

(57) プレビーム連続合成桁の設計と施工

Design and construction of Pre-Beam continuous girder bridges

松井繁之* 栗田章光** 渡辺 滉*** 武田芳久***
Shigeyuki Matui, Akimitu Kurita, Hiroshi Watanabe, Yoshihisa Takeda

A Pre-Beam is a typical composite structure. In Japan, 350 Pre-Beam composite girder bridges have been built until now with simple support.

In 1989, however, two Pre-Beam continuous girder bridges have been built for the first time. In a positive moment portion of these continuous girder bridges, Pre-Beam composite girders which is same structure as simple girder are applied. But in a negative moment portion, these two bridges have different feature each other on their structures. The one's slab concrete is pre-stressed by P.C cable, another's is not done.

This paper reports the design, the construction method, and the results of field loading test in these bridges.

1. 概要

プレビーム合成桁は、下フランジのコンクリートに鋼桁の曲げ剛性を利用してプレストレスを与えたプレビーム桁と床版コンクリートを合成したものであり、高い剛性を有する構造形式である。現在では単純桁橋として350橋余りの施工実績があり、建築の梁としても単純形式ばかりでなくラーメン形式の梁としても広く用いられている。このプレビームを連続桁に適用したプレビーム連続合成桁は経済性、耐震性、走行性に優れた性質を有しており早くから実橋への適用が望まれていた。このため大阪大学橋梁研究室や渡大橋（二上大橋）技術検討委員会（委員長 前田幸雄 大阪大学名誉教授）などで様々な実験的研究が行われてきた。そして最近ほぼ同時期に2橋のプレビーム連続合成桁が大阪市内（尻無川新橋）と富山県内（二上大橋）に施工された。この2橋それぞれの一般図と設計条件を図-1と図-2に示す。

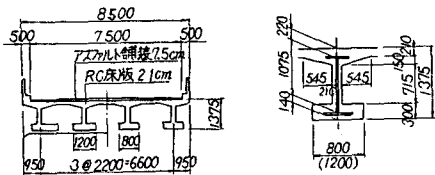
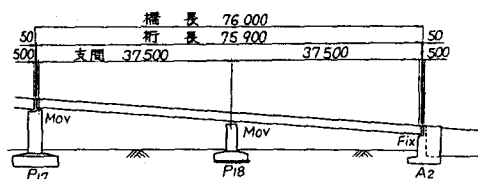
この連続合成桁は、正モーメント領域にプレビーム合成桁を使用し、負のモーメント領域に鋼とコンクリートとの合成構造を使用している。一般的に連続合成桁の中間支点部では、床版に生ずる引っ張り力の取扱い方に基本的な2つの考え方がある。1つは床版にプレストレスを導入する連続合成桁であり二上大橋に採用されている。また1つは床版にプレストレスを導入しない連続合成桁であり尻無川新橋に採用されている。

ここでは、プレビーム連続合成桁が実現に至るまでの研究の概要と、この2橋の設計と施工及び竣工後の実橋載荷試験について報告する。

2. 実験的研究概要

2-1 模型実験結果

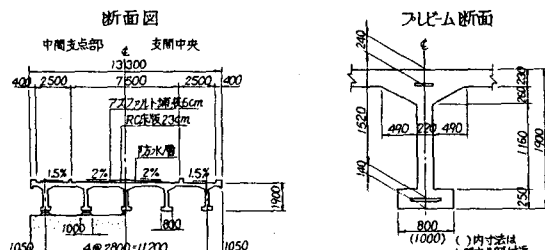
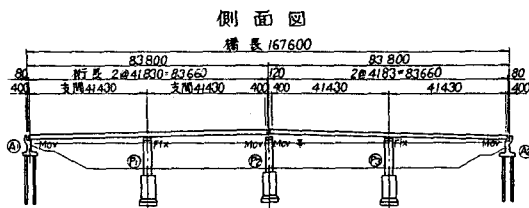
* : 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科 ** : 工修 大阪工業大学講師 土木工学科
*** : 川田工業株式会社大阪支社 設計部



設計条件

形式	2径間連続プレーム合成桁
橋格	1等橋 (TL-20)
橋長	76,000m
桁長	75,900m
支間長	2@37,500
幅員	車道: 7,600m
総幅員	8.0m
縦断勾配	6.95%
横断勾配	1.5% 山形勾配
斜角	90°
桁高	1,375m (床版上面~桁下面)
舗装	アスファルト 舗装厚 75mm
床版	RC床版 厚 210mm (K1=1.2)
雪荷重	なし
適用図書	道路橋示方書 (昭和55年2月) プレーム合成桁橋設計施工指針

