

(53) 低桁高連続合成床版橋

LOW-DEPTH CONTINUOUS HYBRID SLAB BRIDGE

深田清明* 森山正敏* 加納 勇** 綿引 透**

Kiyooki FUKADA, Masatoshi MORIYAMA, Isamu KANO, Toru WATABIKI

Hybrid slab bridges offer following advantages ;

(1) lower girder depth, and (2) reduced work at site.

A hybrid slab bridge with a girder depth to span ratio of 1/50 was built as a expressway ramp girder. The bridge was designed to be of two-span continuous type for economic reason, its steel weight being about 65% of that of two simply supported bridges.

Loading and vibration tests were carried out with two 20t trucks, and following results were obtained.

(1) Actual stress and deflection were about 1/10 of the design values. This was owing to the guard walls and tensile-part of concrete.

(2) The logarithmic decrement δ was as high as 0.12 to 0.25, while the impact factor as low as 0.20.

(3) It was confirmed that the structure is secure and the design concept is valid.

1. まえがき

最近の橋梁建設では、河川との関係、既設の道路・鉄道との関係、あるいは取付道路との関係などから桁高制限を受けるケースが非常に多く、一説では新設橋の30%はなんらかの形で桁高制限を受けていると言われている。

名古屋高速道路の堀田ランプ桁は、既設の高速道路の本線と市道とで上下から制限を受け、構造高を30cmに抑える必要があった。鋼床版橋やPCホロースラブ橋などの形式と比較した結果、構造的なや経済性などで他の形式に優っている2径間連続合成床版橋が採用された。

本橋は、スパン15mの2径間で、有効幅員5.5mの諸元をもつ小規模橋梁であるが、構造高・スパン比1/50であり、さらに連続桁であることから、これまでに例の少ない構造となった。そのため、特に設計上では、中間支点上の負曲げモーメントに対する処置について多くの検討が加えられた。さらに、本橋の構造上の安全性と設計法の妥当性を確認するために、コンクリート打設時と完成時において桁のひずみ、たわみ、及び振動の現地計測を行った。

本論文は、合成床版橋の特長と設計法を概説し、低桁高で連続形式の堀田ランプ桁でとられた設計法、中間支点上の処置法、及び現地計測結果をもとにした本橋の構造特性について述べたものである。

* 名古屋高速道路公社 計画部

** 日本鋼管株式会社 鋼構造建設部

2. 合成床版橋の構造と特長

合成床版橋は、溶接組みされた鋼桁と、この鋼桁を型枠として打ち込まれたコンクリートから成る一種の合成橋梁である。図.1参照。鋼桁は、下フランジとなる一枚の鋼板に、溶接組みされたT形鋼を数本溶接したもので、下フランジの鋼板にはコンクリートとの合成をはかるためにスタッドジベルが溶植される。

鋼桁は製作管理のいきとどいた工場で製作されるため品質の高いものが得られ、現場では、鋼桁が床版型枠の役割りをもはたすため足場工や床版型枠工が要らず、配筋作業とコンクリート打設作業だけで済む。架設作業がかなり簡略化でき、堀田ランプ桁では壁高欄型枠までも工場で取り付けたので、現地の交通遮断は夜間のみ2日間で済んだ。

構造的には、下フランジが幅広で大きな断面面積をもつことができ、さらに上フランジ部には床版を形成するコンクリートが有効に働くので、高強度となる。さらにコンクリート体積が大きいためにたわみ剛性も高く、他の形式に比べて経済的に構造高を低く抑えることができる。

図.2は鋼床版橋、合成桁橋と合成床版橋との鋼重を比較したもので、合成床版橋が低桁高でも鋼重の小さいことが分る。

3. 合成床版橋の設計法

本形式は活荷重合成構造であり、荷重を受ける断面状態には、合成前の鋼桁断面と、合成後の合成断面とがある。合成前の鋼桁断面では通常の鋼構造系の設計法に準じ、合成後の設計では、全体的な力学挙動、すなわち構造解析についてはコンクリート橋の設計法に準じ、内力の状態、つまり断面計算については、合成桁橋の設計法に準じる。表1は設計法の概要をまとめたものである。

