

거더 연속부의 부모멘트 제어에 효과적인 PSC 연속보의 텐던 배치에 관한 연구

김익현*

Kim, Eui Hun*

A Study of the Tendon Profile of a PSC Continuous Beam Able to Resist the Negative Bending Moment of Continuous Intergirders

ABSTRACT

The problems associated with the continuous method of a domestically improved prestressed concrete (PSC) girder and the bending moment of a continuous tendon were studied. Based on the results, a continuous tendon model was proposed that can resist the negative bending moment of an intergirder. This model lowers the anchorage of the continuous tendon as far as possible under the girder, and extends the tendon section arranged under the girder. This method reduces the PS's bending moment in the middle of the span, but maximizes it in the intergirder. This continuous tendon model can offer a suitable method for continuity before manufacturing a composite, which requires a higher design bending moment in the intergirder than in the middle of the span.

Key words : PSC girder, Continuous tendon, Secondary moment, Continuous method

초록

본 연구에서는 국내 개량형 PSC거더(Prestressed Concrete Girder)의 연속화 방식의 문제점과 연속텐던(Continuous Tendon)의 휨모멘트(Bending Moment) 특성을 분석하였다. 이 결과들을 바탕으로 본 연구에서는 거더 연속부의 부모멘트(Negative Moment) 제어에 효과적인 연속텐던 모델을 제안하였다. 이 모델은 연속텐던의 정착단을 거더 하부로 최대한 내리고, 거더 하부로 배치되는 텐던 구간을 늘려, 거더 중앙부의 긴장력 모멘트가 감소하더라도 연속지점부의 긴장력 모멘트를 증가시키는 방법이다. 이러한 연속텐던 모델은 거더 중앙부보다 연속지점부에서 대응해야 할 설계모멘트가 큰 합성 전 연속화 공법에 적합한 성능을 발휘할 수 있다.

검색어 : PSC 거더, 연속텐던, 2차 모멘트, 거더 연속화, 거더 연속부

1. 서론

1.1 연구배경

다경간 교량의 연속화는 경간중앙부의 설계모멘트를 줄일 수 있어 구조적으로도 유리할 뿐만 아니라, 신축이음을 생략할 수가 있어 주행성과 유지관리에서도 유리하다. 1969년, 국내에 처음으로 도입된 PSC I형 거더교는 경간 사이에 신축이음이 있는 비연속화 구조였으나, 이후에는 연속화 공법이 주로 적용되었다.

* 종신회원 · 교신저자 · 기술사사무소 바른구조기술 대표 (Corresponding Author · Structural Engineer BR · brgujo@naver.com)

Received November 20, 2020/ revised January 19, 2021/ accepted August 20, 2021

1980년대 초반에는 거더와 거더 사이 연결을 배제한 상태에서 바닥판 철근콘크리트 구조로 연결하는 방법이 적용되었고, 이후 1980년대 중후반부터는 바닥판 뿐만 아니라 거더와 거더 사이까지 철근콘크리트 구조로 연결하는 연속화 공법이 적용되었다. 이후로도 연속화 공법 개선과 하자 예방을 위해 한국도로공사를 중심으로 연속화에 대한 연구가 진행되기도 하였다(Expressway and Transportation Research Institute, 1999; Expressway and Transportation Research Institute, 2002; Kwak et al., 1999).

2000년대 들어서부터 현재까지, 재료와 시공기술의 발전과 더불어 거더교 시장의 호황에 힘입어 다양한 공법의 PSC 거더, 이른바 개량형 PSC 거더가 개발되었다(ConsPeople, 2018; Han et al., 2001; Koo et al., 2004). 이들 개량형 PSC 거더에서도 연속화는 거더의 설계 경쟁력을 확보하는데 중요한 방법이다. 시장에 선보인 다양한 개량형 PSC 거더들은 각자의 공법적 특징에 맞추어 연속화 방법을 가지고 있다.

최근 개량형 PSC 거더가 적용된 연속교 설계로부터 거더 설계에 관한 문제점을 발견할 수 있었다. 시공단계별 연단 응력의 한계를 검토해야 하는 PSC 구조임에도 불구하고, 구조계에서 가장 중요하다고 볼 수 있는 연속부에서의 응력검토를 생략하는 경우가 있다(Korea Expressway Corporation, 2017; Korea Expressway Corporation, 2018; Korea Expressway Corporation, 2019; K-Water, 2019).

PSC 거더는 시공단계별 응력 안전성과 극한상태에서의 강도 안전성을 확보해야 한다. 제품으로 출시된 개량형 PSC 거더는 단일 부재로서 이러한 설계 조건을 만족시키고 있다. 그런데 이 부재를 통해 연속화 구조계를 구성하면서 문제가 발생된다. 관련 설계를 살펴보면, 거더 연속부에 대해서 강도검토만 수행할 뿐 응력검토를 구체적으로 수행하지 않은 경우를 찾아볼 수 있었다. 해외 교량설계기준(AASHTO LRFD Bridge design Specification)에 따르면(AASHTO, 2014) 이 부분의 설계 대안으로 강도검토만 수행할 수 있도록 제시하고 있지만, 이 대안은 해당 위치에 인장응력이 크게 발생됨을 역설하는 결과다. 이러한 설계는 거더 연속부에 발생하는 부모멘트에 대한 균열발생 여부를 알 수 없다. 만약 연속부에 균열이 발생되면 연속구조 시스템의 파괴 및 강성 저하가 이어진다.

특히 이러한 문제는 합성 전 연속화를 적용한 설계에서 두드러지게 발견되고 있다. 조기 연속화를 통해 구조 효율을 높였지만 정작 연속 구조계의 핵심인 연속부에 대해서는 미약한 설계 대응이 있었다. 이러한 문제점은 교량 안전성과 내구성 측면에서 부정적인 결과를 가져올 수 있다.

1.2 연구목적

이 연구에서는 거더 연속부의 부모멘트 제어에 효과적인 연속텐던 배치방안을 제안하였다. 제안된 방안의 효과를 검증하기 위해 일반적인 연속텐던 배치방법의 모델과 수치해석 비교를 수행하였다. 이를 위해 국내 개량형 PSC 거더교 설계에 적용되고 있는 연속화 특징과 문제점을 분석하였다.

