

국부좌굴을 고려한 지점 상승 하강 강상자형교

Local buckling by lifting and lowering supports in steel box girder bridge

구민세* · 정재운** · 나귀태***
Koo, Min-Se Jeong, Jae-Woon Na, Gwi-Tae

ABSTRACT

The lifting and lowering supports method was recently developed in steel box girder bridge. It has many advantages by lifting and lowering of inner supports and filled concrete. This method reduces an amount of steel and height of girders. It is one of the methods used to effectively increase the use of structural material.

However, if there is too much lifting of inner supports, it is possible to cause buckling of the compression flange or web panel. Therefore it needs a proper number of longitudinal and transvers stiffener.

1. 서 론

강상자형(Steel box girder) 단면교는 큰 강성에 비하여 가벼우며 적은 수의 주형이 사용되기 때문에 공기가 비교적 빠르고 비틀림 강성이 커서 국·내외를 막론하고 널리 시공되어지고 있다. 그러나 폐단면 내부 등의 부식과 소음 및 진동이 비교적 큰 단점을 가지고 있으며 더욱이 모든 연속보형식의 교량과 마찬가지로 2경간 이상의 연속교에서는 단순보형식의 교량과 비교했을 때 지간 중심부의 최대 정모멘트의 크기가 적어 유리하지만 내측 지점부의 최대 부모멘트의 크기는 커서 대략 같은 형고를 가지는 단면을 설계할 경우 단면크기 선정에 비경제성이 내포되고 있다. 또한 내측지점부의 큰 부모멘트에 의한 바닥판 슬래브의 균열 발생가능성이 높으며 이로 인한 단면의 휨강성저하 뿐만 아니라 우수의 침입으로 폐단면의 심각한 부식을 일으키기도 한다.

이러한 강상자형 단면교의 단점을 보완하고 보다 경제적인 단면을 설계하기 위하여 내측지점의 부모멘트 구간에 전단 연결재를 사용해 콘크리트를 충전시켜 단면의 강성을 높이고 지점의 상승 및 하강 과정을 통하여 바닥판 콘크리트에 선압축을 도입시키는 방법이 최근에 개발되었다.

바닥판 콘크리트에 선압축을 도입하기 위한 지점의 상승 과정에서 단면의 하부 플랜지는 큰 압축응력을 받게 되고 복부판 또한 큰 전단력과 휨응력을 받게 되어 적절한 강성의 필요로 하는 수만큼 종방향 보강재와 적절한 간격의 횡방향 보강재를 가져야 된다. 그러므로 본 연구의 목적은 설계의 효율을 높이기 위해 시공단계를 고려한 유한요소 해석프로그램의 해석결과와 하부 플랜지, 복부판의 좌굴 응력을 비교하여 탄성영역에서 좌굴이 발생하지 않도록 하는데 있다.

* 인하대학교 토목공학과 교수

** 인하대학교 토목공학과 박사과정

*** 인하대학교 토목공학과 석사과정

2. 지점의 상승 및 하강 공법을 이용한 강상자형 교

강상자형 단면교의 단점을 보완하고 보다 경제적인 단면을 설계하기 위하여 내측 지점의 부모멘트 구간에 콘크리트를 충전시켜 단면의 강성을 높이고 아래와 같은 지점의 상승 및 하강 과정을 통해 바닥 콘크리트에 선압축력을 도입한다.

