

일체식 및 반일체식 복합슬래브 교량의 구조거동 분석에 관한 연구

최영국¹, 장일영^{2*}

A Study of Structural Behavior Analysis of Integral and Semi-Integral Hybrid Slab Bridge

Young-Guk Choi¹, Il-Young Jang^{2*}

Abstract: Girder bridges and slab bridges are equipped with a system consisting of a flexible joint unit, support, inverted T shaped abutment, and a separate connecting slab structure. These systems have problems such as an increase in cost due to frequent breakage of the expansion joints and a decrease in durability due to a structure with low moment redistribution. To improve these problems, propose Integral and Semi-Integral Hybrid Slab Bridge and examine the safety through structural analysis. As a result of the review, Integral and Semi-Integral Hybrid Slab Bridge was the section stiffness is small. but it is confirmed that the structural safety, ductility and flexibility are higher than existing bridges because the moment redistribution and the force transmission are surely performed.

Keywords: Integral abutment bridge, Structural behavior, Performance evaluation, Finite element analysis, Structural analysis

1. 서론

교량 건설의 최종 목적은 안전하고, 경제적이며, 기능성이 뛰어나고, 보기에 좋고 수명이 긴 구조물을 건설하는데 있다. 공용수명동안 여러 가지 환경적인 요인에 의한 구조물의 피해를 최소화하여 건전한 교량수명을 확보하고, 유지관리비를 최소화하여 소중한 국가재원의 낭비를 억제할 필요가 있다.

기존 거더 형식의 교량이나 슬래브 교량에서는 신축이음장치, 받침, 역T형 교대 및 별도의 접속슬래브 구조를 이루는 시스템으로서 교량의 신축이음장치는 온도, 크리프 및 건조수축 등에 의한 교축방향 변형을 수용하기 위한 장치로서 교량구성 요소 중에 파손이 빈번하고 주기적인 교체로 인한 유지관리 비용 증가의 주원인이 되고 있다. 이러한 중대규모 교량의 기술적인 측면에서의 문제점은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 받침 및 신축이음 설치로 인한 공사비가 증가
- (2) 교량 시중점부의 교대 단면과 철근 증가 및 터파기 범위 증가로 인한 공사비 증가, 민원 발생 및 제방 사면 안정

성 저하

- (3) 접속슬래브와 포장 구조의 이원화로 인한 공사비 증가
- (4) 단일구조 system 또는 모멘트 재분배가 낮은 구조로 인한 지진에 대한 여유성 부족
- (5) 측경간이 단순 경계조건 구조로 인하여 모멘트 재분배 효과가 없어 측경간 경간장이 제한되거나 거더높이 증가
- (6) 부대시설 설치로 인한 구조 내구성 감소
- (7) 구조계의 여유성 부족으로 지진 저항력 저하
- (8) 상부구조 구성이 이중 합성 단면 구성으로 거더높이 증가

상기와 같은 문제점을 개선하기 위해서 상부구조와 하부구조 및 접속슬래브를 하나의 다연속 다프레임 구조 시스템으로 일체시키고, 교량 시중점부에는 상부구조의 거더에 횡방향 변위에 유연하고 축방향 강성이 큰 단주의 세미리지드말뚝으로 지지하여 무교대화 하고, 그 연결을 강결하거나 힌지로 연결하여 일체식 및 반일체식 구조를 이루도록하며, 접속슬래브 내에 게르버힌지인 머나제 장치를 설치하여 경간장 제한을 없애며, 상기 상부 구조의 단면을 압연강재와 PSC 및 RC가 혼합된 복합 단면으로 하여 적용 경간장을 40.0 m 이상 적용과 슬래브거더 높이를 줄이는 것을 목표로 하여 다연속 프레임 일체식 및 반일체식 복합 교량을 제안하고 구조해석에 의한 거동을 분석하여 안전성을 검토를 수행하였다.

