

강상자형 연속교에서 콘크리트재를 이용한 부모멘트 구간의 강성향상공법

A Study for Stiffness Improvement Method with Use of Filled Concrete in Continued Steel Box Girder Bridge

구민세* 이호경**
Koo, Min-Se Lee, Ho-Kyoung

ABSTRACT

The stiffness of slab concrete section is not considered as effective in the existing method of construction for continued steel box girder bridge. Using lifting system and filled concrete, it is possible to make stiffness of slab concrete section effective and improve stiffness of negative moment section. It was proved that the stress of upper flange in positive moment is significantly lower than case of existing method through the stress comparison. This stress difference made possible to rearrange flange thickness and as the result of this rearrangement, the amount of steel and height of girder can be reduced up to 13.23% and 11.5%.

1. 서론

기존의 강상자형(Steel box girder) 단면교는 시공이 타공법보다 비교적 빠르기 때문에 국·내외를 막론하고 널리 시공되어지고 있다. 또한 비틀림 강성이 크기 때문에 곡선교에서는 매우 장점이 큰 교량형식이나 단면이 커서 투박하게 보이는 단점이 있고 또한 소음 및 진동이 비교적 크다.

모든 연속형 교량에서와 마찬가지로 강상자형교에서도 구조역학상 최대 정모멘트와 최대 부모멘트의 크기가 상이하기 때문에 교량 전 길이를 통해 단면크기 선정에 비경제성이 내포되고 있으며 바닥판의 단면이 크므로 단면의 중립축이 상부에 치우쳐 강재의 상부응력과 하부응력의 균형이 이루어지지 않음으로 이로 인해또다른 비경제성의 원인이 되고 있다.

기존의 강상자형 교량의 또다른 결점은 추가 사하중 및 활하중하에서 내측 지점부 즉, 부모멘트 구간의 바닥판 콘크리트에 발생하는 인장응력 때문에 비합성 단면이 되어 바닥판에 균열이 발생되고 강성이 저하된다는 점이다. 또한 상자형 단면의 상하부 플랜지 두께를 다양한 형태로 변화시킴으로 전단 흐름의 교란에 의해 용접 부위 결함의 원인이 된다.

본 공법은 이러한 문제점을 해결하기 위해서 강상자형 연속교에서 강상자형 단면 내부 하단에 전단 연결재를 사용해서 콘크리트를 충전시켜 필요한 강성을 높일뿐만 아니라 지점 상승 및 하강 공정을 통해 부모멘트 구간의 상부 슬래브 콘크리트에 압축응력을 도입시켜 설계하중 작용시 발생하는 인장력을 상쇄시켜 교량 전 길이를 통해 합성단면으로 유지시키고 따라서 강성을 향상시키는 공법이다.

본 연구의 목적은 설계의 효율을 높이기 위해 시공단계를 고려한 유한요소 해석프로그램을 개발하고 이를 이용하여 본 공법에 적합한 단면을 제시하고자한다.

* 인하대학교 토목공학과 교수

**인하대학교 토목공학과 석사과정

2. 시공단계에 따른 해석과정

본 공법의 시공순서를 그림을 이용하여 설명하면 다음과 같다. ①번은 지점상승, ②번은 지점하강, ③번은 바닥판 콘크리트 그리고 ④번은 부모멘트구간의 단면 내부 하부의 콘크리트이다. 부모멘트구간 충전 콘크리트는 공장에서 기제작된 것으로 가정한다.

2.1 강상자형을 2경간에 걸쳐 거치

공장에서 제작되어 운반된 강상자형을 2경간에 걸쳐 거치하고 강제와 내부충진 콘크리트의 자중을 재하시켜 해석을 수행한다. (그림 2.1 참조)

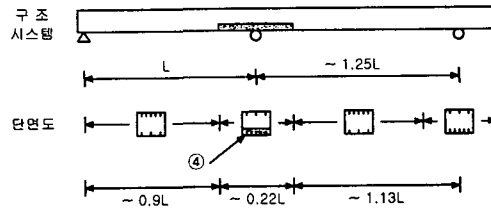


그림 2.1

2.2 제 2지점의 상승

이 때의 상승량은 부모멘트 구간의 바닥판 콘크리트에 설계하중 작용시 발생하는 인장응력을 상쇄시킬 수 있는 크기의 모멘트가 발생될 수 있도록 설계되어야 한다. 또한 무리한 크기의 상승력은 하부 충전 콘크리트의 압축응력을 크게 증가시키므로 하부 충전 콘크리트의 강도에 알맞은 크기의 상승력을 작용 시켜야만 한다. (그림 2.2 참조)