2. 개량형 PSC 거더의 연속화 분석

2.1 연속화 유형 및 정의

일반적인 개량형 PSC 거더 대다수는 다경간 구성을 위해 개념적 연속화 내지는 부분 연속화 구조를 적용하고 있다.

개념적 연속화 구조란 거더 간 신축이음이 없고, 연속부 구조보강도 마련되어 기능적으로는 연속교와 같지만, 연속부에서 발생하는 설계모멘트에 의해 균열이 발생할 수 있는 구조를 말한다. 이 경우 처음 구조계는 연속화 구조이지만 시간이 흐른 뒤의 유효 구조계는 비연속화될 수 있다. 이는 연속지점부에 발생하는 인장응력으로 인해 균열이 발생되기 때문이다. 개념적 연속화 구조는 거더 연속화 여부에 따라 두 가지로 분류할 수 있다.

첫 번째는 Fig. 1(a)와 같이 바닥판만 연속시키는 경우다. 바닥판 연속화는 기능적으로는 연속된 상태이지만, 구조적으로는 단순지지 구조이기 때문에 개념적 연속화로 분류될 수 있다. 이 구조에서는 바닥판 단면 강성이 합성단면 강성에 비해 매우 작다. 전체 구조계에서는 바닥판 연속부가 마치 힌지처럼 거동한다. 따라서 바닥판만 연속시키는 경우는 단순지지 구조라고 봐야 바람직하다.

두 번째는 Fig. 1(b)와 같이 연속부 보강으로 개념적 연속화를 하는 경우가 있다. 이 방법은 연속부 거더 사이를 철근콘크리트 구조로 연

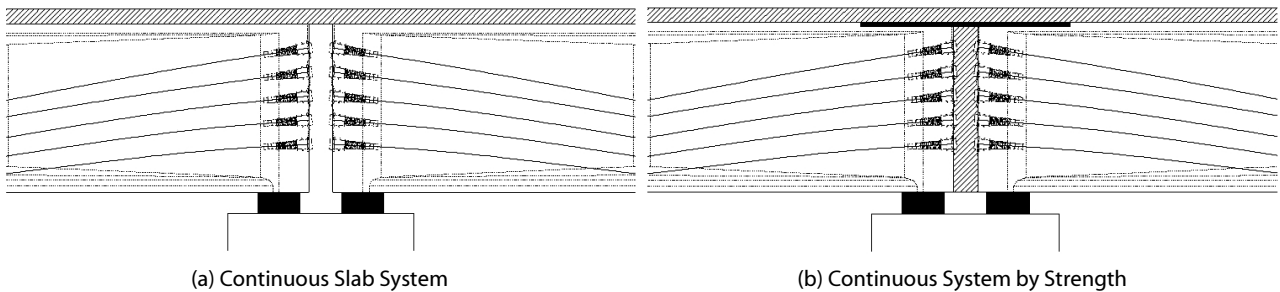


Fig. 1. Continuous Part with Inauthentic Continuous System

결한 다음, 강재나 연속텐던 등을 통해 연속부를 보강하는 방법이다. 설명만으로는 개념적 연속화가 아닌 구조적 연속화로 이해할 수 있다. 그러나 보강 목적이 연속화에 따른 설계단면력 저항이 아닌, 개념적으로 연결하기 위한 목적이기 때문에 개념적 연속화라고 정의내릴 수 있다.

부분 연속화 구조는 거더가 부담해야 하는 전체 설계하중 중 일부를 연속 구조계가 부담하는 구조다. 대표적으로 단계별 긴장력 도입 공법이 적용된 PSC 거더가 부분 연속화에 해당된다. 부분 연속화는 연속화를 도입하는 시공단계에 따라 두 가지로 구분될 수 있다.

가장 일반적인 부분 연속화는 합성 후 연속화다. 합성 후 연속화는 바닥판 시공 후 연속텐던 긴장력을 도입하여 연속부를 연결하는 경우다. 바닥판 중량까지는 거더가 단순지지로 부담하다가 연속화 이후 발생하는 2차 사하중과 활하중에 대해서는 연속 구조계가 부담하는 구조적 특징을 가지고 있다. 이 연속화 방법은 2차 긴장력이 합성단면에 도입된다는 점에서 긴장력 도입 효율이 낮고, 바닥판 중량을 단순 지지 거더가 부담해야 한다는 점에서 구조적 효율이 아쉽지만, 명확한 구조계 정의에 따른 신뢰할 만한 성능을 제공해준다는 점 등에서 장점이 있다.

두 번째 부분 연속화는 합성 전 연속화를 하는 경우다. 합성 전 연속화는 바닥판 시공 전 거더 사이를 연결하고 연속텐던 긴장력을 도입하여 연속화 거더를 구성한다. 연속화 거더가 바닥판 중량까지 부담하기 때문에 합성 후 연속화 대비, 구조효율이 우수하다. 그러나 이러한 사항은 이론적일 뿐, 현실적으로 합성 전 연속화를 적용하기는 쉽지 않다. 연속화 구조가 부담해야 하는 설계하중이 클수록 높은 수준의 연속텐던 긴장력이 요구되어 연속텐던 배치수량을 증가해야 하기 때문이다.

2.2 개량형 PSC 거더의 연속화 문제점

일반적인 개량형 PSC 거더가 구조적 효율이 좋은 연속화를 채택하지 않고, 개념적 연속화 내지는 합성 후 연속화를 적용하는 데에는 몇 가지 이유가 있다.

첫 번째는 연속텐던 정착단 마련이 어렵다. 일반적으로 텐던 정착단은 거더 단부에 마련된다. 그러나 거더가 가설된 후에 긴장력 도입이 필요한 연속텐던은 거더 단부 배치가 불가능하여 이외의 위치에 배치해야만 한다. 거더가설 후에는 거더 단부가 막히기 때문이다. 이 경우 연속텐던 정착단은 긴장작업이 가능한 거더 상단부에 배치하거나, 거더 측면에 별도의 돌출형 정착 구조를 통해 마련된다. 이러한 별도의 정착단은 구조적 성능과 효율, 그리고 시공성 및 경제성까지 고려해야 하기 때문에 상세 결정에서 어려움이 따른다. 거더의 구조적 특징과 공법에 따라 연속화를 하는 것이 오히려 더 비합리적일 수 있다.

