한국전산구조공학회
2003년도 봄 학술발표회 논문집

PS 콘크리트 바닥판 및 고강도 2주형 거더 시스템의 최적설계평가

Optimum Evaluation of PS Concrete Deck and High Strength Two Plate Girder System

박 태 훈* · 박 문 호** · 조 창 근*** · 권 민 호**** · 남 유 석*****
Park, Tae-Hun · Park, Mun-Ho · Cho, Chang-Gun · Kwon, Min Ho · Nam, Yoo-Seok

ABSTRACT

This study presents the Optimum Evaluation of PS Concrete Deck and High Strength Two Plate Girder System. Recently, for the simplification of structure and the long length of bridge, a small number girder bridge which minimized a number of girder by two is much designed and constructed. For the structural analysis, a finite element formulation considering with even the matter of torsion in the three-dimensional problem is presented. And connectively, for the design of optimum section, an algorithm of optimum design is developed. The section of a small number girder bridge which constituted of two girders and PS Concrete Deck is optimized by using optimum program developed in this study. and two girders bridge refered in this study is proved a efficiency and a economy by being compared and checked to the general plate girder bridge with five girder and Reinforced Concrete Deck.

1. 서 론

강교량은 콘크리트 교량에 비해 대체로 재료비, 인건비 및 공사비등의 절감과 기계화시공 및 공장제품화로 시공성이 용이하고 장지간화 할 수 있어 최근 수요가 급증하고 있다.[1),(2)] 따라서 최근 시공성 및 품질관리측면에서 건설계획중인 교량중 강교로 설계되고 있는 교량의 비율이 증가하고 있는 추세이며 이러한 현상은 자연경관과 어울리는 미관추구, 지형적 조건 및 경제성 등으로 장대교에서 강교의 채용이 증대되어 더욱 심화될 전망이다.[3] 최근 내구성의 향상과 건설비의 경감, 유지관리의 생략화를 목표로 한 합리화 교량의 개발과 연구가 되고 있으며 특히 플레이트 거더교의 구조의 단순화와 장지간화를 위해 일반적으로 사용되어 온 철근 콘크리트 바닥판을 PS 콘크리트 바닥판으로 바꾸고 주형을 두세개로 최소화시킨 소수주형교가 많이 설계, 시공되고 있다.

본 연구에서는 PS 콘크리트 바닥판과 2주형 거더 시스템을 채택한 소수주형교에 대하여 구조 해석과 최적

* 경북대학교 토목공학과 박사과정
** 정회원 · 경북대학교 토목공학과 교수
*** 정회원 · 경북대학교 방재연구소 연구원
**** 정회원 · 경상대학교 토목공학과 교수
***** 경북대학교 토목공학과 박사수료

설계를 동시에 할 수 있는 종합적인 최적화 프로그램을 개발하여 실제 구조물의 설계에 적용할 수 있도록 하였다. 개발된 최적화 프로그램을 이용하여 구하여진 설계단면을 기존의 철근 콘크리트 바닥판과 5주형 거더 시스템을 채택한 다주형교 설계단면과 비교, 검토하므로서 경제성과 효율성을 제시하였다.

2. 2주형 거더 시스템의 구조해석

2주형 거더 시스템을 도입한 2주형교의 구조해석은 유한 요소법을 이용해 3차원 해석을 적용하였으며 각 절점에서 축방향, 횡방향, 휨방향 거동의 축방향 요소와 굽힘요소, 그리고 비틀림 요소를 고려한 6 자유도(D.O.F)로 구성된 3차원에서 임의의 방향에 위치한 보 요소에 대한 강성행렬을 유도하였다.

각 절점에서 축방향 요소와 굽힘요소, 그리고 비틀림 요소를 고려한 6 자유도 (D.O.F)로 구성된 3차원에서 임의의 방향에 위치한 보 요소는 그림 2.1과 같다.