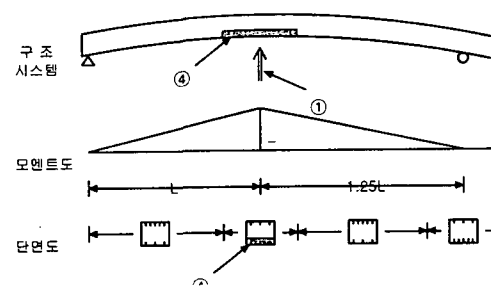


그림 2.2

2.3 바닥판 콘크리트를 타설 및 양생

제 2지점을 상승시킨 상태에서 제 3지점 좌측 일부를 제외한 전구간의 바닥판 콘크리트를 타설 및 양생시키며, 타설된 콘크리트의 자중을 하중으로 하여 해석을 수행한다.



그림 2.3

2.4 제 2지점 하강

이 과정에서 교량 전 길이의 바닥판 콘크리트에는 모멘트의 크기에 대응되는 압축응력이 도입된다. 여기서 정모멘트 구간에는 설계하중의 작용에 의한 압축응력이 추가되나 합성단면의 강성이 크고 콘크리트의 인장강도에 비해 압축강도가 크기 때문에 충분히 허용압축응력 이내에서 안전하게 설계할 수 있다.

기존교량의 보수 및 보강의 경우에는 부모멘트 구간의 균열이 발생한 바닥판콘크리트를 제거시킨후 지점을 상승시켜 콘크리트를 타설 및 양생한 후 지점을 원상복귀하여 시공을 완성시킨다.

(그림 2.4 참조)

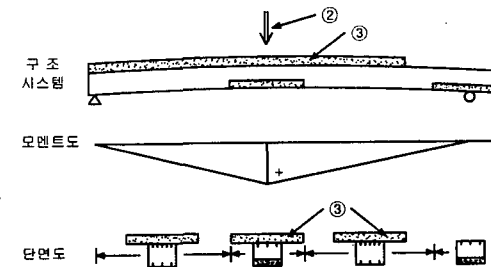


그림 2.4

2.5 제 3경간의 거치

제 3경간을 연결하여 거치한 후 추가된 강재의 자중을 재하시켜 해석을 수행한다.(그림 2.5)

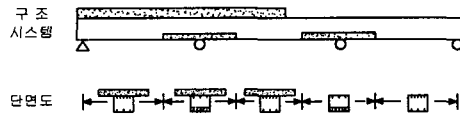


그림 2.5

2.6 제 3지점의 상승

제 2지점 상승시와 같은 목적으로 제 3지점을 상승시킨다. 제 2지점 상승시와 마찬가지로 상승시 충전 콘크리트에 발생하는 압축응력을 고려하여 상승비를 결정한다. 제 3지점의 상승 시는 제 2지점구간에도 상승력의 영향이 미치게 되므로 상승력 결정 시 각별한 주의를 요한다. (그림 2.6 참조)

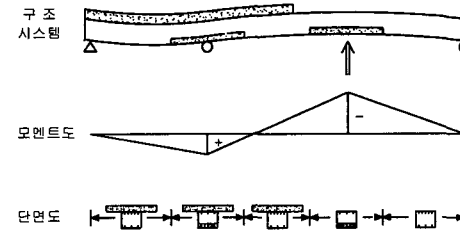


그림 2.6

2.7 바닥판 콘크리트 타설(나머지 구간)

타설된 콘크리트의 하중을 재하시켜 해석을 수행한다. (그림 2.7 참조)

2.8 제 3지점 하강

타설된 바닥판 콘크리트에 압축응력을 도입시키기 위해 제 3지점을 하강시킨다. 제 3지점 상승시와 마찬가지로 제 2지점 구간에 하강력의 영향이 미치므로 주의하여 하강비를 결정해야 한다. (그림 2.8 참조)

