

ALFD방법에 의한 연속합성판형교의 강도평가에 대한 연구

A Study on the Strength Rating of Continuous Composite Plate Girder Bridges by ALFD

한 상 철¹⁾ . 정 경 희²⁾
Han, Sang Cheol Chung, Kyung Hee

요 약 : ALFD방법은 연속합성판형교의 과재하중과 최대하중에 대한 강도검토에 있어서 실제적인 거동을 나타낼 수 있는 탄소성해석법이다. 주어진 하중으로 인한 최대 정, 부모멘트단면에서의 항복은 활하중이 통과한 후에 잔류하는 소성회전을 일으킨다. 또한 제조시의 잔류응력으로 인하여 이론적인 항복모멘트 이하에서도 소성변형을 일으킨다. 이러한 국부항복은 다음에 작용되는 과재하중하에서 탄성화되어 정의 자생모멘트를 유발한다. 본 연구에서는 지점과 최대 정모멘트 단면에서의 단위소성회전각으로 인한 자생모멘트를 공액보법과 3연모멘트법에 의하여 구하였고, 9개의 설계경간을 지점단면을 감소시켜가면서 본 연구에서 개발한 전산프로그램에 의하여 연속관계와 모멘트-비탄성회전각 실험곡선과 일치하는 자생모멘트를 구하였다. 또한 한국도로교시방서에 준하여 비조밀단면을 갖는 3경간 연속합성판형교의 평가를 수행하였다.

ABSTRACT : Elastic-plastic methods have been used for the better prediction of the actual behavior of continuous-composite plate girder bridges in the overload and maximum load analysis. The structural evaluation using ALFD (Alternate Load Factor Design) uses the elastic-plastic analysis. The plastic rotations that remain after the load is removed can be occurred by the yielding locations of the maximum moment section. This situation can occur due to the residual stresses even if the moment is below the theoretical yield moment. The local yielding causes positive automoments that assure elastic behavior under subsequent overloads. In this study, the automoments at the piers occurred due to the unit plastic rotations and other locations were calculated by the conjugate-beam method and three-moment equation, using the nine design span with progressively smaller pier sections. The automoments were determined by the developed computer programs in this study, in which the moments and plastic rotations from the continuity and moment-inelastic rotation relationships must be equal. And also the ratings of 3-span continuous composite plate girder bridges with non-compact section were carried out according to the Korean Highway Bridge Specification.

핵심용어 : 자생모멘트, 탄성화, 유효소성모멘트, 자생모멘트계수, 연속합성판형교 소성회전, 모멘트-회전곡선.

KEYWORDS : automoment, shakedown, effective plastic moment, automoment coefficient, continuous composite plate girder bridges, Plastic rotation, Moment-Rotation curve.

1) 정희원, 서울산업대학교 토목공학과 교수
2) 한국철도대학 철도시설토목과 교수

본 논문에 대한 토의를 1999년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근의 구조물의 설계법은 허용응력설계법에서 강도설계법으로 전환되어가는 추세에 있다. 교량의 설계 특히 강교의 설계에서는 하중계수법(Load Factor Design)이 이미 채택된바 있다⁽¹⁾. 조밀단면을 갖는 연속강합성교를 강도설계법으로 해석할 때에는 Shakedown 현상에 의하여 발생하는 자생모멘트를 고려할 수 있다.

Shakedown 현상이란 부재가 소성영역에 이르는 하중을 되풀이하여 받는 과정에서 강재의 소성이 탄성으로 안정화되는 현상을 말하고 이로 인해 발생하는 자생모멘트에 의해서 부모멘트가 발생하는 내측지점에서의 정모멘트가 자동적으로 발생하여 내측지점의 부모멘트를 감소시켜 주게 된다. 조밀단면의 연속I형교에 대해서는 횡방향의 비틀림좌굴이 발생하지 않도록 충분히 횡지지된 조건 하에서의 ALFD (Alternate Load Factor Design) 방법이 AASHTO지침시방서에 규정되어 있지만⁽²⁾ 비조밀단면을 갖는 연속합성판형교에 대한 모멘트-비탄성회전각 실험곡선의 개발을 위한 실험이 진행중에 있다⁽³⁾.

압축플랜지는 초조밀단면이고 복부의 세장비는 비조밀단면인 시편을 시험하여 부모멘트 영역에서 복부의 세장비에 따라 조밀단면에서 개발한 모멘트-비탄성회전각 곡선을 수정하여 과재하중 및 최대하중에 적용할 수 있는 통합자생응력법을 개발한바 있으며⁽⁴⁾ 정모멘트 영역에서 모멘트-비탄성회전각 곡선은 텍사스대학의 Frank 와 Vasseghi가 제시한바 있다⁽⁵⁾.