¹정회원, 금오공과대학교 토목공학과, 박사수료

²정회원, 금오공과대학교 토목공학과, 교수, 교신저자

*Corresponding author: jbond@kumoh.ac.kr

Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

•본 논문에 대한 토의를 2018년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 구조해석에 의한 거동특성 분석

2.1 개요

다연속·프레임 일체식 및 반일체식 복합슬래브 교량의 구조 특성에 미치는 아래 요인들에 대해 이론 정밀해석을 통해 구조 거동의 안전성을 검토하였다

- (1) 다연속 다프레임 구조의 상호 부재별 구속에 의한 힘 분배의 영향
- (2) 세미리지드말뚝 지지 및 연결 경계조건에 의한 구조 영향
- (3) 온도변화에 의한 교량의 교축방향 신축변위 수용
- (4) 접속슬래브의 경간장과 머나제장치의 역할
- (5) 복합슬래브 구조 단면
- (6) Soil-Structure Interaction 관계의 구조 시스템

2.2 머나제장치에 의한 접속슬래브 거동 분석

2.2.1 머나제장치 특성 및 개요

접속슬래브내에 설치한 머나제장치가 회전을 자유롭게 하고 전단력만 전달하는 역할을 충실히 하여 접속슬래브 끝단의 상향 처짐발생이 없도록 게르버힌지 역할로서의 구조 거동이 하는지를 분석하고, 접지된 지반반력계수 영향에 대해 교량구조에 발생하는 부재력을 파악하였다.

2.2.2 유한요소해석에 의한 구조적 안전성 검토

머나제장치에 직접 차량하중이 재하될 때의 머나제장치의 구조적 안전성을 분석하기 위해 FEM해석과 전단마찰이론으로 해석을 실시하였다. 국부 상세 해석 범위는 도로교설계기준의 연속판 윤택중 분포폭 범위를 고려하여 결정하였다. Fig. 2와 같이 상부 본체는 Solid요소로, 머나제장치는 Fig. 3과 같

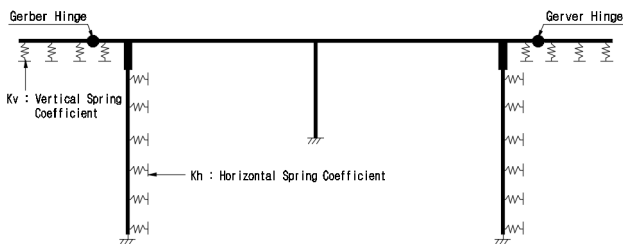


Fig. 1 Modeling of Integral and Semi-Integral Hybrid Slab Bridge

Table 1 Material properties

Classification	Upper of bridge	Mesnage hinge reinforcement
Section	2.1 m x 2.1 m	D22
Material	$f_{ck} = 27 \text{ MPa}$	$f_y = 300 \text{ MPa}$

이 보 요소로 모델링하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같으며, 구조 해석의 수행은 범용구조해석 프로그램인 MIDAS/CIVIL을 사용하였다.

머나제장치에 발생하는 최대 응력을 알아보기 위하여 머나제장치 상단에 DB-24의 후륜하중의 2배에 해당하는 192 kN을 집중하중으로 직접 재하 하였으며, 하중에 의한 머나제장치 상에 발생하는 최대 발생응력은 3.2 MPa로서 머나제장치의 다웰철근 허용응력 140 MPa보다 매우 적어 안전성은 충분히 확보된 것으로 판단되어 진다.

2.3 일체식·반일체식 세미리지드말뚝의 거동분석

2.3.1 일체식·반일체식 세미리지드말뚝의 개요

기존의 무조인트 교량의 문제점인 교대 휨 강성 및 축방향 강성에 따라 크게 발생하는 정모멘트와 중앙부 처짐을 줄이기 위해서 축방향 강성이 높은 세미리지드말뚝으로 지지케

