

ALFD해석방법에 의한 2경간합성교 연구 The Analysis of Two Span Continuous Composite Plate Girder Bridge by ALFD

한 상 철
Sang-Cheol Han

ABSTRACT

The main purpose of this study was to determine whether the inelastic moment-rotation characteristics defined by the lower-bound curve permit economical ALFD for noncompact plate girders. The study was also intended to determine the benefits of improving the moment-rotation to illustrate the application of the ALFD to noncompact plate girders and to show the influence of various parameters on the design process.

To accomplish these objectives, 34 preliminary designs were made by ALFD or LFD or WSD. In the study, this method of analysis is described first. Next, the design procedures are described. Finally, the resulting designs are presented and discussed.

1. 서 론

구조물 설계시 최근의 설계방법은 기존의 허용응력 설계법에서 강도설계법으로 변환되고 있는 추세이다. 현재 우리나라에서는 교량설계시 허용응력설계법을 사용하고 있으나 미국에서는 교량설계시 1973년 AASHTO에 의해서 강도설계법인 하중계수법(Load Factor Design)이 채택되었다.

연속판형교는 지점에서 소성힌지가 생겨도 붕괴되

지 않는 부정정특성과 잔류응력에 의한 Shakedown 현상으로 인하여 단순교보다 큰 강도를 갖는다. 이와 같은 특성을 하중계수법에서는 단면이 조밀단면일 경우 교각단면에서 모멘트를 10% 재분배함으로써 막연히 이용하고 있으며 여전히 탄성해석에 근거를 두고 교량을 설계하고 있다. Autostress설계방법은 이러한 Shakedown효과를 이용하여 교량을 설계하는 방법으로서 AASHTO에 의해 1986년 Guide Specification으로 채택되었다.

* 정회원 : 서울산업대학 토목공학과

소성설계방법으로 I-beam교나 관형교를 설계할 경우 부재는 조밀단면의 조건을 만족하여야 한다. 이를 위해서 AISC에서는 플랜지와 Web의 세장비를 제한하고 있다. 그러나 일반적으로 종래 교량에 사용된 관형의 세장비는 AISC에서 규정하는 세장비보다 크고 교량의 내측지점에서 요구되는 소성회전값은 AISC에서 규정한 소성회전값보다 작기 때문에 소성모멘트를 그대로 사용하는 일반적인 소성설계법을 교량의 설계에 적용 하기에는 부적당하다.

따라서 1981년 Carskaddan과 Grubb는 소성모멘트대신 유효소성모멘트개념을 개발하여 교량에 사용되는 대부분의 단면에 소성설계법을 적용할 수 있게 하였다. 비조밀관형에 대한 연구가 진행되면서 1985년 Schilling은 실험에 의해 유효소성모멘트개념을 대체할 수 있는 비탄성모멘트-회전특성인 Lower-bound 곡선을 제안하였다.

본 연구는 Schilling의 실험으로부터 얻은 비조밀관형에 대한 Lower-bound curve가 ALFD설계시 합리적으로 사용될 수 있는지를 알아보고 개선된 모멘트-회전특성의 이점과 ALFD설계방법의 적용을 예시하고 여러가지 인자들(M/M_E , Plastic Rotation, Stress Ratio등)의 영향을 보여주는데 목적이 있다.

2. 해석 방법

ALFD설계방법에서는 교각단면에서의 항복을 허용하고 나머지 부분은 탄성이라고 가정한다. 재하된 하중에 의해 각 교각단면에서 발생된 소성회전의 양은 다음의 두개의 관계에 의해 좌우된다.

- 1) 구조물에 대한 연속관계
- 2) 각 교각단면의 모멘트-회전관계

각 교각단면마다 가정된 소성회전(Plastic Rotation)에 대한 교량의 임의의 점에서의 모멘트는 연속관계식과 비탄성모멘트-회전곡선식을 이용하여 구할 수 있다. 2지간 교량의 경우 그림 (1)과 같은 항복선도표(Yield-line Chart)를 이용해서 직접구할 수

있다.

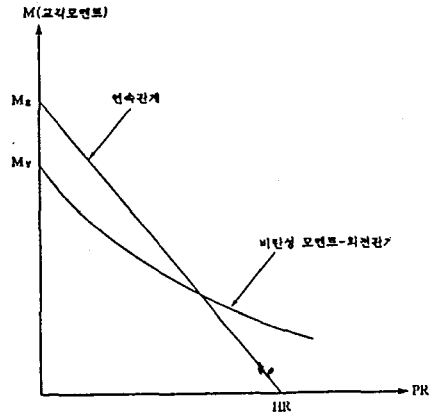


그림 (1) 항복선도표

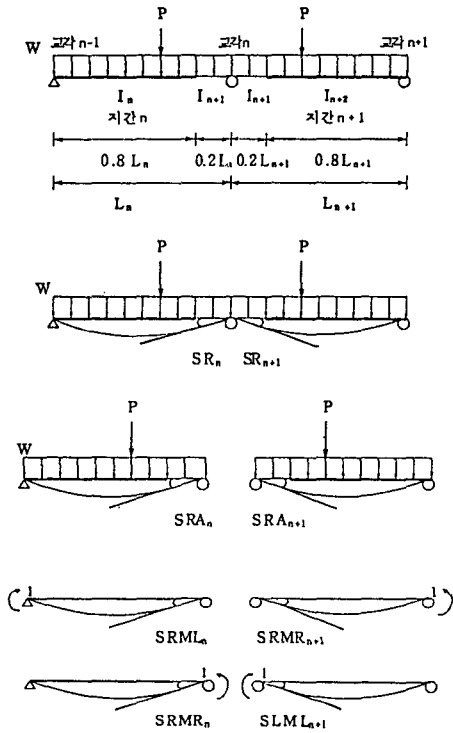
정확한 소성회전과 실제 모멘트값은 두 관계를 나타낸 선의 교점에서의 값이다. 모멘트-회전관계는 실험으로부터 얻어진 결과로서 비탄성모멘트-회전곡선에서 소성회전은 항복의 결과로 단면이 비선형거동을 할 때까지 0이다. 따라서 비탄성 모멘트-회전곡선은 최대하중검토에서는 교각단면이 항복모멘트(M_V)에 도달할 때 까지 탄성적이라고 가정하며 초과하중검토에서는 항복이 잔류응력에 의해 항복모멘트(M_V)에 도달하기전에 항복이 시작된다고 가정한다.

2.1 연속관계

2.1.1 부정정 해석방법

연속관계에서 가정된 소성회전에 대응하는 모멘트는 다음과 같은 일반적인 부정정 해석방법인 3연모멘트법과 유사한 방법을 이용하여 계산하였다.

