

せん断連結継手を有するプレキャスト床版の開発 ～STスラブの開発～

Development of Pre-cast PC-Slabs with Shear Transmission Joint

樋口 雅善

Masayoshi HIGUCHI

川田建設㈱大阪支店技術部設計課課長

梶川 靖治

Yasuharu KAJIKAWA

大阪工業大学短期大学部土木工学科教授

新井 達夫

Tatsuo ARAI

川田建設㈱工事本部開発部技術開発課

Pre-cast pre-stressed concrete deck slabs with a new, unique jointing system called "ST-slabs", have been developed for steel girder bridges. The pre-cast panels are jointed by using headed studs and cement mortar to transmit only shearing forces between each panel with no longitudinal pre-stressing. Consequently, the jointed panels will behave as an integrated deck slab under traffic loading with good load distribution, and without any difference in level.

The fundamental principle of this jointing system has been certified by a finite element analysis and a static loading test on model slabs. The basic concept of the jointing system and the results of the analytical and experimental studies on ST-slabs are presented in this paper.

Key words : precast slabs, shear transmission joint, loading test

1. まえがき

近年、鋼橋の新設あるいは補修の床版において、現場施工の省力化を図るためにプレキャスト化された床版が使用されてきている。大別すると、型枠をプレファブ化した床版、型枠・鉄筋をプレファブ化した床版、プレキャストコンクリート床版の3種類に分類される。

このうち、プレキャストコンクリート床版としては、PC版とRC版が考えられ、いずれの構造においてもパネル相互間の連結に対し各種の連結工法が提案されている。この橋軸方向の連結工法は、基本的に、橋軸方向にプレストレスを導入する方法と、しない方法の2種類に大別できる。

前者については、すでに数多くの実績があり、設計基準類¹⁾も整備されつつある。しかし、プレストレスを導入するためにPC鋼材を用いて縦縫めを行うことになるため、この作業自体が工程上の大変なネックとなり、工費の増加も避けられないと指摘されている。また、部分的に取り替えも煩雑である。

これに対し、現場施工のさらなる省力化と工期短縮および経済性向上のために、縦縫めを省略した方法が各種提案されており、その代表例として第2東名自動車道等に採用されているループ継手がある。しかし、この工法においてもループ継手部（間隔約30cm程度）が現場打ち

の膨張コンクリートとなるため型枠の組立・解体作業が必要となる場合もある。また、最終的にPCパネル間にRC継手部が混在することになるなどの問題点もある。

そこで、継手間詰め部間隔を狭小化し、パネル相互の段差解消と荷重分配のため、せん断力のみを確実に伝達できるような継手構造を持つプレキャストコンクリート床版いわゆる「せん断連結床版」（以下、STスラブという）を考案し、継手部分および床版部分の耐久性を確認するために実験を行った。

本文はこれらの結果を報告し、さらに実橋に採用されたSTスラブの実橋試験についても報告する。

2. STスラブの構造

STスラブの構造概要を図1に示す。STスラブはPC鋼材による縦縫めを必要とせず、現場施工の省力化および急速施工が可能な高耐久性床版を目指すものであり、現場形成のせん断連結構造によりパネル相互間のせん断伝達のみを期待して一体化を図った床版である。当然のことながらパネル相互間のせん断連結継手部の構造が重要であり、少なくとも以下の要件を満足する必要がある。

- ① 確実なせん断伝達要素の選定。
- ② パネル間相互の離間防止。
- ③ 継手部（RC部）間隔の狭小化。
- ④ 製作誤差や不陸の吸収のために自由度の大きい現場

