여 평형을 이룬다. 이러한 면내응력은 지점부가 휨방향으로 구속되지 않을 경우에도 발생하나 슬라브의 두께에 비하여 치집량이 작을 경우 휨응력에 비하여 훨씬 작기 때문에 보통의 경우 무시된다. 만일 슬라브의 두께를 고려하고 하부연단에 휨구속된 지점이 있을 경우에는 前述한 보의 경우와 같이 支點에 휨방향 反力과 슬라브에 面內壓縮應力, 즉 “아치현상”이 발생하게 된다. 그림 5와 같이 균열이 발생한 슬라브의 경우는 앞에서 설명한 그림3의 보의 경우와 동일한 원리에 의하여 “아치현상”이 발생하게 된다.

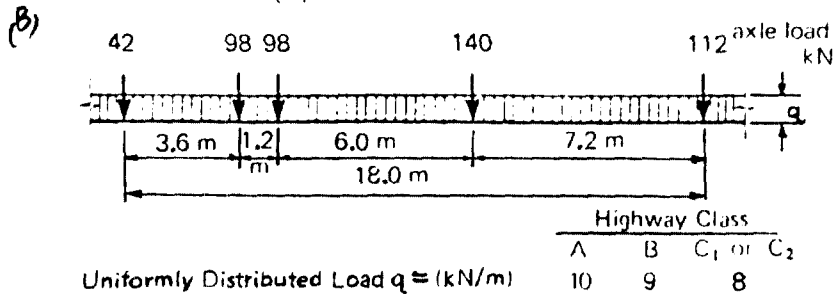
3. 歷史的 背景

철근콘크리트 슬라브의 強度에 대한 面內壓縮應力의 영향은 構造工學分野에서 중요한 관심사의 하나였다. 1955년 오클리스톤⁽³⁾은 남아프리카 요한네스버그의 3층 R. C건물의 슬라브를 現場實驗한 결과 降服理論에 의하여 예측된 強度의 3~4배에 달하는 파괴강도를 얻었으며 이러한 현상이 面內壓縮應力에 의한 것임을 밝혀냈다.

1957년에는 리벤버그, 로버트슨과 맥그로우가 역시 남아프리카의 케이프타운의 한 노후한



(A) OHBD TRUCK LOADING



(B) OHBD LANE LOADING

그림 8 현행온태리요기준의 설계하중

건물이 철거되기 전에 50개에 달하는 슬라브를 실험하였으며 面內壓縮應力의 발생과 슬라브의 강도에 미치는 영향을 확인하였다. 구온⁽⁴⁾은 프리스트레스트 콘크리트 연속슬라브의 거동을 연구한 결과 面外荷重에 대한 슬라브의 설계에 “아치현상”에 의한 영향을 고려하여야 한다고 제안하였다. 그외에도 슬라브에서의 아치현상에 관련된 많은 연구가 크리스찬슨, 프레드릭슨 및 파크에 의하여 수행되었다.

1960년대 후반 일리노이즈大學에서 소즌과 갬블⁽⁵⁾은 콘크리트 板을 실험했는데 이 板들은 횡방향으로 구속되었을 경우 요한슨의 降服線理論에 의하여 계산된 강도보다 훨씬 더 큰 파괴강도를 나타내었다.

1969년 이후 캐나다 온태리오州 교통통신부의 구조연구분과는 많은 교량의 현장실험을 통하여 교량의 耐荷力 및 構造部材의 거동에 대하여 조사, 연구하였다.⁽⁶⁾이 현장실험에서 보