(n지간 연속교 해석)



n지간의 오른쪽에서의 회전각
 $SR_n = SRA_n + M_n(SRMR_n) + M_{n-1}(SRML_n)$
 n+1지간의 왼쪽에서의 회전각
 $SL_{n+1} = SLA_{n+1} + M_n(SLML_{n+1}) + M_{n+1}(SLMR_{n+1})$
 지점 n에서 회전각방정식
 $PR_n = SR_n - SL_{n+1}$
 $= SRA_n + M_n(SRMR_n) + M_{n-1}(SRML_n) - (SLA_{n+1} + M_n(SLML_{n+1}) + M_{n+1}(SLMR_{n+1}))$
 3모멘트법형태로 다시 쓰면
 $SRML_n M_{n-1} + (SRMR_n - SLML_{n+1}) M_n + (-SLMR_{n+1}) M_{n+1} = PR_n - SRA_n + SLA_{n+1}$
 $C_{n,n-1} M_{n-1} + C_{n,n} M_n + C_{n,n+1} M_{n+1} = C_{n,ns}$
 여기서,
 $C_{n,n-1} = SRML_n$ $C_{n,n} = SRMR_n - SLML_{n+1}$
 $C_{n,n+1} = SLMR_{n+1}$ $C_{n,ns} = PR_n - SRA_n + SLA_{n+1}$
 2지간의 경우 ; $M_0 = 0, M_2 = 0$

$$C_{1,1} = SRMR_1 - SLML_2, \quad C_{1,1s} = PR_1 - SRA_1 + SLA_2$$

$$PR_1 = SRA_1 + SRMR_1(M_1) - (SRA_2 + SLML_2)M_1$$

여기서,

- M = 지점에서의 모멘트
- PR = 소성회전
- SR = 지간의 오른쪽 끝에서의 회전각
- SL = 지간의 왼쪽 끝에서의 회전각
- SRA = 작용하중에 의한 왼쪽에서의 회전각
- SLA = 작용하중에 의한 오른쪽에서의 회전각
- SRMR = 지간의 오른쪽 끝에서 단위 모멘트에 의한 오른쪽에서의 회전각
- SLMR = 지간의 오른쪽 끝에서 단위 모멘트에 의한 왼쪽에서의 회전각
- SRML = 지간의 왼쪽 끝에서 단위 모멘트에 의한 오른쪽에서의 회전각
- SLML = 지간의 왼쪽 끝에서 단위 모멘트에 의한 왼쪽에서의 회전각
- C = 계수

2.1.2 합성단면

합성형교에서 총모멘트, 처짐, 단위회전각은 강단면과 합성단면에 대한 값이 합해진 값이다. 2지간 합성형교에 대한 연속관계는 그림 (2)와 같다.

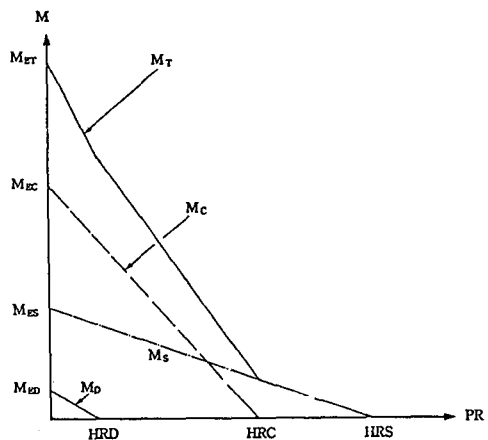


그림 (2) 교각단면에서 연속 관계

한상철

교각단면에서의 연속관계식 ;

$$M_{ET} = M_{EC} + M_{ES} + M_{ED}$$

$$M_C = M_{EC} - \frac{(M_{EC})(PR)}{HRC}$$

$$M_S = M_{ES} - \frac{(M_{ES})(PR)}{HRS}$$

$$M_D = M_{ED} - \frac{(M_{ED})(PR)}{HRD}$$

PR ≤ HRD일 경우 ;

$$M_T = M_C + M_S + M_D$$

PR > HRD일 경우 ;

$$M_T = M_C + M_S$$

초과하중해석에서 합성전사하중에 의한 강형에서 항복을 최소소성회전 (PRI)이라 하며 합성단면에 차 후하중이 작용될 때 합성전 사하중에 의한 소성회전 (PRI)을 제작상의 영구불연속과 같은 개념으로 다루었다. 최소소성회전의 영향은 그림 (3)와 같다.

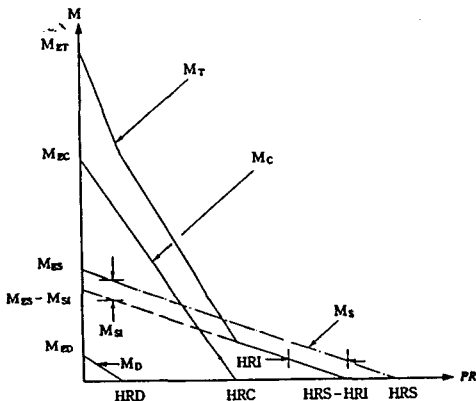


그림 (3) 최소소성회전에 대한 연속관계

최소 소성회전시 연속관계식 ;

$$M_{ET} = M_{EC} + M_{ES} + M_{ED}$$

$$M_C = M_{EC} - \frac{(M_{EC})(PR)}{HRC}$$

$$M_S = (M_{ES} - M_{SI}) - \frac{(M_{ES} - M_{SI})(PR)}{HRS - HRI}$$

$$M_D = M_{ED} - \frac{(M_{ED})(PR)}{HRD}$$

PR ≤ HRD일 경우 ;

$$M_T = M_C + M_S + M_D$$

PR > HRD일 경우 ;

$$M_T = M_C + M_S$$

여기서,

M : 교각단면모멘트 (PR의 함수)

M_{ET} : 총 탄성모멘트

M_{EC} : 활하중에 의한 탄성모멘트

M_{ES} : 합성전 사하중에 의한 탄성모멘트

M_{ED} : 합성후 사하중에 의한 탄성모멘트

PR : 소성회전 (Plastic Rotation)

HRC : 활하중 작용시 자유힌지회전각

HRS : 합성전 사하중 작용시 자유힌지회전각

HRD : 합성후 사하중 작용시 자유힌지회전각

HRI : 합성전 사하중에 의한 최소소성회전각

2.2 모멘트 - 회전 관계

2.2.1 초과하중 (Overload : OL)

$$OL = D + 5/3^{(L+1)}$$

초과하중은 구조물에 작용할 수 있는 하중으로서 가장 큰 하중으로 정의되며, 초과하중 작용시 요구조건은 영구치짐이 지정된 어느 한계내에 있어야한다. 이러한 조건을 만족하기 위해서 하중계수법은 부재의 용력을 제한하였지만 ALFD설계방법에서는 (-)모멘트지역에서의 용력을 제한하지 않고 내측지점에서의 Shakedown현상을 허용하였다. 따라서 잔류용력에 의해서 항복이 발생하고 모멘트-회전곡선이 비선형이 된다. AASHTO는 Guide Specification에서

rolled beam에 대한 초과하중 검토시 비탄성 모멘트-회전곡선을 제시하였다. 그러나 비조밀 관형에서의 모멘트는 좌굴에 의해서 항복모멘트로 제한되기 때문에 모멘트-회전곡선은 항복모멘트 M_y 에서 최대가 된다. 그림 (4)는 비조밀관형에 대한 모멘트-회전관계를 나타내고 있다.