表.1 設計法の概要

	構造解析 (たわみと断面力の計算)	断面計算 (応力の照査)
合成前の鋼桁断面	斜角があまりきつくない場合、幅員が広くなくコンクリート打設が幅員方向ではば一様に行える場合、あるいは各主桁の剛性にあまり差のない場合などについては、上下のフランジとウェブの有効部分より構成される工桁梁として主桁の断面力を算出する。このとき、横桁には断面力は発生せず、主桁の座屈固定点としてのみ機能させる。	通常の鋼桁断面計算の方法で応力照査する。
合成後の合成断面	道路橋示方書コンクリート橋編によると、版として解析することを原則としながらも、版理論の実用計算式や梁理論の簡易式などが提示されており、支間長によって使い分ける。版としての解析法は、活荷重が支配的であるため影響線載荷が行える格子解析が適している。しかし横桁剛度と配置に注意をはらう必要がある。 剛度を求めるためのコンクリートの弾性係数比は7を標準とし、コンクリートは全断面有効とする。(道路橋示方書 I-3, II-9) たわみ制限は、横分配作用が大きいこと、床版コンクリートの応力照査を行っており変形による付加応力が存在しないことなどから L/500 とする。又、衝撃係数については構造の類似性からコンクリート橋の係数を適用する。	(1) 曲げモーメントに対する断面計算 ① 後死荷重および活荷重：コンクリートの弾性係数比を15とした複鉄筋コンクリート断面として算定する。コンクリートの引張応力部は無視する。 ② コンクリートのクリープ及び乾燥収縮：道路橋示方書 (II-9) 合成桁の項に準じる。 ③ コンクリートの鋼の温度差：コンクリートが充実した構造であるため温度差応力は微小と考慮して無視する。 (2) せん断力に対する断面計算 コンクリートにもせん断力を負担させる場合には、必要量の補強筋を入れる。 (3) ずれ止めの設計 下フランジとコンクリートとの境界面に働く後死荷重・活荷重によるせん断力と乾燥収縮によるせん断力に対し、道路橋示方書 (II-9) 合成桁のずれ止めの項に準じて設計する。