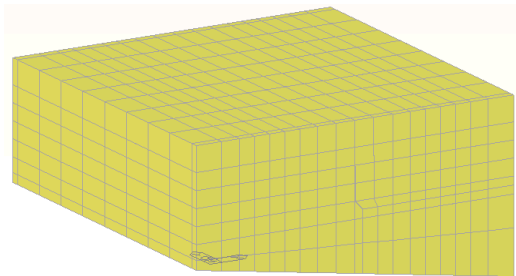


Fig. 2 Solid element

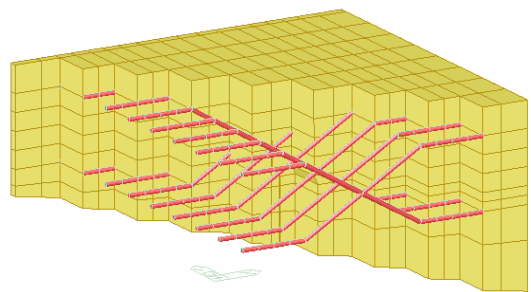


Fig. 3 mesnage hinge-beam element

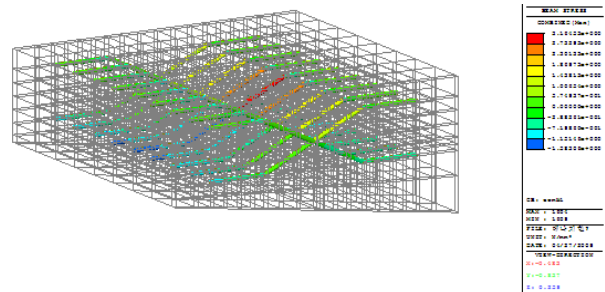


Fig. 4 Analysis result

함에 따라, 그 구조특성과 상기 말뚝과 상부구조와의 연결을 강결시키는 일체식(Integral)구조로 하는 시스템과 힌지로 결합시키는 반일체식(Semi-Integral)시스템에 의한 구조거동과 영향을 분석하여 구조 거동 적정성을 검토하였다.

2.3.2 유한요소해석에 의한 구조 안전성 검토

2.3.2.1 모델링 및 하중 재하

세미리지드말뚝의 거동을 반영하기 위하여 2-D해석에서 구한 말뚝머리 상부 반력을 고려하였다. 이 하중을 모델링 양단에 재하 하여 본 연구대상 교량에 작용하는 모든 하중의 영향을 고려하였다.

2.3.2.2 해석결과

세미리지드말뚝 상단에서의 최대 발생응력은 Table 3과 같이 각각의 하중조합의 경우 61.2 MPa, 68.6 MPa이 발생하여 허용응력 대비 안전율이 2.288~2.041으로 상당한 여유력을 가지고 있는 것으로 판단되며, 교대 거더부 콘크리트의 압축응력은 각각 11.3 MPa, 12.6 MPa이 발생하여 허용응력 대비 안전율이 1.11 ~1.24로 구조물의 안전성을 확보하는데 문제가 없는 것으로 판단된다.

Table 2 Material properties

Classification	Upper of bridge	Abutment	Filled Concrete	Steel pipe pile
Section	2.1 m x 2.1 m	2.1 m x 1.4 m	φ484	φ508-12t
Material	$f_{ck} = 35 \text{ MPa}$	$f_{ck} = 35 \text{ MPa}$	$f_{ck} = 24 \text{ MPa}$	SM400

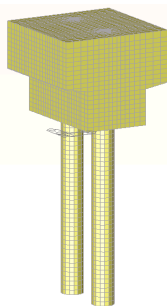


Fig. 5 Modeling for Structural Analysis

Table 3 Results of structural safety of semi-rigid pile joint

Classification	Allowable stress	Applied stress	Safety rate	Note
Upper of pile	140 MPa	61.2 MPa	2.288	$P_{max} = 1731.9 \text{ kN}$
		68.6 MPa	2.041	$M_{max} = 354.4 \text{ kN.m}$
Girder concrete	14 MPa	11.3 MPa	1.239	$P_{max} = 1628.9 \text{ kN}$
		12.6 MPa	1.111	$M_{max} = 576.7 \text{ kN.m}$

3. 배면토압에 의한 영향 분석

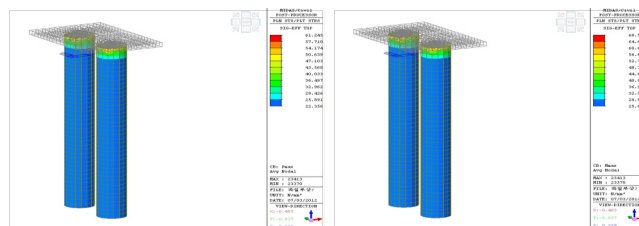
3.1 배면토압의 설계 적용방법

교대 배면에 발생하는 토압은 온도변화에 따른 상부구조의 변위에 의해 교대 배면에 발생하는 토압의 크기가 달라지게 된다. 즉, 온도 감소로 인해 상부구조의 길이가 줄어들 경우 주동토압이 작용하게 되며, 온도증가로 인해 상부구조의 길이가 늘어날 경우 수동토압이 작용하게 된다. 따라서, 교대 배면의 토압분포는 온도변화에 의한 교대 변위에 따라 달라지게 되며, 그 크기도 주동토압과 수동토압 사이에 존재하게 된다(Fang et al., 1994).