비합성단면 ;

$$\frac{M}{M_y} = -3.646 \times 10^8 (PR)^4 + 7.188 \times 10^6 (PR)^3 - 54170 (PR)^2 + 210 (PR) + 0.6$$

합성단면 ;

$$\frac{M}{M_y} = 2.344 \times 10^8 (PR)^4 + 4.583 \times 10^6 (PR)^3 - 39690 (PR)^2 + 247.9 (PR) + 0.17$$

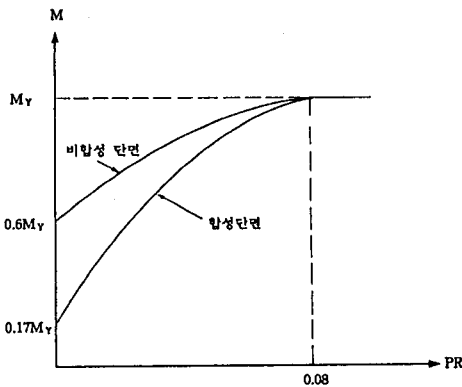


그림 (4) 초과하중 작용시 모멘트-회전관계

2.2.2 최대하중 (Maximum Load ; ML)

$$ML = 1.3(D + 5/3(L + I))$$

최대하중은 구조물에 작용하는 하중으로는 거의 생각할 수 없는 하중이며, 교량의 최대저항능력을 평가하기 위해 사용되는 하중이다.

비조밀관형에 대한 최대하중검토시 비탄성모멘트-회전특성인 Lower-bound curve를 사용하였다. 그림 (5)에서 곡선의 수평부분(PRF)은 비탄성 모멘트-회전 특성이 개선된 관형에 대한 것으로서 본 논문에서는 비탄성-모멘트특성을 개선했을 때 설계에 어떤 영향을 미치는가를 보여주기 위해서 이 수평 부분에 대해 여러 값을 주어 설계하였다.

Lower-bound 모멘트-회전관계식

$$\frac{M}{M_y} = 230(PR - PRF)^2 - 24(PR - PRF) + 1$$

직선식

$$\frac{M}{M_y} = 0.632 - 5.6(PR - PRF)$$

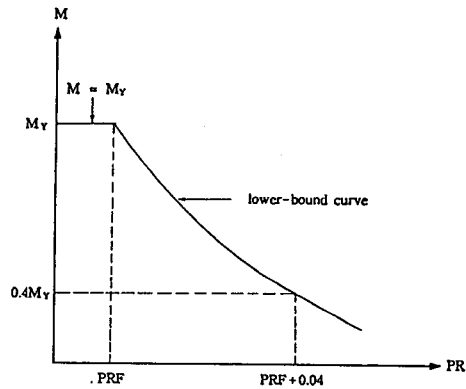


그림 (5) 최대하중에 대한 모멘트-회전관계

2.2.3 하중단계별 모멘트-회전곡선들의 관계

초과하중검토시 곡선은 0부터 항복모멘트까지의 하중제거동안의 비탄성 모멘트-회전관계이며, 최대하중해석시 곡선은 항복모멘트부터 하중제거동안의 비탄성 모멘트-회전관계이다.

2.2.4 항복모멘트

초과하중과 최대하중 각각에 대한 모멘트-회전곡선은 항복모멘트 M_y 의 향으로 규정하였다. 이때의 항복모멘트는 플랜지에서 잔류응력의 영향에 의한 항

한상철

복모멘트가 아니라 공칭용력이 플랜지에 규정된 최소 항복강도에 이를 때의 모멘트이다. 다음은 합성단면의 항복모멘트(M_Y)을 구하는 식이다.

— 최대하중해석의 경우

* 최초항복시 합성전 사하중에 의한 응력 : $\frac{M_{YT}(M_{ES})}{SMS(M_{ET})}$

* 최초항복시 합성후 사하중에 의한 응력 : $\frac{M_{YT}(M_{ED})}{SMD(M_{ET})}$

* 최초항복시 활하중에 의한 응력 : $\frac{M_{YT}(M_{EC})}{SMC(M_{ET})}$

$$Y = \frac{M_{YT}(M_{ES})}{SMS(M_{ET})} + \frac{M_{YT}(M_{ED})}{SMD(M_{ET})} + \frac{M_{YT}(M_{EC})}{SMC(M_{ET})}$$

$$M_{YT} = \frac{M_{ET}(SMC)(SMS)(SMD)Y}{M_{ET}(SMS)(SMD) + M_{ES}(SMC)(SMD) + M_{ED}(SMC)(SMD)}$$

— 초과하중해석의 경우

* 최대하중해석시 항복모멘트 방정식중

M_{ES} 를 ($M_{ES} - M_{SI}$)로 대체한다.

여기서,

M_{YT} : 최초항복에서 총 항복모멘트

M_{ES} : 합성전 사하중에 의한 강형에서의 탄성모멘트

M_{EC} : 활하중에 의한 합성단면에서의 탄성모멘트

M_{ED} : 합성후 사하중에 의한 합성단면에서의 탄성모멘트

SMS : 강형의 단면계수

SMC : 합성단면에서의 단면계수(n)

SMD : 합성단면에서의 단면계수(3n)

Y : 항복응력

n : 탄성계수비

3. 설 계

지간수와 길이가 다른 총 34개의 2지간 합성형교에 대한 예비설계를 하였다. 각 교량에 대해서 하나의 허용응력설계와 하중계수설계 그리고 하나 이상의 ALFD설계를 하였다. 각 설계방법에 대한 기준은 가능한 한 한국도로교시방서를 따르려고 하였으며, 시방서에 없는 기준은 미국의 AASHTO시방서를 이용

하였다.

3.1 설계기준

3.1.1 하중계수설계(LFD)

비조밀 관형에서 최대하중이 항상 설계를 지배한다. 최대하중시 비조밀단면에 대한 AASHTO시방서 LFD기준에서는 최대(+)와 최대(-)모멘트에 대한 플랜지응력을 항복응력으로 제한하였다.

3.1.2 ALFD설계

(+)휨지역에서의 플랜지응력(F_F)은 다음의 조건을 만족하여야 한다.

— 초과하중검토

$$F_F \leq 0.95F_y \text{ (합성단면)}, F_F \leq 0.8F_y \text{ (비합성단면)}$$

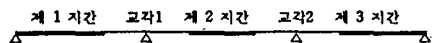
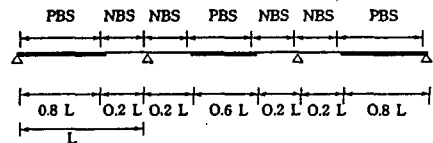
— 최대하중검토

$$F_F \leq F_y$$

(-)휨지역에서의 플랜지응력은 제한하지 않는다.

3.2 교량제원

본 연구에서 설계된 교량은 모든 교량이 대칭이며 교량의 (+)와 (-)휨지역은 그림(6)과 같다.



여기서, PBS : (+)휨단면
NBS : (-)휨단면

그림 (6) 교량 구조

전형적인 교량제원은 그림 (7)과 같다.