2.1 내측 지점의 상승 및 하강에 의한 3경간 연속교의 시공단계

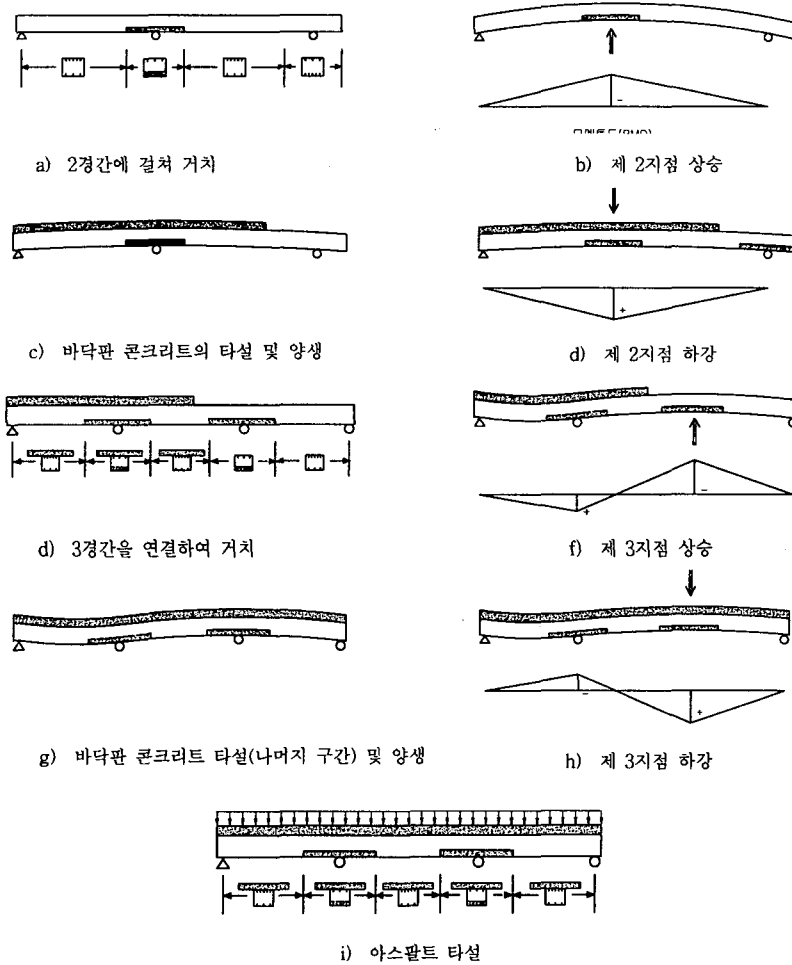


그림 2.1 내측 지점의 상승 및 하강을 이용한 강상자형교의 시공단계

그림 2.1과 같이 바닥판 슬래브에 선압축력을 도입시키기 위해서는 a)~i)의 시공 단계를 거치게 된다. 그림의 a) 단계에서처럼 공장에서 제작되거나 현장에서 제작한 콘크리트로 충전된 강상자형을 2경간에 걸쳐 거치한다. 내측 지점의 부모멘트 구간에 충전시킨 콘크리트는 강성을 증가시키는 효과 외에도 폐단면내의 침입수로 인한 하부 플랜지의 부식을 막아주고 또한 지점의 상승과정 중의 좌굴을 억제한다. b) 단계에서 내측 지점을 상승시키는데 하부의 콘크리트의 강도에 알맞은 크기의 상승력을

작용시켜 압축파손을 막아야한다. c) 단계에서 바닥판 콘크리트를 타설하고 양생시키며 d) 단계에서 내측 지점을 하강시켜 바닥판 콘크리트에 선압축력을 도입시킨다. e) 단계에서 나머지 제 3경간을 연결하고 거치 시키며 f) 단계에서 제 2지점의 상승과 같은 목적으로 제 3지점을 상승시킨다. 제 3지점의 상승력은 기존의 제 1, 2 경간에도 영향을 미치므로 주의해야한다. g) 단계에서 나머지 구간에 바닥판 콘크리트를 타설하고 양생후 h) 단계에서 제 3지점을 하강시켜 선압축력을 도입한다. i) 단계에서 아스팔트 포장과 추가의 구조물을 설치하여 대략적인 시공 단계를 마치게 된다.