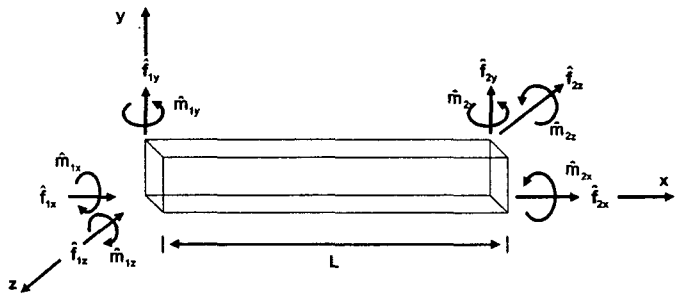

그림 1. 6자유도로 구성된 3차원에서 임의의 방향에 위치한 보요소

2.1 합성형교의 설계

2주형 거더 시스템을 도입한 2주형교는 합성형교로 설계하였는데 합성형교란 강재로 되어진 거더 주형과 철근 콘크리트 바닥판이 일체로 거동하도록 강형의 플랜지와 철근 콘크리트의 바닥판을 전단 연결재로 합성시킨 합성거더를 말한다.

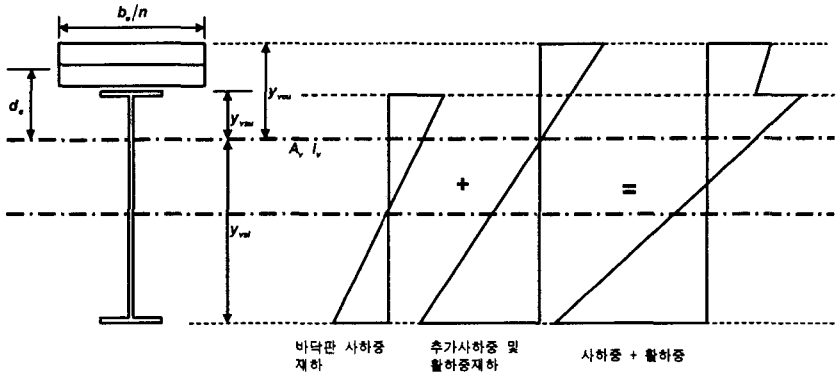

그림 2. 합성형의 단면과 응력 분포

강재의 주형과 철근 콘크리트의 바닥판으로 구성된 서로 다른 종류의 재료로 된 합성단면의 경우 윤하중을 직접 지탱하는 바닥판이 주형의 상부플랜지의 일부로서 역할을 담당하게 된다. 이 때 일반 보 이론과 다른 의미를 갖는 것은 상부플랜지의 수직 응력 분포 형상에 관한 문제, 즉 공학적으로 유효 폭으로서 처리하고 있다. 합성 거더 이론이란 콘크리트 특유의 성질에 의해 발생하는 전체 거동의 추적에 있다고 할 수 있다. 일반적으로 비합성형에 비하여 강성이 높고 강재의 중량이 20~30% 감소하여 현저하게 경제적이다. 그림 2. 는 합성형의 단면과 응력분포를 도시한 것이다. 합성형교의 응력 계산은 합성전과 합성후로 나누어 계산하며 합성후에는 강거더와 콘크리트 바닥판 온도차에 의한 응력 및 건조 수축에 의한 응력등이 포함된다.

3. 2주형 거더 시스템으로 구성된 2주형교의 단면 최적화

3.1 구조물의 최적설계

2주형 거더 시스템으로 구성된 2주형교의 단면 최적화에는 다제약, 다설계변수의 비선형의 최적화 문제에 보다 효율적이고 여러 가지 장점이 많다고 알려진 벌칙함수를 이용하는 SUMT법(축차 무제약 최소화기법)을 사용하였다.[4],[5] SUMT법의 기본원리는 목적함수와 제약조건함수를 사용하여, 제약조건의 위배에 대하여 복합함수를 제재하는 매개변수를 포함하는 함수를 구성하는 것이다. 위배가 많으면 벌칙도 크게 된다. 일단 벌칙매개변수의 집합으로 복수함수를 정의하면 비 제약 최적화법으로 최소화한다. 벌칙매개변수는 조건에 따라 적절히 조정되고, 복수함수는 재정의되어 최소화된다. 이 과정은 최적점의 추정에 만족할 만한 개선이 없을 때까지 계속한다. 이러한 개념을 바탕으로 만든 방법이 SUMT법 이다.[6]

3.2 대상구조의 모델화

설계문제를 정식화 하는데 있어서 첫 번째 단계는 설계변수를 정하는 일이다. 최소중량설계를 위한 일반적인 2주형 거더 시스템으로 구성된 2주형교의 설계흐름은 바닥판 설계가 주형의 설계에 앞서 수행된다. 따라서 본 연구에서는 그림 3. 에서와 같이 바닥판과 주형을 분리하여 최적설계 문제를 정식화 하였다.