실제 교대 배면에 발생하는 토압은 교대 변위에 따라 달라지기 때문에, 이와 같은 교대 변위와 토압의 상관관계를 고려한 배면토압을 일체식 및 반일체식 교대 교량의 설계에 적용하기 위한 연구가 최근 활발히 수행되고 있으며, 본 절에서는 그 가운데 제일 많이 알려진 식 (1)의 Diciceli(2000a)의 제안식을 적용하였다.

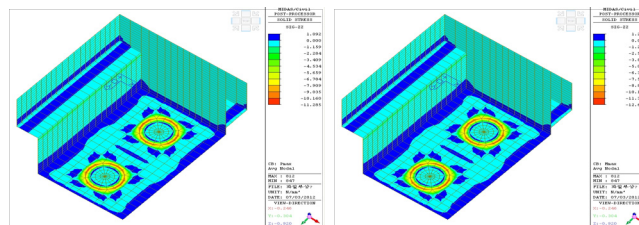
$$K_a \leq K_0 + \phi d \leq K_p \quad (1)$$

여기서, d 는 온도변화에 의해 상부구조와 교대 접합부에 발생하는 수평변위(지반- 구조물 상호 작용 의존함수), K_a 는 주동토압계수, K_0 는 정지토압계수, K_p 는 수동토압계수, ϕ 는 교대변위와 토압계수 사이의 1차 관계의 기울기이다.



(a) P_Max (b) M_Max

Fig. 6 Steel pipe pile stress



(a) P_Max (b) M_Max

Fig. 7 Girder concrete stress

3.2 유한요소해석에 의한 구조 안전성 검토

교대배면 토압의 변화는 내부 마찰각 30°에 대해서 정지토 압계수(1-sinΦ = 0.5)에서부터 수동토압계수까지 0.5씩 증가시켜 구조물에 미치는 영향을 분석하였다.

Table 4와 같이 배면 토압계수의 변화에 따른 구조물의 거동 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 교대



$$P1 = k (q + r \times H1), \quad P2 = k (q + r \times H2)$$

Fig. 8 Modeling of earth pressure load

Table 4 Results of safety estimate of semi-rigid pile joint

Earth pressure coefficient	Earth pressure	Abutment negative moment (kN·m)	Span Moment (kN·m)	Pier negative moment (kN·m)
K=0.5	q1 = 2.691	-4220.7	1640.1	-6034.3
	q2 = 7.080			
K=1.0	q1 = 5.382	-4244.7	1633.4	-6019.5
	q2 = 11.469			
K=1.5	q1 = 8.073	-4268.7	1626.7	-6004.7
	q2 = 15.858			
K=2.0	q1 = 10.765	-4292.7	1620.6	-5989.8
	q2 = 20.247			
K=2.5	q1 = 13.456	-4316.7	1615.0	-5975.0
	q2 = 24.636			
K=3.0	q1 = 16.147	-4340.7	1609.3	-5960.2
	q2 = 29.025			

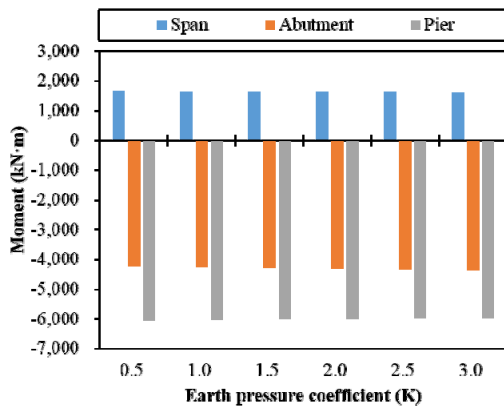


Fig. 9 Result to earth pressure coefficient change

부 형식이 일반 벽식 강성 교대가 아니고 낮은 거더와 세미리 지드말뚝 형식으로 이루어져 토압 크기와 적용범위가 적기 때문인 것으로 판단된다.