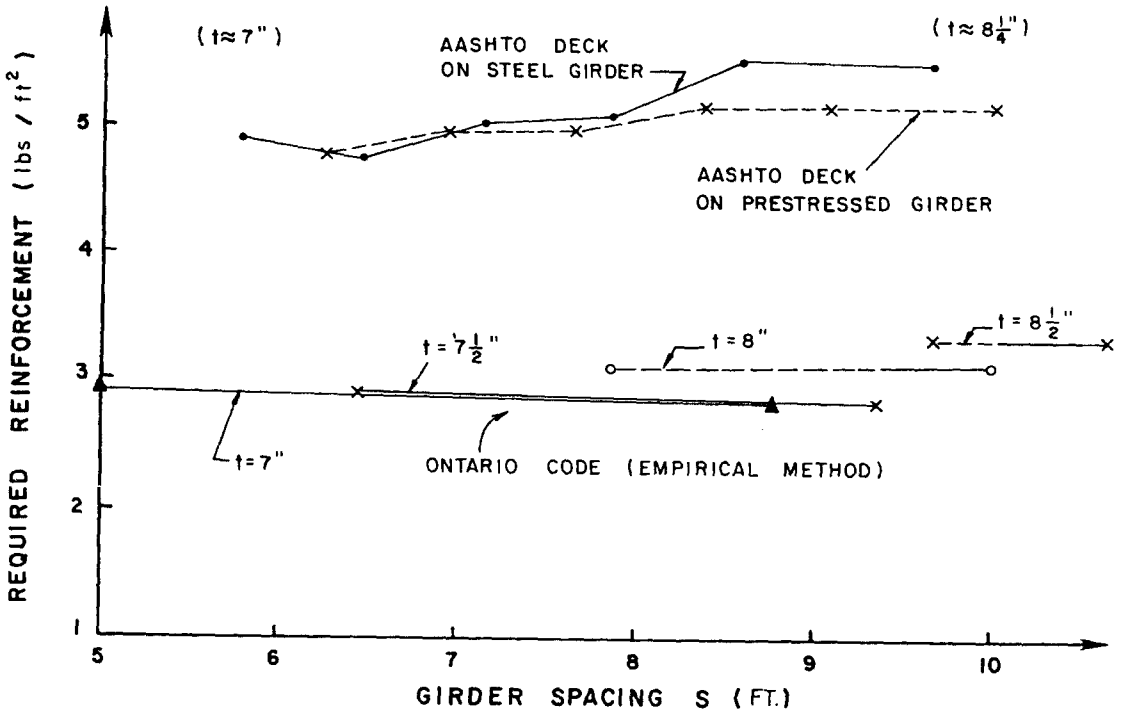
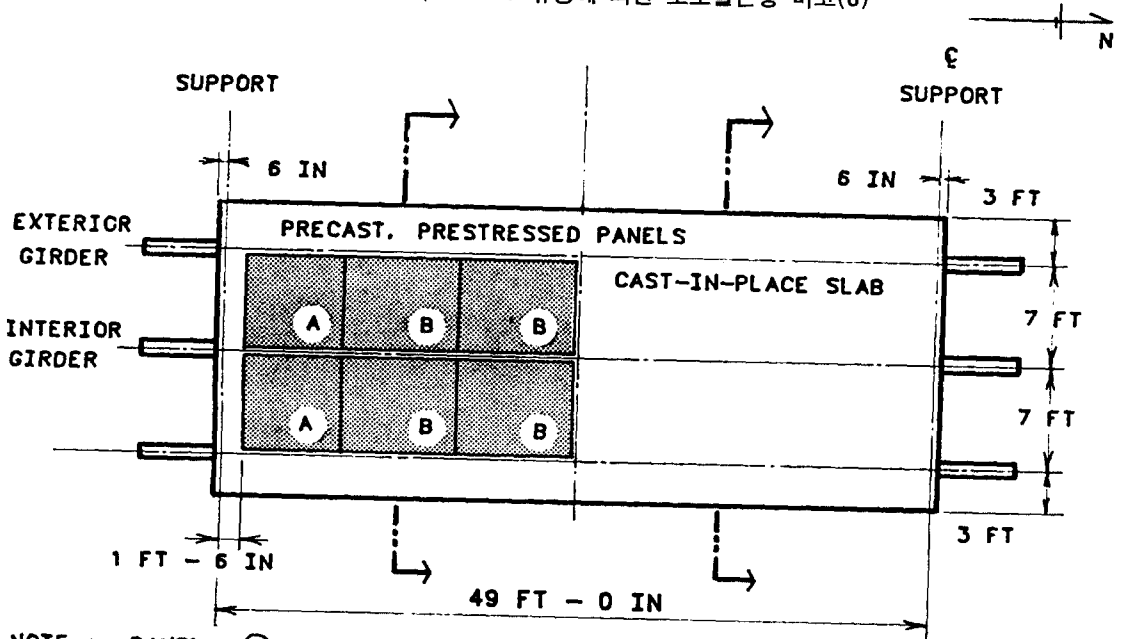


그림 9 AASHTO와 OHBDC 규정에 의한 소로철근량 비교(8)



NOTE : PANELS (A) ARE 7 FT • 6 FT - 6 IN
 PANELS (B) ARE 8 FT • 6 FT - 6 IN

그림 10 텍사스형 온태리오 상판 실험 모형

나 거더에 의하여 지지된 床板 슬라브의 강도는 철근이 많이 부식되고 노후화가 심한 경우에도 재래의 해석방법에 의하여 추정된 강도를 훨씬 상회하였다.