두 번째는 연속텐던이 발휘하는 긴장력에 의한 저항력 수준이 소요 수준과 맞지 않은 문제점이 있다. 연속구조가 저항해야 하는 모멘트와 연속텐던이 발휘할 수 있는 모멘트의 경향에서 차이가 발생하기 때문이다.

연속구조에서는 경간 중앙부보다 연속부에서 큰 외력 모멘트가 발생된다. 예를 들어, 전 구간 등분포하중이 작용하는 3경간 연속보 구조의 경우에는 연속부에서 발생하는 모멘트가 경간 중앙부보다 약 25% 크다. 하중재하 조건에 따라 이 수치가 달라질 수 있지만 경향은 마찬가지다. 이와 같은 연속구조의 조건이라면, 연속텐던이 발휘하는 저항력은 연속부가 경간 중앙부보다 커야 소요에 부합된다.

Fig. 2는 일반적인 연속텐던 배치도를 나타낸 것이다. Fig. 2(b)와 같이 연속텐던을 배치하면 거더 중앙부에서 발휘되는 긴장력 모멘트와 거더 연속부에서 발휘되는 긴장력 모멘트 크기가 비슷한 수준이기 때문에 소요와 맞지 않게 된다. 이 경우 설계 안전성을 확보하기 위해서는 상대적으로 위험단면인 연속부의 소요에 맞춰 연속텐던 도입

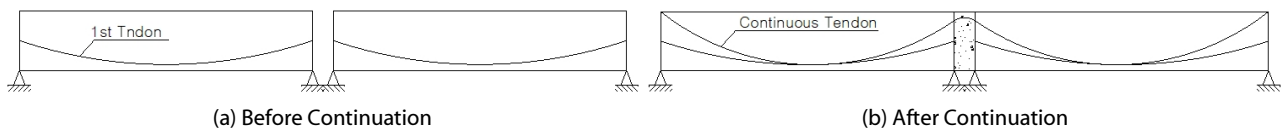


Fig. 2. Conventional Concept of Continuous Tendon Placement in Precast Prestressed Concrete Girder Continuous Beams

Table 1. Continuous Method of Representative Improved Prestressed Concrete Girders

Name	Continuous method	Continuity stage	Structural system
E* girder	Continuity of only slab	After slab construction	Inauthentic continuous beam
I** girder	Continuity of composite girder	After slab construction	Structural continuous beam for live load
e* girder	Continuity of composite girder	Before slab construction	Inauthentic continuous beam
D* girder	Continuity of girder	Before slab construction	Inauthentic continuous beam
B** girder	Continuity of only slab	After slab construction	Inauthentic continuous beam
O** girder	Continuity of only slab	After slab construction	Inauthentic continuous beam
W** girder	Continuity of composite girder	After slab construction	Structural continuous beam for live load

긴장력을 결정해야 한다. 그러면 경간 중앙부에는 소요 이상의 저항력이 도입된다.

연속텐던의 배치상세에 따라 경간 중앙부가 연속부보다 더 큰 저항력이 발생하는 경우도 있다. 이 경우는 연속텐던에 의해 연속 지점부에 부반력(Negative Reaction)이 발생된다. 그러면 경간 중앙부에는 유리한 2차 모멘트(Secondary Moment)가 발생되지만, 연속부에서는 불리한 2차 모멘트가 발생된다.

이러한 이유로 실무에서는 개념적 연속화를 적용하거나 합성 후에 연속화를 적용하게 된다. Table 1은 국내 주요 개량형 PSC 거더의 연속화 구조 특징에 대한 정보이다. 이들 거더의 연속화 방식을 살펴보면 연속부에 대해 극한상태에서의 안전성만 검토하는 개념적 연속화 내지는 연속화 소요력이 상대적으로 부담스럽지 않은 합성 후 연속화 방식이 적용되어 있다.

2.3 연속화 시기에 따른 설계 단면력 분석

다음은 연속화 시기별 설계해야 할 모멘트의 수준을 비교하기 위한 분석을 수행하였다. 여기서 연속화 시기란 개량형 PSC 거더에서 어느 시공단계에서 연속화를 하는가에 따른 시간적 구분이다. 또는 구조적 연속화의 구분이라고도 이해가 가능하다. 해석 모델은 Fig. 3과 같이, 경간장 50 m의 3경간 연속 PSC 합성거더를 선정하였다. 연속화

시기는 다경간 단순보 구조인 바닥판 연속화(Only Slab Continuity)를 비롯하여, 합성 후 연속화(After Composite), 합성 전 연속화(Before Composite), 그리고 완전 연속화(Full Continuity)까지 4가지로 구분하였다. 구조해석은 상용프로그램인 MIDAS Civil을 사용하였다. 자중은 프로그램 내에서 자동 계산되었고, 2차 사하중은 아스팔트 포장 80 mm 두께를 적용하였다. 활하중은 도로교설계기준에서 제시된 활하중을 적용하였다(KIBSE, 2016). 해석 결과는 Table 2 및 Fig. 4와 같다.

경간 중앙부에서 발생하는 설계 휨모멘트 크기를 확인하였다. 바닥판 연속화의 경우 경간 중앙부에서 발생하는 설계 휨모멘트는 21,499 kNm이다. 합성 후 연속화를 한 경우 경간 중앙부에서 발생하는 휨모멘트 크기는 18,058 kNm로 구조적인 연속화를 하지 않은 바닥판 연속화 대비 약 16% 감소한 수치다. 연속화를 더욱 앞당겨 합성 전에 연속화를 하게 되면 경간 중앙부에서 15,718 kNm의 휨모멘트가 발생되었다. 이 수치는 합성 후 연속화 대비 약 13%, 바닥판 연속화 대비 약 27% 감소된 수준이다. 연속화를 앞당기면 거더 경간 중앙부에 발생하는 설계 휨모멘트를 감소시킬 수 있어 경쟁력 있는 설계로 이어질 수 있다.