4. 다연속·프레임 복합슬래브 구조의 특성분석

4.1 기존교량 구조해석 결과와 비교 분석

본 연구 교량의 복합슬래브와 다연속프레임 구조 시스템의 합리성을 입증하기 위하여, 본 연구 교량과 대체 가능한 기존의 대표적 교량 형식인 조인트 합성거더교와 합성라멘교에 대한 구조 해석 결과를 상호 비교 분석하였다.

해석 모델링상에 큰 특징은, 본 연구 교량은 Fig. 10과 같이 접속슬래브와 상부구조와 하부구조가 강결 일체 구조와 측경간이 지반에 직접 지지되는 시스템을 갖는 다연속 구조계이면서, 교량 시중점부의 말뚝이 지반과 직접 지지되는 구조시스템과 교각은 강결로 이루어져 다프레임 구조시스템을 구성하는 특징을 갖는다.

반면, 기존 교량 PSC합성 거더교는 Fig. 11과 같이 구조 완성 전까지는 단순지지하다가, 완공후는 바닥판이 연속화되면

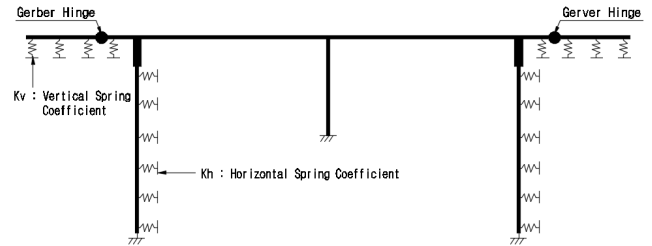


Fig. 10 Frame composite slab bridge modeling

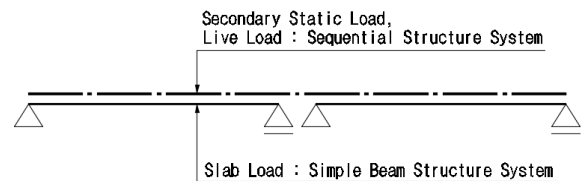


Fig. 11 PSC composite girder bridge modeling

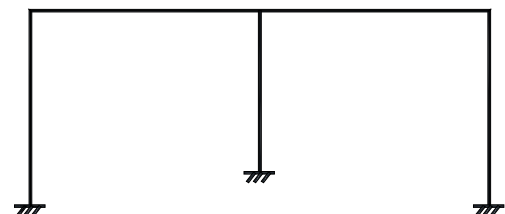


Fig. 12 Synthetic ramen bridge modeling

서 교각에 2개의 받침으로 지지하는 부분연속 구조시스템으로 구성됨을 특징으로 하고 있고, 기존의 합성라멘교는 Fig. 12와 같이 교량 시중점부거 매시브한 교대가 강결된 라아멘 구조 시스템을 특징으로 하고 있다.

4.2 거동 특성 분석 결과

하중조합은 도로교 설계기준에 의거 적용하였으며, 작용하중은 고정하중과 활하중과 토압등의 상시하중(LC1) 중심으로, 고정하중이 작용하는 경우(LC2), 활하중만 작용하는 경우(LC3), 온도변화만 작용하는 경우(LC4) 조건별로 해석하고 비교 하였다. 기존 PSC합성 거더교은 그 특성상 경간의 중앙부와 교각의 지점부에 발생하는 휨모멘트에 대하여 비교 분석을 주로 하였다. 해석결과는 Tables 5~ 7에 나타내었다.