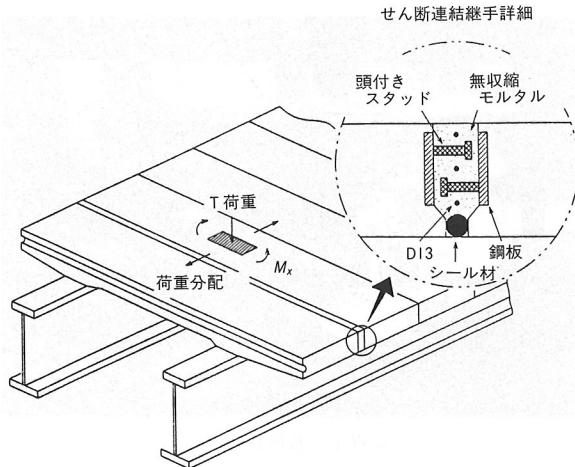


図1 STスラブ概要図

形成の継手であること。

これらの要件を満足する構造として、鋼・コンクリート合成桁のずれ止めとして多用されている頭付きスタッドを千鳥状に溶植した鋼板を埋め込んだプレキャストパネルを工場製作する。その後、現場においてこれらが互いに噛み合うように設置し、詰め部に無収縮モルタルを流し込んで一体化しようとするものである。

3. FEM解析

道路橋示方書²⁾に示される床版の設計曲げモーメント式は、相対2辺単純支持の等方性無限版を対象として解析・誘導されたものがベースとなっている。これに対し、プレキャスト床版のような有限幅の板（パネル）を連続的に並べ、パネル相互間をピン結合により一体化して相

対2辺を単純支持した「連結版」の曲げ性状について調べた研究は、解析的にも実験的にもこれまで皆無のようである。

そこで、連結版の基本板性状を把握するために、2枚のパネルを連結したモデルについて3次元FEM解析を実施した。解析モデルは、スパン2.0mのパネル（幅1.5m、厚さ18cm一定）を支間方向24分割、支間直角方向20分割した四角形アイソパラメトリック1次板曲げ要素を用いてモデル化し、このパネルを上下にわずかにずらし2枚並べて2辺で単純支持した。連結部のピン結合は、両パネルの隣接節点どうしを立体ト拉斯要素で連結し表現した。板は等方性で、そのヤング係数は $3.8 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とし、ひび割れは考慮しないものとした。また、荷重は、1枚のパネルの連結エッジ部に載荷し、輪荷重を想定した $P=10\text{tf}$ の面荷重（載荷面積 $440 \times 300\text{mm}$ ）を与えた。なお、比較のために、パネル2枚分の大きさの1枚版についても、同じ要素分割および載荷状態で計算を行った。

これらの計算結果より、おおよそ以下のことがわかった。

- ① せん断連結とすることによりY方向（配力筋方向）たわみ曲線において、連結部で明らかな角折れ現象が見られる（図2）。
- ② 床版上面における主鉄筋方向応力度 σ_x は、1枚版に比べて最大で約10%程度大きくなるが、その分布状況は全体に圧縮側となりほぼ1枚版のものと同様であった（図3）。
- ③ 床版上面における配力筋方向応力度 σ_y は、1枚版