이 일련의 현장실험들이 바로 온타리오형 교량상판이 탄생하게된 직접적인 계기가 되었다. 이 실험결과를 입증하기 위한 모형실험과 연구가 온타리오주의 재정지원하에 퀸스대학에서 추가적으로 수행되었으며 교량床板 슬라브의 강도가 面內壓縮應力에 의하여 증가하는 것으로 결론지었다.⁽⁷⁾

그 이후에도 온타리오주 교통통신부는 기존의 AASHTO규정에 의한 것보다 작은 철근량을 배근한 교량상판에 대하여도 실험을 하였으며 이러한 일련의 연구결과에 의하여 經驗的인 橋梁床板設計方法이 제안되었는데 이것이 바로 現行 온타리오주 道路橋 設計規準(OHBDC)에 규정되어 있는 經驗적설계방법의 基本案이다.

4. 온타리오 道路橋 設計規準

現行 온타리오 道路橋 設計規準(OHBDC)⁽²⁾은 橋梁床板의 設計에 經驗的設計方法을 使用할 수 있도록 규정하고 있다. 이 經驗적 설계방법은 限界상태설계개념(Limit State Design Concept)에 근거를 두고 있으며 콘크리트 슬라브에 충분한 面內壓縮應力이 發生할 경우에 사용할 수 있다. 그러나 콘크리트 슬라브의 面內應力을 계산하는 것은 기존의 콘크리트 床板 設計方法보다 더 번거로운 작업이므로 OHBDC에서는 몇가지 設計條件을 規定하여 이 條件을 만족할 경우에는 經驗적설계방법을 사용할 수 있도록 하고 있다. 이 방법에 의한 설계는 상판슬라브의 上部와 下部에 단순히 0.3%의 철근을 兩方向으로 배치하므로써 完了되며 僥倖만 아니라 전단과 균열에 대해서도 安全한 것으로 간주된다.(그림 6)

OHBDC의 經驗설계방법을 사용할 수 있는 條

件은 다음과 같다.

- 1) 床板슬라브의 支間거리가 3.7m를 초과하지 않고 캔틸레버 부분은 外則보의 中央에서 최소한 1.0m 이상이 되어야 한다.
- 2) 床板슬라브의 支間거리는 슬라브 두께의 15배를 초과할 수 없으며 斜橋(Skew Bridge)에서는 斜支間長(Skew Span Length)을 사용하여야 한다.
- 3) 斜角(Skew Angle)이 20°보다 클 경우에는 슬라브의 양단 부분에는 최소한 2배(0.6%)의 철근량을 배근하여야 한다.
- 4) 슬라브의 두께는 최소한 225mm이어야 하며 철근의 간격은 300mm이하이어야 한다.
- 5) 外則보에 수직브레이싱(Diaphragm)을 설치하여야 하며 그 간격은 鋼桁橋일 경우 8m를 초과하지 못한다. 콘크리트 거더일 경우에는 支點부분에 설치한다.
- 6) 상판슬라브의 양단부분은 규준에 정하는 바에 따라 보강한다.

上記한 經驗적설계방법의 조건들은 그다지 엄격한 규정이 아니며 대부분의 교량상판은 이 방법에 의하여 설계될 수 있다.上記한 조건이 만족되지 못할 경우, 즉 經驗설계법을 적용하지 못할 경우에는 AASHTO와 같은 탄성해석이 아닌 降服線理論(Yield-Line Method)을 이용하여 극한저항모멘트를 계산하며 均열에 대한 使用性 限界狀態도 검토하여야 한다.

OHBDC의 또 다른 하나의 특징은 교량설계 하중에 있다. 그림7은 AASHTO에서 규정하고 있는 설계하중으로 우리나라에서도 이 교량설계하중, 특히 트럭하중의 形狀과 크기가 실제와 많은 차이가 있다고 비판과 논란의 대상이 되고 있다. OHBDC에서는 실제 조사한 트럭하중에 근거하여 교량설계하중을 규정하였다. 그림8은 OHBDC의 설계하중을 圖示한 것으로 A는 트럭하중 B는 차선하중이다. 이 OHBDC의 설계하중을 그림7의 AASHTO 설계하중과 비교할 때, 축간거리나 윤하중에 있어서 OHBDC의 경우가 실제에 훨씬 더 가까운 것을 알 수

있다.