본 연구 대상 교량의 발생 휨모멘트는 기존 라멘교의 휨모멘트에 비하여 약 95% 수준으로 낮게 나타났으며, 기존 PSC 합성형 거더교에 비해서는 상당히 낮게 나타났다. 이는 PSC 합성형 거더교의 구조 모델링이 단순보 System이고 바닥판만 연속화에 따른 결과로 판단되며, 중앙부의 처짐도 기존 교량

에 비하여 86% 및 80% 낮게 나타내는 것은 기존교량에 비해 단면 강성이 적지만 접속슬래브와 본체구조가 연속 강결에 따라 모멘트 재분배와 힘전달이 확실하게 이루어진다는 결과로 판단됨에 따라 타 교량 형식에 비해 구조안정성 및 연성이 높은 구조로 사료된다.

그리고 기존 합성라멘교 교대 벽체 강성이 본 연구 교량의 강성보다 수십배 큰데 비해 중앙부 모멘트와 처짐이 본 연구 교량에 비해 크게 나오는 것은 길이와 높이의 비 차이와 비연속에 따른 결과로 판단된다.

지점부와 교각 지점부의 휨모멘트는 본 연구 대상 교량이 기존 합성라멘교에 비하여 약 95%와 90% 수준으로 적게 나타났다. 이는 다연속 다프레이밍 일체식 교량의 교대 형식이 단주형 강판세미리지드 말뚝 형식으로 그 축방향 강성이 일반 라멘교 교대의 강성보다 상대적으로 작아 회전각이 축소되고 다연속에 의해 모멘트 재분배와 온도변화 영향이 작기 때문인 것으로 판단된다. Case별 해석 결과의 경향성은 Figs. 13, 14에 나타내었다.

Table 5 Results of Frame composite slab bridge

Load combination	Abutment Support (kN-m)	Span Center (kN-m)	Pier Support (kN-m)	Deflection(mm)	
				Horizontal	Vertical
Max. load	-4388.3	1568.1	-5802.3	11.68	38.73
Dead load	-2412.2	840.8	-3658.9	0.0	21.39
Live load	-1508.1	746.3	-1608.0	1.4	16.48
Temp.	-441.5	390.9	-340.2	9.7	0.00

Table 6 Results of PSC composite girder bridge modeling

Load combination	Abutment Support (kN-m)	Span Center (kN-m)	Pier Support (kN-m)	Deflection(mm)	
				Horizontal	Vertical
Max. load	-	7046.6	-4130.3	expantion	45.00
Dead load	-	4652.5	-742.8	expantion	36.40
Live load	-	2394.1	-2035.8	expantion	8.60

Table 7 Results of Synthetic ramen bridge modeling

Load combination	Abutment Support (kN-m)	Span Center (kN-m)	Pier Support (kN-m)	Deflection(mm)	
				Horizontal	Vertical
Max. load	-4616.6	1643.3	-6461.4	12.41	48.97
Dead load	-2239.6	905.8	-3727.1	0.00	22.68
Live load	-1341.2	762.3	-1632.0	0.10	16.79
Temp.	-685.4	419.0	-1010.5	10.55	0.00