図-1 尻無川新橋一般図



設計条件

形式	2径間連続プレーム合成桁
橋格	1等橋 (TL-20)
橋長	167,600m (2@83,800m)
桁長	167,000m (2@83,660m)
支間長	2@41,430+2@41,430m
幅員	車道: 7,500m, 歩道: 2@2,500m
総幅員	13,300m
縦断勾配	1%、1%、VCL=167,600m
横断勾配	2% 山形勾配 (A: 橋台付近は除く)
斜角	1.5% 片勾配
桁高	1,900m (床版上面~桁下面)
舗装	アスファルト 舗装厚 60mm
床版	RC床版 厚 230mm (K1=1.2)
雪荷重	100 kg/m ²
適用図書	道路橋示方書 (昭和55年2月) プレーム合成桁橋設計施工指針

図-2 二上大橋一般図

連続桁の場合には、中間支点部の構造型式によって連続合成桁がどのような挙動を示すかを把握し、終局耐力やひびわれ性状等も解明しておく必要があった。そのため、昭和54年よりプレビームを用いた連続合成桁の模型を製作し、静的載荷試験および疲労試験がおこなわれた。

(1) 実験桁の種類

プレビームを連続形式に適用する場合、図-3のように死荷重による曲げモーメントの変曲点で、連続桁を径間部と中間支点部の2つの部材に分けて考える。径間部（正のモーメント領域）は単純桁とほぼ同様と考えられるため、通常のプレビームを使用する。中間支点部の構造は、表-1に示す様に床版構造ではプレストレスを導入するものとし、下フランジコンクリートについては鋼桁にずれ止めを設けたものと設けないもの、

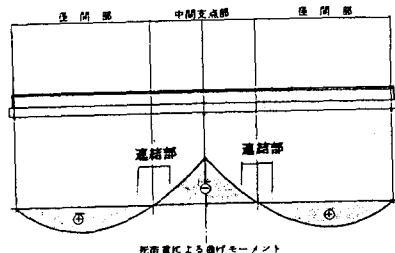


図-3 径間部と中間支点部

表-1 中間支点部の形状

	タイプ-I	タイプ-II	タイプ-III	タイプ-IV
床版	プレストレスを導入	鉄筋のみ考慮	プレストレスを導入	鉄筋のみ考慮
下フランジコンクリート	鋼桁と合成	鋼桁と合成	鋼桁と非合成	鋼桁と非合成
形状				

各々を組み合わせた4タイプが考えられる。よって径間部にはプレビームを中間支点部にはこの4タイプの構造を持つ4種類の連続合成桁を実験桁として製作し、静的試験及び疲労試験を行なった。なお、中間支点部の床版へのプレストレスの導入は径間部の下フランジコンクリートへのプレストレス導入と同様に鋼桁の曲げ剛性を利用して行なっている。

(2)静的試験結果及び疲労試験結果

静的試験結果：タイプⅠ、タイプⅢのように床版へプレストレスを導入したものは、床版のひび割れは少なく復元力も良い。しかし、たわみ及び終局耐荷力については、中間支点部の構造の違いによる差異はほとんど認められなかった。

疲労試験結果：タイプⅠとタイプⅢ、及びタイプⅡとタイプⅣと比較すると鋼桁のずれどめの有無による差は余り認められず、床版にプレストレスを導入した（すなわち床版にプレビームを用いた）構造が、床版のひび割れや、疲労耐力等で、若干優れていた。これらのことから、床版にプレストレスを導入しないものは床版のひび割れではやや劣るが実用上の問題はない事、及び終局耐力及びたわみには差が無いことが分かった。

2-2 渡大橋（二上大橋）技術検討委員会の報告書概要

プレビーム連続合成桁を実橋に適用する場合について、既往の試験結果なども参考にして、基本思想、設計、製作、施工面から検討を加えた。その結果、本委員会で審議された諸問題に対する対策をふまえ、且つ品質保証について十分な配慮を行なうならば、本形式は新しい橋梁形式であるのみならず、安全性の点でも問題がなく、所期の目的に大して十分実用に供し得るという結論に至っている。この報告書では中間支点部の床版コンクリートにプレストレスの導入を提案している。これは床版コンクリートの耐久性の向上を目的としたものである。二上大橋は積雪地帯に架かるものであり、長期間湿潤状態となる事が多く、床版のひびわれは雨水の侵入を招き、耐久性をそこなう要因になる可能性があるため、床版にプレストレスを与えてひび割れを極力抑える事にしたものである。

