한국전산구조공학회
1998년도 가을학술발표회 논문집

하중-저항계수 설계법과 허용응력 설계법에 의한 강교량 주부재의 최적화 설계

Optimum Design of I-Type Girders in Steel Bridges by LRFD and ASD

안 성 욱* 신 영 석**
Ahn, Sung-Uk Shin, Yung-Seok

ABSTRACT

In this study, I-type girders, main members of a steel composite bridge, are designed by Load and Resistance Factor Design method as well as Allowable Stress Design method. The width, height, web thickness and flange thickness of main girders are set as design variables.

The design program connects optimization program ADS, which is coded with FORTRAN, and a main program coded with C^{++}. In this study, it is shown that in this particular steel composite bridge, the design by The Load and Resistance Factor Design method is more economical than that by The Allowable Stress Design method.

1. 서 론

최근의 기술동향을 살펴볼 때 세계 여러 나라에서 강구조물의 설계개념이 허용응력 설계에서 하중-저항계수 설계로 바뀌고 있다. 이는 신뢰성이론에 바탕을 둔 개념으로 미국의 경우 1986년에 AISC에서 LRFD(Load and Resitance Factor Design) Specification을 제정하였고 이어 우리 나라에서도 도로교 표준 시방서(1996)[1]에 부록으로 하중-저항계수 설계편이 출간되었다.

강교량의 경우 위에서 언급한 바와 같이 세계적인 흐름을 고려할 때, 앞으로는 허용응력 설계법보다 모든 면에서 합리적인 설계방법으로 인식되고 있는 하중-저항계수 설계법이 주로 적용될 것으로 보여진다.

일반적으로 하중-저항계수 설계법에 의한 설계의 경우가 허용응력 설계법에 의한 설계보다 경제적이고 합리적인 설계가 이루어진다고 보고 있다. 그 차이가 어느 정도인지 최적화설계를 통해 살펴볼 수 있을 것이다.

본 논문에서는 공개 소프트웨어로서 누구나 저작권의 시비없이 사용 및 프로그램의 개작이 가능하여 최적화 설계용으로 학계와 산업계에서 널리 사용되고 있는 ADS[5] (a FORTRAN program for Automated Design Synthesis)를 이용하여 최적화를 수행하도록 하였다. ADS프로그램의 Option으로 Strategy Option은 Go directly to the optimizer를 사용하였으며, Optimizer로는 Modified Method of Feasible Direction[3][4]을 사용하고, One-Dimensional Search로는 Golden Section method[3][4]를 사용하였다.

본 논문에서는 허용응력 설계법과 하중-저항계수 설계법에 의한 교량의 주부재인 I형 거더의 설계순서 및 최적화 제약조건에 대해서 살펴보고 지간에 대한 결과 값의 경제성 및 형상의 차이를 비교 분석한다.

* 아주대학교 토목공학과 석사
** 아주대학교 토목공학과 부교수

2. 설계에 사용된 교량의 모델

설계에 사용된 교량은 단순지지교량으로써 합성형 I거더를 병렬로 배치하였다(그림 2.1). 주형인 I거더의 횡좌굴에 저항하기 위하여 가로보를 규정(도로교시방서)에 의해 배치하였다(그림 2.2).

하중-저항계수 설계법과 허용응력 설계법에 의한 강교량 주부재의 중량차이를 비교하기 위하여 콘크리트 슬래브의 두께를 각 설계법에서 규정하는 두께범위 내에서 고정하여 사하중의 계산에 있어서 같은 값을 가지도록 설계하였다. 구조용 강재로는 SWS490을 사용하였고, 콘크리트의 압축강도는 300Kg/cm^{2}를 사용하였다. 주형은 수평보강재가 없는 형태이며, 교량의 등급은 1등급교량을 기준으로 설계하였다.