3. 하부 플랜지 및 복부판의 좌굴

평판의 강도를 증가시키는 방법 중에서 판의 두께를 증가시키는 것도 하나의 방법이나 경제적이지 않으므로 보강재를 이용하여 강도를 증가시키는 것이 일반적이다. 강상자형 단면의 상·하 플랜지 및 복부판은 그림 3.1과 같은 형태의 종방향 보강재와 횡방향 보강재로 보강된 판 형태를 띄고 있다. 그러나 너무 많은 수의 보강재를 설치하는 것은 용접에 따른 인건비 상승 등의 경제적인 문제와 잔류응력 및 잔류변형 등으로 인한 역학적 문제를 가지게 된다.

강상자형의 보강된 압축플랜지의 설계방법은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 각 종방향 보강재와 일정한 유효폭의 플랜지를 기등으로 가정하여 해석하는 방법과 종방향 보강재 및 횡방향 보강재 모두를 고려하는 방법이 있다. 현재 도로교설계기준 및 AASHTO 시방서 등에서는 충분한 강성의 횡방향 보강재가 설치되어 있다면 그림 3.1에서와 같이 독립된 판으로 간주하여 탄성 좌굴강도를 기준으로 하는 방법을 적용하고 있다.

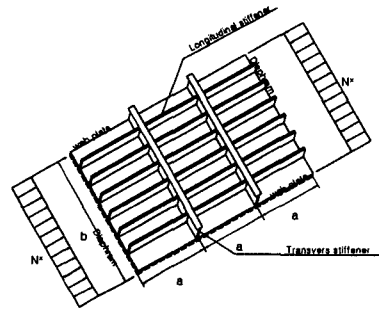


그림 3.1 보강재로 보강된 압축 플랜지

3.1 일방향 압축력을 받는 단순지지 평판

3.1.1 보강재가 설치되지 않은 경우

그림 3.2는 일방향 압축력을 받으며 보강재가 설치되지 않은 평판을 모델링한 그림이다. 이 때의 좌굴계수(k)는 식 (3.1)으로 구할 수 있으며 형상비(a/b)와 이에 따른 좌굴파형의 수(m)에 지배된다.

$$k = \left[\frac{1}{m} \frac{a}{b} + m \frac{b}{a} \right]^2 \quad (3.1)$$

좌굴계수(k)는 작용력의 종류, 판의 형상비, 경계조건에 따른 계수이며 좌굴계수로 나타내어지는 판의 탄성 좌굴응력(f_{cr})은 다음과 같다.

$$f_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu)^2} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (3.2)$$

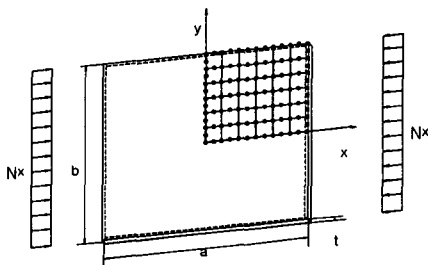


그림 3.2 보강재가 설치되지 않은 판

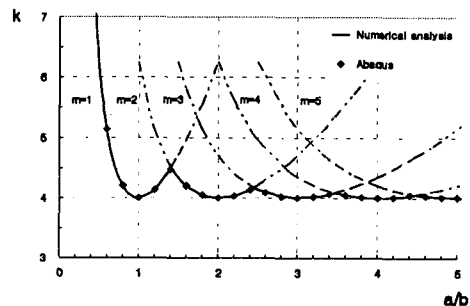


그림 3.3 단순지지된 평판의 좌굴계수

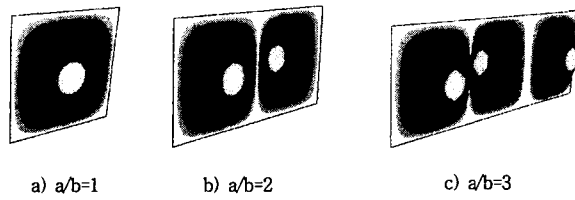


그림 3.4 형상비에 따른 좌굴형상(Buckling Mode)

그림 3.3과 표 3.1은 Timoshenko 등의 좌굴계수식과 ABAQUS로 해석한 값을 비교한 것으로 그림 3.2와 같은 단순 지지된 판에 일방향 압축력을 받는 경우 ABAQUS의 Buckling 해석에 의해 정확한 탄성 좌굴응력을 구할 수 있다.