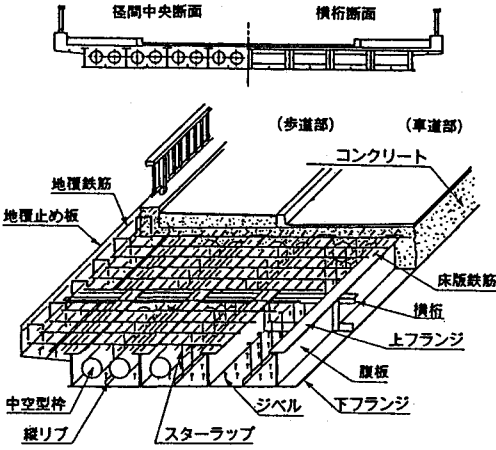


図1. 合成床版橋の構造

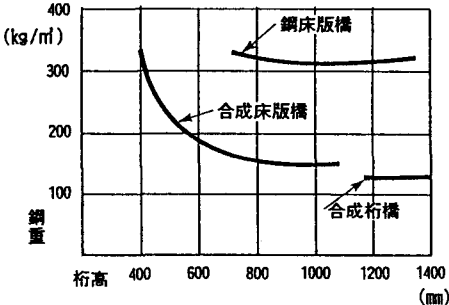


図2. 構造高と鋼重の比較

支間20m 幅員8.7m

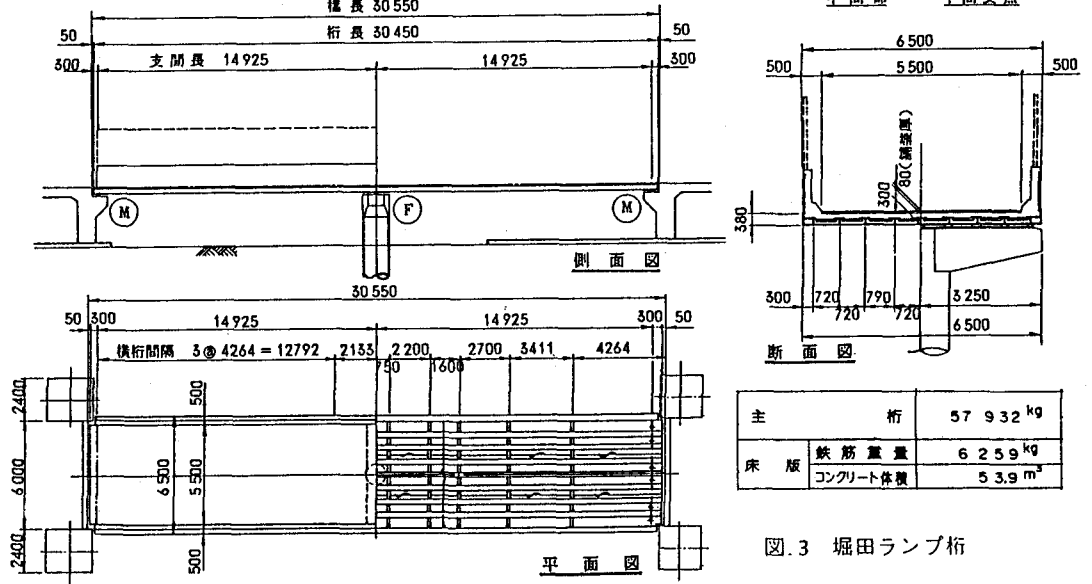
4. 堀田ランプ桁の設計

本橋の構造一般図を図.3に示す。本橋は上下の建築制限が厳しく、桁高を極力低くすることが求められ、構造高を、低桁高が可能な本形式であっても設計上及び製作上のほぼ限界と考えられる30cmとした。又、2径間連続とすることで単純形式2連に比べ鋼重を65%にまで抑えることができた。連続桁のため中間支点上には負の曲げモーメントが働き、床版コンクリートの上面には引張応力が発生するので、設計上次の処置をとった。

- (1) 橋軸鉄筋量：鉄筋量は、鋼桁の上フランジと橋軸鉄筋を合せてコンクリート断面積の2%以上とした。
- (2) 橋軸鉄筋の応力の制限：後死荷重と活荷重によって発生する引張応力を塩害対策指針を参考にして1000kg/cm²以下に抑えた。設計値では後死荷重で461kg/cm²、活荷重で533kg/cm²とした。
- (3) 防水層の設置：表面水が床版内へ浸透するのを防ぐため、シート防水層を中間支点上だけでなく全面に設置した。
- (4) せん断補強：中間支点反力に対する床版コンクリートの押し抜きせん断耐力が確保できるようにせん断補強筋を配置した。

以上の処置の他に、本橋の構造高がこれまでに例の少ない高さであることを考慮して、床版コンクリートにスチールファイバー (0.5×0.5×30mm) を体積比で1.5%混入し、曲げに対するタフネスと、ひびわれ抵抗力を与えることにした。

合成前の構造解析、主に製作そりの計算は、梁理論、FEM解析、格子解析を行い、手法の比較をした。又、合成後の構造解析は、格子解析によった。ここで、解析上の横桁はスパンの1/7、すなわち2.132m間隔で配置した。



5. 堀田ランプ桁の実橋計測と考察

コンクリート打設時と、完成時で、表.3に示す載荷計測と振動計測を行った。ここでは、主に完成時の計測結果とその考察を述べる。

5.1 計測法

完成時の計測量と計測位置を図.4に示し、ひずみ計測点の断面内の位置を図.5に示す。尚、たわみ計測と加速度計測の幅員方向の計測位置は幅員中央点と幅員両端点を基本とし適宜変更した。荷重には、全重量20tのダンプトラック2台を使用した。