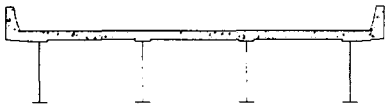


그림 2.1 교량의 단면도

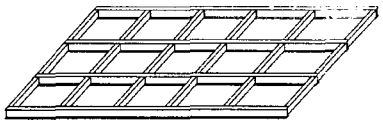


그림 2.2 주형과 가로보의 배치도

3. 하중-저항계수 설계법에 의한 설계

본 논문에 사용한 교량의 형태는 그림 2.1과 같으며, 이 교량은 단순 지지된 합성형 I거더를 가지는 교량이다. 이 교량의 설계는 도로교표준시방서(1996) "(부록) 하중-저항계수 설계편"[1]을 따른다.

본 프로그램은 C++ 컴퓨터 언어로 프로그래밍 되었으며, Fortran으로 코딩된 상용 최적화 프로그램인 ADS(Automated Design Synthesis)를 이용하기 때문에 이들 서로 다른 컴퓨터 언어간 연계(interface)가 필요하다. 그래서 main인 C++에서 extern문을 사용하여 객체 정보교환이 이루어지도록 프로그램 하였다. 프로그램의 구성도는 그림 3.1과 같다.

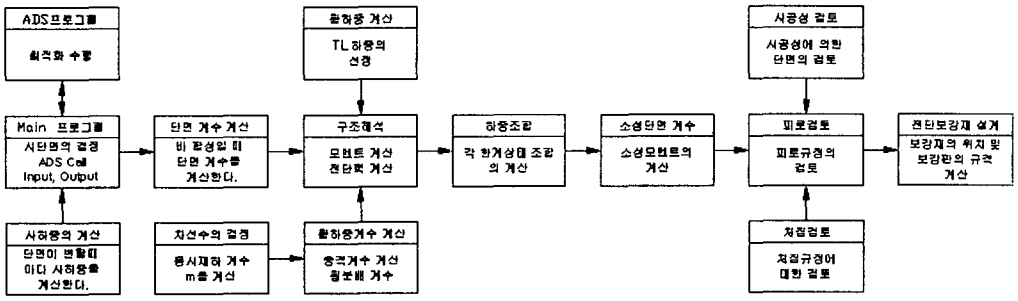
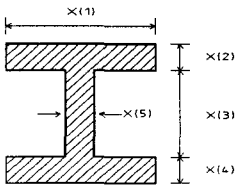


그림 3.1 하중-저항계수 설계 프로그램의 흐름도

3.1. 설계목적함수

본 논문에서는 경제적인 시공을 위하여 구조용 강재의 중량을 최소화하는 설계목적함수를 사용하였다.

Objective Function : $X(1)\times X(2)+X(3)\times X(5)+X(1)\times X(4)$



앞의 X(1)~X(5)는 설계변수로 그림3.2와 같으며, I형 거더 상·하부 플랜지의 폭을 같게 두고 설정하여 총 5개의 설계변수를 가지는 조건으로 프로그래밍 하였다.

그림 3.2 설계변수

3.2 설계제약조건(Design Constraints)

본 논문에서는 도로교표준시방서(1996) "하중-저항계수 설계편"[1]에 근거하여 제약조건을 선정하였으며, 총 14개의 제약조건을 포함하는 설계이다. 각 제약조건은 아래표 3.1과 같다.

표 3.1 하중-저항계수 설계에 대한 제약조건

제약 조건	내 용
G(1)	설계휨강도가 설계하중에 의한 휨모멘트 보다 크게 규정한다.
G(2)	연성규정으로써 파괴시 강재에 의한 연성파괴를 유도한다.
G(3)	공칭모멘트강도와 소성모멘트를 같게 하기 위한 조밀단면 규정
G(4)	휨부재에 대한 단면비 제약조건
G(5)	휨부재에 대한 단면비 제약조건
G(6)	피로강도에 대한 제약조건
G(7)	수평보강재가 없는 복부판의 휨에 대한 규정
G(8)	피로하중에 의한 전단에서 수직보강재를 갖는 균질한 복부판에 대한 규정
G(9)	구조물의 처짐에 대한 제약조건
G(10)	시공중인 구조물에 대한 복부판의 세장비 조건
G(11)	시공중인 구조물에 대한 압축플랜지의 세장비 조건
G(12)	시공중인 구조물에 대한 횡비틀림 좌굴의 제약조건
G(13)	횡방향 횡지지 길이에 따른 복부판의 세장비 제약조건
G(14)	횡비틀림 좌굴에 대한 설계모멘트가 설계하중에 의한 모멘트보다 크게 규정한다.