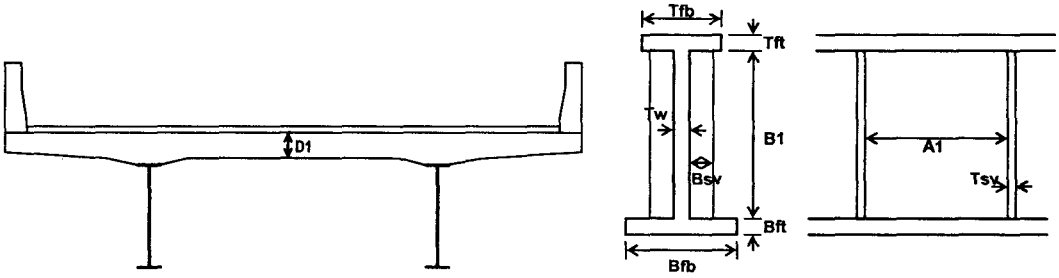

그림 3. 바닥판 및 주형의 설계변수

3.3 목적함수의 형성

본 논문에서는 단위중량과 설계변수의 함수로 유도되는 중량함수를 목적함수로 하였으며, 중량함수는 PS 콘크리트 바닥판의 중량과 주형의 중량으로 구분해서 나타내었다. 교량설계에 실제로 사용되지만 설계변수에 포함하지 않는 부분인 포장재인 아스콘과 기타 부속시설에 대한 것을 포함시킬 경우 목적함수의 민감도만 떨어뜨리는 항목이기에 제외하였다.[7]

	바 닥 판	강 재 주 형
목적함수	$Obj = \{\sum Area_c \cdot L \cdot \gamma_c\}$ $Area_c$: 바닥판 중앙부단면의 면적 (cm^2) L : 연장 (m) γ_c : 콘크리트의 단위체적중량	$Obj = \sum_{i=1}^{NS} Area_i \cdot L_i \cdot \gamma$ $Area$: i^{th} 경간의 단면의 면적 (cm^2) L_i: i^{th} 경간의 길이 (m) γ: 강재의 단위체적중량

3.4 제약조건

2주형 거더 시스템으로 구성된 2주형교는 PS 콘크리트 바닥판과 강재주형을 분리해서 정식화 했다. PS 콘크리트 바닥판의 제약조건식은 도로교 설계기준(건설교통부:2000)에 제시되어진 강도설계법에 의해 지간길이, 바닥판의 두께, 휨강도, 최소 PS 강재량 등의 범위 제한을 위한 제약조건을 만족하도록 하였다.[8] 강제 주형의 제약조건식은 도로교 설계기준(건설교통부:2000)에 기초한 허용응력설계법에 의해 부재의 사용성, 단면 형상, 합성 응력, 복부판의 최소두께, 자유돌출판에 작용하는 압축응력, 수직보강재의 폭·두께, 수직보강재의 간격, 중간 보강재의 강도, 지점 수직보강재의 단면등의 범위 제약 조건을 만족하도록 하였다. 강재 주형에서의 부재의 사용성에 대한 제약조건은 강재 주형의 최대처짐의 제한 규정을 만족하도록 규정하였다. 단면 형상에 대한 제약조건은 강재 주형을 구성하고 있는 플렌지와 복부판의 두께에 대한 규정에 만족하도록 규정하였으며 여기서 사용되어진 용접구조용 압연강재는 SM 570을 사용하였다. 합성 응력에 관한 제약조건은 3차원 구조해석으로 구하여진 순수비틀림과 뒴비틀림을 고려하여 제약조건을 규정하였다. 항복에 대한 안전도 검사에 의한 제약조건은 플렌지 상·하부에서의 응력을, 강합성형 구조임을 고려해 허용응력을 크리프, 건조수축, 온도변화에 의해 증가되도록 규정하였다.