(1) 静的載荷計測

トラックを両径間中央に配置し、中間支点が負曲げとなる状態と、片側径間の中央に2台を並列して配置し、径間中央が正曲げとなる状態で、ひずみとたわみを計測した。

(2) 振動計測

次のような加振方法で、たわみ振動と加速度振動を計測した。

① トラック定速走行：

10km/h、20km/h、30km/h、40km/hで走行する。

② トラック段差衝撃：8cm角材の乗り上げ通過により衝撃力を与える。

③ 砂袋落下衝撃：重さ7.8kgの砂袋を高さ1.5mの高さから落下させる。

④ 常時微動：橋梁近辺の交通振動の少ない夜間に1時間の微動計測をする。

表.3 計測の目的と内容

	桁の状態	目的	載荷方法	計測量
コンクリート打設時	鋼桁のみで外力に抵抗する。	1.コンクリート打設時の応力状態(下フランジ、上フランジ、横桁)を把握し、設計法の妥当性を確認する。 2.変形状態を把握し、キャンバー設計法への資料とする。	本工事のコンクリート打設	1.鋼桁(上フランジ、下フランジ、横桁)のひずみ -中間支点断面11chと径間中央断面13ch 2.鋼桁のたわみ-7ch
完成後	鋼桁と床版コンクリートとの合成桁で外力に抵抗する。	1.鋼桁とコンクリートのひずみ分布を計測し、鋼とコンクリートとが一体合成されていることを確認する。 2.中間支点上のひずみ分布を計測し、設計値と比較することで、設計法の妥当性を確認する。又、その応力レベルから構造物の安全性を照査、確認する。 3.桁のたわみ分布を計測し、版のたわみを推定し、たわみ設計法への設計資料とする。 4.桁の加速度振動を計測し、桁の固有振動数と固有減衰率を推定し、設計上仮定した衝撃係数の妥当性を確認する。	20tトラック2台(静止載荷、定速走行)	1.鋼桁(上フランジ、下フランジ)とコンクリート(鉄筋)のひずみ -中間支点断面16chと径間中央断面18ch 2.合成桁のたわみ -径間中央断面と各支点 -11ch 3.合成桁の振動加速度 -8ch

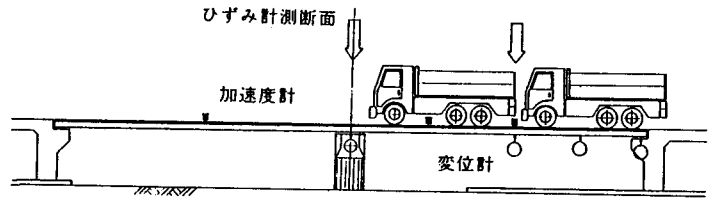


図.4 計測量と計測位置

5.2 計測結果

(1) ひずみとたわみ

断面内のひずみの分布を図.6に示し、これを応力に換算して設計値と比較したものが表.4である。

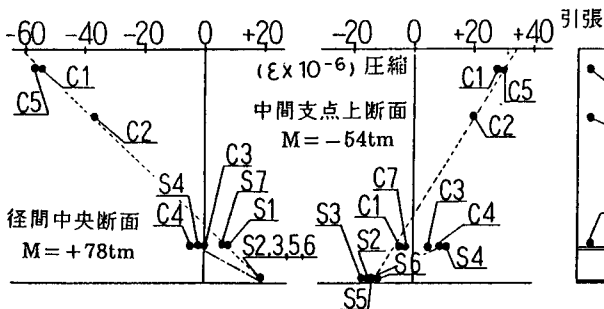


図.6 断面内ひずみ計測結果

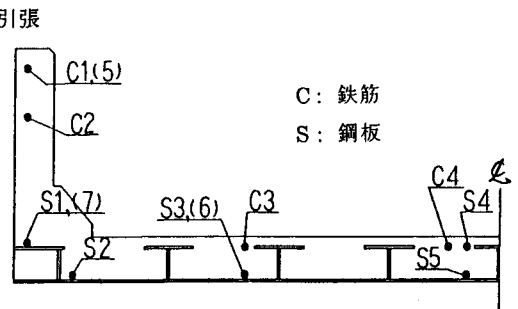


図.5 断面内のひずみ計測位置

表.4には、たわみの計測値と設計値もあわせて示した。尚、構造物内に埋込むひずみゲージをできる限り少なくするため温度保障ゲージを設置せず、そのため夜間計測としたが、応答値の小さなひずみには誤差が含まれているものとする。