5. AASHTO의 교량상판 설계규정

本章에서는 OHBDC의 규정과 비교하기 위하여 우리나라 道路橋標準示方書의 것과 같은 AASHTO의 교량상판 설계에 대한 규정을 간략히 설명하고자 한다.

現行 AASHTO규정에 의하면 교량상판은 自重과 車輛荷重에 대하여 설계하도록 되어있다. 차륜하중에 의한 휨모멘트는 크게 3가지의 슬라브 종류에 따라 각각 다르게 계산된다. 첫째는 車線方向과 同一한 方向으로 主鐵筋이 배근될 경우, 둘째는 主鐵筋이 차선방향과 수직으로 배근될 경우이며 셋째는 캔틸레버슬라브의 경우이다.

예를 들어 주철근이 차선방향과 수직으로 배근되고 1방향 슬라브로 간주되면 설계모멘트는 다음과 같다.

$$M = P(S+2)/32 \text{ k-ft/ft}$$

여기에서 P는 차륜하중이며 S는 슬라브의 유효지간거리이다. 이 모멘트는 충격계수 1.3을 곱하여 최종설계모멘트가 되며 3경간이상의 슬라브에 대해서는 연속효과를 고려하여 설계모멘트를 80%로 감소시킬 수 있다.

이러한 AASHTO의 규정은 彈性解析 결과에 의한 것으로 콘크리트의 허용응력설계시대에서 극한강도설계시대에 이르기까지 오랜 기간 동안 교량상판 설계에 사용되어 왔다.

그러나 3장에 기술된 최근의 연구결과에 따라서 현행 AASHTO의 규정이 필요이상의 과도한 철근량을 요구하며 너무 보수적이라는 인식이 대두되고 있다.

6. AASHTO 및 OHBDC에 의한 鐵筋量比較

OHBDC의 經驗的 설계방법에 의한 온태리오형 床板의 이점중의 하나는 床板슬라브의 所要 철근량이 현행 AASHTO 규정에 의한 것

보다 훨씬 적다는 것이다. 그림10은 다양한 상판 슬라브의 두께 및 지간거리에 대하여 AASHTO 규정 및 OHBDC규정에 의하여 각각 설계된 슬라브의 所要鐵筋量을 圖示化한 것이다. 여기에서 OHBDC의 규정에 따른 상판 슬라브의 두께가 225mm보다 작은 것은 텍사스주에서 수정, 제안되어 사용되고 있는 텍사스 온태리오 규정을 따랐기 때문이다.⁽⁸⁾

그림9에서 보는 바와 같이 AASHTO 규정에 의하여 설계된 교량상판 슬라브의 소요철근량은 지간이 5.66~9.64ft 일때 5.0~5.3 lb/ft²이며 온태리오형 교량상판의 경우는 2.9~3.4 lb/ft²으로 AASHTO규정의 경우에 대하여 60% 정도 밖에 되지 않는다. 즉 온태리오형 상판을 사용할 경우 상판 철근량을 40%정도나 절약할 수 있어 매우 경제적이다.

미국의 경우 新設되는 교량을 모두 온태리오형 상판으로 설계하면 연간 2,000만불 정도가 절감될 것이라고 한다.

7. 온태리오형 교량상판의 利用現況과 추세

온태리오형 교량상판은 OHBDC에 經驗設計法으로 規定되어 캐나다 온태리오주에서 실제 교량설계에 적용하기 시작한 후 北美地域에서 많은 研究가 이루어지고 있다.

뉴욕주 道路局은 온태리오형 상판의 철근상세를 갖는 슬라브와 현행 AASHTO 규정에 의하여 설계된 슬라브의 축소모형 실험연구를 수행하였다.⁽⁹⁾ 이 연구에서 균열이 없는 슬라브와 균열이 발생된 슬라브를 실험하였는데 균열이 있는 슬라브실험은 초과차륜하중하에서 상판·슬라브의 거동을 알아내기 위한 것이었다. 설계하중하에서 철근의 응력은 900kg/cm²를 초과하지 않았으며 극한하중을 가하였을 때 모든 슬라브는 편진전단에 의하여 파괴되었고 철근배근에 관계없이 파괴하중은 항상 설계하중의 6배 이상이 되었다.