3.3 최적설계 알고리즘

본 연구에서 개발되어진 2주형 거더 시스템으로 구성된 2주형교 최적 설계 프로그램은 그림 4. 와 같은 기본 흐름도를 갖는다. 주요연산 모듈은 FORTRAN으로 작성되어졌으며 구조해석 및 최적화 프로그램을 개발하여 연계시켰다.[9]

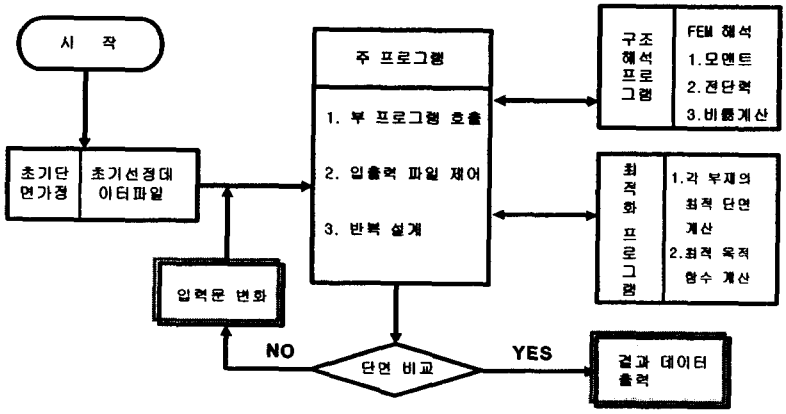

그림 4. 강합성형 거더 연속교의 최적설계 알고리즘

2주형 거더 시스템으로 구성된 2주형교의 최적화를 위해 단면별 최적화를 통하여 최적 설계변수값을 구하는 과정을 반복하여 전체구조가 최적해에 수렴하도록 하는 동적계획법에 의해 최적화를 진행하였으며 부재별 최적화 단계에서 축차 무제약 최소화 기법을 사용하였다.[10],[11] 먼저 바닥판과 주형, 그리고 보강재에 대한 각 부재의 초기 설계 변수를 가정하여 구조해석을 한 후 주형의 플랜지, 복부, 보강재의 순으로 각 변 단면별 최적화를 수행하였으며 이 각각의 모든 단면에 대한 최적화가 끝나서 전체 구조물의 최적화가 이루어진 후 목적함수인 전체 중량이 결정되어지면 이미 결정되어진 설계변수를 단면값으로 취한 뒤 이 값으로 다시 구조해석을 하여 최적화를 실시한 뒤 전체 중량이 결정되도록 하였다. 이미 산출되어진 전단계의 전체 중량과 비교하여서 기준 허용치내로 목적 함수가 수렴하지 않았을 경우에는 다시 기준허용치 내에 값으로 수렴할때까지 이 최적화 과정을 반복하며 결과가 만족하여 수렴할 때 전체 최적화를 종료하도록 하였다.

4. 최적설계 적용 및 결과 분석

4.1 구조물의 형식

본 연구에서 개발되어진 2주형 거더 시스템으로 구성된 2주형교 최적 설계 프로그램은 각 지간에서 발생하는 최대 정·부 모멘트에 의해 지배되는 단면으로 나누어 설계하는 방법으로 결과를 구하였으며 이 프로그램의 타당성과 효율성을 검증하기 위해 그림 5. 와 같은 건설교통부에서 작성된 도로설계편람에서 설계되어있는 연장 40m의 5주형으로 구성되어 있는 단순교와 PS 콘크리트 바닥판과 2주형교로 설계/시공 되어 있는 일본의 치도리노사와천교를 최적설계를 수행하여 최적단면을 결정하여 설계교량의 주 영향기여도를 추적할 수 있도록 하였다.[12] 설계조건은 콘크리트의 설계기준강도 f_{ck}는 350 kgf/cm^2, 인장철근의 설계 항복강도 f_y 는 4,000 kgf/cm^2, 콘크리트의 탄성계수 E_c는 266,400 kgf/cm^2, 철근의 탄성계수 E_s는 2,100,000 kgf/cm^2 이다.