3. 実橋への適用

3-1 二上大橋

(1)基本的な構造

二上大橋の基本的な構造を、死荷重曲げモーメントの分布形状により径間部、中間支点部、連結部に分けて表-2に示す。

二上大橋では中間支点部の床版にPC鋼線にてプレストレスを導入した。

また、下フランジコンクリートは鋼桁にずれ止めを設け鋼桁と合成構造としている。連結部は若干負のモーメント領域側に入るよう設定されており連結部下フランジコンクリート打設後の死荷重（床版荷重・橋面死荷重）によって、下フランジコンクリートにはプレストレスが導入されるよう配慮されている。

(2)施工概要

プレビーム連続合成桁は、径間部材と中間支点部材を各々別に製作し架設時に各部材を連結し連続桁とするものである。連続桁の基本的な施工順序を表-3に示す。

二上大橋では各部材の製作を架設地点近くに主桁製作ヤードを設けて行なった。

また 架設は現場の条件を考慮し工法選定を行なった結果、河川上であるためエレクトリオンガーターを用いた引出し架設工法を採用した。

表-2 連続桁における各部材の構造

	二上大橋	河川上・架設用橋
径 間 部	死荷重モーメントが正となる区間で構造特性がほぼ単純化され、通常のプレビームを使用。	
	死荷重モーメントが負となる区間で床版には引張力が作用する。	
中間支点部	床版にPCケーブルを用いてプレストレスを導入する構造とした。	床版にプレストレスは導入しない。 道路橋示方書Ⅱ、9、1、3解説(1)により応力の等出時は床版内の軸方向鉄筋のみ断面力に抵抗させる。
	下フランジコンクリートは鋼桁にずれ止めを設け合成とした	
連 結 部	径間部と中間支点部の両者を連結させる部分で鋼桁連結は高力ボルトを使用し、下フランジコンクリートは径間部材・中間支点部材を別々に製作するため間詰めとなるので断縁コンクリートを使用した。	

中間支点部床版へのプレストレスの導入にはPCケーブルによる方法、桁のジャッキアップダウンによる方法及び前記の併用が考えられたが、本橋では施工性を重視してPCケーブルによる方法を採用した。ケーブルはシングルストランド19本（PCより線21.8mm）とし主桁1本当たり14本で合計70本を使用した。

またケーブルの定着は横桁位置とし張出し床版部は美観上地覆内とした。

(3)床版のプレストレス導入に伴うひずみ測定

二上大橋のPCケーブルによる応力導入の状況を把握する目的でストレーンゲージを中間支点部付近に貼り付けて静ひずみ測定器により計測した。ひずみの測定はケーブル5本毎に行い、最終のひずみ値を応力度に換算したものを表-4に示す。この結果より、部分プレストレスによる応力度は、ケーブル本数増加に伴いほぼ直線的に導入され、最終導入応力も床版、ウェブ、下フランジとも設計値に近いものであったことが確認された。

3-2 尻無川新橋

(1)基本的な構造

二上大橋と同様に尻無川新橋の各部材の基本的な構造を、表-2に示す。

尻無川新橋では中間支点部の床版にプレストレスを導入しておらず、施工性にすぐれている。また、二上大橋と同様、負のモーメント領域の下フランジコンクリートは鋼桁と合成されている。

(2)施工概要

二上大橋と同様に、径間部材と中間支点部材を各々別に製作し架設した。

尻無川新橋では径間部のプレビーム桁製作に、工場にて応力導入を行なうブロック工法を用いた。この工法では現場に主桁製作のためのヤードが不要になり現場工事期間の短縮・製作精度及び経済性が向上する等のメリットがある。

主桁の架設は支保工併用によるトラッククレーン架設工法によった。

ブロック工法を用いた本橋では正のモーメント領域にある連結部下フランジコンクリートへプレストレスを導入する必要がある。このプレストレス導入の方法にはPC鋼線を用いたインケーブル方式・アウトケーブル方式、およびカウンターウェイト方式等があるが施工性を考えすべての桁に一度にプレストレスを導入できるカウンターウェイト方式を用いた。すなわちカウンターウェイトを載荷後、径間部の連結部の下フランジコンクリートを打設し、このコンクリートが硬化後カウンターウェイトを取り去ることにより下フランジコンクリートにプレストレスを導入する方法である。カウンターウェイトは合成後死荷重がすべて載荷されたのちに載荷させることによりその重量を軽減させた。その手順を図-4に示す。カウンターウェイトには