본 논문은 비조밀 연속 판형교에서 소성변형 때문에 발생한 자생모멘트의 값과 재분배모멘트를 구하는 방법을 제시하였고 조밀단면에서 개발한 모멘트-비탄성회전각 곡선을 사용하여 비조밀 단면의 자생모멘트를 구하는 방법을 개발하였다. 또한, 한국도로교 표준시방서 규정에 따라 제조시 잔류응력과 실제의 모멘트 재분배를 고려하여 과

재하중 및 최대하중에 대한 강도평가방법을 제시하였다.

2 자생모멘트

2.1 자생모멘트의 발생

그림 1과 같이 2경간 연속 강형교에서 활하중이 작용하면 내측지점에서의 부모멘트가 가장 크게 발생한다. 소성변형을 일으킬 만한 크기의 활하중이 통과하면 국부적인 소성변형이 남게된다 그림1(a), 내측지점에서의 구속을 해제하면 그림 1(b), 와 같이 위로 올라간다. 그러나 지점이 구속되어 있거나 또는 사하중이 있으면 솟음이 제거되면서 외측 양지점에 반력들이 발생되고 반력에 의하여 내측지점에 모멘트가 발생한다. 이 모멘트를 자생모멘트라 하며 자생모멘트의 크기는 소성변형에 의한 비탄성회전각에 의해 결정된다.⁽⁶⁾ 이와 같이 비탄성회전각은 항복이 발생하는 단면에서만 일어나고 보의 나머지 단면은 탄성이라고 가정한다. 비조밀단면의 비탄성 회전각 실험곡선은 조밀단면에서 실험하여 얻은 모멘트-비탄성회전각 곡선을 이용하는데 플랜지는 초조밀단면이고 복부는 비조밀단면을 갖는 판형에서 복부의 세장비에 따라 수정된 곡선을 이용할 수 있음을 밝혔다⁽⁷⁾. 최대 정, 부모멘트 단면에서 발생하는 자생모멘트를 구할수 있다면 총 모멘트는 탄성모멘트에 자생모멘트를 합하여 얻을 수 있다. 작용하중에 의해서 항복이 발생하는 모든 위치에서 연속관계와 회전관계를 만족시키는 자생모멘트를 구할 수 있다. 연속관계는 부재의 전 길이에 걸친 강성에 의해 결정되고 회전관계는 항복단면의 기하학적 성질에 의존한다. 또한, 3경간 이상의 연속판형에서는 연속관계와 회전관계를 동시에 만족시키기 위한 반복법이 요구된다

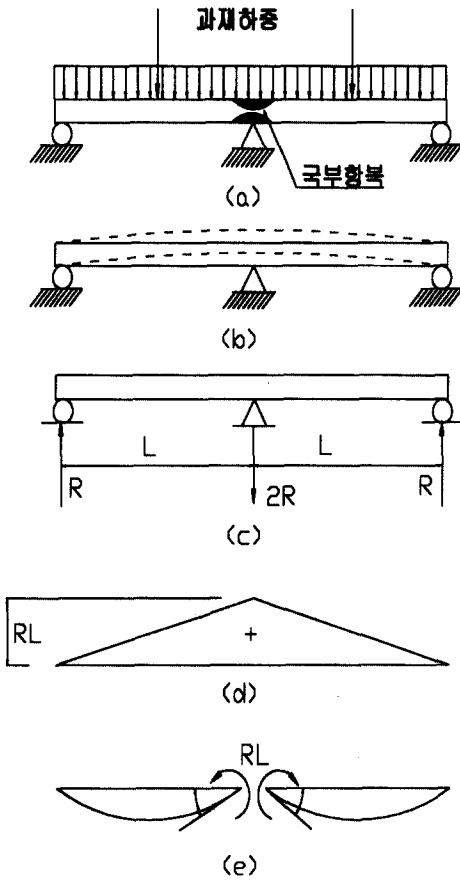


그림 1. 자생모멘트 발생과정

2.2 내측지점에 발생하는 자생모멘트

연속보에서 작용하중에 의해 내측지점에서 항복모멘트를 초과하는 모멘트가 발생한다면 비탄성회전이 발생하고 이 비탄성회전은 하중이 통과한 후에도 소성변형으로 남게되므로 자동적으로 자생모멘트를 발생하여 다른 내측지점에 대하여서는 재분배시킨다 (그림2). 하중이 통과한 후에 소성변형각은 남아 있다. 이때 소성변형각으로 인하여 발생한 자생모멘트는 지점의 소성변형각에 비례하며 지점의 탄성모멘트를 감소시키고 경간에서는 탄성모멘트를 증가시킨다.