다음은 거더 연속부에 발생하는 설계 휨모멘트의 수준을 비교하였다. 바닥판 연속화의 경우 거더 연속부에서는 이론적으로 휨모멘트가

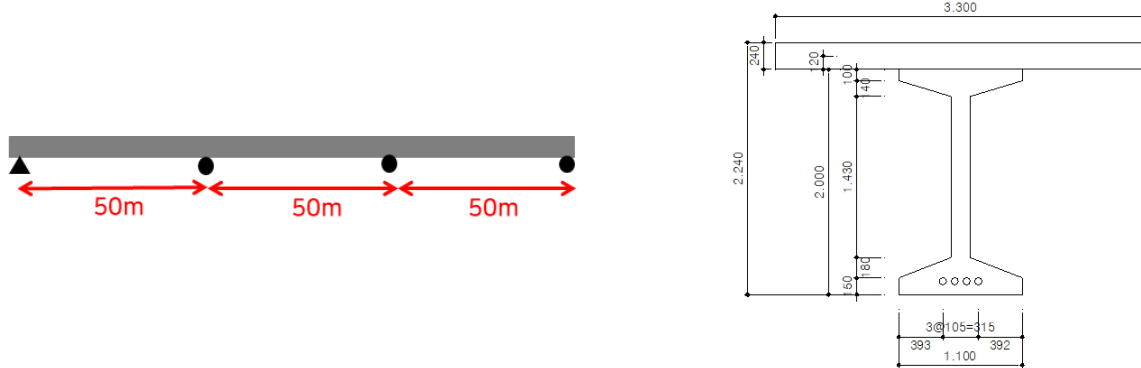


Fig. 3. Three-span Continuous Prestressed Concrete Composite Girder Model Applied to Analysis

Table 2. Design Bending Moment at Each Construction Stage according to the Continuation Period (Unit : kNm)

Continuity period	Location	Self weight		2nd Dead	Live	Total	Continuous structure
		Girder	Slab				
Only slab continuity	Middle of span	6,836	6,500	2,401	5,762	21,499	-
	Intergirders	0	0	0	0	0	-
After composite	Middle of span	6,836	6,500	1,537	3,185	18,058	-4,722
	Intergirders	0	0	-1,921	-3,180	-5,101	5,101
Before composite	Middle of span	6,836	4,160	1,537	3,185	15,718	-8,882
	Intergirders	0	-5,200	-1,921	-3,180	-10,301	10,301
Full continuity	Middle of span	4,375	2,662	983	3,185	11,205	-11,205
	Intergirders	-5,469	-3,328	-1,229	-3,180	-13,206	13,206

발생되지 않는다. 합성 후 연속화 경우에는 거더 연속부에서 -5,101 kNm의 휨모멘트가 발생되었다. 같은 경우 경간 중앙부에서 발생된 18,058 kNm 대비 약 28 %수준의 부모멘트가 발생되었다. 합성 전에 연속화 경우에는 거더 연속부에서 -10,301 kNm의 휨모멘트가 발생되었다. 같은 경우 경간 중앙부에서 발생된 15,718 kNm의 약 66 %수준이자, 합성 후 연속화 대비 약 두 배에 이르는 부모멘트가 발생되었다. 연속화를 앞당길수록 연속화 구조가 부담해야 하는 하중의 크기가 증가함을 확인할 수 있다.

경간 중앙부와 거더 연속부에서 각각 발생하는 설계 휨모멘트에서 연속화 구조가 부담해야 하는 소요의 휨모멘트를 각각 산정하여 그 수준을 비교하였다.

합성 후 연속화의 경우, 2차사하중과 활하중을 연속화 구조가 부담해야 한다. 이 때 거더 중앙부에서 연속화 구조가 부담해야 하는 휨모멘트는 2차사하중에 의한 1,537 kNm과 활하중에 의한 3,185 kNm을 더한 4,722 kNm이다. 거더 연속부에서는 2차 사하중에 의한 -1,921 kNm과 활하중에 의한 -3,180 kNm을 더한 -5,101 kNm이다. 경간 중앙부 대비 거더 연속부가 108 % 큰 수준이다.

합성 전 연속화의 경우, 바닥판 자중부터는 연속화 구조가 부담해야 한다. 이 때 중앙부에서 연속화 구조가 부담해야 하는 휨모멘트는 바닥판 자중에 의한 4,160 kNm과 2차사하중에 의한 1,537 kNm, 그리고 활하중에 의한 3,185 kNm을 합한 8,882 kNm이다. 거더 연속

부에서는 바닥판 자중에 의한 -5,200 kNm과 2차 사하중에 의한 -1,921 kNm, 그리고 활하중에 의한 -3,180 kNm을 합한 -10,301 kNm이다. 경간 중앙부 대비 거더 연속부가 116 % 큰 수준이다.

이어서 거더 중앙부와 거더 연속부에서 각각 연속텐던이 부담해야 하는 설계 휨모멘트 경향을 추정해 보았다. 이는 연속텐던의 소요 설계모멘트 경향을 통해 연속텐던의 소요 특성을 파악할 수 있기 때문이다. 연속텐던이 부담하는 설계 휨모멘트는 앞서 산정한 연속화 구조가 부담해야 하는 설계 휨모멘트로부터 1차 텐던이 부담하는 설계 휨모멘트를 제외한 순 소요 값에 해당된다.

한편 총 긴장력 도입에서 1차 긴장력 도입 비율은 거더 설계별로 상이하고 그 편차도 크다. 실제 설계에서는 가급적 1차 긴장력 도입을 늘리고 2차 긴장력 도입을 줄여야 한다. 1차 긴장작업이 2차 긴장보다 수월하기도 하고, 2차에 해당하는 연속텐던 긴장력이 너무 크면 정착 단마련과 텐던 배치가 부담스럽기 때문이다. 최근 설계 자료에 따르면 연속화 구조가 적용된 경우 1차 긴장력은 총 긴장력의 약 80~85 % 수준으로 확인되었다(Korea Expressway Corporation, 2017; Korea Expressway Corporation, 2018; Korea Expressway Corporation, 2019; K-Water, 2019).