(2) 振動特性

低次モードの固有振動数と対数減衰率を表.5に示す。固有振動数は、常時微動をFFT処理したスペクトルから読みとった。径間1/4点のたわみ速度のスペクトルを図.7に示す。尚、スペクトルで3.2Hzにピークをもつ振動は、ゴム沓の上に乗った桁が全体に上下する剛体振動である。対数減衰率は、砂袋落下による減衰波形を、バンドパスフィルターを通した後、減衰率計算を行って求めた。図.8参照。

トラック走行時の応答倍率とそのたわみ振動波形を図.9に示す。

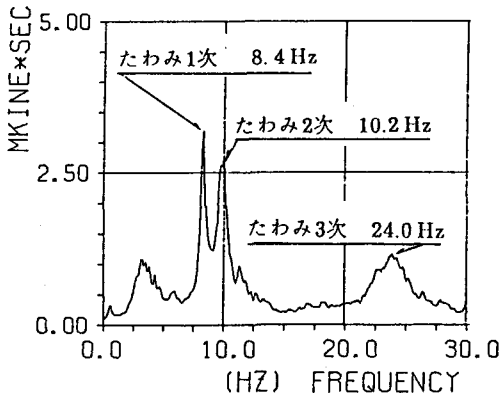


図.7 径間1/4点のパワースペクトル

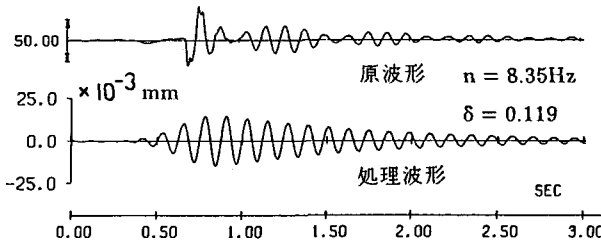


図.8 砂袋落下の減衰波形

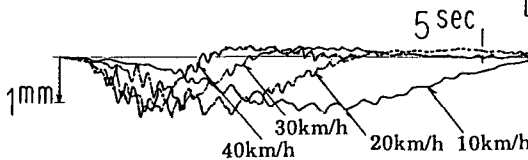


表.4 応力とたわみの計測値

計測項目	測定位置	中間支点上		橋脚中央	
		コンクリート	4.33t/m	コンクリート	4.33t/m
コンクリート	曲げモーメント	-120.7		+67.8	
	応力	上フランジ	62.9 kg/cm ²	中央部	-41.6
		下フランジ	-65.8	両側部	32.8
	たわみ	0		中央部	26.2
鋼材	曲げモーメント	-120.7		+67.8	
	応力	上フランジ	4.93	中央部	-20.7
		下フランジ	-18.1	両側部	19.3
	たわみ	注1	0.12	中央部	23.6
充てり	曲げモーメント	1.925t/m		1.925t/m	
	応力	上フランジ	50.3	中央部	-46.9
		下フランジ	-49.3	両側部	60.7
	たわみ	0		24.9	
新注2	曲げモーメント	20t × 1台		20t × 2台	
	応力	上フランジ	23 (4.8)	中央部	-20.7
		下フランジ	36 (7.4)	両側部	19.3
	たわみ	注1	0.020 (0.04)	中央部	1.66 (2.37)