텍사스주는 미국에서 2번째로 온태리오형

교량상판에 대한 실험연구를 수행하였다⁽⁹⁾. 이 실험의 특기할 사항은 온태리오형 상판의 경험적설계의 조건(본고 4장 참조)의 일부를 만족하지 않는 수정된 텍사스형 온태리오 상판이라는 점과 세계에서 처음으로 축소모형이 아닌 原型(Prototype)모델에 대한 실험이라는 점이다. 또한 교량상판의 일부를 프리스트레스트 PC 판넬로 설치하여 온태리오형상판의 적용성을 조사하였다.(그림 10)

이 實驗에서 수정된 OHBDC의 經驗的設計의 條件은 다음과 같으며 수정한 이유는 現行 텍사스 標準詳細圖와 맞추기 위해서였다.

1. 슬라브의 최소두께 225mm를 190mm(7.5in)로 감소시키고
2. 캔틸레버부분의 최소폭 1.0m를 0.9m(3ft)로 감소시켰다.

이 실험결과 교량상판슬라브는 R. C 및 P. C부분 모두 設計荷重의 3배에 해당되는 荷重에도 현저한 균열은 발생하지 않았으며 5백만 회의 피로실험후에도 만족할만한 거동을 보였다. 슬라브의 파괴하중은 설계차분하중의 약6배에 달하였으며 편칭전단에 의하여 파괴되었다. 이 실험의 결과로 온태리오형 상판의 거동이 다시 확인되었으며 현행 OHBDC의 經驗的設計條件이 보수적이며 너무 엄격하다는 결론을 얻었다. 텍사스州에서는 OHBDC의 다른 경험적 설계조건에 대해서도 연구하여 보다 진보적이며 合理的인 經驗設計方法을 제시하려고 노력하고 있다.⁽¹⁰⁾

플로리다州는 미국에서 온태리오형 교량상판을 사용할 3번째 州가 될 것이 확실시되며 다른 州에서도 이 經濟的이며 施工이 간편한 매력적인 교량상판의 사용을 검토하고 있어 온태리오형 상판의 이용범위는 급속도로 확산되고 있는 추세이다.

8. 結 言

캐나다 온태리오州에서 제안되어 北美地域

에 급속도로 확산되어가고 있는 온태리오형 橋梁床板에 대하여 기술하였다. 온태리오형 교량상판은 支點이 횡구속된 슬라브에 발생하는 面內壓縮應力으로 인하여 증가되는 슬라브의 강도를 고려하여 經驗的方法에 의하여 設計되는 것으로 철근배근이 간단하고 철근량이 기존의 AASHTO 규정에 비하여 40%나 절약되며 이에 따라 철근의 부식우려가 감소하여 내구성도 증진시킬 수 있는 우수한 교량구조부재이다. 현행 OHBDC규정의 경험적설계의 조건들은 대부분의 교량설계에 적용할 수 있는 것들이며 이 조건들도 점점 완화되어 가고 있는 추세이다.

온태리오형 상판을 이용하면 설계, 시공, 감리 및 사후유지관리가 모두 간편해질 뿐만 아니라 막대한 建設費를 절감할 수 있으므로 우리나라에서도 이의 도입을 검토, 적극 추진하는 것이 바람직하리라 사료된다.

참고문헌

1. American Association of State Highway and Transportation Officials, *Standard Specification for Highway Bridges*, 13th Edition, 1983.
2. Ontario Ministry of Transportation and Communications, *Ontario Highway Design Code*, 1983.
3. Ockleston, A. J., "Load Test on a Three Story Concrete Building in Johannesburg," *The Structural Engineer*, Vol. 33, No 10, October 1955.
4. Guyon, Y., *Prestressed Concrete*, Vol 2, New York, John Willy and Sons, 1962.
5. Gamble, W. L., Flug, H., and Sozen, M. A., "Strength of Slabs Subjected to Multiaxial Bending and Compression," Report to the Defense Office of the Secretary of the Army and Office of Civil Defense, Oc-

- tober, 1970
6. Bekht, G. and Csagoly, P. F., "Bridge Testing," Research Report No. 79-SSR-10, Ministry of Transportation and Communications of Ontario, Downsview, August, 1979.
 7. Bachelor, B. deV. , et al, "Investigation of the Ultimate Strength of Deck Slabs of Composite Steel/Concrete Bridges," "Transportation Research Record, No. 664, 1978.
 8. Fang, I. K. , Worley, J. A. , Burns, N. H, Klingner, R. E. , "Behavior of Ontario-Type Bridge on Steel Girders," Research Report No. 350-1, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 1986.
 9. Beal, D. B., "Strength of Concrete Bridge Deck," Research Report 89, New York State Department of Transportation, July, 1981.
 10. Kim, K. H. , et al, "Behavior of Ontario-Type Bridge Decks on Steel Girders," Research Report No. 350-4F, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Jan, 1988.