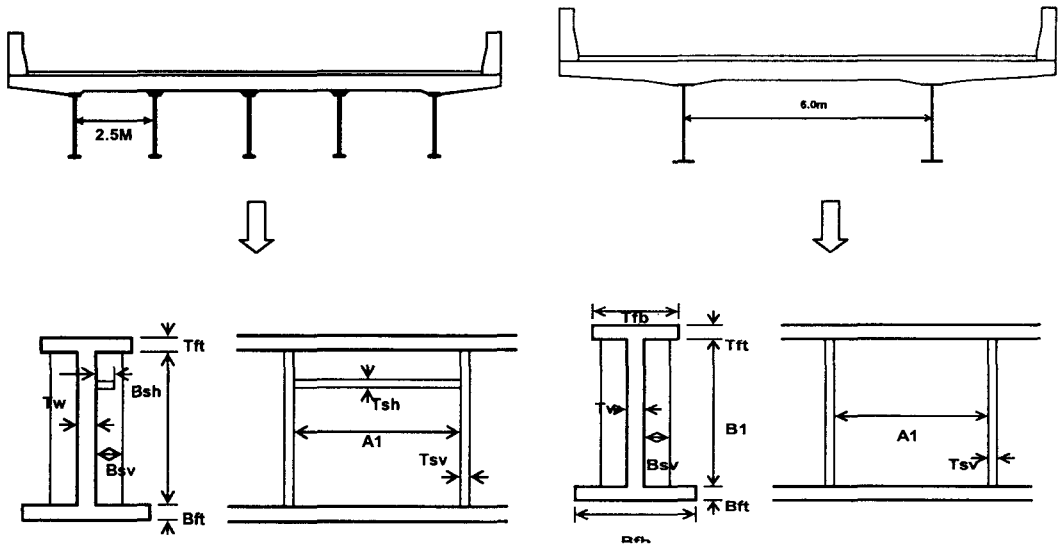

그림 5. 최적설계 대상교량

4.2 최적설계의 결과

4.2.1 최적 설계 프로그램

본 연구에서 개발되어진 2주형 거더 시스템으로 구성된 2주형교 최적 설계 프로그램의 입·출력 화면은 그림 6. 과 같다.

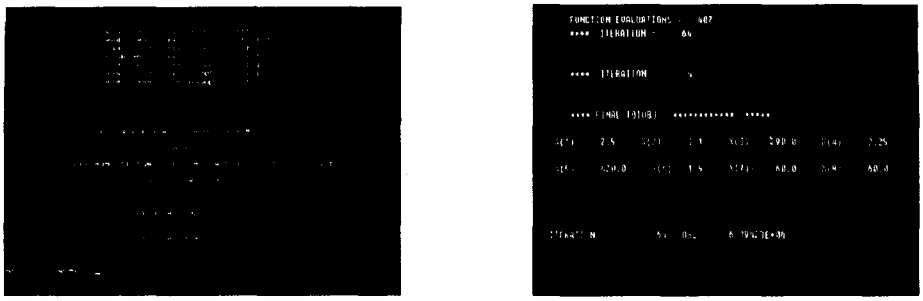

그림 6. 2주형교 최적 설계 프로그램의 입·출력 화면

4.2.2 바닥판의 최적설계

바닥판은 PS 콘크리트 바닥판으로 설계하였으며 고정된 폭원으로 중앙지점 두께를 최적설계하였고, RC바닥판과 비교하였다. 그 결과와 최적화 수렴과정을 표 1. 과 그림 7. 로 나타내었다.