4. 허용응력 설계법에 의한 설계

본 논문에 사용한 교량의 형태는 그림 2.1과 같으며, 이 교량은 단순 지지된 합성형 I거더를 가지는 교량이다. 이 교량의 설계는 도로교표준시방서(1996) "설계/시공 및 유지관리편"[2]을 따른다.

본 프로그램은 C++ 컴퓨터 언어로 프로그래밍 되었으며, Fortran으로 코딩된 상용 최적화 프로그램인 ADS(Automated Design Synthesis)를 이용하기 때문에 이들 서로 다른 컴퓨터 언어간 연계(interface)가 필요하다. 그래서 main인 C++에서 extern문을 사용하여 객체 정보교환이 이루어지도록 프로그램 하였다. 프로그램의 구성도는 그림 4.1과 같다.

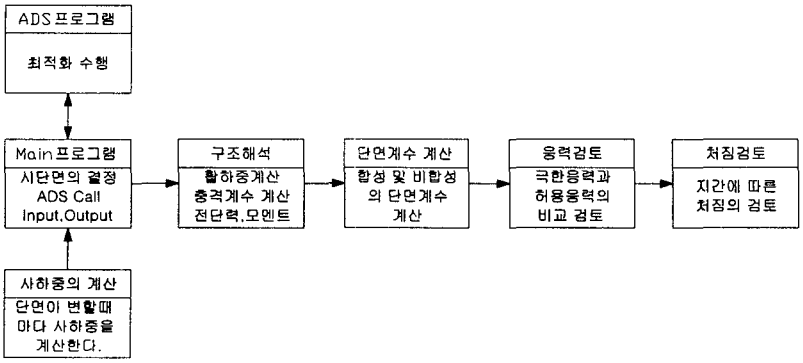


그림 4.1 허용응력 설계 프로그램의 구성도

4.1. 설계목적함수

설계목적함수와 설계변수는 앞의 3.1절의 경우와 동일하게 사용하였다.

4.2. 설계제약조건

본 논문에서는 도로교표준시방서(1996) "설계/시공 및 유지관리편"[(2)]에 근거하여 제약조건을 선정하였으며, 총 15개의 제약조건을 포함하는 설계이다. 각 제약조건은 아래표 4.1과 같다.

표 4.1 허용응력 설계에 대한 제약조건

제약 조건	내 용
G(1)	콘크리트의 허용응력이 설계하중에 의한 슬래브 상부의 응력보다 크게 규정한다.
G(2)	콘크리트의 허용응력이 설계하중에 의한 슬래브 하부의 응력보다 크게 규정한다.
G(3)	강재의 허용응력이 설계하중에 의한 거더 상부의 응력보다 크게 규정한다.
G(4)	강재의 허용응력이 설계하중에 의한 거더 하부의 응력보다 크게 규정한다.
G(5)	강재의 허용전단응력이 설계하중에 의한 복부의 전단응력보다 크게 규정한다.
G(6)	복부판의 폭/두께비 제약조건
G(7)	압축플랜지의 폭/두께비 제약조건
G(8)	인장플랜지의 폭/두께비 제약조건
G(9)	구조물의 처짐에 대한 제약조건
G(10)	국부좌굴에 대한 규정으로써 복부판의 최소 두께 제약조건
G(11)	국부좌굴에 대한 규정으로써 설계하중에 의한 복부판 상부의 응력이 허용응력보다 크게 규정한다.
G(12)	횡지지 길이에 의한 국부좌굴에 대한 규정으로 압축플랜지의 최소 두께 제약조건
G(13)	횡지지 길이에 의한 허용휨압축응력이 비합성일 때 압축플랜지 상부의 응력보다 크게 규정한다.
G(14)	항복에 대한 안전도의 검사 규정
G(15)	항복에 대한 안전도의 검사 규정

5. 최적 설계 결과 및 분석

우선, 최적 설계 결과를 검증하기 위해 서로 다른 시단면에서의 최적화 값을 비교하고 지간을 다르게 적용할 때의 각 설계법에 대한 주형의 변화를 비교하였다. 마지막으로, 가로보의 개수를 달리 적용할 경우의 주형의 변화를 비교 분석하였다.