본 논문에서는 1차 긴장력 도입 비율을 연속화 부담이 상대적으로 큰 합성 전 연속화 경우를 감안하여 총 긴장력의 약 2/3 수준으로 가정하였다. 가정된 1차 긴장력 도입 수준은 일반적인 1차 긴장력 수준인 80~85 % 보다 낮은 수준으로서, 본 논문에서 확인하고자 하는 연속텐던의 경향 측면에서 보수적인 결과를 나타내주는 수준이다.

Table 3은 Table 2의 결과로부터, 가정된 1차 긴장력에 의한 설계 휨모멘트 부담 수준을 반영한 결과이다. 추정된 연속텐던 소요 경향은 거더 중앙부 대비 거더 연속부가 약 164~218 % 수준으로 확인된다.

연속화를 앞당길수록 연속텐던이 부담해야 하는 소요 휨모멘트는 증가한다. 그리고 연속화를 앞당길수록 경간 중앙부의 설계 휨모멘트는 감소하고, 거더 연속부의 설계 휨모멘트는 증가한다. PSC 연속보 구조에서는 앞당긴 연속화가 경간 중앙부의 단면력을 줄여 거더 설계의 경쟁력을 가져다줄 수 있지만, 증가된 연속부의 부모멘트도 제어해야 하는 문제도 있다. 실질적인 1차 긴장력 도입을 고려한다면 연속텐던이 발휘해야 하는 휨모멘트는 거더 중앙부 대비 거더 연속부에서 최소 1.6배 이상 요구된다는 경향도 확인하였다.

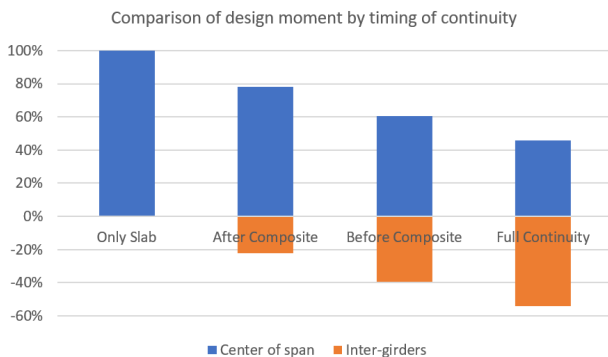


Fig. 4. Design Bending Moment at Each Construction Stage according to the Continuation Period

Table 3. Tendon Required Bending Moment at Before Composite Model under Practically Assumed Conditions (Unit : kNm)

1st Tendon of requirement	Location	Requirement	1st Tendon	2nd Tendon	Ratio (②/①)
60 % (Practical result)	① Middle of span	-15,718	-9,431	-6,287	-
	② Intergirders	10,301	-	10,301	1.64
65 % (Practical result)	① Middle of span	-15,718	-10,216	-5,501	-
	② Intergirders	10,301	-	10,301	1.87
70 % (Practical result)	① Middle of span	-15,718	-11,002	-4,715	-
	② Intergirders	10,301	-	10,301	2.18

2.4 연속텐던의 Secondary Moment 분석

다음은 연속텐던의 배치 형상에 따른 2차 모멘트(Secondary Moment)의 경향을 확인하였다. Fig. 5는 PSC 2경간 연속보에서의 연속텐던 배치에 따른 긴장력에 의한 모멘트의 경향을 개념적으로 나타낸 것이다(Lee, 2015). 총 세 가지 경우가 있고, 직관적으로 확인이 가능한 공통점이, 긴장력에 의한 1차 모멘트도의 형상은 텐던 배치를 상, 하로 뒤집어 놓은 것과 같다는 점이다.

Fig. 5 Case 1은 연속텐던이 거더 중립축에서 시작하여 거더 연속부에서도 중립축 위상을 지나도록 배치한 경우이다. 거더 연속부에서는 긴장력에 의한 1차 모멘트가 발생되지 않는다. 그런데 전체 연속된 거더는 전반적으로 중립축 아래에 배치된 연속텐던에 의해 전체가 위로 솟으려는 거동이 발생된다. 여기서 이 거동을 구속하는 내부 지점의 반력에 의해 2차 모멘트가 발생된다. 연속 지점부에서는 이 2차 모멘트의 크기에 해당하는 정모멘트가 발휘된다.

Fig. 5 Case 2는 Case 1에 비해 거더 연속부에서의 텐던 위상을 높인 경우이다. 이 경우 거더 연속부에서는 텐던 위상을 높이 올린만큼

의 1차 정모멘트가 발생된다. 만약이 연속 텐던의 배치가 콘코던트 긴장재(Concordant Cable)에 일치할 경우에는 긴장력에 의한 2차 모멘트가 발생되지 않는다. 이때에는 긴장력에 의한 모멘트는 1차 모멘트로 결정된다.

Fig. 5 Case 3은 Case 2에서 거더 단부의 연속 텐던 정착단을 거더 상부로 끌어 올린 경우이다. 이 경우에는 Case 2보다 중립축 아래로 배치되는 텐던의 구간이 줄어들어 거더 전체가 하방으로 처지려는 거동을 보이게 되고 이로 인해 내부 지점에 밀어 올리는 반력이 발생된다. 이 반력에 의해 2차 모멘트가 발생된다. 이 모멘트는 부모멘트로서 1차 모멘트와 중첩되어 결국에는 거더 연속부에서의 정모멘트를 감소시키게 된다. 반면에 경간 중앙부의 부모멘트는 증가시키게 된다.