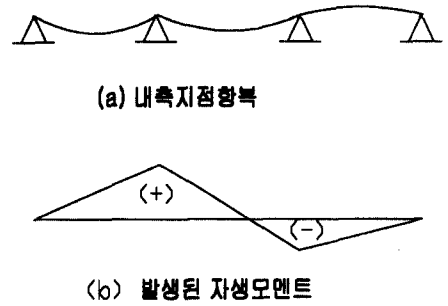


그림 2. 내측지점 1에서 불연속으로 인한 자생모멘트

2.3 경간내에서 발생하는 자생모멘트

작용하중은 지점 이외의 위치에서도 항복을 일으킬 수 있다. 즉 항복은 최대 정모멘트 위치에서도 발생할 수 있다.⁽⁸⁾ 최대 정모멘트가 이론적인 항복모멘트 이하 일 지라도 잔류응력의 결과로서 발생할 수 있다. 경간 내에서의 항복으로 인한 자생모멘트의 발생과정은 아래 그림 3, 과 같이 설명할 수 있다. 이 경우 경간에서의 소성회전각은 내측지점의 회전각으로 환산할 수 있다. 경간내에서 항복으로 인한 각의 불연속을 단순보로 가정하면 보의 나머지 부분은 그림에서와 같이 직선이 되며 이 때 발생하는 경간내에서의 소성회전을 내측지점으로 환산하면 회전각은 다음과 같다.

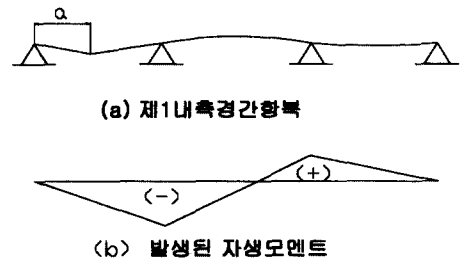


그림 3. 경간내 불연속으로 인한 자생모멘트

$$\theta_s = a \times \frac{\theta_p}{L_s}$$

여기서

θ_s : 내측지점에서의 회전각

a : 비탄성 회전각 점까지의 거리

L_s : 지간의 길이

θ_p :경간에서 비탄성회전각

$$M1P1 = \frac{12EI}{L} \cdot \frac{n+1}{2n^2+8n+4}$$

$$M2P1 = \frac{-6EI}{L} \cdot \frac{n}{3n^2+8n+4}$$

$$M1P2 = -\frac{6EI}{L} \frac{n}{3n^2+8n+4}$$

$$M2P2 = \frac{12EI}{L} \frac{n+1}{3n^2+8n+4}$$

$$M1S1 = -\frac{12EI}{L} \cdot \frac{(n+1).x}{3n^2+8n+4}$$

$$M2S1 = \frac{6EI}{L} \frac{n.x}{3n^2+8n+4}$$

$$M1S2 = -\frac{6EI}{L} \frac{2+2n-2x-3nx}{3n^2+8n+4}$$

$$M2S2 = -\frac{6EI}{L} \frac{2x-n+3nx}{3n^2+8n+4}$$

$$M1S3 = \frac{6EI}{l} \frac{nx}{3n^2+8n+4}$$

$$M2S3 = -\frac{12EI}{L} \frac{(n+1).x}{3n^2+8n+4}$$

여기서 n 은 경간비이고 x 은 경간내에서 소성회전이 발생하는 위치이다.

실제모멘트는 이 자생모멘트계수와 발생한 소성회전각의 곱으로 표현된다. 위식 ① ②는 항복이 발생한다고 가정하는 모든 위치에서 소성회전과 지점모멘트와의 상호관계를 나타내는 연속관계이다. 유사한 연속관계를 각각의 지점에 적용하여 지점모멘트를 알수 있고 경간내에서의 모멘트는 탄성해석에 의해 계산할 수 있다.

3. 연속 합성판형교의 해석

3.1 연속관계

연속합성판형교에서 지점에서 총 모멘트는 작용하중으로 인한 탄성모멘트와 소성회전으로 인한 자생모멘트를 합한 모멘트이다. 소성회전은 작용하중에 의한 응력과 잔류응력에 의한 항복에 의해 발생한다.