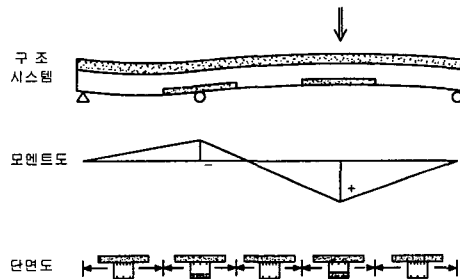


그림 2.7

2.9 아스팔트 타설

타설된 아스팔트의 자중을 재하시켜 해석을 수행한다. 이 때 타설되는 아스팔트의 두께는 8cm로 한다. (그림 2.9 참조)

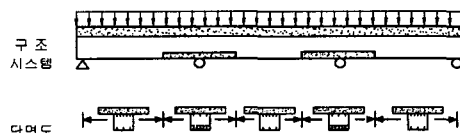


그림 2.8

2.10 2차응력의 계산

본 연구에서는 2차응력으로 충전콘크리트의 creep와 건조수축, 바닥판 콘크리트의 creep 및 건조수축을 고려한다.

2.11 활하중의 재하

본 연구에서는 활하중으로 DL-24 및 BD-24 하중을 재하시켜 해석하였다.

3. 해석결과와 비교

3.1 해석모델

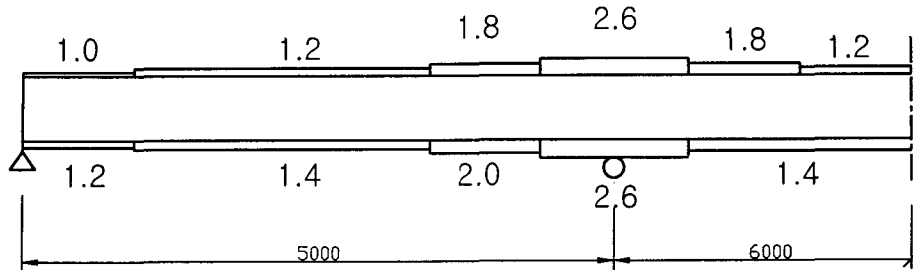


그림 3.1

참고문헌에서 발췌한 설계 예를 경간별로 32개의 부재로 나누어 동일한 조건하에서 시공 단계별로 유한요소 해석을 수행하여 최종응력을 매개변수로 본 공법과 기존 공법을 비교해 보았다. 여기서 바닥판의 유효폭은 579.4cm이고, 바닥판의 두께는 25cm이다.

강재는 SWS490(허용응력 1900kg/cm²)강재를 사용하였고, 바닥판 콘크리트 및 내부 충전콘크리트는 공칭강도 270kg/cm²인 보통 콘크리트를 사용하였다.

표 3-1 부재별 강재 단면

부재	상플랜지 (mm)	하플랜지 (mm)	상부 rib (mm) (길이×두께×갯수)	하부 rib (mm) (길이×두께×갯수)	web 높이 (mm)	web 두께 (mm)
1~6	10×3500	12×3500	150×12×6	150×12×4	2000	12
7~22	12×3500	14×3500	150×12×6	150×12×4	2000	12
23~28	18×3500	20×3500	150×12×6	150×12×4	2000	12
29~36	26×3500	26×3500	150×12×4	150×12×6	2000	12
37~44	18×3500	14×3500	150×12×6	150×12×4	2000	12
45~48	12×3500	14×3500	150×12×6	150×12×4	2000	12

3.2 해석 결과

3.2.1 응력 비교

그림 3.2은 표 3.1에 제시된 단면을 해석하여 얻은 최종 단계의 부재별 응력의 누적곡선이다. 그림 3.1이 보여주듯이 상부 플랜지와 하부 플랜지의 압축응력이 본 공법의 경우 정모멘트 구간에서는 약 60% 부모멘트 구간에서는 약 25% 정도 적게 발생하고 있다. 인장응력의 경우 정모멘트 구간에서는 기존의 공법에서 보다 약 10~60% 정도 크게 발생된다. 이는 매개변수 조정이 안된 것이 원인이다. 그림 3.2는 본 공법의 주형 설계 과정에서 매개변수 조정을 통해 응력을 효과적으로 분배시키면 강재단면의 절감효과를 얻을 수 있음을 보여준다.