표 1. 바닥판의 최적설계 결과

	초기 값 (cm)	최적 값 (cm)
5주형교 - RC 바닥판	25	22.8
2주형교 - PS 콘크리트 바닥판	34	32

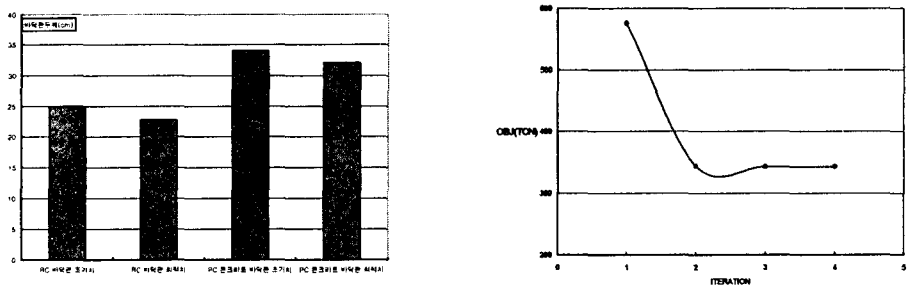

그림 7. 바닥판의 최적설계 비교와 목적함수의 수렴 결과

4.2.3 강재 주형의 최적설계유형 1

설계유형 1은 단경간으로 지간길이 40m인 교량으로 형고를 고정시켜 거더 주형의 높이를 일정하게 하고 플렌지와 두께와 보강재를 자유롭게 하여 최적설계한 경우이다. 그 결과와 최적화 수렴과정을 그림 8.로 나타내었다.

4.2.4 강재 주형의 최적설계유형 2

설계유형 1은 단경간으로 지간길이 60m인 교량으로 형고를 고정시켜 거더 주형의 높이를 일정하게 하고 플렌지와 두께와 보강재를 자유롭게 하여 최적설계한 경우로 40m 최적설계치와 비교하였다. 그 결과와

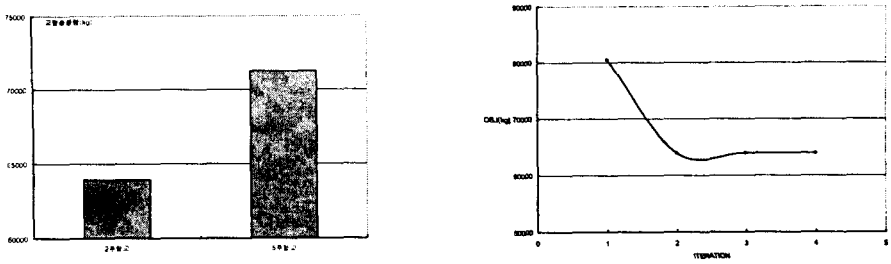

그림 8. 지간 40m 단경간 2주형교의 최적설계 비교와 목적함수의 수렴 결과

최적화 수렴과정을 그림 9.로 나타내었다.

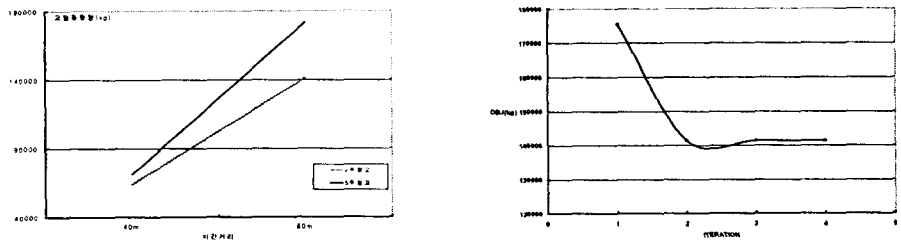

그림 9. 지간길이별 40m와 60m 단경간 2주형교의 최적설계 비교와 목적함수의 수렴 결과

4.2.5 강재 주형의 용접면에 따른 최적설계

단경간 40m인 RC 바닥판을 가진 5주형 거더교와 PS 콘크리트 바닥판을 가진 2주형교의 용접면적을 최적 설계하여 비교하였다. 그 결과를 그림 10. 으로 나타내었다.