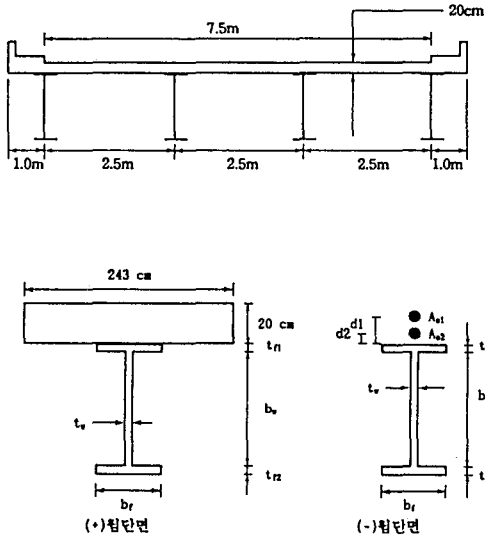


그림 (7) 교량제원

다음과 같은 조건으로 단면을 설계하였다.

- 1) 교량전체에 걸쳐 Web의 치수는 일정
- 2) 상부와 하부 플랜지치수는 두께만 변화.
- 3) 브레이싱 간격: 5m
- 4) 상판슬라브의 제원
 슬라브유효폭: 240cm
 슬라브두께: 20cm, 탄성계수비 n=8
 철근의 면적; 유효슬라브면적의 1%
- 5) 강재의 항복강도는 동일(교량전체)

3.3 하 중

3.3.1 사하중

내측주형에 대한 설계를 하였으며, 사하중에 대한 하중단계별 하중계수는 다음과 같다.

- 최대하중검토시 하중계수; 1.3
- 초과하중검토시 하중계수; 1

3.3.2 활하중

교량설계에서 허용응력설계시 활하중은 사용하중을, 하중계수설계와 ALFD설계시 활하중은 초과하중 또는 최대하중을 재하한다. 각 하중단계별 하중재하방법은 그림 (6)과 같다.

지배적인 (-)활하중: ML12

지배적인 (+)활하중: KS DB18트럭하중(MT1)
 KS DL18차선하중(ML1)

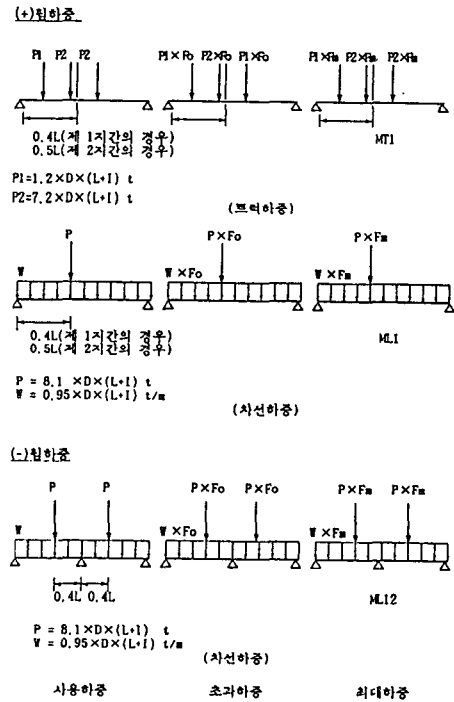


그림 (8) 하중재하방법

관형에 작용하는 활하중은 다음과 같은 3개의 계수를 기본적인 설계하중에 대하여 고려한다.

- 1) 활하중 분배계수(D)
 $D = S / 1.65$ (2차선이상인 경우; $S \leq 4.2m$)
 여기서, S: 세로보의 간격

2) 충격계수(I)

$$I = \frac{20}{L + 50}$$

3) 초과하중과 최대하중 계수

초과하중계수(Fo) : 1.667
 최대하중계수(Fm) : 2.167

3.4 설계방법

3.4.1 허용응력설계법(WSD)

3.4.2 하중계수법(LFD)

하중계수법으로 설계시 초과하중보다 최대하중이 설계를 지배한다. 따라서 모든 하중계수설계는 최대하중에 근거를 두고 설계한다. 단계별로 나타내면 다음과 같다.

- 1) 최대(+)와 (-)모멘트 계산.
- 2) 최초의 플랜지두께 결정.
- 3) 두가지 하중조건에 대하여 해석.
 (+)휨지역을 지배하는 하중
 (-)휨지역을 지배하는 하중
- 4) 각각의 최대휨모멘트의 응력비 계산.

$$\text{응력비}(K) = \frac{\text{플랜지응력}}{\text{항복응력}}$$
- 5) 응력비가 각각의 지역에서 허용한계를 초과한다면, (+)휨단면과 (-)휨단면의 양쪽의 플랜지두께를 변화.
- 6) 시도된 구조물에서 두가지 하중조건에 대하여 해석하고 응력비를 검토.
- 7) 시도된 구조물의 응력비들이 허용한계내에 들어올때까지 계속해서 이러한 과정을 반복.

이러한 하중계수설계과정은 실제적인 단면2차모멘트를 갖고 구조물을 해석하기 때문에 만족할 만한 설계를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 하중계수설계시 응력비의 허용한계를 교량설계시 소요값 1.0의 0.4

%로 보았다.

3.4.3 ALFD설계법

본 연구에서는 설계시 최대하중만을 검토하였다. ALFD설계에서 교각단면에 대한 설계기준은 교각단면에서의 하중계수설계모멘트의 어떤 백분률에 대응하는 단면 치수를 (-)휨지역에서의 단면으로 정하였다. 설계과정은 다음과 같다.

- 1) (-)휨단면의 하중계수설계모멘트 계산.
- 2) 유효항복강도이용 (-)휨단면의 플랜지두께를 결정.((-)휨단면은 전체 설계과정에서 불변.)

$$\text{유효항복강도}(F_c) = \frac{\text{실제항복강도}}{\text{선택된백분률}}$$
- 3) 최초의 (+)휨단면은 판단에 의해 결정.
- 4) 최초 시도된 구조물을 해석하여 각 휨단면에 대한 응력비를 계산.
- 5) 교각단면에서의 응력비는 무시하고 (+)휨지역에서의 응력비를 검토.(일반적으로 0.05%)

4. 비교분석

본 논문에서는 총 34개의 교량을 각각 허용응력설계, 하중계수설계 그리고 ALFD설계방법으로 설계한 결과가 도표 1, 2, 3에 요약되어 있다.

각 도표에서 설계번호의 문자 A, B는 비탄성 모멘트-회전곡선의 수평부분(PRF)이 각각 0.005 Radian, 0.01 Radian임을 뜻하며 나머지 설계번호는 PRF가 0 Radian임을 뜻한다. 각 도표의 설계형태에서 SBS50과 SBS41은 교량에 사용된 강재의 종류를 나타내며 강재종류 다음에 나오는 문자인 W, E, A는 각각 허용응력설계, 하중계수설계, Autostress설계방법으로 구조물을 설계하였음을 표기하였다. 다시 ALFD설계를 세분화하여 설계형태문자 뒤에 나오는 숫자는 (-)휨단면의 치수를 정하는 데 사용된 하중계수설계모멘트에 대한 설계모멘트의 비를 말한다.