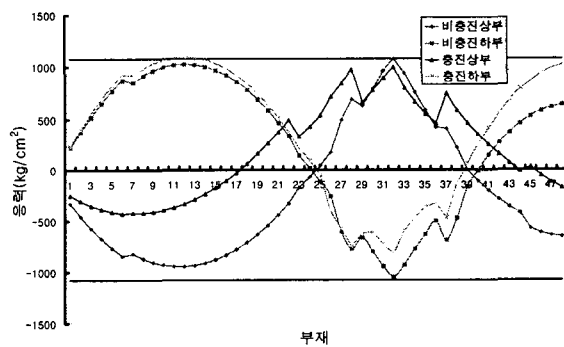


그림 3.2

3.3 매개변수 해석

3.3.1 기본 설정

매개변수 해석은 앞서 제시된 기존 공법의 예제단면과 동일한 강제량을 가지지만 본 공법의 특성에 적합하도록 flange의 변화가 개선된 단면을 사용하여 수행되었다. 즉 같은 강제량을 가지고 얼마만큼의 형고 감소효과와 지간 연장효과가 있는가에 대해 알아보고, 그에 따른 강제량의 감소효과와 적정 단면을 제시하도록 한다.

3.3.2 형고

표 4-2 형고변화에 대한 매개변수 해석 결과

형고 (cm)	제 2지점						제 3지점					
	상승			하강			상승			하강		
	상승비	상승력 (t)	상승변위 (cm)	하강비	하강력 (t)	하강변위 (cm)	상승비	상승력 (t)	상승변위 (cm)	하강비	하강력 (t)	하강변위 (cm)
200	0.600	61.63	48.81	0.660	-74.15	-32.21	1.350	83.19	32.10	1.750	-107.84	-21.80
195	0.600	59.78	49.94	0.660	-72.22	-32.96	1.350	80.70	32.80	1.750	-104.61	-22.20
190	0.600	57.94	51.13	0.640	-68.17	-32.72	1.350	78.21	33.52	1.750	-101.39	-22.62
185	0.600	56.11	52.38	0.620	-64.25	-32.47	1.350	75.75	34.28	1.750	-98.19	-23.06
180	0.600	54.29	53.69	0.620	-62.47	-33.29	1.350	73.30	35.07	1.750	-95.01	-23.51
177	0.600	53.21	54.51	0.620	-61.41	-33.80	1.350	71.83	35.57	1.750	-93.12	-23.79

형고에 대한 매개변수 해석은 형고와 상하강비만을 제외하고 모든 변수는 고정시킨채 기존공법에 사용된 단면과 동일한 강제량을 가지는 단면에서 시작하여 형고를 5cm간격으로 최종상태의 응력이 상한값에 도달할 때까지 감소시킨 결과 형고를 177cm까지 감소시킬 수 있었다. 형고를 감소시켜 감에 따라 바닥판 콘크리트 상부의 인장응력이 증가하기는 하지만 허용응력보다 적으므로 문제가 되지 않는다.

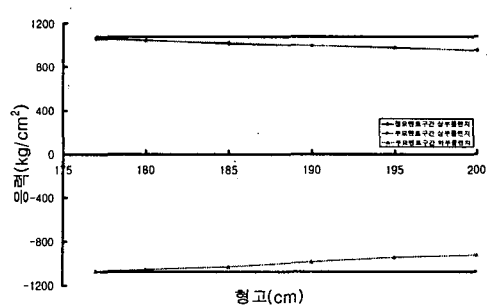


그림 3.3 형고에 대한 최종응력의 변화

3.3.3 지간

지간에 대한 매개변수 해석은 강제량과 형고등을 고정시키고 지간을 50m-60m~56m-67.2m까지 2m간격으로 증가시키며 수행하였다. 그림 3.4를 보면 지간이 증가함에 따라 정모멘트구간의 하부플랜지와 부모멘트구간의 상부플랜지의 응력이 선형적으로 증가하고 있음을 볼 수 있고, 그림 3.5는 거의 선형적으로 증가하는 상·하강량을 보여준다.