5.1 최적화 설계의 수렴과정

최적화 설계에서 전체 최소 값과 국부적인 최소 값이 있다고 한다면, 시단면을 달리하였을 경우 그 결과 값이 동일한 값이 나올 경우 전체 최소 값에 수렴한다고 볼 수 있다. 그래서 아래와 같이 각각의 설계법에서 시단면을 달리하여 최적화를 수행하여 비교 검토하였다. 이 때 지간은 42m으로 고정하고, 가로보의 개수도 각각 고정하여 비교하였다.

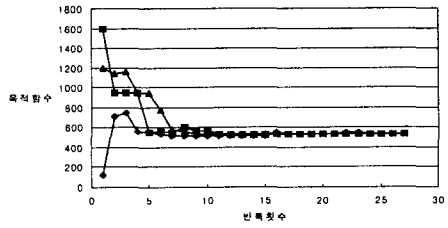


그림 5.1 최적화 과정(하중-저항계수 설계)

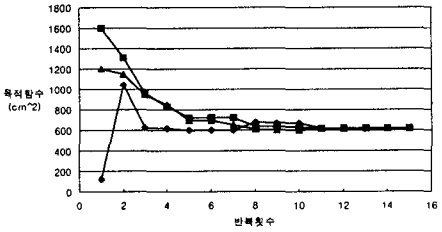


그림 5.2 최적화 과정(허용응력 설계)

하중-저항계수 설계법에 의한 최적화 설계에서 시단면을 다르게 하였을 때 주형 단면적의 변화는 위의 그림5.1과 같다. 그 때의 각 부위별 치수는 약간씩의 차이가 있으나, 전체 단면적은 1%이내의 오차를 가짐으로써 최적화가 만족스럽게 수행됨을 알 수 있다. 허용응력 설계법에 의한 최적화 설계의 경우 주형 단면적의 변화는 위의 그림 5.2와 같으며, 이때도 마찬가지로 2%이내의 미소한 오차를 가지게 되며, 역시 최적화가 만족스럽게 수행됨을 알 수 있다.

5.2 지간의 변화에 따른 주형의 변화

지간은 설계트럭의 길이(총 13.2m)보다 큰 지간인 15m을 시작으로 하여 I형 거더가 Box형 거더보다 유리한 길이 범위(60m이하)를 설정하였다. 이때 가로보의 간격 즉, 횡지지 길이에 따라서 횡좌굴 조건이 달라지므로 그 간격을 5m으로 고정하여 지간을 조절하였다. 지간의 변화에 따른 주형의 변화는 크게 두 가지로 비교할 수 있는데, 우선 주형 단면적의 변화를 비교하고, 다음으로 주형의 각 부위별 치수에 대한 변화를 살펴 볼 수 있다. 주형 단면적의 변화를 먼저 살펴보면 아래와 같다.

지간 길이에 따라서 설계 하중에 의한 모멘트가 급수적으로 증가하며, 이에 대한 설계모멘트 또한 급수적으로 증가하게 된다. 그래서, 단면2차 모멘트의 증가가 복부높이의 증가를 가져오게 되는데, 복부 높이의 증가에 따른 단면비와 복부 두께, 플랜지의 폭 및 두께 또한 증가하여 최종적으로는 주형의 단면적을 커지게 한다. 이는 아래의 표 5.1 및 그림 5.3에 나타내고 있다. 최적화 설계결과 하중-저항계수 설계법에 의한 최적화 설계에서는 대부분 G(6), G(10), G(11), G(14)에 대하여 제약조건으로 작용하며, 허용응력 설계법에 의한 최적화 설계에서는 G(4), G(6), G(7), G(13)이 제약조건으로 작용하고 있다.