Fig. 5 Case 2와 Case 3이 연속화를 도입한 개량형 PSC 거더에 주로 적용되는 연속텐던 배치 방법에 해당된다. 그런데 앞서 2.1. 연속화 시기에 따른 설계 단면력 분석에서는 바닥판 시공 전 연속화를 하는 경우, 경간 중앙부 대비 거더 연속부의 소요 모멘트가 116% 수준임을 확인하였다. 1차 긴장력 도입 정도를 총 긴장력의 약 2/3 수준으로 가

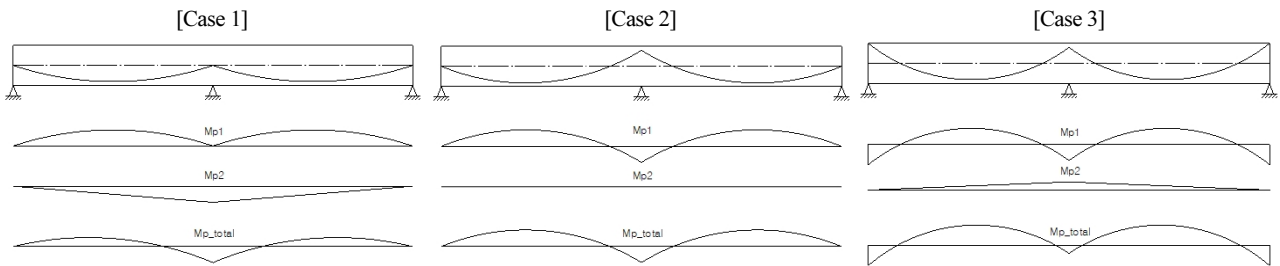


Fig. 5. The PS Force Bending Moment Trend according to Continuous Tendon in Prestressed Concrete Two-span Continuous Beam

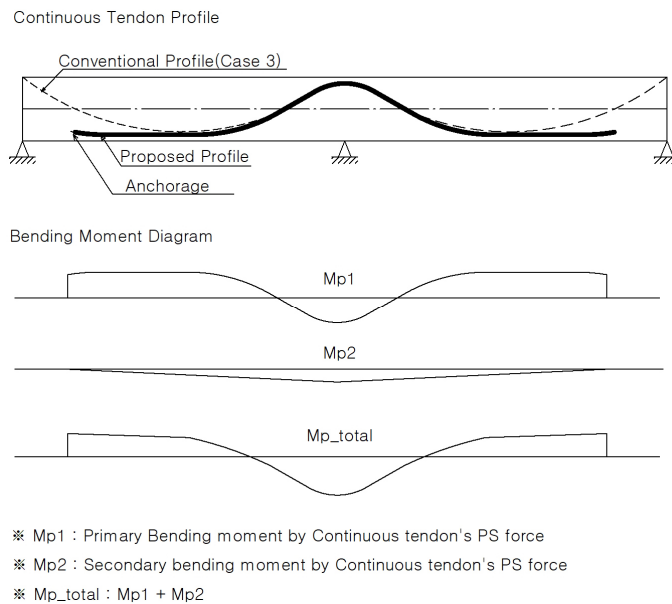


Fig. 6. Proposed Continuous Tendon Profile and Its Bending Moment Diagram

정했을 경우는 164~218% 라는 수치도 확인하였다. 이러한 경향을 고려하면 Case 2와 Case 3는 효과적인 방안으로서 다소 아쉬움이 있다. 빠른 연속화, 즉 바닥판 시공 전 연속화를 하려면 연속텐던에 의한 휨모멘트가 거더 중앙부 보다는 거더 연속부에서 강하게 발휘되어야 한다. 그러나 일반적인 경우에 해당되는 Case 2와 Case 3은 특별히 거더 연속부에서 강점을 발휘하지 못한다. 이 경우, 설계에는 적용할 수 있지만, 구조 효율적인 측면에서는 다소 아쉬운 방법이라고 볼 수 있다.

3. 부모멘트 제어에 유리한 연속텐던 배치 모델

3.1 연속텐던 배치 모델 제안

본 연구에서는 개량형 PSC 거더의 연속화 구조에서 연속지점부 부모멘트 제어에 효과적인 연속텐던 배치 모델을 제안하였다. Fig. 6은 본 연구에서 제안하는 연속텐던 배치 모델이다. 제안된 연속텐던 배치에서 기존 방법과 가장 큰 차이점은 정착부 위치이다. 연속텐던 정착부는 거더 단부에서 소정의 간격을 두고서는 거더 최 하단에 배치 되는 것이 특징이다. 단부로부터 간격을 두는 이유는 다경간 구조에서의 연속텐던 긴장 작업을 위해 소요의 공간 확보가 필요하기 때문이다. 경간 중앙부에서의 연속텐던은 단면 하부를 지나는데, 가능한 거더 하단에 가깝게 배치하였다. 그리고 연속지점부에서는 텐던이 단면 최상단을 지나도록 배치하였다.

제안된 연속텐던 배치는 정착단이 하부에 위치한다는 점, 그리고 거더 중앙부에서 가능한 하부를 지나도록 배치한다는 점으로 인해

기존의 연속텐던 배치형상보다 중립축 아래에 배치되는 구간이 많다. 이러한 배치는 전체 거더의 솟음을 증가시켜, 이 거더의 보상작용에 해당되는 정모멘트 성향의 2차 모멘트를 증가시킬 수 있다. 이러한 연속텐던 배치는 연속지점부 설계모멘트가 상대적으로 크게 발생되는 합성 전 연속화 구조에 효과적인 방법이 될 수 있다.

3.2 연속텐던의 휨모멘트 비교

본 연구에서 제안된 연속텐던의 구조적 성능을 알아보기 위해 긴장력에 의한 휨모멘트를 산정하여 기존의 일반적인 방법과 비교하였다. Fig. 7은 대상 모델의 연속텐던 배치도다. Fig. 7의 Model 1에서 Model 6에 이르기까지 연속텐던 배치형상을 점진적으로 변화시켜 총 6개 모델을 마련하였다. Model 1은 일반적인 연속텐던 모델에 해당되며, Model 6은 이 연구에서 제안된 연속텐던 배치방안이다.

Model 1에서 Model 3까지는 연속텐던 정착단을 거더 단부의 최상단에 배치하였고, Model 4에서 Model 6까지는 거더 단부에서 3.5 m 이격된 위치에 정착단을 배치하였다. 그리고 Model 4의 정착단 위상은 거더 하단으로부터 1.2 m 위에 있고, Model 5와 Model 6은 0.4 m 위에 배치된다. 또한 Model 1에서 Model 6으로 갈수록 거더 중앙 하부에 배치되는 연속텐던 구간을 점진적으로 늘렸다. 이러한 6개 모델의 배치는 배치형상의 상대적인 경향 차이를 확인하기 위한 목적을 가진다.