고정시키고 지간을 50m-60m~56m-67.2m까지

강재의 응력과 바닥판 콘크리트의 응력이 모두 상한값 보다 작은 지간 54m 이하에서는 상하강량의 조정으로 강재의 정·부모멘트구간 강재에 발생하는 응력을 균형있게 맞춰 강재의 응력부담을 덜 수 있다. 하지만 강재의 응력과 바닥판 콘크리트의 응력이 모두 상한값 보다 커지는 지간 56m 이상 부터는

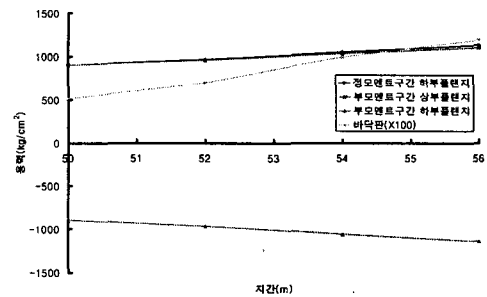


그림 3.4 지간의 변화에 따른 응력의 변화

상·하강량 만으로는 강재에 발생하는 응력을 분산 시킬 수 없기 때문에 정·부 모멘트구간의 인장응력의 차이가 커진다. 이로 인해 단면의 변화 없이 더 이상의 지간연장은 어렵다.

지간에 대한 매개변수 해석결과 외측 지간은 최대 54m까지 연장할 수 있다.

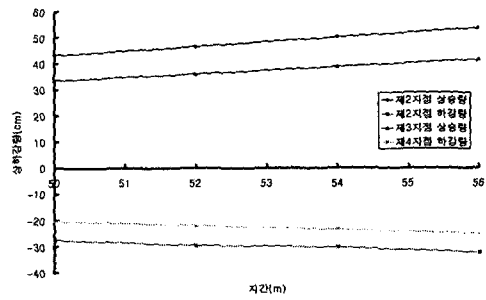


그림 3.5 지간의 변화에 따른 지점 상·하강량의 변화

3.3.4 강제량

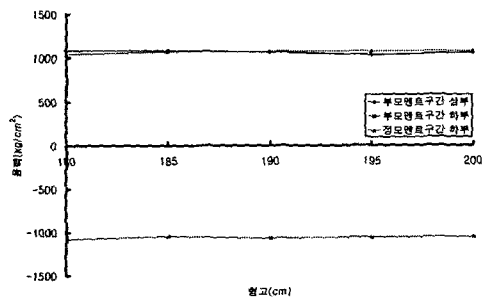


그림 3.6 형고와 강제량에 따른 강재의 응력

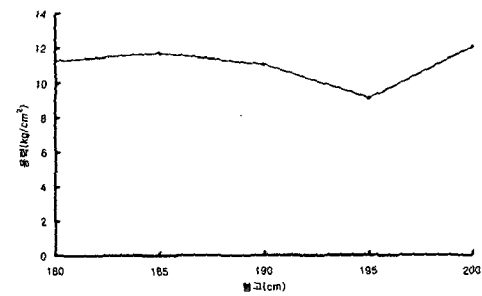


그림 3.7 형고와 강제량에 따른 바닥판의 응력

강제량에 대한 매개변수해석은 형고를 200~180 cm까지 5cm간격으로 변화시켜가며 각 형고에 대해 기존 단면에서의 최대 응력에 가장 근접한 flange 단면의 변화를 찾는 방법으로 수행되었다. 여기서 바닥판 콘크리트의 허용인장응력은 $18\text{kg}/\text{cm}^2$ 이지만 단순화된 하중조건 등을 고려하여 $12\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지만 허용하였다.

그림 3.6 과 그림 3.7은 형고와 강제량의 변화에 따른 강제 상하부 플랜지와 바닥판 콘크리트의 응력이 형고 190cm 일 때 가장 조화를 잘 이루고 있음을 보여준다. 기존공법에 사용된 단면의 총 강제량은 224.49ton 이고, 그림 3.8의 종축은 이에 대한 각 형고별 강제량의 비를 나타낸다. 그림 3.8은 형고가 190cm일 때 강재가 가장 적게 사용됨(기존단면에 비해 13.23% 감소)을 보여준다. 위의 결과를 종합하면 형고가 190cm인 단면이 가장 경제적임을 알 수 있다.