表-3 連続形式の施工順序

施 工 段 階		注 意
(1)		径間部は下フランジコンクリートにプレストレスを導入したプレビームとし、中間支点部はプレストレスの導入しない鋼桁と下フランジコンクリートの合成した桁とする。
(2)		径間部及び中間支点部の桁を架設しMアボルトにて連結する。
(3)		桁端部の下フランジコンクリートを打設する（図例参照）。
(4)		床版及び横桁に所定の鉄筋を配しコンクリートを打設する。（図例参照）。打設順序は径間部を初めに、中間支点部は最後とする。
(5)		床版コンクリート合成後、橋面工が施工され活荷重が撤去される。

表-4 プレストレスによる応力度
(単位kg/cm²)

		実 測 値	設 計 値
床	版	-50.1	-42.9
ウ	ェ	-31.0	—
下フランジ	上面	-31.8	-32.5
	下面	-26.8	-27.8

下フランジのヤング係数

$$E_{cf}=4.0 \times 10^5 \text{ (設計計算より)}$$

床版・ウェブ

$$E_{cw}=2.91 \times 10^5 \text{ (T.P.圧縮試験より)}$$

敷鉄板を使用し全橋での総重量は77.6tであった。コンクリートは負のモーメント領域にある連結部に使用したものと同じく膨張コンクリートを使用しコンクリートのクリープ乾燥収縮による引張り力の発生を低減させた。

(3)カウンターウェイトによるプレストレス導入に伴うひずみ測定

尻無川新橋のカウンターウェイトによる径間部連結部下フランジコンクリートの応力導入状況を確認する目的で鋼桁にひずみゲージをはりつけ静ひずみ測定器により計測した。本橋は連続桁であるため完成後下フランジコンクリートに作用する引張り応力は、端支点側連結部に大きく発生するが、中間支点側ではほとんど発生しない。そのためカウンターウェイトの載荷位置は主に端支点側連結部の下フランジコンクリートにプレストレスを導入するように決定した。

表-5は、カウンターウェイト撤去時の鋼桁の測定ひずみと計算値を示したものであり、ほぼ計算値通りのプレストレスが導入されていることが確認された。

4. 実橋における試験

施工中の各種の測定により2つの橋梁はほぼ設計通りに施工されてきている事が確認されていたが、竣工後の全体挙動を計測し、プレビーム連続桁の構造特性をより明確に把握するために実橋の載荷試験を行なった。

二上大橋は平成元年3月9日尻無川新橋は同年6月7日に行なった。

主な着目点は

- ①径間部のたわみ
- ②径間部材と中間支点部材の連結部近傍の応力度
- ③中間支点部材の応力度
- ④径間部材の応力度
- ⑤振動特性

などである。これらは実測値と解析値を比較することで評価した。

4-1 試験方法

(1) 載荷試験

静的載荷試験では2橋共図-5に示すように、幅員中央4台載荷、片側2台偏芯載荷についてそれぞれ径間部・連結部にあらかじめ検量した総重量約20tのトラックを載荷した。

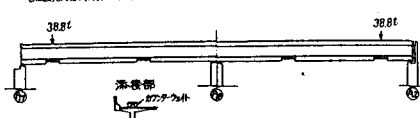
振動試験では径間部幅員中央にて荷重車の後輪を枕木から落下させた。

(2) 測定方法

(a) ひずみの測定

測定はひずみゲージを用い、二上大橋ではG2、G3桁尻無川新

①カウンターウェイト載荷
全径間部貫通部カウンターウェイトを載荷し径間部鋼桁に応力導入する。



② 径間部下フランジ打設、カウンターウェイト除去
径間部下フランジコンクリートを打設し、コンクリート硬化後カウンターウェイトを除去する。

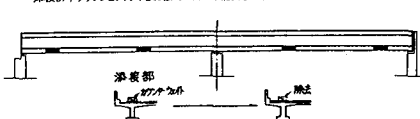


図-4 フロック工法の施工手順

表-5 鋼桁下フランジ上面 ひずみ (μ×10⁻⁵)