지점1,2에서 총 모멘트는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$M1C = M1E + M1P1 \times R1 + M1P2 \times R2 +$$

$$\dots + M1PN \times Rn \text{ --- ①}$$

$$M2C = M2E + M2P1 \times R1 + M2P2 \times R2 +$$

$$\dots + M2PN \times Rn \text{ --- ②}$$

여기서 $M1C, M2C$ 은 지점1,2 에서의 총모멘트, $M1E, M2E$ 은 지점1,2에서 작용하중에 의한 탄성모멘트, $R1, R2 \dots Rn$ 은 지점1,2... n 에서 소성회전각, $M1P1, M1P2, M1PN$ 지점 1,2... n 에서 단위소성회전각 때문에 지점1에서 발생한 자생모멘트계수, $M2P1, M2P2 \dots M2PN$ 지점 1,2... n 에서 단위소성회전각 때문에 지점2에서 자생모멘트 계수이다. 또한, 단위소성회전각을 일으키는데 요하는 모멘트를 자생모멘트계수라고 한다. 이 자생모멘트 계수는 부재의 강성으로서 3연모멘트법 및 공액보법으로 구할 수 있는데 대칭인 3경간 연속형에서 자생모멘트계수를 본 연구에서 구한 결과는 다음과 같다⁽⁸⁾

3.2 회전관계

압축플랜지는 초조밀단면이고 복부는 비조밀단면인 판형일 경우 조밀단면에서 개발한 모멘트-비탄성회전각 곡선은 복부의 세장비에 따라 수정한 모멘트-비탄성회전곡선을 사용할 수 있음을 밝혔는데⁽⁴⁾ 즉, 조밀단면에서 개발된 모멘트-비탄성곡선에서 소성모멘트 대신에 최대모멘트능력(M_{max})으로 표시하여 비조밀단면에 적용하였다.

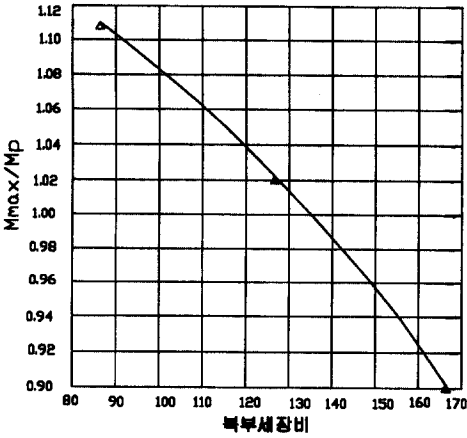


그림 4. 복부세장비 - 모멘트 곡선

즉 Mmax 는 복부의 세장비가 134 까지는 소성모멘트 (Mp)와 같고 복부의 세장비가 134 에서 170 까지는 복부의 세장비가 변함에 따라 변한다(그림 4).

Mmax / Mp 은 복부의 세장비가 160 일 때 0.92 로 복부의 세장비가 88에서는 1.11까지 변화하였다. 그러나 최대값은 소성설계에서 하는 방법과 1로 제한하였다. 경간단면에서 모멘트-비탄성회전각곡선은 텍사스대학의 Frank와 Vasseghi에 의해 실험되었는데 비탄성회전의 대부분은 전단 연결재에 의하여 콘크리트의 국부적인 파쇄에 기인한다는 것이 관찰되었다. AASHTO의 지침시방서에서 채택한 지점단면의 모멘트-비탄성회전곡선과 비교하기 위하여 정모멘트영역의 모멘트-비탄성회전 실험곡선과 함께 그림 5, 에 도시하였다. 텍사스곡선은 소성회전 0.015 rad 에서 소성모멘트(Mp)에 도달하였다. 변형을경화 현상에 의해 소성모멘트(Mp)이상 증가 할 수 있지만 소성설계에서처럼 소성모멘트(Mp)이상 증가는 무시하였다. 대신에 소성회전이 0.015 rad을 초과하면 소성모멘트(Mp)에 일정하게 남아 있다고 가정하였다. 이와 같이 비탄성회전곡선을 회기분석하여 얻은 소성회전 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{M}{M_p} = -0.0001 \times \theta_p^4 + 0.0035 \times \theta_p^3 - 0.0452 \times \theta_p^2 + 0.2757 \times \theta_p + 0.2243$$

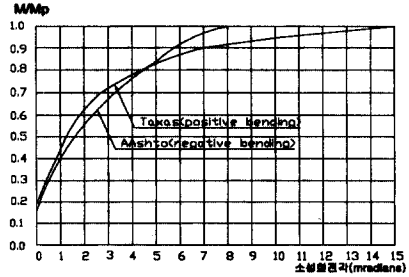


그림 5. 모멘트 - 회전곡선

3.3 모멘트 재분배

강재의 비탄성회전 때문에 발생된 자생모멘트는 지점단면에서는 탄성적으로 계산된 부모멘트에 정의 자생모멘트를 더하여 주게 되므로 총 모멘트가 감소한다. 또한, 모멘트재분배가 발생한다(그림 6).