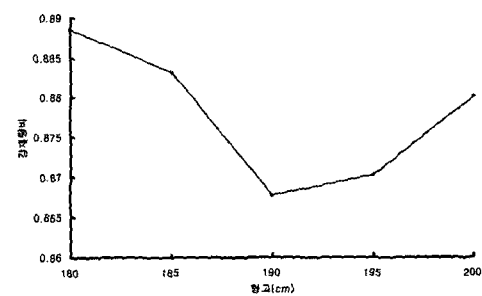


그림 3.8 형고에 따른 강제량의 변화

지금 까지 연구된 바에 의하면 지점 상하강량의 결정방법을 체계적으로 제안해 주기는 어려운 실정이다. 따라서 상하강량 결정에 있어서는 강재의 상·하부 플랜지와 부모멘트구간 바닥판 콘크리트의 응력을 검토하여 시행착오법에 의해 최적의 상하강량을 결정하는 방식을 사용하였다. 그림 3.9는 이와

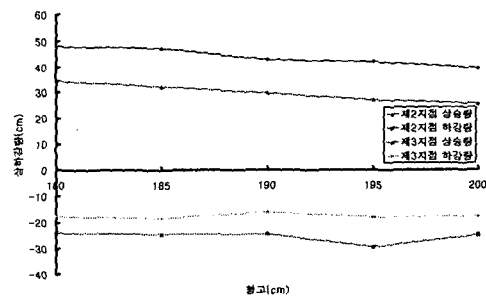


그림 3.9 형고와 강제량에 따른 지점 상·하강량

같은 방식으로 결정된 제 2지점과 제 3지점의 상·하강량을 형고와 강재량의 변화에 따라 정리한 것이다.

3.3.5 단면의 제안

매개변수 해석 결과와 시행착오에 의해 결정된 본 공법에 적합한 강상자형 단면은 다음과 같다.

표 3-3 부계별 강재 단면

부재	상플랜지 (mm)	하플랜지 (mm)	상부 rib (mm) (길이×두께×갯수)	하부 rib (mm) (길이×두께×갯수)	web 높이 (mm)	web 두께 (mm)
1~6	8×3500	14×3500	150×12×6	150×12×4	1900	10
7~25	8×3500	18×3500	150×12×6	150×12×4	1900	10
26~28	14×3500	14×3500	150×12×6	150×12×4	1900	10
29~32	22×3500	18×3500	250×20×4	250×20×6	1900	10
33~36	22×3500	14×3500	250×20×4	250×20×4	1900	10
37~44	14×3500	10×3500	150×12×6	150×12×4	1900	10
45~48	8×3500	14×3500	150×12×6	150×12×4	1900	10