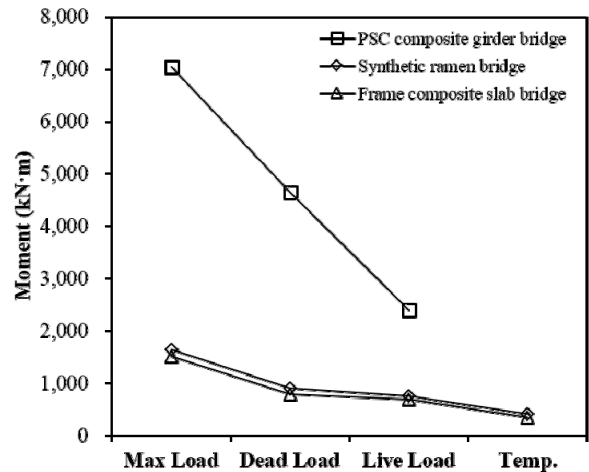


Fig. 13 Moment of Span center

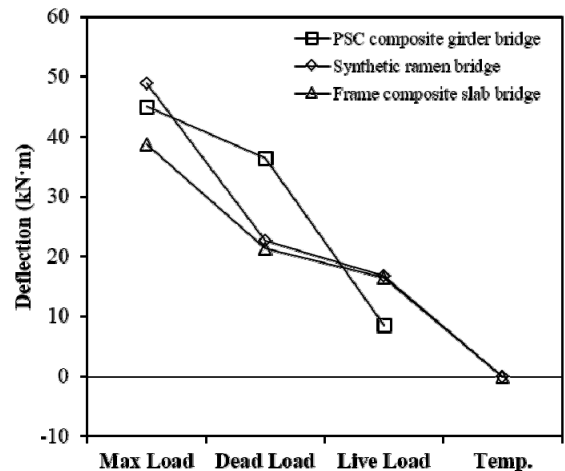


Fig. 14 Deflection of Span center

5. 결 론

본 연구에서는 다연속프레임 일체식 및 반일체식 복합슬래브 교량을 제안하고 정밀해석을 통해 구조 거동의 합리성과 안전성을 검토하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 하중에 의한 머나제장치상에 발생하는 최대 발생응력은 3.2 MPa로서 머나제장치의 다웰철근 허용응력 140 MPa 보다 매우 적어 안전성은 충분이 확보된 것으로 판단되어 진다.
- 2) 세미리지드말뚝 연결부는 반일체식경우는 일체식경우보다는 다소 증가하나, 구조적 안전성이나 사용성에 문제가 없는 것으로 분석되며, 현장 여건에 따라 본체 경간장이 크고 접속슬래브 경간장이 큰 경우는 반일체식 구조로 적용하여도 타당함을 확인할 수 있었다
- 3) 세미리지드말뚝 상단과 교대 거더부 콘크리트의 압축응력은 허용응력 대비 안전율이 1.11~1.24로 구조물의 안전성을 확보하는데 문제가 없는 것으로 판단된다.
- 4) 배면 토압계수의 변화에 따른 구조물의 거동 변화는 거의 없는 것으로 나타으며, 이와 같은 결과는 교대부 형식이 일반 벽식 강성 교대가 아니고 낮은 거더와 세미리지드말뚝 형식으로 이루어져 토압 크기와 적용범위가 적기 때문인 것으로 판단된다.
- 5) 기존교량에 비해 단면 강성이 적지만 접속슬래브와 본체 구조가 연속 강결에 따라 모멘트 재분배와 힘전달이 확실하게 이루어진다는 결과로 판단됨에 따라 타 교량 형식에 비해 구조안정성 및 연성이 높은 구조임을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비(2016-104-100)에 의하여 연구된 논문이며, 본 연구를 위해 많은 지원을 아끼지 않으신 관계자 제위께 깊은 감사를 드립니다.

References

- AASHTO (2010), LRFD Bridge Specifications.
- AISI, Highway Structures Design Handbook: Integral Abutments for Steel Bridges, American Iron and Steel Institute, Tennessee, Vol. II Chap.5.
- Jang, C.-W. (2003), Analytical Study on the Behavior of Preflex Beam-Abutment Integral Bridges.
- Martin P. Burke Jr. (2009), Integral and Semi-Integral Bridges.
- Oguejiofor, E. C., and Hosain, M. U. (1994), A Paramatic study of Perfobond rib Shear Connectors, Canadian Journal of Civil Engineering, 21, 614-625.
- PCI (2011), Bridge Design Manual.

Received : 09/27/2017

Revised : 12/13/2017

Accepted : 12/29/2017

요 지 : 기존 거더 형식의 교량이나 슬래브 교량에서는 신축이음장치, 받침, 역T형 교대 및 별도의 접속슬래브 구조를 이루는 시스템으로 이루어져 있다. 이러한 시스템은 신축이음부의 빈번한 파손으로 인한 비용증가, 모멘트 재분배가 낮은 구조로 인한 내구성 감소 등의 문제가 있다. 상기의 문제를 개선하기 위해 일체식 및 반일체식 복합 교량을 제안하고 구조해석을 통해 안전성을 검토하였다. 검토결과 단면강성은 작지만 접속슬래브와 본체 구조가 연속 강결된 다연속 프레임 구조계 형성과 상부구조의 경간과 단면강성의 균형으로 인하여 모멘트재분배와 힘전달이 확실하게 이루어져 기존교량에 비해 구조안전성 높은 구조임을 확인하였다.

핵심용어 : 무교대슬래브, 구조거동, 성능평가, 유한요소해석, 구조해석