注1. 支点たわみは支点から200mm離れた点の値。 注2. 設計両側部に修正した値

表.5 固有振動数と対数減衰率

振動モード	固有振動数	1次	2次	3次	計測法
		8.4 Hz	10.2 Hz	24.0 Hz	常時微動
たわみ	対数減衰率	0.119	0.151	—	砂袋落下
ねじり	固有振動数	12.6	21.9	32.1	常時微動
	対数減衰率	0.265	—	—	砂袋落下

速度 km/h	0	10	20	30	40	50
最大変位 d mm	1.215	1.299	1.376	1.380	1.461	1.462
応答倍率 d/d ₀	1.0	1.069	1.133	1.134	1.202	1.203

図.9 トラック走行時の変位波形

5.3 考 察

(1) 剛性

トラック載荷による桁のたわみは、設計剛度から推定した値の約1/10であった。これは、設計上無視されている壁高欄が働いているためと思われる。実際、桁の鋼換算断面2次モーメント I (コンクリート弾性係数比7、全断面有効として計算) を壁高欄を無視した場合と考慮した場合とで比較すると 1/10になり、このことが裏付けられる。又、壁高欄を考慮した I を使用してトラック載荷による桁のたわみを推定してみると、1.75mmとなり計測値1.66mmとよく一致する。以上のことから、次のことが言える。

- a. たわみ計算用の断面2次モーメント I を算出するには、以下の仮定で算定するのが実情とよく合う。
 - ・コンクリートの弾性係数比を7.0とする
 - ・コンクリートは全断面有効とする。
- b. 壁高欄を無視したときの設計活荷重によるたわみは23.6mmと推定され、スパン比で $l/630$ 程度である。又、壁高欄のある実際の状態の活荷重たわみは、2.4mmと推定され、スパン比で $l/6300$ 程度となる。このように、剛性の点からも安全な構造であると言える。

(2) 中間支点上の鉄筋応力

静的載荷による発生応力から、設計荷重に対する中間支点上の鉄筋応力を推定すると、引張 48kg/cm^2 程度であり床版コンクリートの負曲げによるひびわれはまったく問題ないと言える。又、同様に壁高欄上部の鉄筋応力を推定すると、引張 118kg/cm^2 程度であり、この部分もひびわれに対して問題はないと言える。

(3) 振動特性と衝撃係数

合成床版橋の振動特性は、その構造からみて、コンクリート橋に近いと判断し、本橋の衝撃係数にはコンクリート橋の係数を適用した。振動計測の結果、低次たわみ振動の対数減衰率が0.12~0.15と大きいこと、又、最低次の固有振動数がスパンに対しては大きな8.2Hzであることなどがコンクリート橋の振動特性に近いことを裏付けている。一方、トラック走行時の応答倍率が1.20程度であり、設計上の係数1.20とはほぼ一致している。以上のことから、合成床版橋の衝撃係数としてはコンクリート橋の値をとるのが妥当であると言える。

6. あとがき

低桁高で連続形式の合成床版橋の設計検討と実橋実験結果に対する考察を述べた。これらをまとめると以下ようになる。

中間支点上で負曲げモーメントを受ける部分については、通常のせん断補強をした上で、引張鉄筋の応力を、 1000kg/cm^2 以下に抑える設計をした。又、構造が特に薄いため、クラックを抑え、浸透水を防ぐために、床版コンクリートには体積比で1.5%のスチールファイバーを混入させ、全面に防水層を敷く処置をした。

完成時にトラックによる載荷実験を行い、設計荷重による応力とたわみを推定したところ、設計値の1/10程度であった。これは設計上無視している壁高欄と床版コンクリートの引張り部分が実際は効いているためである。壁高欄のない状態を仮定したとしても、その応力とたわみは許容値に十分入っており、安全な構造物であることが確認できた。又、衝撃係数はコンクリート橋の係数をとるのが妥当であると考えられる実験結果などを得ており、設計法の妥当性も確認できた。

実験をとうして、低桁高連続合成床版橋の安全性と設計法の妥当性を確認したが、この資料が今後の合成床版橋の発展に役立てば幸いである。最後に、堀田ランプ桁の設計・施工にあたりご尽力をいただいた関係各位に深く感謝の意を表する次第である。