표 3-1 좌굴계수 비교

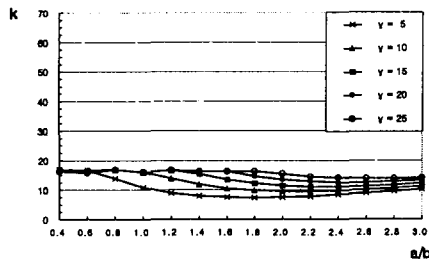
a/b	K	
	ABAQUS	식(3.1)
0.4	8.41	8.41
0.6	5.14	5.14
0.8	4.20	4.20
1.0	4.00	4.00
1.2	4.13	4.13
1.4	4.47	4.47
1.6	4.20	4.20
1.8	4.04	4.04
2.0	4.00	4.00
2.2	4.04	4.04
2.4	4.13	4.13
2.6	4.08	4.08
2.8	4.02	4.02
3.0	4.00	4.00

3.1.2 여러 개의 보강재가 설치된 경우

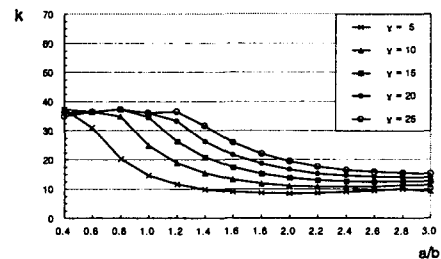
보강재의 강성비와 단면적비는 식(3.3)으로 나타내며 그림 3.5는 ABAQUS에 의하여 단면적비 (δ)가 0.1 일 때의 강성비 (γ)가 5일 때부터 25까지 보강재의 개수에 따른 좌굴계수를 비교한 것이다.

$$\gamma = \frac{EI_s}{Db}, \quad \delta = \frac{A_s}{bt} \quad (3.3)$$

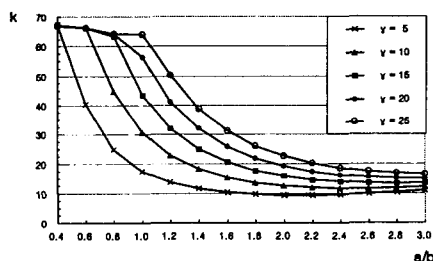
그림 3.5의 좌굴계수는 보강재의 사용 개수에 따라 형상비가 적은 경우 크게 증가하지만 형상비가 커질 수록 좌굴계수의 증가폭이 적어진다. 또한 같은 수의 보강재가 설치되었을 때 강성비가 증가할수록 좌굴 계수가 커지는 경향이 있지만 형상비에 따른 한계강성비 이상으로 증가시키면 좌굴계수의 증가가 일어나 지 않는다. 그림 3.6에서 강성비에 따른 좌굴모드를 나타내었다.