이들 각각의 모델을 대상으로 구조해석을 수행하여, 연속텐던에 의한 휨모멘트 경향을 확인하였다. 6개 모델 모두 직사각형 단면의

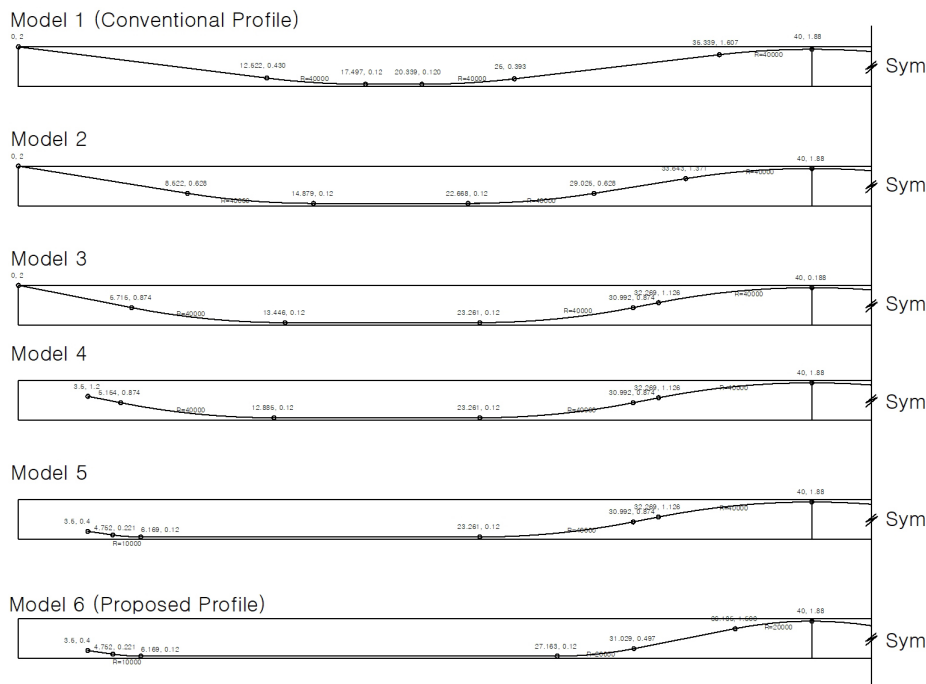


Fig. 7. Continuous Tendon Analysis Models for Comparison

2경간 연속보 거더이며, 동일한 도입 긴장력 3,000 kN을 적용하였다. 재료특성은 구조해석과는 무관하다.

Fig. 8은 구조해석 모델과 해석결과를 나타낸 것이다. 구조해석은 상용프로그램인 MIDAS Civil를 사용하였고, PSC 모델링 기능을 적용하여 긴장력에 의한 1차 모멘트와 2차 모멘트가 자동 합산되도록 하였다.

해석 결과는 Table 4와 같다. 일반적인 연속텐던 모델인 Model 1의 긴장력 모멘트 크기는 경간 중앙부에서 2,354 kNm, 거더 연속부에서 2,535 kNm으로, 거더 연속부가 약 7.6 % 큰 값을 나타내고 있다. Model 1에서 Model 6으로 갈수록 거더 중앙부 대비 거더 연속부의 긴장력 모멘트 크기가 증가하는 경향이 나타났다. Model 2의 경우 약 32%, 점차 증가하여 Model 5는 약 38 % 큰 값을 나타내고 있다. 제안된 모델인 Model 6은 경간 중앙부에서 2,105 kNm, 거더 연속부에서 3,637 kNm으로, 거더 연속부가 약 72.8 % 크게 산정되었다. 기존 모델과 비교했을 때, 제안된 모델은 거더 중앙부에서의 긴장력 부모멘트가 다소 감소한 대신 연속지점부의 긴장력 정모멘트가 증가되었음을 확인할 수 있었다.

제안된 연속텐던 모델은 연속지점부의 큰 부모멘트를 효과적으로

제어함과 동시에 경간 중앙부에서의 과설계를 방지할 수 있게 해주는 방법이 될 수 있다. 이러한 특징의 제안된 연속텐던 모델은 거더 중앙부보다 연속지점부에서 대응해야 할 설계모멘트가 큰 합성 전 연속화 공법 적용에 적합하다.

4. 결론

이 연구에서는 거더 연속부의 부모멘트 제어에 효과적인 연속텐던 배치방안을 제안하였다. 제안된 방안의 효과를 검증하기 위해 일반적인 연속텐던 배치방법의 모델과 수치해석 비교를 수행하였다. 이를 위해 국내 개량형 PSC 거더교 설계에 적용되고 있는 연속화 특징과 문제점을 분석하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) PSC 거더 연속화 시기에 따른 설계 단면력 및 연속텐던의 2차 모멘트의 특징에 대하여 분석하였다. 연속화 시기를 앞당길수록 경간 중앙부에 발생되는 휨모멘트를 줄일 수 있어 보다 경쟁력 있는 설계로 이어질 수 있지만, 동시에 거더 연속부에 발생되는 부모멘트에 대한 대응이 필요하다.