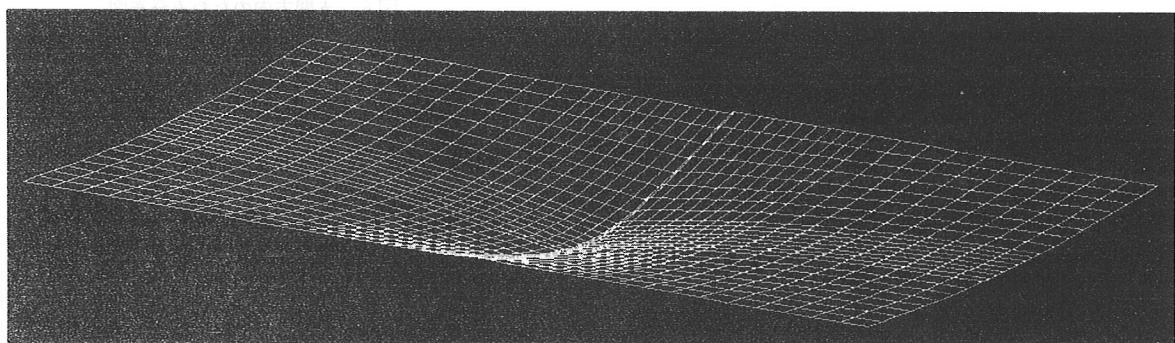


図2 変形図

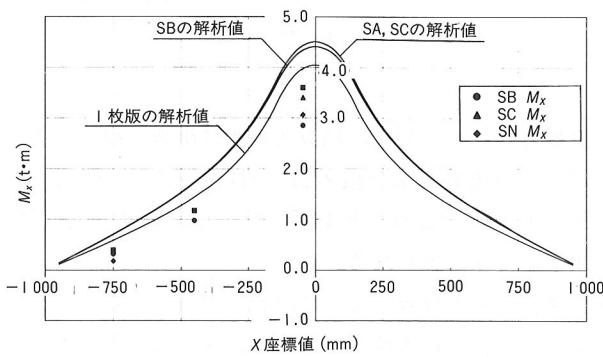


図3 主鉄筋方向曲げモーメント

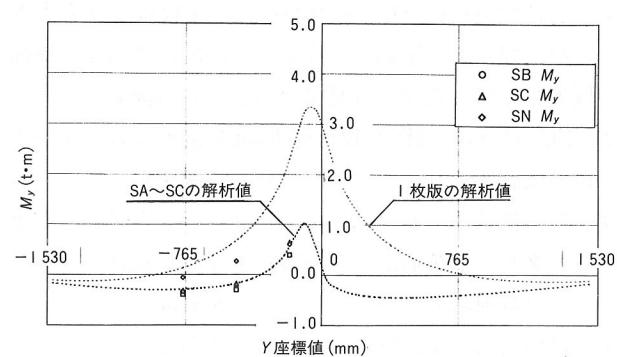


図4 配力筋方向曲げモーメント

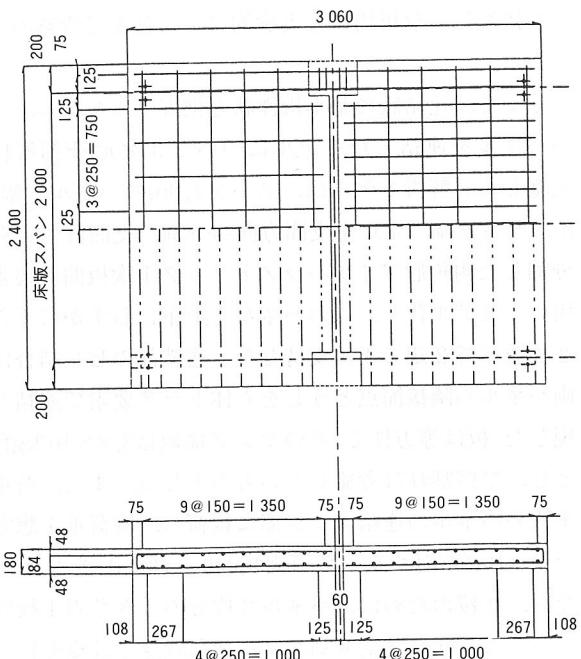


図 5 供試体図 (mm)

に比べて全体的に小さくなる（約50%程度）が、比較的引張応力度の大きい領域（+5 kgf/cm²）が目立つようになる（図4）。

4. 実験概要

スタッドを用いたせん断連結継手の力学特性や耐荷力を調べるとともに、STスラブの弾塑性挙動などを明らかにするために、スパン中央部に活荷重をかけ静的載荷試験および疲労載荷試験を実施した。

供試体は、ジベル間隔および補強板厚を変化させた3種類のプレテンションPCパネルを連結したもの（SA,SB,SC）と、1枚版のもの（SN）を製作した（図5）。

なお、疲労試験は、供試体SCと同様な供試体を用い、定点載荷および交互載荷の2種類の載荷方法で実施した。

（1） 静的載荷試験（写真1）

各タイプともスパン中央部に破壊状態となるまで定点荷重を与え、たわみ量、ひび割れ状況を測定した。

静的載荷試験結果を表1に示す。

- ① 連結版（SA～SC）のたわみは、1枚版よりも大きいが、弾性的な挙動は1枚版とほぼ同様であり、補強板の厚さによる違いは見受けられない（図6）。
- ② SCのたわみ剛性が載荷荷重35tを超えるあたりから他の供試体より小さくなっている（図7）。
- ③ どの供試体も荷重20t～25tにおいて荷重直下の床版コンクリート下面からひび割れを生じ、荷重の増加とともに放射状のひび割れパターンを形成した。
- ④ 終局耐力は、ほぼ1枚版と同様であった。
- ⑤ 破壊状況は、間詰めモルタル部の荷重直下を中心に