표 5.1 지간 길이에 따른 강재량의 변화

지간(m)	가로보 개수 (개)	하중-저항계수 설계법		허용응력 설계법		LRFD에 대한 ASD의 증가량
		강재의 총 단면적(cm^2)	활성화 제약 조건(G)	강재의 총 단면적(cm^2)	활성화 제약조건(G)	
15	4	145.2	*1,6,11,14	168.4	4,6,7,13	15.9%
20	5	226.9	6,10,11,14	262.1	4,6,7,13	15.5%
25	6	304.2	6,10,11,14	344.9	4,6,7,13	13.4%
30	7	374.5	6,10,11,14	428.1	4,6,7,13	14.3%
35	8	440.9	6,10,11,14	505.5	4,6,7,13	14.7%
40	9	505.2	6,10,11,14	581.7	4,6,7,13	15.2%
45	10	568.8	6,10,11,14	660.4	4,6,7,13	16.1%
50	11	633.0	1,6,10,11,14	749.3	4,6,7,13	18.4%
55	12	704.2	1,6,10,11,14	839.2	4,6,7,13	19.2%
60	13	784.2	1,6,10,11,14	948.6	3,6,7,13	21.0%

* 복부에 대한 강재의 최소 두께 조건이 제약조건으로 작용함

하중-저항계수 설계의 경우는 지간 15m에 대하여 G(10)의 제약조건 즉, 시공성을 고려하여 비합성 거동을 하는 경우의 복부 세장비 조건이 활성화 제약 조건으로 작용하지 않는데, 이는 강부재의 최소두께(0.8cm)로 복부의 하한가를 규정하였기 때문에 그 두께를 더 이상 적게 할 수 없기 때문이다.

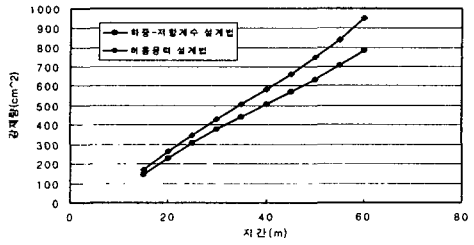


그림 5.3 지간 길이에 따른 주형 단면적의 변화

지간의 변화에 따른 강재량의 변화를 각 설계법에 대해 비교하여 보면(그림 5.3), 15m이하의 지간에서는 각 설계법에 따른 강재량의 차이가 근소하나 지간이 점점 늘어날수록 하중-저항계수로 설계한 교량이 더욱 경제적인 단면을 가진다. 지간 60m에서는 강재량의 차이가 약 21%에 달한다.

지간 길이에 따른 주형의 부위별 변화는 아래의 그림 5.4와 그림 5.5와 같다. 지간 길이에 따라 증가된 극한 모멘트에 대하여 설계모멘트도 증가하게 되며, 압축플랜지의 폭 및 두께는 횡좌굴에 저항하기 위하여 단면적이 증가하고, 복부의 높이는 사하중과 활하중에 의한 모멘트에 저항하기 위하여 단면적 및 높이가 증가하게 된다.

하중-저항계수 설계법에 의한 최적화 설계의 경우는 G(1)이 활성화 제약조건으로 작용하는 구간 (지간15m, 지간 50~60m)에서 인장플랜지의 두께를 얇게 하는 경우를 볼 수 있다.

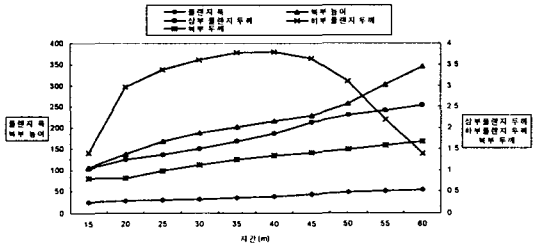


그림 5.4 지간 길이에 따른 강재의 단면변화(LRFD)

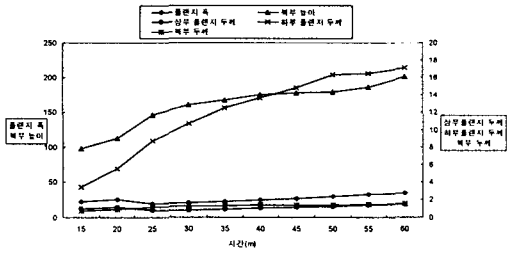


그림 5.5 지간 길이에 따른 강재의 단면변화(ASD)