표 1. 총강재무게와 플랜지면적

설계 번호	TYPE	경간	강지의 무게비		플랜지 면적비						
			플랜지	총계	계1경간		교각		평균	상부 플랜지	하부 플랜지
					상부 플랜지	하부 플랜지	상부 플랜지	하부 플랜지			
1	SFSSOW	2400	1.109	1.049	1.076	1.093	1.087	1.092	1.175	1.141	
2	SFSSOE	2400	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
3	SFSSOA.8	2400	0.943	0.973	1.000	1.062	1.033	0.602	0.767	0.701	
4	SFSSOA.6	2400	0.928	0.966	1.000	1.171	1.109	0.602	0.467	0.522	
5	SFSA1F	2400	1.207	1.076	1.076	1.215	1.174	1.266	1.301	1.259	
6	SFSA1E	2400	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
7	SFSA1A.8	2400	0.939	0.969	1.000	1.075	1.053	0.458	0.811	0.665	
8	SFSA1A.6	2400	0.929	0.963	1.000	1.159	1.113	0.433	0.524	0.487	
9	SFSSOW	2460	1.083	1.041	1.154	1.023	1.066	1.090	1.146	1.117	
10	SFSSOE	2460	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
11	SFSSOA.9	2460	0.958	0.979	1.000	1.038	1.028	0.848	0.875	0.863	
12	SFSSOA.9	2460	0.949	0.975	1.000	1.178	1.132	0.634	0.753	0.699	
13	SFSSOA.7	2460	0.953	0.977	1.000	1.336	1.250	0.454	0.626	0.548	
14	SFSSOA.6	2460	0.966	0.988	1.000	1.457	1.339	0.415	0.496	0.460	
15	SFSSOW	2465	1.244	1.132	2.154	1.048	1.288	1.244	1.158	1.195	
16	SFSSOE	2465	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
17	SFSSOA.9	2465	0.977	0.987	1.000	1.069	1.055	0.841	0.891	0.869	
18	SFSSOA.8	2465	0.989	0.994	1.000	1.236	1.186	0.651	0.774	0.721	
19	SFSSOA.7	2465	0.994	0.996	1.000	1.385	1.304	0.460	0.654	0.571	
20	SFSSOA.6	2465	1.004	1.002	1.000	1.515	1.406	0.378	0.511	0.454	
21	SFSA1F	2465	1.216	1.119	1.923	1.097	1.254	1.106	1.232	1.172	
22	SFSA1E	2465	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
23	SFSA1A.9	2465	0.950	0.978	1.000	1.025	1.021	0.866	0.910	0.889	
24	SFSA1A.8	2465	0.921	0.956	1.000	1.067	1.055	0.721	0.800	0.762	
25	SFSA1A.7	2465	0.930	0.961	1.000	1.218	1.177	0.576	0.691	0.637	
26	SFSA1A.6	2465	0.945	0.969	1.000	1.385	1.312	0.463	0.548	0.508	
3A	SFSSOA.8	2400	0.943	0.973	1.000	1.062	1.033	0.602	0.767	0.701	
3B	SFSSOA.8	2400	0.943	0.973	1.000	1.062	1.033	0.602	0.767	0.701	
4A	SFSSOA.6	2400	0.939	0.971	1.000	1.149	1.109	0.602	0.467	0.522	
4B	SFSSOA.6	2400	0.939	0.971	1.000	1.149	1.109	0.602	0.467	0.522	
18A	SFSSOA.8	2465	0.921	0.958	1.000	1.086	1.068	0.651	0.774	0.721	
18B	SFSSOA.8	2465	0.915	0.954	1.000	1.072	1.057	0.651	0.774	0.721	
19A	SFSSOA.6	2465	0.963	0.981	1.000	1.427	1.336	0.379	0.511	0.454	
19B	SFSSOA.6	2465	0.920	0.956	1.000	1.328	1.258	0.379	0.511	0.454	

표 2. 각 교량의 단면제원

설계 번호	TYPE	경간	계1경간				교각		복부단
			상부플랜지	하부플랜지	상부플랜지	하부플랜지	상부플랜지	하부플랜지	
1	SFSSOW	2400	1,400×31	2,537×31	2,358×31	3,800×31	0.95×140		
2	SFSSOE	2400	1,300×31	2,321×31	2,158×31	3,236×31	0.95×140		
3	SFSSOA.8	2400	1,300×31	2,440×31	1,300×31	2,483×31	0.95×140		
4	SFSSOA.6	2400	1,300×31	2,719×31	1,300×31	1,514×31	0.95×140		
5	SFSA1F	2400	1,500×31	3,782×31	3,800×31	5,610×31	0.96×150		
6	SFSA1E	2400	1,300×31	3,112×31	3,000×31	4,310×31	0.95×150		
7	SFSA1A.8	2400	1,300×31	3,345×31	1,374×31	3,497×31	0.95×150		
8	SFSA1A.6	2400	1,300×31	3,609×31	1,300×31	2,258×31	0.95×150		
9	SFSSOW	2400	2,000×31	3,852×31	3,867×62	4,899×62	1.25×180		

10	SFSSOE	2460	1,300×31	3,767×31	3,367×62	4,099×62	1.25×180
11	SFSSOA.9	2460	1,300×31	3,910×31	2,855×62	3,589×62	1.25×180
12	SFSSOA.8	2460	1,300×31	4,437×31	2,135×62	3,087×62	1.25×180
13	SFSSOA.7	2460	1,300×31	5,034×31	1,529×62	2,567×62	1.25×180
14	SFSSOA.6	2460	1,300×31	5,487×31	1,400×62	2,035×62	1.25×180
15	SFSSOW	2465	2,800×31	5,088×31	4,827×62	5,957×62	1.25×180
16	SFSSOE	2465	1,300×31	4,857×31	3,879×62	5,146×62	1.25×180
17	SFSSOA.9	2465	1,300×31	5,194×31	3,264×62	4,586×62	1.25×180
18	SFSSOA.8	2465	1,300×31	6,000×31	2,527×62	3,982×62	1.25×180
19	SFSSOA.7	2465	1,300×31	6,728×31	1,786×62	3,364×62	1.25×180
20	SFSSOA.6	2465	1,300×31	7,358×31	1,470×62	2,630×62	1.25×180
21	SFSA1F	2465	2,500×31	6,086×31	6,047×62	7,442×62	1.20×210
22	SFSA1E	2465	1,300×31	5,546×31	5,474×62	6,042×62	1.20×210
23	SFSA1A.9	2465	1,300×31	5,686×31	4,741×62	5,499×62	1.20×210
24	SFSA1A.8	2465	1,300×31	5,919×31	3,945×62	4,635×62	1.20×210
25	SFSA1A.7	2465	1,300×31	6,756×31	3,154×62	4,176×62	1.20×210
26	SFSA1A.6	2465	1,300×31	7,683×31	2,532×62	3,314×62	1.20×210
3A	SFSSOA.8	2400	1,300×31	2,440×31	1,300×31	2,483×31	0.95×140
3B	SFSSOA.8	2400	1,300×31	2,440×31	1,300×31	2,483×31	0.95×140
4A	SFSSOA.6	2400	1,300×31	2,668×31	1,300×31	1,514×31	0.95×140
4B	SFSSOA.6	2400	1,300×31	2,668×31	1,300×31	1,514×31	0.95×140
18A	SFSSOA.8	2465	1,300×31	5,274×31	2,527×62	3,982×62	1.25×180
18B	SFSSOA.8	2465	1,300×31	5,207×31	2,527×62	3,982×62	1.25×180
19A	SFSSOA.6	2465	1,300×31	6,930×31	1,470×62	2,630×62	1.25×180
19B	SFSSOA.6	2465	1,300×31	6,450×31	1,470×62	2,630×62	1.25×180