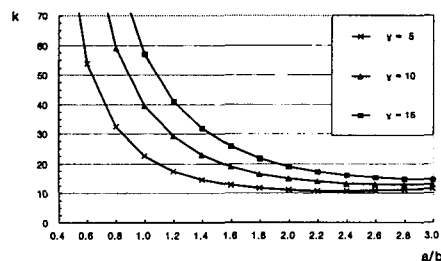
a) 보강재 1개일 경우의 좌굴계수



b) 보강재 2개일 경우의 좌굴계수



c) 보강재 3개일 경우의 좌굴계수



d) 보강재 5개일 경우의 좌굴계수

그림 3.5 보강재의 개수에 따른 좌굴계수

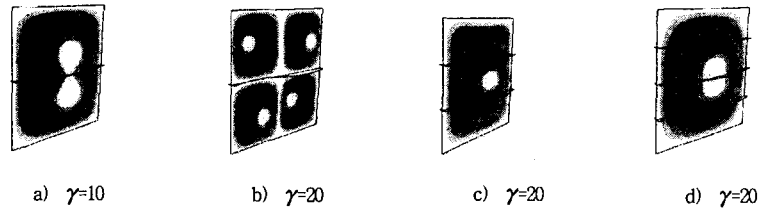


그림 3.6 a/b=1.0일 때의 강성비와 보강재의 수에 따른 좌굴형상(Buckling Mode)

3.2 전단력을 받는 단순지지 평판

그림 3.7은 전단력을 받으며 보강재가 설치되지 않은 평판을 모델링한 그림이다. 이 때의 좌굴계수는 Timoshenko 등에 의해 식 (3.4),(3.5)로 대략 구할 수 있으며 형상비(a/b)에 의해 결정되어진다.

$$\beta = \frac{a}{b}, \quad \lambda^2 = \frac{\beta^4}{81(1+\beta^2)^4} \left[1 + \frac{81}{625} + \frac{81}{25} \left(\frac{1+\beta^2}{1+9\beta^2} \right)^2 + \frac{81}{25} \left(\frac{1+\beta^2}{9+\beta^2} \right)^2 \right] \quad (3.4)$$

$$k = -\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\pi^2}{32\beta} \quad (3.5)$$

좌굴계수로부터 단순지지 평판의 좌굴응력은 다음과 같다.

$$\tau_{cr} = \frac{(N_{xy})_{cr}}{t} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu)^2} \cdot \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (3.6)$$

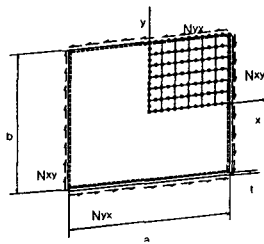


그림 3.7 전단력을 받는 단순지지 평판

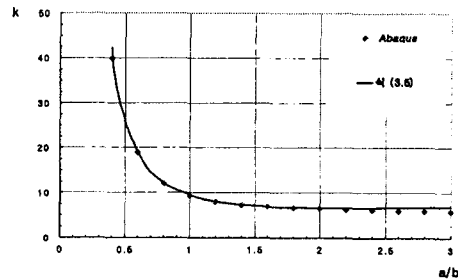


그림 3.8 식(3.5)와 ABAQUS에 의한 비교

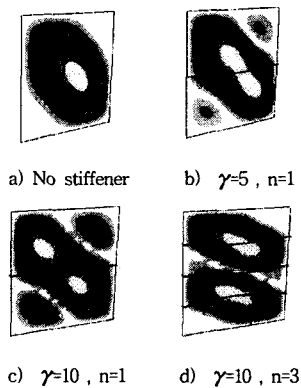
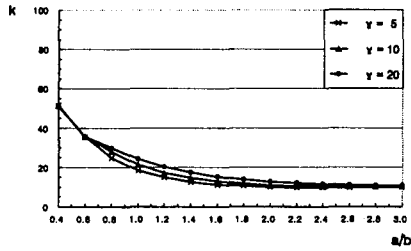


그림 3.9 보강재의 수에 따른 좌굴형상

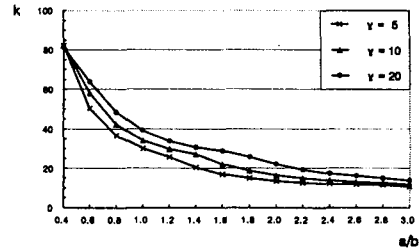
표 3-2 좌굴계수 비교

a/b	K		
	ABAQUS	식(3.5)	Timoshenko
0.4	39.8	42.2	-
0.6	18.9	19.2	-
0.8	12.1	12.3	-
1.0	9.3	9.4	9.3
1.2	8.0	8.1	8.0
1.4	7.3	7.4	7.3
1.6	6.9	7.0	7.0
1.8	6.7	6.8	6.8
2.0	6.6	6.7	6.6
2.2	6.3	6.7	-
2.4	6.1	6.7	-
2.6	6.0	6.8	-
2.8	5.9	6.9	-
3.0	5.8	7.0	5.9