	G1桁 (外桁)	G2桁 (中桁)
計算値	24	28
測定値	24	26

下フランジ間部コンクリート下面への必要プレストレスが与えられるための、鋼桁下フランジ上面ひずみは16μである。

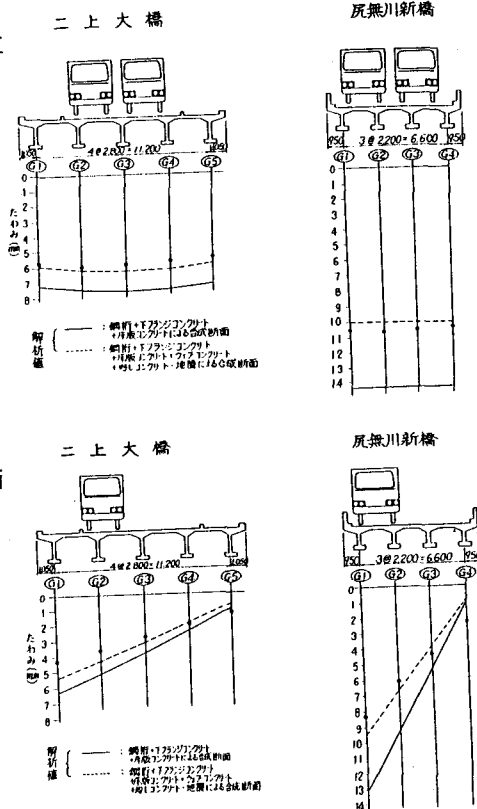


図-5 径間部中央におけるたわみ測定結果

橋ではG1、G2桁の中間支点部、径間部、連結部において床版上面、床版下面、ウェブ、下フランジ上面及び下フランジ下面で行なった。

(b)たわみの測定

測定は高感度変位計を用い、全桁の径間部における下フランジ下面の変位量で行なった。

(c)振動の測定

測定はサーボ型振動計を、外桁の各径間中央部に4台設置して行なった。

4-3 試験結果

(1)ひずみ測定結果

a)中間支点部材と径間部材との連結部は下フランジコンクリート及び床版コンクリートともひずみは実測値が解析値より若干小さい傾向ではあったがいずれも滑らかな分布を示し、連結部は一連の桁として正常な挙動をしていた。

b)中間支点部材は床版コンクリート及び下フランジコンクリートとも合成断面として正常に挙動していた。

c)径間部材は下フランジコンクリートも応力抵抗断面として寄与している。均しコンクリート、地覆、及びウェブコンクリートは現状では応力抵抗断面として寄与している。

測定した結果を下表に示す。

(2)たわみ測定結果

たわみは測定位置に対して正の載荷、負の載荷とも同様の性状を示し連続桁として正常な挙動を示している。正の載荷時に付いてその結果を図-5に示す。測定値は地覆、ウェブコンクリート等一切を抵抗断面と考えた解析値に近似しており、ウェブコンクリート、均しコンクリート及び地覆コンクリートも桁剛性に寄与しているものと推定される。

4-4 考察

今回の載荷試験で最も留意した点は変曲点近傍に於ける主桁の連続性を確認することであつた。測定の結果、2橋共ひずみ及びたわみは滑らかに連続していたことが確認されており、これはこの連続桁が一体となつた一本の梁として挙動していたことを示すものである。

たわみは地覆を含む全断面を抵抗断面と考えた連続桁の解析値とよく一致している。これは共に竣工直後の測定であり、橋面上の全ての物が載荷荷重（ダンプトラック）による断面力に抵抗しているためである。また分配性状は格子計算による解析値より若干優れているようである。これは、プレビーム橋の横桁は床版と一体となって構成されているため分配性状は格子理論と版理論の中間の解析値に近くなる傾向があるためである。この分配性状を理論計算に考慮すると測定結果は計算値にほぼ一致する。これはプレビーム連続合成桁の設計施工の考え方が妥当であつた事を示すものである。

5. あとがき

この2橋は我国で初めてのプレビーム連続合成桁であり長期にわたる実験および研究の成果が集約されて竣工をみたものである。鋼とコンクリートのそれぞれの特徴を合理的に引き出すことの出来る合成構造は今後あらゆる分野に適應されていくものと考えている。適應に際しこのプレビーム連続合成桁が参考になれば幸いである。

最後にこの2橋の計画から設計施工および竣工後の実験にいたるまで多大な御協力をいただいた大阪市建設局の皆様、富山県土木部の皆様および渡大橋（二上大橋）検討委員会の皆様に深く謝意を表わす。

参考文献

渡大橋（プレビーム連続合成けた橋）報告書

昭和60年4月

渡大橋技術検討委員会

プレビームを用いた連続合成けたの静的載荷試験および疲労試験報告書

昭和56年3月

大阪大学工学部 土木工学科 橋梁研究室