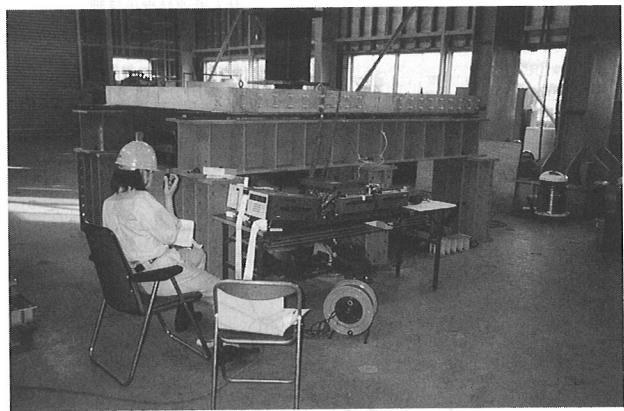


写真1 載荷状況

表1 終局耐力の対比

供試体	ジベル間隔 (mm)	補強板厚 (mm)	破壊荷重 (tf)	終局耐力	
				土木学会式	松井式
SA	100	12	71.0		
SB	200	19	68.0	54.3	67.0
SC	200	12	66.5		
SN	一枚版		70.0		

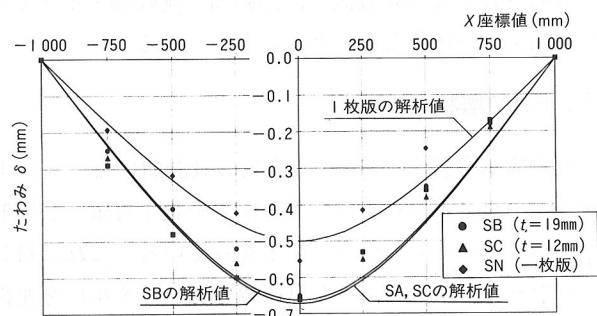


図6 支間方向のたわみ分布図

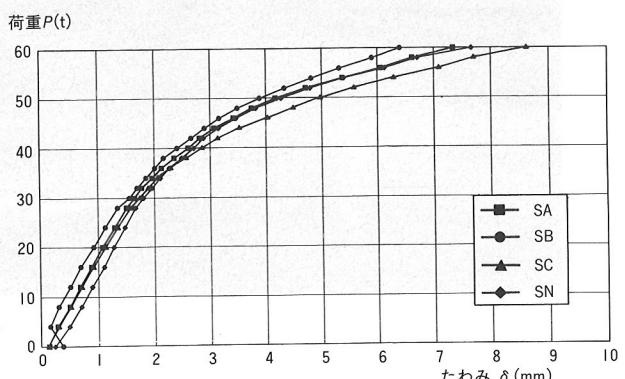


図7 荷重-たわみ曲線

橋軸方向にひび割れ、鋼板との間に亀裂、段差を生じた。この亀裂および段差は、SB,SCのほうがSAに比べて大きい。このことより、ジベルピッチ200mmは広すぎるようと思われる。

- ⑥ 連結版・1枚版ともに最終的に押抜きせん断（パンチング・シア）破壊を生じたが、連結版の押抜きせん断面は、荷重載荷側のみに見受けられる。

表2 疲労試験載荷荷重

載荷回数	荷重
0～100万回	14t
100～200万回	22t
200～250万回	29t
250～285万回	36t

⑦ コンクリートをハツリだした結果、スタッドジベルが上方に曲げ上げられているが、破断等の異常は見受けられなかった。

(2) 疲労試験

疲労試験は、静的載荷と同様な定点載荷と180°位相を与えた交互載荷（写真2）を行った。載荷荷重および回数は表2に示すとおりであり、285万回終了後は最終状態に至るまで静的載荷を行った。