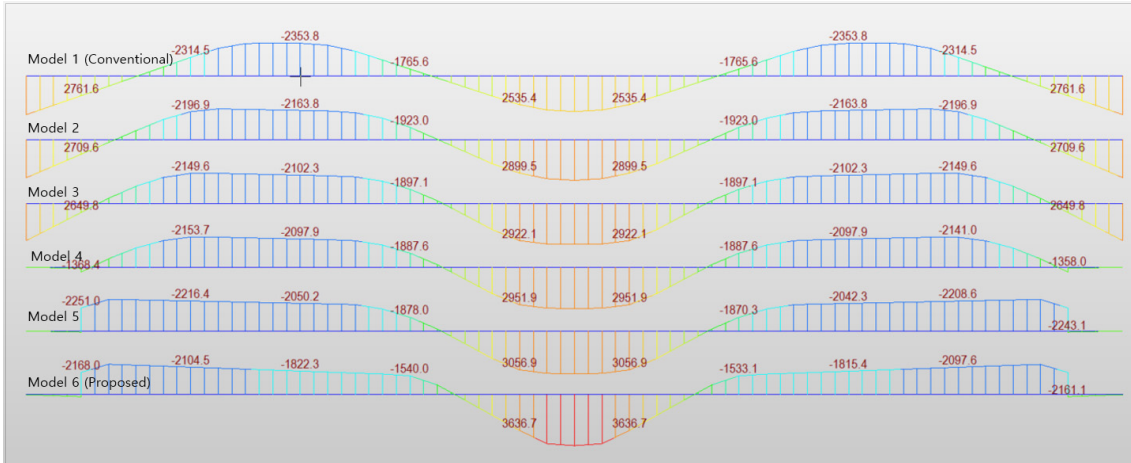


Fig. 8. Analysis Results of Two Continuous Tendon Models

Table 4. Analysis Results of Continuous Tendon Models

Model	Pj (kN)	BMD by continuous tendon (Absolute value, kNm)		Ratio (②/①)
		① Middle of span	② Intergirder	
Model 1 (Conventional profile)	3,000	2,354	2,535	1.076
Model 2	3,000	2,197	2,900	1.320
Model 3	3,000	2,150	2,922	1.359
Model 4	3,000	2,154	2,952	1.370
Model 5	3,000	2,216	3,057	1.380
Model 6 (Proposed profile)	3,000	2,104	3,637	1.728

- (2) 연속텐던의 배치 형태에 따라 발생하는 긴장력에 의한 2차 모멘트의 경향도 문헌을 통해 확인하였다. 중립축을 기준으로 전반적인 연속텐던배치가 컨코크리트 긴장재 배치보다 높을 경우에는 2차부모멘트가 발생, 연속지점부의 긴장력 모멘트가 감소되어 연속화 적용에 불리해진다.
- (3) 상기 내용을 바탕으로 본 연구에서는 PSC 거더 연속부의 부모멘트 제어에 효과적인 연속텐던 배치 모델을 제안하였다. 이 모델은 연속텐던의 정착단을 거더 하부로 최대한 내리고, 거더 하부로 배치되는 텐던 구간을 늘려, 거더 중앙부의 긴장력 모멘트가 감소하더라도 연속지점부의 긴장력 모멘트를 가능한 높이는 방법이다.
- (4) 제안된 연속텐던 모델의 구조적 성능을 확인하기 위해 기존 연속텐던 모델과 제안된 모델의 연속텐던 긴장력 모멘트를 비교하였다. 일반적인 연속텐던 모델에 의한 긴장력 모멘트 크기는 경간 중앙부에서 2,354 kNm, 거더 연속부에서 2,535 kNm으로, 경간 중앙부 대비 거더 연속부가 107.6% 수준을 나타내고 있다. 제안된 모델은 경간 중앙부에서 2,105 kNm, 거더 연속부에서 3,637 kNm으로, 경간 중앙부 대비 거더 연속부가 약 172.8% 수준이다. 합성 전 연속화에서 현실적인 1차 긴장력 60~70%를 도입했을 경우 경간 중앙부 대비 거더 연속부의 소요 연속텐던 휨모멘트가 164~218%임을 감안한다면 일반적인 모델보다는 제안된 모델이 부합되는 경향을 보여주었다.
- (5) 제안된 연속텐던 모델은 연속지점부의 큰 부모멘트를 효과적으로 제어함과 동시에 경간 중앙부에서의 과설계를 방지할 수 있게 해주는 방법이 될 수 있다. 이러한 특징의 제안된 연속텐던 모델은 거더 중앙부보다 연속지점부에서 대응해야 할 설계모멘트가 큰 합성 전 연속화 공법 적용에 적합하다.

References

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2014). *AASHTO LRFD Bridge design specification*, AASHTO, USA, pp. 556-557.

ConsPeople (2018). *Patent construction method for bridges - A to Z*, Construction Economy, pp. 470 (in Korean).

Expressway and Transportation Research Institute (1999). *A study on the continuation method of precast prestressed concrete girder bridges*, Expressway and Expressway and Transportation Research Institute, pp. 193 (in Korean).

Expressway and Transportation Research Institute (2002). *A study on safety evaluation and retrofit of PSC I-Girder bridges*, Expressway and Expressway and Transportation Research Institute, pp. 54-61 (in Korean).

Han, M. Y., Kim, B. H. and Kim, S. H. (2001). "The effect of design parameter on the beam depth of ipc girder continuous bridge." *Proceedings of the Korea Concrete Institute Conference, Korea Concrete Institute*, pp. 125-130 (in Korean).

Koo, M. S., Yon, J. H., Jung, B. S. and Kim, S. C. (2004). "The continuous prestressed precast concrete girder bridges with a reinforcement steel plate." *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16, No. 5, pp. 35-41 (in Korean).

Korea Expressway Corporation (2017). *Working design for construction of Pohang-Yeongdeok expressway*, Korea Expressway Corporation (in Korean).

Korea Expressway Corporation (2018). *Working design for construction of Sejong-Anseong expressway*, Korea Expressway Corporation (in Korean).

Korea Expressway Corporation (2019). *Working design for construction of Gwangju-Gangjin expressway*, Korea Expressway Corporation (in Korean).

Korea Institute of Bridge and Structural Engineers (KIBSE) (2016). *Road bridge design standards*, Korea Institute of Bridge and Structural Engineers, pp. 811 (in Korean).

Korea Water Resources Corporation (K-Water) (2019). *Preliminary design for construction of Songsan-Sihwa connection road*, Korea Water Resources Corporation (in Korean).

Kwak, H. G., Seo, Y. J., Jung, C. M. and Park, Y. H. (1999). "Control of deck cracking at interior supports of continuous PSC-Beam bridge." *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 12, No. 2, pp. 201-214.

Lee, J. H. (2015). *Prestressed concrete strength design method and limit state design method*, Dongmyeong-sa, pp. 858 (in Korean).