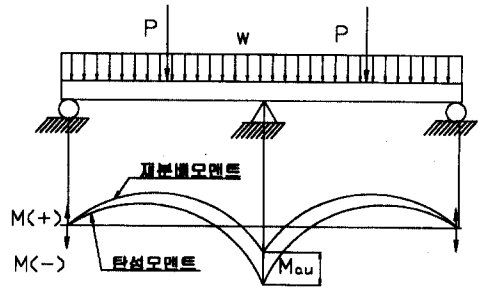


그림 6. 모멘트 재분배

어떠한 점에서 항복이 발생하였을 때 그때의 모멘트와 소성변형은 연속관계와 회전관계를 동시에 만족해야한다. 즉 항복이 발생한 위치에서는 연속관계와 회전관계로 부터 얻은 모멘트와 소성회전은 동등하여야 한다. 이와 같은 위치에서는 두 개의 방정식(연속관계, 회전관계)과 두 개의 미지수(소성회전, 모멘트)가 있으므로 유일 해를 얻은 데 충분하다. 지점에서만이 항복하는 2경간형

에서는 연속관계와 회전관계의 두 개의 방정식은 동일하다고 보아 직접 구할 수 있다. 만약 항복이 다른 위치에서도 발생하고 2경간 이상이라면 반복절차가 요구된다. 3경간 이상인 연속합성형에서는 한 내측지점에 발생한 자생모멘트는 다른 단면에 영향을 주므로 소성변형과 그때의 모멘트를 구하기 위하여 반복계산이 요구된다. 회전관계는 비선형이고 최대정모멘트 위치는 하중의 크기 및 재하위치에 따라 변한다. 지점과 다른 위치에서 소성회전 때문에 연속관계를 적용하여 지점에서 모멘트를 구할 때 사용되는 자생모멘트계수는 부재의 고유한 성질이기 때문에 반복시에는 변하지 않는다.

3.4 3경간 연속형의 자생모멘트 계산

3경간 연속형에서는 내측지점의 소성변형과 경간의 소성변형을 고려하여 자생모멘트를 계산한다 (그림 7).

제1단계에서는 경간에서의 소성변형을 무시하고 두 개의 내측지점 1, 2 에서 연속 및 회전관계를 동시에 만족하는 모멘트(M1C, M2C)와 그때의 소성변형(R1, R2)을 구한다.

제2단계에서는 내측지점에서 구한 소성변형(R1, R2)에 의해 내측지점모멘트를 사용하여 경간에 항복이 발생하는 단면에 경간모멘트(M1S, M2S, M3S)를 계산한다.

$$M1C = M1E + M1P1 \times R1 + M1P2 \times R2 + M1S$$

$$M2C = M2E + M2P1 \times R1 + M2P2 \times R2 + M2S$$

여기서 M1C, M2C 은 지점 1, 2 의 총모멘트 M1E, M2E 은 지점 1, 2 의 작용하중에 의한 탄성모멘트 R1, R2 는 지점소성회전각 M1S, M2S 경간에서 발생한 자생모멘트를 지점 1, 2에 재분배된 양으로서 경간의 소성회전각 및 자생모멘트계수에 의하여 다음과 같이 계산한다.

$$M1S = M1S1 \times RS1 + M1S2 \times RS2$$

$$+ M1S3 \times RS3$$

$$M2S = M2S1 \times RS1 + M2S2 \times RS2 + M2S3 \times RS3$$

$$+ M2S3 \times RS3$$

여기서 RS1, RS2, RS3 은 경간 ①, ②, ③에서 소성회전각

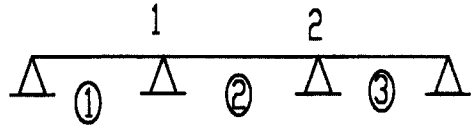


그림 7. 3경간 연속보

4. 3경간 연속 합성 판형교의 강도평가

4.1 설계제원

설계 예는 자생모멘트의 영향이 설계단면에 미치는 영향을 알아보기 위한 것이기 때문에 내측주형만 고려하였다. 대상 교량은 1등교인 대칭인 3경간 연속합성형교로서 지간길이 30m + 36m + 30m, 40m + 48m + 40m, 50m + 60m + 50m 인 3종류로 주형간격은 2.8m로 하였다. 콘크리트의 설계 기준강도 $\sigma_{ck} = 280 \text{ kg/cm}^2$ 를 사용하였고 사용철근은 SD35 ($\sigma_y = 3500 \text{ kg/cm}^2$) 탄성계수비 $n=8$ 사용강재는 SWS50 ($\sigma_y = 3200 \text{ kg/cm}^2$)으로 하였다. 내측지점 좌,우 경간의 20%까지는 부 모멘트를 받는다고 가정하고 콘크리트의 인장강도는 무시하였다. 따라서, 대칭인 3경간 연속보는 3곳의 위치에서 검토하였다. 지점에서 압축플랜지는 모멘트-비탄성회전곡선에 일치시키기 위해 초조밀단면으로 하였다. 유효슬래브폭은 한국도로교시방서 규정을 적용하였고 종방향철근은 지점슬래브의 유효단면적 2%로 하고 종방향철근의 2/3 는 슬

래브상부에 놓고 나머지 1/3은 하부에 놓았다. 부 모멘트영역에서는 강형과 철근이 합성 되었고 정 모멘트영역에서는 콘크리트슬래브가 강형과 합성된 구조로 하여 구조의 전구간을 등가환산단면 2차 모멘트로 하였다. 도로교시방서의 규정에 따라 횡분배계수, 충격계수를 구하여 3경간연속교에서 제1경간의 3/8점, 지점, 제2경간의 중앙점에 과재하중에 의한 모멘트를 영향선도에 의해 구한 값은 표 1과 같다.