표 3. 각 단면설계시 설계인자

설계 번호	TYPE	경간	하중	응력비		MAE		FR mod
				(+)단면	(-)단면	(+)단면	(-)단면	
2	SFSSOE	2400	M1	0.996	0.776	1.000	1.000	0
			M12	0.667	0.998	1.000	1.000	0
			M1	0.668	0.728	1.000	1.000	0
3	SFSSOA.8	2400	M1	1.001	0.867	1.000	1.000	0
			M12	0.778		1.142	0.786	4.59
4	SFSSOA.6	2400	M1	1.001		1.038	0.889	2.17
			M12	0.839		1.251	0.566	9.46
6	SFSA1E	2400	M1	0.996	0.779	1.000	1.000	0
			M12	0.664	0.998	1.000	1.000	0
			M1	0.669	0.730	1.000	1.000	0
7	SFSA1A.8	2400	M1	0.997	0.867	1.000	1.000	0
			M12	0.747		1.099	0.862	2.39
8	SFSA1A.6	2400	M1	1.001		1.028	0.907	1.17
			M12	0.827		1.218	0.627	6.14
10	SFSSOE	2460	M1	1.001	0.757	1.000	1.000	0
			M12	0.792	0.998	1.000	1.000	0
			M1	0.958	0.697	1.000	1.000	0
11	SFSSOA.9	2460	M1	0.998	0.821	1.000	1.000	0
			M12	0.976		1.221	0.733	9.57
12	SFSSOA.8	2460	M1	0.955	0.756	1.000	1.000	0
			M12	1.000		1.284	0.614	13.65
			M1	0.954	0.881	1.000	1.000	0
13	SFSSOA.7	2460	M12	0.998		1.314	0.514	17.12
			M1	0.912	0.981	1.000	1.000	0
			M1	0.873	0.902	1.000	1.000	0

14	SIESDA 6	2850	MJ2	0.956		1.324	0.425	20.31
			ML1	0.949		1.077	0.732	5.69
			MT1	0.843	1.003	1.000	1.000	0
16	SIESOE	2855	MJ2	0.999	0.765	1.000	1.000	0
			ML1	0.950	0.698	1.000	1.000	0
			MT1	0.929	0.749	1.000	1.000	0
17	SIESDA 9	2855	MJ2	1.004		1.271	0.678	13.24
			ML1	0.978	0.820	1.000	1.000	0
			MT1	0.929	0.749	1.000	1.000	0
18	SIESDA 8	2855	MJ2	1.001		1.256	0.533	19.21
			ML1	0.978	0.889	1.000	1.000	0
			MT1	0.917	0.806	1.000	1.000	0
19	SIESDA 7	2855	MJ2	0.938		1.347	0.473	21.26
			ML1	0.882	0.977	1.000	1.000	0
			MT1	0.838	0.860	1.000	1.000	0
20	SIESDA 6	2855	MJ2	0.936		1.370	0.376	25.53
			ML1	0.930		1.161	0.718	8.90
			MT1	0.837		1.024	0.935	1.86

설계 번호	TYPE	경간	하중	음압비		WME		PR mmud
				(+)단면	(-)단면	(+)단면	(-)단면	
21	SIESDA5	2855	MJ2	0.999		1.265	0.460	22.40
			ML1	0.969	0.969	1.000	1.000	0
			MT1	0.939	0.874	1.000	1.000	0
22	SIESDA52	2855	MJ2	0.988		1.227	0.641	15.16
			ML1	0.938	0.926	1.000	1.000	0
			MT1	0.936	0.749	1.000	1.000	0
24	SIESAE	2855	MJ2	1.002	0.768	1.000	1.000	0
			ML1	0.736	0.999	1.000	1.000	0
			MT1	0.953	0.702	1.000	1.000	0
25	SIESDA 9	2855	MJ2	0.897		1.118	0.863	4.11
			ML1	0.952	0.745	1.000	1.000	0
			MT1	0.939		1.262	0.718	7.96
26	SIESDA 8	2855	MJ2	0.997	0.865	1.000	1.000	0
			ML1	0.947	0.809	1.000	1.000	0
			MT1	0.938		1.289	0.625	10.39
27	SIESDA 7	2855	MJ2	0.942	0.963	1.000	1.000	0
			ML1	0.865	0.880	1.000	1.000	0
			MT1	0.936		1.389	0.484	14.14
28	SIESDA 6	2850	MJ2	0.961		1.032	0.765	4.57
			ML1	0.861		1.000	0.928	1.39
			MT1	1.001	0.897	1.000	1.000	0
34	SIESDA 8	2800	MJ2	0.736		1.091	0.878	2.61
			ML1	1.001	0.867	1.000	1.000	0
			MT1	1.000		1.026	0.914	1.44
44	SIESDA 6	2800	MJ2	0.806		1.189	0.675	7.13
			ML1	1.000		1.026	0.914	1.44
			MT1	1.000		1.189	0.711	6.35
18A	SIESDA 8	2855	MJ2	0.999	0.898	1.000	1.000	0
			ML1	0.969	0.829	1.000	1.000	0
			MT1	0.949	0.808	1.000	1.000	0
18B	SIESDA 8	2855	MJ2	0.997		1.109	0.869	5.96
			ML1	0.949	0.829	1.000	1.000	0
			MT1	0.949	0.829	1.000	1.000	0
20A	SIESDA 6	2855	MJ2	1.003		1.333	0.445	23.06
			ML1	0.942		1.054	0.889	3.57
			MT1	0.849		1.009	0.976	0.73
20B	SIESDA 6	2855	MJ2	0.938		1.273	0.553	18.99
			ML1	0.988		1.098	0.884	3.81
			MT1	0.929		1.057	0.848	15.32

4.1 ALFD거동

4.1.1 교각단면치수의 영향

ALFD설계에서는 교각단면에서의 항복을 허용한다. 본 논문에서는 SBS50강재를 사용한 55m 2지간 연속합성형교설계(설계번호 16~20)를 이용하여 교각단면치수의 영향을 그림 9~12에 걸쳐 예시하였다. 여기서, 교각단면치수비는 ALFD설계시 교각단면의 치수를 결정할 때 사용된 하중계수설계모멘트에 대한 비이다.