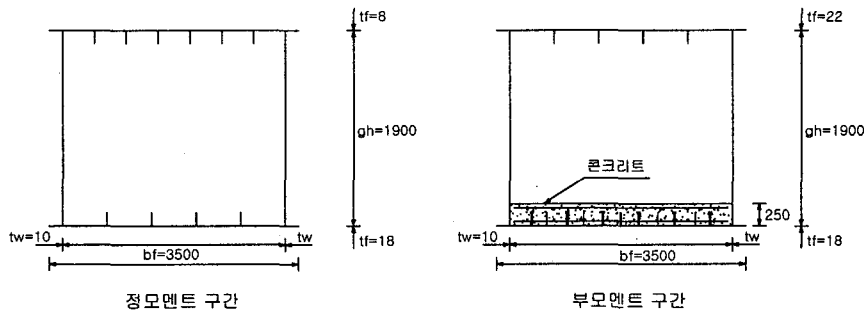


그림 3.10 주요단면의 횡단면도

표 3.4 시공 단계별 응력

구분	빔 중앙부(제 1경간)		내측지점부(제 2지점)		바닥판(제 2지점)	
	상부플랜지 (kg/cm ²)	하부플랜지 (kg/cm ²)	상부플랜지 (kg/cm ²)	하부플랜지 (kg/cm ²)	상부 (kg/cm ²)	하부 (kg/cm ²)
1단계	-166.61	108.63	289.08	-180.05	-	-
2단계	415.54	-270.94	521.62	-324.89	-	-
3단계	-475.82	435.32	472.28	-408.68	-	-
4단계	-85.24	298.33	-214.45	372.06	-37.06	-28.19
5단계	-10.70	21.01	-22.23	26.20	-2.61	-1.98
6단계	-66.30	232.04	-166.08	289.39	-28.82	-21.92
7단계	1.36	-4.76	3.42	-5.93	0.59	0.45
8단계	50.36	-176.26	126.70	-219.82	21.89	16.65
9단계	-30.68	107.32	52.82	-91.63	9.13	6.94
10단계	-6.20	21.71	-15.23	-122.25	0.38	-1.24
11단계	-1.28	4.48	-3.01	-73.95	1.08	0.01
12단계	-34.04	-33.14	-95.75	-30.36	14.58	10.04
13단계	-162.73	-25.10	-67.71	-49.10	12.44	12.53
14단계	-85.07	297.76	110.64	-191.95	19.12	14.54
합계	-657.41	1,016.4	992.1	-1,010.96	10.72	7.83

본 연구과정에 의해 제안된 강상자형 단면과 기존 공법에 의한 단면과의 최종응력을 비교하면 그림 3.11과 같다. 강제량은 224.49ton에서 194.80ton으로 약 13.23% 절감된 반면 주요 위치에서의 응력은 기존 단면의 최대 응력보다 작다. 기존단면의 최대응력에 충분히 접근하지 못하는 이유는 시공단계 중 충전콘크리트 및 바닥판 콘크리트의 허용응력 초과를 방지하기 위함이다.

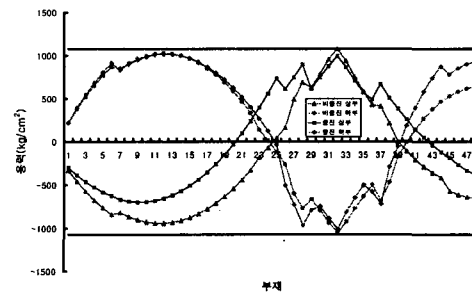


그림 3.11 최종응력의 비교

3. 결론

본 공법은 부모멘트구간 단면내에 충전된 콘크리트에 의해 부모멘트구간 주형의 강성을 증대시키고 지점 상승하강 공법을 이용하여 부모멘트구간 바닥판에 압축 프리스트레스를 도입함으로 기존에는 합성효과를 기대하기 힘들었던 부모멘트구간 바닥판의 주형과의 합성효과를 극대화한다. 이렇게 증대된 부모멘트구간의 강성에 의해 재분배된 주형의 응력을 플랜지의 단면과 지점 상승·하강력을 이용해 다시 효과적으로 분해함으로써 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

기존의 강상자형 교량보다 교량의 형고를 낮춤으로서(최대 11.5%) 형하공간 확보에 용이하고, 정·부모멘트 구간의 단면을 변단면화하는 경우 경간의 장대화도 가능할 것이다. 부모멘트 구간 단면 내부 하부에 충전된 콘크리트는 소음 및 진동을 흡수하는 부가적 효과를 가질수 있고, 본 공법에 의해 응력이 감소된 구간의 강제 두께를 조절 함으로써 강제량을 감소(최대 13.23%) 시킬 수 있었다. 또한 부모멘트구간 바닥판에 균열이 생긴 기 시공된 교량의 보수 보강공법으로의 활용도 고려할 수 있다.

본 공법에 의해 절감된 강제량이 곧 바로 경제성과 연결되기 위한 효율적인 공정의 연구도 필요할 것이라고 생각한다.

4. 참고문헌

- (1) 구민세 · 이재혁, 2경간 P.S. 연속합성보 교량의 설계에 관한 연구, 한국 강구조학회 논문집, 7권 4호, 1995.12
- (2) 한국도로공사, 도로설계실무편람, 구조물공, 1996.08
- (3) Charles G. Salmon · John E. Johnson, Steel Structures Design and Behavior forth edition, Harper Collins College Publishers, 1996, pp571-609, pp955-998
- (4) Peter Ansourian · Jack William Roderick, Analysis of Composite Beams, Journal of the Structural Division, ASCE, 104, ST10, 1978.08, pp1631-1645
- (5) Design of Modern Steel Highway Bridges, C. P. Heins, D. A. Firmage, A Wiley-Interscience Publication, 1979, pp227-279