5.2 가로보의 개수에 대한 주형의 변화

지간 42m에 대하여 가로보의 개수를 5~9개로 변화시키면서 최적화를 수행하였다. 이때 하중-저항계수 설계법에 의한 최적화 설계의 경우는 활성화 제약조건이 G(6), G(10), G(11), G(14)로 균등하게 분포하며, 허용응력 설계법에 의한 최적화 설계의 경우도 활성화 제약조건이 G(4), G(6), G(7), G(13)으로써 균일하게 분포함을 알 수 있다. 같은 지간에 대해 가로보의 개수가 많아지게 되면 상대적으로 횡좌굴에 대한 저항력이 커지게 되어 요구되는 압축플랜지의 단면적이 줄어들게 된다. 먼저 가로보의 개수에 대한 주형 단면적의 변화를 살펴보고, 각 부위별 치수 변화에 대해서 살펴보기로 한다.

가로보의 개수에 대한 주형 단면적의 변화는 표 5.2와 그림 5.6과 같이 나타난다.

표 5.2 가로보 개수에 따른 주형 단면적의 변화

지간(m)	가로보의 개수(개)	하중-저항계수 설계법		허용응력 설계법	
		강재의 총 단면적(cm^2)	활성화 제약 조건(G)	강재의 총 단면적(cm^2)	활성화 제약조건(G)
42	5	542.4	6,10,11,14	640.1	4,6,7,13
	6	537.7	6,10,11,14	629.2	4,6,7,13
	7	534.4	6,10,11,14	617.1	4,6,7,13
	8	532.2	6,10,11,14	612.9	4,6,7,13
	9	530.7	6,10,11,14	610.5	4,6,7,13

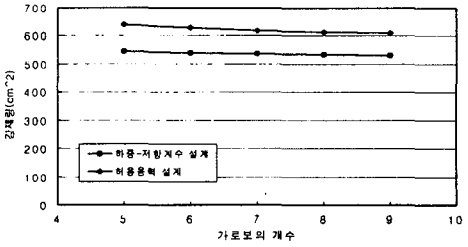


그림 5.6 가로보 개수에 따른 주형 단면적의 변화

가로보의 개수에 대한 주형 단면적의 변화는 표 5.2와 그림 5.6과 같이 나타난다. 주형의 단면적이 완만하게 줄어들고 있으며, 허용응력 설계법에 의한 최적화 설계의 경우가 조금 더 급한 경사도를 가지며 단면적이 줄어듦을 알 수 있다.

가로보의 개수에 대한 주형 단면의 부위별 형상변화는 아래 그림 5.7, 그림 5.8과 같다. 횡지지 길이가 변화함에 따라 횡좌굴에 의한 압축플랜지의 단면적은 줄어들게 된다.

하중-저항계수 설계법에 의한 최적화 설계의 경우는 가로보의 개수가 늘어남에 따라 플랜지의 폭, 상부플랜지의 두께, 복부 높이가 점차적으로 줄어들며, 복부 두께와 하부플랜지 두께가 점차적으로 늘어난다.

허용응력 설계법에 의한 최적화 설계의 경우는 가로보의 개수가 늘어남에 따라 플랜지의 폭, 상부플랜지의 두께가 줄어들며, 하부플랜지 두께, 복부 높이, 복부 두께가 늘어난다.

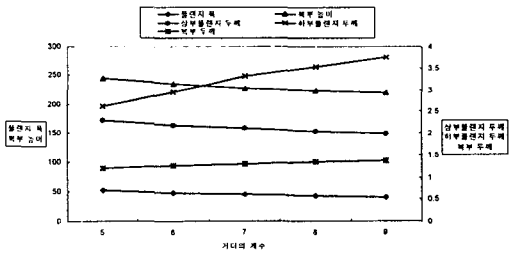


그림 5.7 가로보의 개수에 따른 단면형상 변화(LRFD)

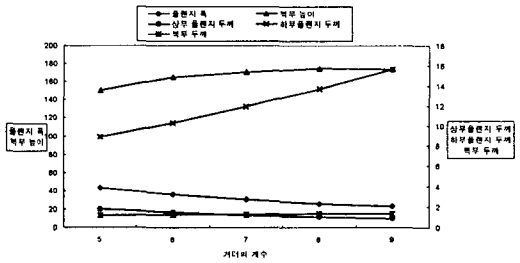


그림 5.8 가로보의 개수에 따른 단면형상 변화(ASD)