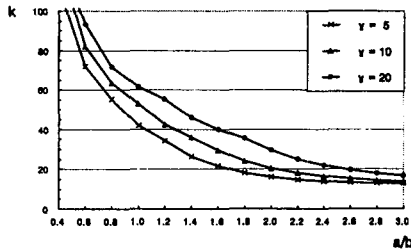
그림 3.8과 표 3-2는 식(3.5)와 ABAQUS로 해석한 좌굴계수를 비교한 것이다. 식(3.5)는 거의 정확한 좌굴계수를 계산할 수 있지만 형상비가 커짐에 따라 미소 오차가 증가하게 된다. 보강재가 설치되지 않은 평판은 형상비가 1 보다 적은 경우 전단에 의한 좌굴응력이 크게 증가함을 알 수 있으며 형상비가 무한히 커지면 $k=5.34$ 에 수렴한다.



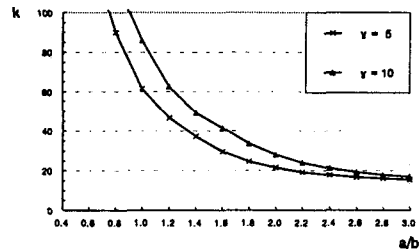
a) 보강재 1개일 경우의 좌굴계수



b) 보강재 2개일 경우의 좌굴계수



c) 보강재 3개일 경우의 좌굴계수



d) 보강재 5개일 경우의 좌굴계수

그림 3.10 보강재의 개수에 따른 좌굴계수

그림 3.10에서와 같이 전단력을 받는 단순지지 보강된판에서 형상비가 적을 때는 보강재의 개수나 강성비가 증가할수록 좌굴계수의 증가폭이 크나 형상비가 커질수록 보강재의 영향이 적어진다. 그림 3.9는 보강재의 강성비와 개수에 따른 좌굴형상을 나타낸 것이다.

3.3 힘을 받는 단순지지 평판

판의 두께가 일정한 정방형의 평판은 순수하게 힘을 받는 경우 중립축에서 인장연단까지의 거리가 압축연단까지의 거리와 같아 양연단에서의 절대값이 같다. 그림 3.11과 3.12는 순수한 힘을 받으며 보강재가 설치되지 않은 평판을 모델링한 그림이며 이 때의 좌굴계수를 그림 3.12에 나타내었다. 표 3-3에서 ABAQUS의 해석결과와 Timoshenko 등의 결과를 비교하였다.

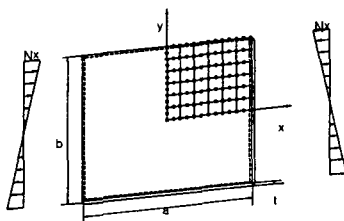


그림 3.11 힘을 받는 단순지지 평판

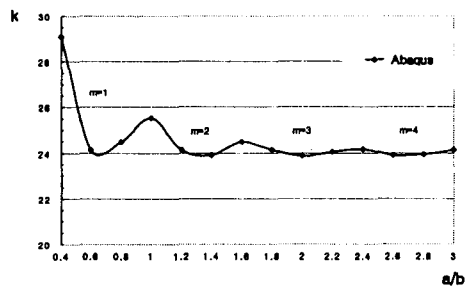


그림 3.12 ABAQUS에 의한 힘좌굴계수

보강재가 없는 순수한 휨을 받는 경우에 판의 좌굴계수는 형상비의 증가에 따라 일축 압축을 받는 경우와 같이 파형의 수가 증가하여 점차 수렴하게 된다. 그림 3.13과 3.14에서는 강성비의 증가와 보강재의 개수에 따른 좌굴계수와 좌굴형상을 나타내었다.