표 1. 과재하중에 의한 모멘트

경간길이 (m)	과재하중모멘트(t-m)		
	제1경간	지점	제2경간
30+36+30	522.11	633.94	484.15
40+48+40	785.45	1083.93	720.72
50+60+50	1208.60	1772.12	1116.92

지점단면에서 압축플랜지는 초조밀단면을 갖고 복부는 비조밀단면으로 전구간에 걸쳐 복부의높이가 일정하게 하여 최대휨모멘트가 발생하는 지점에서의 단면을 표 2, 표 3 과 같이 가정하였다.

표 2. 경간단면 (단위 : cm)

경간길이 (m)	경간1		경간2	
	TF	BF	TF	BF
30+36+30	30*1.71	50*2.80	30*1.71	50*3.10
40+48+40	30*1.71	60*3.20	30*1.71	60*3.30
50+60+50	30*1.71	63*3.50	30*1.71	65*3.50

표 3. 지점단면 (단위 : cm)

경간길이 (m)	단면변화	TF	BF	복 부
30+36+30	A1	40*3.0	48*3.38	128*0.8
	A2	40*2.5	47*3.30	
	A3	40*2.30	43*3.02	
40+48+40	A1	50*3.20	58*4.09	160*1.0
	A2	50*2.95	55*3.88	
	A3	45*2.80	50*3.52	
50+60+50	A1	66*3.60	61*4.30	203.2*1.27
	A2	56*3.60	60*4.20	
	A3	55*3.40	58*4.09	

TF : 상부플랜지 BF : 하부플랜지

지점단면의 변화에 의하여 자생모멘트의 영향을 알아보기 위하여 경간의 단면은 일정하게하고 지점단면을 감소시켜 검토하였다.

4.2 자생모멘트의 계산

과재하중을 작용시켜 경간의 소성회전을 고려한 경우와 경간의 소성회전을 고려하지 않은 경우에 대하여 자생모멘트의 값을 구하였다. 또한, 자생모멘트가 단면의 변화에 따라 자생모멘트의 크기가 어떻게 변화되는 지를 알아보기 위하여 지점단면의 크기가 점점 감소함에 따라 자생모멘트의 값을 구하여 탄성모멘트 값과(표 4, 표 5 비교하였다.

표 4. 경간의 소성회전을 고려하지 않은 경우 (단위 : t-m)

경간길이 (m)	단면 변화	지점		제1경간		제2경간	
		자생모 멘트	과재하 중비	자생모 멘트	과재하 중비	자생모 멘트	과재하 중비
30+36+30	A1	78.02	12.3	29.26	5.60	78.02	16.1
	A2	83.68	13.1	31.37	6.00	83.68	17.2
	A3	97.33	15.3	36.49	6.98	97.33	21.1
40+48+40	A1	117.4	10.8	44.02	5.60	117.4	16.2
	A2	129.6	11.8	48.62	6.19	129.6	17.9
	A3	154.2	14.2	57.85	7.36	154.2	21.4
50+60+50	A1	200.2	11.3	75.09	6.21	200.2	17.9
	A2	205.7	11.6	77.15	6.38	205.7	18.4
	A3	218.8	12.3	82.07	6.79	218.8	19.5

표 5. 경간의 소성회전을 고려한 경우 (단위 : t-m)

경간길이 (m)	단면 변화	지점		제1경간		제2경간	
		자생모 멘트	과재하 중비	자생모 멘트	과재하 중비	자생모 멘트	과재하 중비
30+36+30	A1	52.54	8.28	19.70	3.77	52.54	10.8
	A2	58.27	9.23	21.96	4.20	58.57	12.0
	A3	72.86	11.4	27.32	5.23	72.86	15.0
40+48+40	A1	85.88	7.92	32.20	4.09	85.87	11.9
	A2	98.53	9.09	36.95	4.70	98.53	13.6
	A3	123.9	11.4	46.48	5.91	123.2	17.0
50+60+50	A1	154.9	8.74	58.09	4.80	154.9	13.8
	A2	160.4	9.02	60.16	4.97	160.4	14.3
	A3	174.1	9.82	65.31	5.40	174.1	15.5

4.3 강도검토

4.3.1 과재하중에 대한 검토

과재하중에서 구조물의 수평요건을 만족하기 위한 한계상태규정은 지점단면에서는 응력을 제한하지 않고 경간에서는 합성단면에서는 $0.95\sigma_y$, 비합성단면에서는 $0.8\sigma_y$ 로 규정하고 있다⁽⁹⁾. 경간에서 과재하중에 의한 응력과 자생모멘트의 영향을 고려한 응력검토의 결과는 표6, 표7,과 같다.