6. 결 론

본 연구에서는 도로교표준시방서(1996)[1][2]에 의한 합성교량 I거더의 최적설계과정을 프로그램화하였다. 이는 하중-저항계수 설계법과 허용응력 설계법에 대해서 각각 적용하였으며, 지간의 길이 및 횡지지 길이를 변화하며 각각에 대하여 최적설계를 찾아보았고, 두 설계법에 의한 최적설계의 결과를 비교 검토하여 아래와 같은 결과를 도출하였다.

(1) 하중-저항계수 설계법의 경우에는 단지간, 중간지간과 장지간으로 구분하여 결과를 살펴보면, 단지간과 장지간의 경우에는 제약조건중에서 슬래브와의 합성에 의한 소성휨모멘트조건이 활성화되며 이는 소성휨모멘트에 의하여 설계단면이 결정되어지는 것을 의미한다. 특히 장지간에서는 소성모멘트 중립축의 위치가 콘크리트 슬래브 부분에서 압축플랜지 내부로 이동하게 되며, 이것으로 인해 인장플랜지의 두께는 얇은 값을 갖게 된다. 중간지간(20~50m)의 경우는 압축플랜지에 발생되는 횡좌굴응력에 따라 설계가 결정된다. 중간지간의 경우에는 지간이 5m씩 늘어남에 따라 거더의 단면적은 10~13%의 증가가 일어나는 것으로 관찰되었다.

(2) 허용응력 설계법에 의한 최적화 설계에서 평판 두께의 상한 값을 두지 않는 경우에는 대부분의 지간에 대해 인장플랜지의 단면이 두터워지는 경향을 보여주고 있으나, 60m이상의 장지간에서는 압축플랜지 좌굴의 영향에 의해 오히려 압축플랜지의 두께가 증가한다. 중간지간의 경우에는 지간이 5m씩 늘어남에 따라 거더의 단면적은 11~13%의 증가가 일어나게 되어 증가량의 기울기에 있어서는 하중-저항계수 설계법에 의한 설계와 비슷한 양상을 띄게 된다.

(3) 지간의 길이를 달리하였을 경우 지간이 늘어남에 따라 하중-저항계수 설계법에 의한 설계가 더욱더 경제적인 단면을 가지게 되며, 지간 60m의 경우는 그 차이가 약 21%에 달한다.

(4) 하중-저항계수 설계법에 의한 설계에서 같은 지간에 대해 가로보의 개수가 1개씩 증가할 때마다 I형거더의 단면적이 1%이내의 근소한 감소가 발생한다. 단면의 형상도 압축플랜지의 폭, 두께와 복부의 높이가 감소하는 것으로 나타나고, 인장플랜지의 두께 및 복부의 두께는 증가하는 규칙성을 가진다.

(5) 허용응력 설계법에 의한 설계에서 같은 지간에 대해 가로보의 개수가 1개씩 증가할 때마다 I형거더의 단면적이 1.5%정도의 감소가 발생하여 하중-저항계수 설계법의 경우보다 감소율이 더 크게 나타났다. 단면의 형상은 압축플랜지의 단면적이 감소하고 그 이외의 부재는 증가하는 것으로 나타나 하중-저항계수 설계법에 의한 설계의 경우와는 차이가 있다.

7. 참고 문헌

1. "도로교표준시방서(부록) 하중-저항계수 설계편", 건설교통부 , pp.1-1 - 4-172, 1996.

2. "도로교표준시방서 설계/시공 및 유지관리편", 건설교통부 , pp.33-313, 1996.

3. Garret N. Vanderplaats, "Numerical Optimization Techniques For Engineering Design", Mc Graw-Hill Book Company, 1984.

4. Singiresu S. Rao, "Engineering Optimization Theory and Practice", John Wiley & Sons .Inc., 1996.

5. Vanderplaats, G. N. (1984). "ADS - a Fortran Program for Automated Design Synthesis Version 1.10", NASA CR 172460.