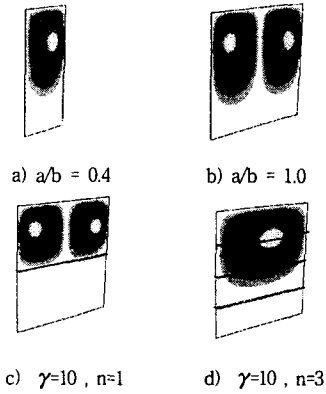
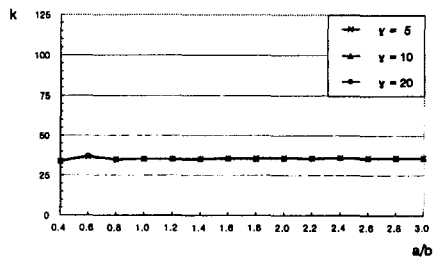


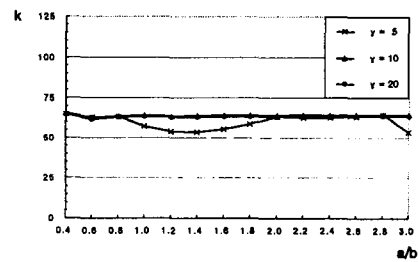
그림 3.13 보강재의 수에 따른 좌굴형상

표 3-3 좌굴계수 비교

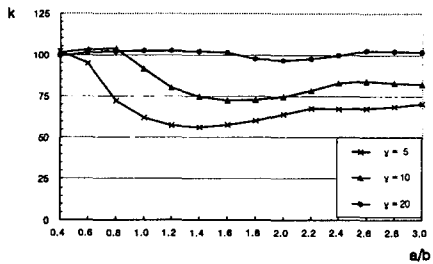
a/b	K	
	ABAQUS	Timoshenko
0.4	29.1	29.1
0.6	24.1	24.1
0.8	24.5	24.4
1.0	25.5	25.6
1.2	24.1	-
1.4	23.9	-
1.6	24.5	-
1.8	24.1	-
2.0	23.9	-
2.2	24.0	-
2.4	24.1	-
2.6	23.9	-
2.8	23.9	-
3.0	24.1	-



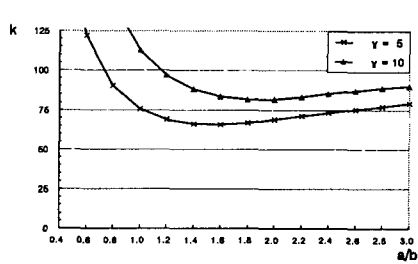
a) 보강재 1개일 경우의 좌굴계수



b) 보강재 2개일 경우의 좌굴계수



c) 보강재 3개일 경우의 좌굴계수



d) 보강재 5개일 경우의 좌굴계수

그림 3.14 보강재의 개수에 따른 좌굴계수

3.4 휨과 전단을 같이 받는 단순지지 평판

휨과 전단이 동시에 작용할 때의 좌굴응력을 Timoshenko등은 아래의 식 (3.8)과 같이 나타내었다. 이 식에 의하면 $\tau/\tau_{cr} < 0.4$ 일 때에 휨에 의한 좌굴에 전단력의 영향은 적으며 반대의 경우도 성립한다.

$$\left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{f_{cr}}{f}\right)^2 = 1 \quad \text{혹은} \quad \left(\frac{\tau'_{cr}}{\tau_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{f}{f_{cr}}\right)^2 = 1 \quad (3.8)$$

4. 내측 지점의 상승에 의한 하부 압축판의 강도 검토

바닥판 슬래브에 선압축력을 도입시키기 위해 내측지점을 상승시키면 강상자형 단면의 하부는 큰 압축력을 받게 된다. 이 압축력을 지금까지의 좌굴계수를 이용한 탄성 좌굴응력과 Nara, Fukumoto (1991)의 보강된판에서의 극한강도와 비교 하면 아래와 같다.