표 6. 경간의 소성회전을 고려한 경우 (단위 kg/cm²)

경간길이 (m)	단면 변화	1 경 간		2 경 간	
		최종 모멘트 (t-m)	응력	최종 모멘트 (t-m)	응력
30+36+30	A1	541.81	2351	536.66	2132
	A2	544.08	2360	542.70	2132
	A3	549.43	2383	556.98	2212
40+48+40	A1	817.65	2158	806.59	2052
	A2	822.40	2170	819.24	2084
	A3	831.93	2194	844.66	2147
50+60+50	A1	1266.70	2279	1271.81	2196
	A2	1268.76	2282	1277.32	2205
	A3	1273.91	2297	1291.06	2228

표 7. 경간의 소성회전을 고려하지 않은 경우 (단위 :kg/cm²)

경간길이 (m)	단면 변화	1 경 간		2 경 간	
		최종 모멘트 (t-m)	응력	최종 모멘트 (t-m)	응력
30+36+30	A1	551.37	2391	562.16	2232
	A2	553.49	2400	567.81	2254
	A3	558.61	2422	581.44	2308
40+48+40	A1	829.47	2188	838.11	2130
	A2	834.07	2200	850.34	2161
	A3	843.30	2223	874.95	2222
50+60+50	A1	1283.70	2308	1317.15	2271
	A2	1285.75	2311	1322.56	2281
	A3	1290.68	2320	1335.78	2303

경간에서의 한계상태는 $0.95\sigma_y = 3040 \text{ kg/cm}^2$ 이다. 경간1 및 경간2 에서의 응력은 한계상태를 넘지 않는다. 따라서 과재하중에 대한 한계상태를 만족한다.

4.3.2 최대하중에 대한검토

최대하중에 대해서는 메카니즘의 형성여부를검토해야 하는데 구조물이 안정하기 위해서는메카니즘이 형성되어서는 안된다. 내측지점단면은 부모멘트를 받으므로 콘크리트의 인장응력이 무시되고 철근만이 강재와 합성되는 비대칭단면이 된다. 이러한 단면은 국부좌굴이 발생하므로 소성모멘트에 도달하지 못한다. 따라서, 소성설계개념을 그대로 사용하기 위해서는소성모멘트를 감소시킨 유효소성모멘트를 사용해서 검토한다.⁽¹⁰⁾ 즉 내측지점에서 유효소성모멘트가 작용하고 경간에 활하중을 재하시켜 메카니즘이 형성되지 않으면 최대하중에 대하여 만족한다. 유효소성모멘트는 다음과 같이 구한다.

$$M_{pe} = R_f \cdot M_{pf} + R_w \cdot M_{pw}$$

$$\text{여기서 } R_f = \frac{\sigma_{yfe}}{\sigma_y}, R_w = \frac{\sigma_{ywe}}{\sigma_y}$$

$$\text{또한 } \sigma_{yfe} = 0.0845 \cdot E \cdot (t/b')^2 \leq \sigma_{yf}$$

$$\sigma_{ywe} = 1.32 \cdot E \cdot \left(\frac{tw}{D_{cp}}\right)^2 \leq \sigma_{yw}$$

이 방법에 의하여 유효소성모멘트를 계산하면 다음 표 8과 같다.

표 8. 유효소성모멘트 (단위 : t-m)

설계번호 (m)	단면 변화	유효소성 모멘트	지점최대 모멘트
30+36+30	A1	658.3	824.12
	A2	604.90	
	A3	526.70	
40+48+40	A1	1129	1409.11
	A2	1032	
	A3	871	
50+60+50	A1	1604	2303.75
	A2	1623	
	A3	1524	

3경간 연속보를 내측지점에 유효소성모멘트가 작용하고 경간에 활하중(트럭하중 및 차선하중)과 사하중에 의하여 단순보로 취급하여 경간에서의 최대휨모멘트를 구하면 다음과 같다.