그림 (9)는 최대하중 재하시 각 설계에서의 (+)와 (-)휨모멘트의 변화를 보여주고 있다. 그림 (9A)에서 (-)휨모멘트는 단면비가 작을수록 감소했다. ML12하중에 대한 모멘트는 교각단면에서 보다 많은 회전능력(Rotation Capacity)이 요구되기 때문에 ML1하중에 대한 모멘트보다 매우 빠르게 감소한다. 그림 (9B)에서의 (+)휨모멘트는 그림 (9A)에서의 (-)휨모멘트가 감소할때 증가하였다. 하중계수설계시 (+)휨지역에서는 ML1하중에 대한 모멘트가 ML12하중에 대한 모멘트보다 25% 크다. 따라서 ML1하중이 (+)휨지역에서의 단면설계를 지배한다. 교각단면치수비가 작아질수록 ML12하중에 대한 모멘트는 빠르게 증가하고 ML1하중에 대한 모멘트는 천천히 증가하여 0.9부터 ML1하중에 대한 모멘트를 초과함으로써 작은 치수비에서는 (+)휨지역에서의 단면설계를 ML12하중이 지배한다는 것을 알 수 있다.

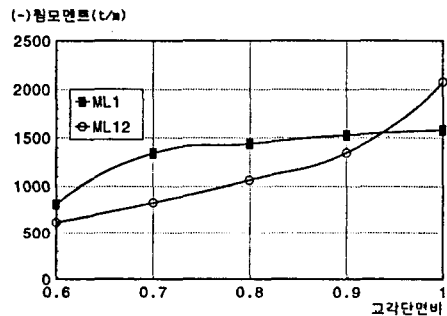


그림 (9A) 교각단면에서의 (-)모멘트의 변화

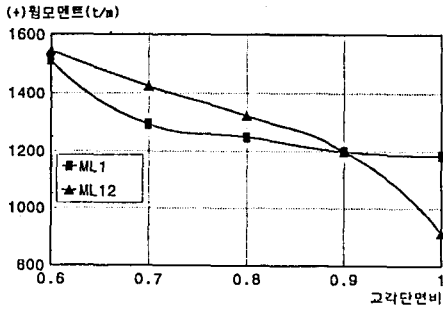


그림 (9B) 최대 (+) 휨모멘트

그림 (9) 교각단면치수비에 대한 모멘트의 변화

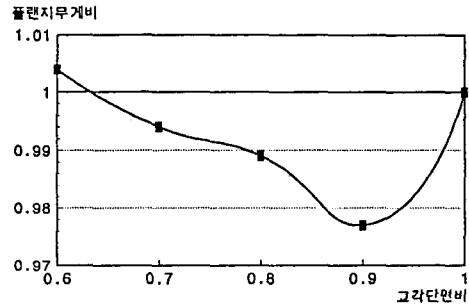


그림 (10B) 플랜지무게비

그림 (10) 플랜지면적과 무게의 변화

그림 (10)은 (+)와 (-)휨단면의 플랜지면적 및 무게의 변화를 보여주고 있다. 그림 (10A)에서 (+)휨단면에서의 플랜지면적비는 증가했고 (-)휨단면에서의 플랜지면적비는 거의 비례적으로 감소했다.

면적비의 변화는 양쪽에서 대략적으로 같으나 교각단면치수비에 대응하는 (-)휨단면의 플랜지면적이 (+)휨단면의 플랜지면적 보다 크기 때문에 (-)휨단면의 변화량이 상대적으로 상당히 크다. 그림 (10B)는 교량에 대한 총플랜지 무게비의 변화를 보여주고 있다. 교각단면치수비가 1부터 0.9까지는 총플랜지무게는 하중계수설계시 무게의 97.7%로 감소한 치수비가 0.9보다 작아지면 증가했다.

그림 (11)은 (+)와 (-)휨지역에서 상대적인 플랜지단면적의 변화량을 보여주고 있다.

상대적인 플랜지 단면적 :

$$\frac{(+)\text{ 휨단면의 플랜지 단면적}}{(-)\text{ 휨단면의 플랜지 단면적}}$$

교각단면치수비가 0.7인 점에서 두지역에서의 하부플랜지치수는 같으나 상부플랜지치수는 약 2.75만큼의 차이가 있다.

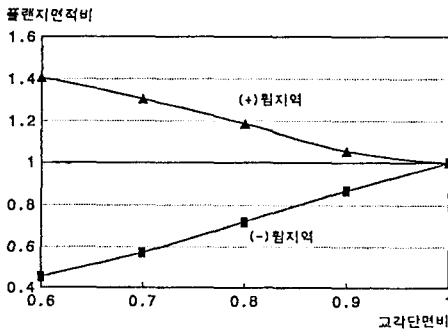


그림 (10A) 플랜지면적비

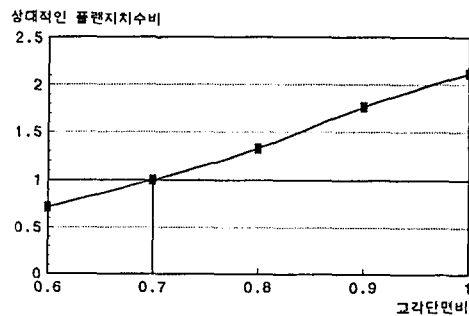


그림 (11A) 하부플랜지

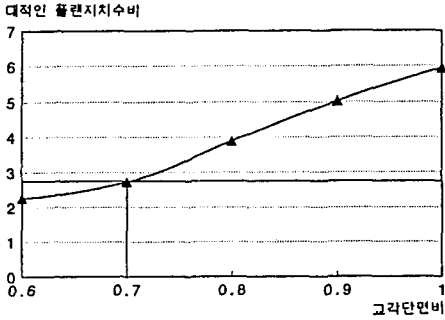


그림 (11B) 상부플랜지

그림 (11) (+)와 (-)휨지역에서의 상대적인 플랜지치수의 변화

그림 (12)은 ML12하중에 대한 교각단면에서의 소성회전의 변화량을 보여주고 있다. 소성회전(PR)은 교각단면의 치수가 감소하면 증가한다. 상대적으로 ML1하중에 대한 소성회전은 상당히 작다.

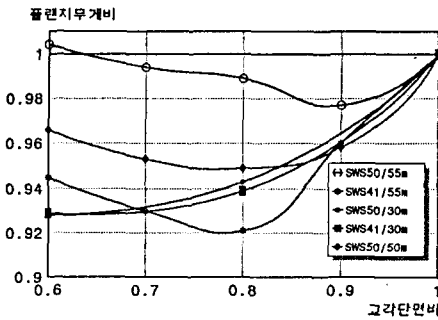


그림 (12) 소성회전의 변화

4.1.2 지배하중

ALFD설계를 지배하는 하중은 도표3에서 예시된 것처럼 설계변수들에 의해서 변한다. 하중계수설계시 (+)휨지역은 MT1이나 ML1이 설계를 지배하고, (-)휨단면은 ML12이 설계를 지배할 것이다. ALFD설계에서 (-)휨단면은 단면치수가 정해졌기 때문에 어떤 하중도 (-)휨단면을 지배하지 않는다.