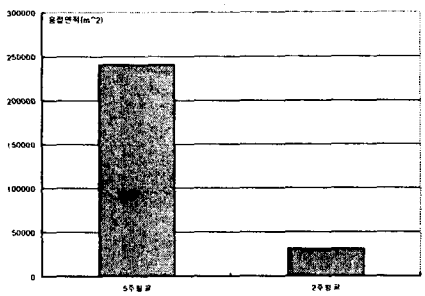

그림 10. 40m 단경간 5주형교와 2주형교의 용접면적의 최적설계 비교

4. 결 론

1) 2주형 거더 시스템으로 구성된 2주형교 최적 설계 프로그램의 구조해석과 최적설계를 동시에 수행할 수 있는 종합적인 최적설계 프로그램을 개발하였다.
2) 일반적으로 사용되어지는 RC 바닥판을 사용한 주형이 5개인 판형교와 PS 콘크리트 바닥판을 사용한 주형이 2개인 2주형교와의 최적 설계를 비교한 결과 단순지간 40m인 경우 약 10%으로 중량 감소를 획득할 수 있으며 지간이 장지간화함에 따라 더 큰 중량감소의 경향을 나타내었다.
3) 본 연구에서 개발한 최적설계 프로그램을 이용하여 PS 콘크리트 바닥판을 설계할 경우 약 5%의 자중 감소를 가질 수 있는 경제적인 설계를 할 수 있음을 알았다. 2주형교에 사용되어지는 PS 콘크리트 바닥판

의 설계에서 도로교 설계기준에 제시되어진 바닥판 최소 두께 기준으로 인해 PS 콘크리트 바닥판의 최소 두께가 다소 크게 수렴되었다. 따라서 PS 바닥판을 이용한 2주형교의 중량을 보다 줄이기 위해서는 현행 시방서의 PS 콘크리트 바닥판 최소두께 규정에 대한 실험 및 해석을 통한 재검토에 의해 바닥판 두께를 보다 줄여 2주형교의 중량을 보다 감소시킬 수 있는 방향으로 연구가 필요하다고 판단된다.

4) RC 바닥판을 사용한 주형이 5개인 판형교와 PS 콘크리트 바닥판을 사용한 주형이 2개인 2주형교와의 강재 용접 면적과의 비교에서 약 70%의 용접면적의 경비 감소를 나타내었다.

참 고 문 헌

1. Goble, G.G. and P.V. DeSantis. "Optimum Design of Mixed Steel Composite Girders," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.92, No.ST6, Proc. Paper 5001, Dec., 1966, pp.25-43.
2. Annamalai, N., A.D.M. Lewis and J.E. Goldberg. "Cost Optimization of Welded Plate Girders," Journal of Structural Division, ASCE, Vol.98, No.ST10, Proc. Paper 1972, pp.2235-2246
3. Razani, R. and G.G. Goble. "Optimum Design of Constant Depth Plate Girders," Journal of Structural Division, ASCE, Vol.92, No.ST2, April, 1966, pp.253-282.
4. Goble, C.C. and F. Moses. "Practical Applications of Structural Optimization," Journal of Structural Division, ASCE, Vol.101, No.ST4, Proc. Paper 11267, April, 1975, pp.635-647.
5. Azad, A.K. "Continuous Steel I-Girders: Optimum Proportioning," Journal of Structural Division, ASCE, Vol.106, No.ST7, July, 1980, pp.1543-1555.
6. Kanagasundaram, S. and B.L. Karihaloo. "Optimal Strength and Stiffness Design of Beams", Journal of Structural Division, ASCE, Vol.109, No.1, Jan., 1983, pp.221-237.
7. Knight, R.P. Economical Steel Plate Girder Bridges, Bethlehem Steel Corporation, AISC National Engineering Conference, Memphis, Tennessee, March, 1983
8. 한국도로교통협회, "건설교통부 제정 도로교설계기준" , 건설정보 , 2000
9. 박문호, "철근 콘트리트 플래이트 슬래브형 구조체 및 이방성 연속 곡평면 슬래브의 최적화 알고리듬에 관한 연구", 대한 토목학회 논문집 제 4권 1 호, 1-12 ,1985
10. 박문호, 조창근, 김기홍, 장준호, "최적내진설계에 의한 강뼈대구조물의 브레이싱효과" , 대한 토목 학회 논문집 제 18권 제 I - 6호 , 1998
11. 박문호, 조창근, 이성국, "시간의존효과와 시공단계 해석모델에 의한 PSC 세그멘트 연속 박스거더의 최적설계" , 대한 토목 학회 논문집 , 2002
12. 한국건설기술연구원 , "도로설계편람(Ⅲ)" , 건설교통부 , 2001