표 9. 1경간에서의 최대모멘트 (단위 : t-m)

경간 길이 (m)	단면 변화	트럭하중		차선하중		소성모멘트
		경간모멘트	지점모멘트	경간모멘트	지점모멘트	
30+36+30	A1	643.9	1291	528.2	1100	985
	A2	665.7	1293	549.9	1100	
	A3	698.3	1295	582.2	1101	
40+48+49	A1	939.0	2102	889.1	1925	1653
	A2	978.0	1845	928.2	1926	
	A3	1044	2180	923.3	1926.	
50+60+50	A1	1466	3032	1546	3131	2576
	A2	1459	3436	1538	3130	
	A3	1499	3438	1579	3132	

표 10. 2경간에서의 최대모멘트 (단위 t-m)

경간 길이 (m)	단면 변화	트럭하중		차선하중		소성모멘트
		경간모멘트	지점모멘트	경간모멘트	지점모멘트	
30+36+30	A1	555.1		476.1		985
	A2	608.5	1097	529.6	1110	
	A3	686.7		607.8		
40+48+49	A1	760.6		809.9		1653
	A2	848.6	2735	906.9	2748	
	A3	1010.		1068.		
50+60+50	A1	1296		1583		2576
	A2	1277	2894	1564	2907	
	A3	1376		1663		

표 9, 표 10 에서와 같이 지점모멘트는 유효 소성모멘트보다 크므로 지점에서는 소성힌지가 발생하고 경간에서는 경간의 최대모멘트가 경간에서의 소성모멘트보다 작으므로 소성힌지가 발생하지 않으므로 메카니즘이 발생하지 않는다. 따라서, 최대하중에 대한 조건도 만족한다.

5. 결 론

본 논문은 비조밀단면을 갖는 연속합성교의 강도를 해석할 때 내측지점과 경간내의 소성변형 때문에 자동적으로 발생하게되는 자생모멘트의 영향을 고려하는 해석방법이다. 자생모멘트의 값을 구하기 위해서는 모멘트-비탄성회전곡선이 필요한데 조밀단면에 대한 모멘트-비탄성곡선이 AASHTO지침시방서에 채택되었고 비조밀단면에

대한 모멘트-비탄성회전 곡선이 개발중에 있다. 따라서 비조밀단면의 자생모멘트를 구하기 위한 3경간연속보를 공액보법 및 3연모멘트법에 의해서 자생모멘트계수를 구하였고 연속관계와 회전관계를 만족시키는 프로그램을 개발하였다. 또한 이 자생모멘트를 적용하여 과제하중 및 최대하중에 대해 강도검토를 하여본 결과 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻었다.

1. 경간과 지점의 소성회전을 고려한 자생모멘트를 구하여 강도를 평가할수 있는 프로그램을 제시하였는데 경간내의 소성회전을 적용하면 자생모멘트의 크기는 재분배 때문에 내측지점만 고려한 경우보다 작은 값이된다.

2. 내측지점 단면이 점점 감소함에 따라 소성회전각이 증가하고 자생모멘트의 크기는 커진다.

3. 지점단면에서 ALFD방법에 의한 자생모멘트의 크기는 제조시의 잔류응력을 고려하여 탄성모멘트의 10% 이상이 되므로 이를 고려하지 않은 LFD 방법보다 강도평가에서 유리하고 실제적인 모멘트 재분배를 할 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) 대한토목학회, 도로교표준시방서, 1996 P4-53
- (2) Grubb, M.A, "The AASHTO Guide Specification for Alternate Load-Factor Design Procedures for Steel Beam Bridges" Engineering Journal, AISC, First quarter, 1987
- (3) Geerhard Haaijer, Phillip. S, Carskaddan, Michal. A. Grubb., "Suggested Autostress Procedures for Load Factor Design of Steel Beam Bridges" Engineering Journal, AISC, November 1898
- (4) C. G. Schilling., "A Unified Autostress Method" Project 51 AISI November 1989 p10 - 22
- (5) Vasseghi. A, and Frank, K. H. "Static Shear and Bending Strength of Composite Plate Girders" PMFSEL Report, NO84-4, The University of Texas at Austain

Texas, June 1987

- (6) Geerhard Haaijer "Objectives and Early Research of Design", Transportation Autostress Research Record 1380.
- (7) C. G. Schilling., "Exploratory Autostress Girder Design" Project 51 AISI November 1989 p17 - 29
- (8) Dishongh, B. E., "Residual Damage Analysis: A Method for the Inelastic Rating of Steel Girder Bridges" Ph. D Thesis, The University of Minnesota 1990. p41 - 51
- (9) Michael. A. Grubb., "Autostress Design Using Compact Welded Beams" Engineering Journal, AISI, Fourth Quarter 1989.
- (10) Edward. V. Hourigan and Robert c. Holt "Design of Rolled Beam Bridge by New AASHTO Guide Specification for Compact Braced Section" Engineering Journal, AISI, First Quarter 1987.

(접수일자 : 1999년 2월 3일)