따라서 (+)휨단면의 설계를 지배하는 하중이 ALFD설계를 지배할 것이다. 일반적으로 30m 2지간 연속교에서 MT1하중이 (+)휨단면의 설계를 지배한다. 설계 3의 예에서와 같이 31m 2지간 연속교에서는 MT1하중이 ALFD설계를 지배하고 항복이 발생하지 않는 경우 교량은 탄성적으로 거동하지만 ALFD설계는 이러한 설계를 허용한다. 50m, 55m 2지간 연속교에서는 ALFD설계는 ML12하중과 ML1하중에 의해서 지배되며 대부분의 지배하중은 교각단면에서 항복이 발생시킨다.

4.2 비교분석

4.2.1 무게비

그림 (13)은 교각단면치수비에 대한 5개의 2지간교량에 대한 각각의 플랜지무게비의 변화를 예시하였다. 교각단면치수비가 작아지면 무게비는 일반적으로 최소한으로 작아진 다음 증가한다. 무게가 최소일때의 치수비가 각 교량에 대한 최적의 교각단면치수비이다.

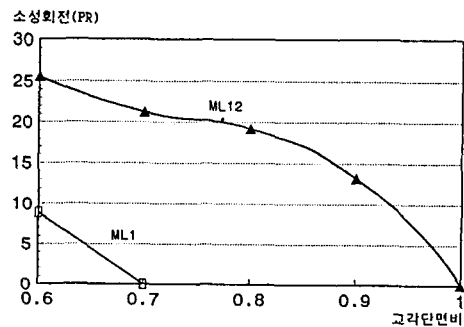


그림 (13) 여러교량에서의 플랜지무게의 변화

도표 1에서 나타난 것처럼 ALFD설계시 플랜지무게비들은 0.925이상의 범위에 있다. 따라서 일반적으로 ALFD설계과정은 조밀단면에 대한 것과 마찬가지로 비조밀 판형들에 대한 것도 다른 설계방법보

다 작은 강제무게를 제공하며, 또한 총플랜지 무게의 감소는 일반적으로 교각단면의 소성회전을 감소시키는 관형의 강성이 작은강도($F_y=2500\text{kg/cm}^2$), 짧은 지간(30m)에 대한것이 어느정도 크다는 것을 알 수 있다.

4.2.2 소성회전(PR)

도표3에서 최대하중시 교각단면에서의 소성회전은 0부터 0.02553 Radian 범위에 있다. ML12하중에서 소성회전이 발생하였으나 ML1하중 및 MT1하중에서는 거의 소성회전이 발생하지 않았다. 또한 소성회전은 짧은 지간보다는 긴 지간에서 크다.

4.2.3 모멘트비

도표3에서 실제모멘트와 탄성모멘트의 비(M/ME)는 (-)휨지역에서는 교각단면치수가 작아지면 감소하였으며, (+)휨지역에서는 교각단면치수비가 작아지면 증가하였다. (-)휨모멘트의 감소는 (+)휨모멘트의 증가보다 상대적으로 크게 변화하였다.

4.2.4 개선된 모멘트-회전곡선

도표1에서 항복모멘트에서 수평부분(PRF)을 가진 비탄성모멘트-회전곡선은 개선된 강형의 비탄성모멘트-회전특성의 영향을 보여주기 위해서 몇개의 ALFD설계에 사용하였다. PRF가 있는 경우 때때로 플랜지의 무게비가 개선되었다.

5. 결 론

본 연구에서 ALFD설계결과를 분석해본 결과는 다음과 같다.

- 1) 모든 교량에서 총플랜지무게비는 최소치로 감소한 다음 증가했다. 이때 이 최소치에 대응하는 교각단면치수비는 ALFD설계시 최적의 설

계를 제공한다.

- 2) 플랜지무게는 하중계수설계시 보다 평균 6%가 절약되었으며 이때 재료절약은 작은강도($F_y=2500\text{kg/cm}^2$), 짧은 지간(30m)에서 큰 재료절약이 발생하였다.
- 3) 비탄성모멘트-회전곡선을 개선하는 것은 때때로 총플랜지무게비를 감소시켰다.
- 4) 소성회전은 ML1 또는 MT2의 경우 거의 소성회전이 발생하지 않았고 지간이 길고 강재의 강도가 크고 교각단면치수가 작을 경우에 크게 발생하였다.

따라서 Lower-bound curve를 이용한 비조밀 관형에 대한 ALFD설계는 허용응력설계와 하중계수설계보다 재료절감효과가 크게 개선된 설계가 가능하다는 것을 알 수 있다. 또한 본 논문에서는 설계시 비탄성모멘트-회전곡선을 개선할 수 있는 모든 인자에 대해서 고려되지 않았기 때문에 이러한 인자들의 영향을 고려하면 현재의 설계보다 개선된 설계가 가능하다고 사료된다.

참고 문헌

1. Carskaddan, P.S., "Autostress Design of highway Bridges, Phase 3 : Interior Support Model Test," Research Laboratory Report, United States Steel Corporation, Monroeville, PA, Feb. 11, 1980.
2. Carskaddan, P. S., & Mion, R. L., "Rating of Steel Bridges with the Autostress Method," Proceedings of the Specialty Conference on Bridge Maintenance/Rehabilitation, held in Monroeville, PA, March 8, 1980.
3. Carskaddan, P. S., Haaijer, G., & Grubb, M. Positive-Moment Yielding, Engineering Journal, AISC, Vol. 21, No. 4, Fourth Quarter, 1984.
4. Gaylord, E. H, & Gaylord, C. N., "Structural

- Engineering Handbook," 2nd. ed., McGraw-Hill, New York, NY, 1979.
5. Grubb, M. A., "Design Example : A two-span Continuous Highway Bridge Designed by the Autostres Method," Report on Project 188, AISI, May 10, 1985.
 6. Carskaddan, P. S., & Grubb, M. A., "Autostress Design of Highway Bridges, Phase 3 : Moment-Rotation Requirements," Research Laboratory Report, United States Steel Corporation, Monreeville, PA, July. 6, 1981.
 7. Carskaddan, P. S., "Autostress Design of Highway Bridges, Phase 3 : Initial Moment-Rotation Tests," Research Laboratory Report, United States Steel Corporation, Monreeville, PA, April. 18, 1979.
 8. Haaijer, G., "Advances in Short Span Steel Bridges," Civil Engineering, Vol. 55, No. 11, Nov., 1985.
 9. Haaijer, G., "Autostress Design of Steel Structures," Presented at the April 9-13, 1973, ASCE National Structural Engineering Meeting, held at San Francisco, CA,(Preprint, 1930)
 10. Haaijer, G., & Carskaddan, P. S., "Autostress Design of Continuous Steel Bridge members," Proceedings of the Canadian Structural Engineering Conference, held at Montreal, Canada, 1970.
 11. 이원복, "기존강교의 재하능력 평가방법에 관한 연구", 홍익대학교 논총, 1987.
 12. 이원복, "Autostress설계법의 소개", 대한토목학회지, Vol. 36, No 3, 1988.