SM490 강재를 이용한 지간 40·50·40m의 3경간 연속보에서 폭 2600 mm, 두께 16 mm 판을 하부 플랜지로 사용하는 부분의 내측지점 상승시 압축응력은 대략 $0.4 \cdot f_y$ 이다. 그러므로 아래의 그림 4.1, 4.2을 보면 보강재를 2개 이상은 반드시 설치해야 되며 충분한 강성을 갖는 횡방향 보강재를 형상비에 맞추어 배치해야 한다. 즉 $\nu=5$ 인 종방향 보강재 3개를 설치하는 경우에는 폭 2600 mm보다 더 적은 간격으로 해야 한다.

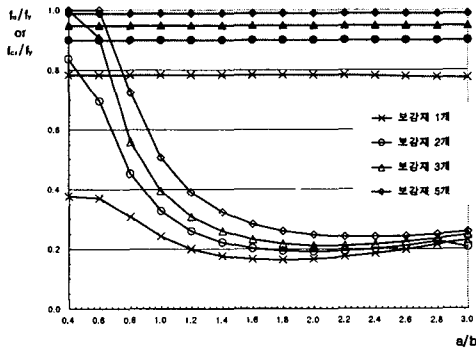


그림 4.1 $\nu=5$ 인 경우 보강된 판의 강도

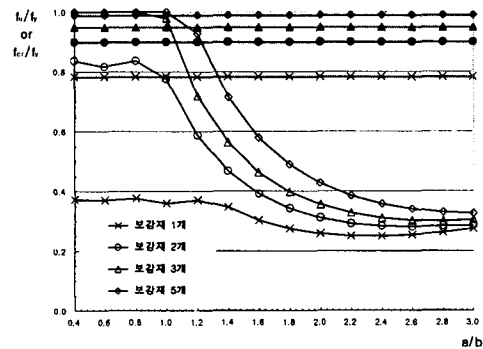


그림 4.2 $\nu=15$ 인 경우 보강된 판의 강도

5. 결론

지점의 상승 및 하강을 이용한 강상자형교는 부모멘트구간의 충전된 콘크리트에 의해 주형의 강성을 증대시키고 내측지점을 상승 하강하여 바닥판에 선압축력을 도입함으로써 기존 교량보다 형고를 낮추거나 사용 강재를 적게 할 수 있다. 그러나 고강도의 콘크리트를 사용하여 선압축력을 크게 하기 위해 내측 지점의 상승량을 증가시킬 경우 압축판에서 좌굴이 발생할 가능성이 있다. 그러므로 종방향 및 횡방향 보강재를 포함한 압축판의 강도를 검토해야 한다.

참고문헌

1. Stephen P. Timoshenko and James M. Gere, *Theory of elastic stability*, McGRAW-HILL, Singapore, 1963, pp.348~408
2. Yuhshi Fukumoto, *Structural stability design*, Elsevier Science, Great Britain, 1997, pp.149~162
3. Theodore V. Galambos, *Stability design criteria for metal structures*, JOHN WILLY & SONS, New York, 1998, pp.124~146
4. 김상식, *구조안정해석*, 문운당, 서울, 1999, pp.200~276
5. 이호경, "강상자형 연속교에서 지점 상승하강 및 충전콘크리트를 이용한 부모멘트구간 강성의 개선", 인하대학교 공학석사 학위논문, 2000, p.7~37
6. 전승권, "반복하중을 받는 강판의 강도특성과 변형성능", 인하대학교 공학석사 학위논문, 2000, p.4~11