a) 定点載荷試験結果（図8, 9）

- ① 間詰め部に40万回程度でヘヤークラックが生じたが、100万回まではほとんど変化なし。
- ② 荷重を17tから22tに増加させることにより、床版部にクラックが発生した。
- ③ 繰り返し載荷に伴い、上記クラックが放射状に徐々に増加したが、たわみの増加はあまり見られなかった。また、荷重載荷側補強板とモルタル部の離間が目視できるようになったが、設計荷重の1.5倍での200万回の繰り返し載荷において、連結部の異常は認められない。
- ④ 22tでの200万回終了後で荷重を29tに増加させたことにより、床版部および間詰め部にクラックが発生した。また、荷重載荷の反対側の補強板とモルタル部の離間が目視できるようになった。
- ⑤ 繰り返し載荷に伴い、クラックの伸展およびたわみの増加率が大きくなかった。また、水平ずれが目視できるようになった。
- ⑥ 250万回以降急激にクラックの伸展、たわみの増加、水平ずれが大きくなったり。
- ⑦ 285万回繰り返し載荷後、最終状態に至るまで静的に載荷を行い、荷重が57t程度でパンという音が発生し、荷重が52.4tまで下がった。その後、再度荷重を増加させたところ、58.5t（静的載荷の88%）で最終破壊状態となった。
- ⑧ 最終破壊は、静的載荷試験と同様パンチング・シアであった。
- ⑨ 荷重載荷側の補強板に、疲労亀裂が発生した。疲労亀裂は、補強板背面に溶接された異形スタッドの根本部を貫通しているものと、前面部に溶接されたスタッドジベル下面の橋軸直角方向の2種類がある。また、板縁部は、若干だが延性破断面が見受けられ、最終破壊前の音と関係があるものと思われる（写真3, 4）。

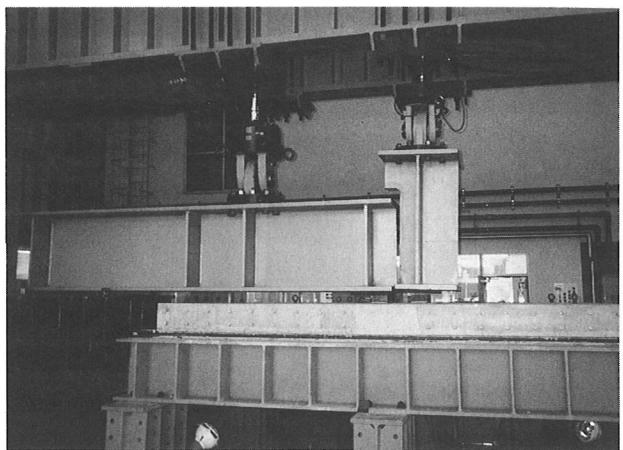


写真2 交互載荷状況

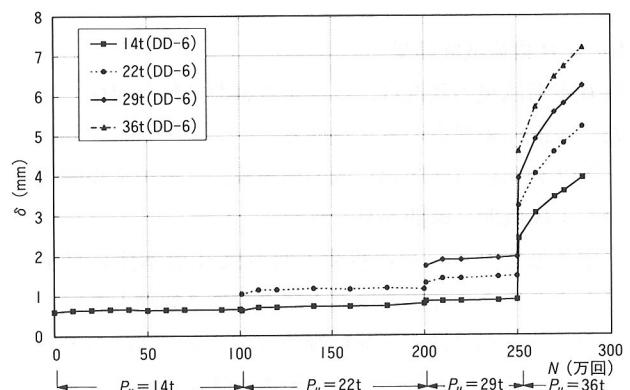


図8 繼手部たわみ変化図

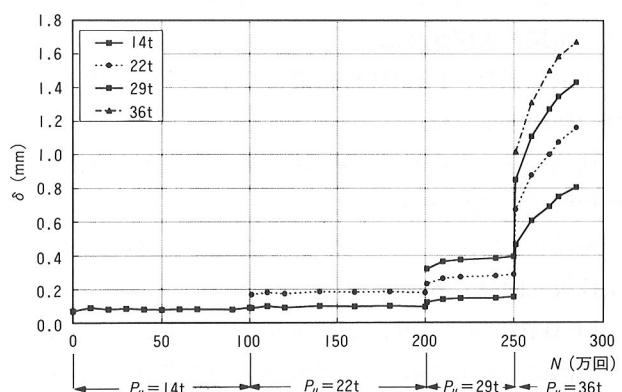


図9 繼手部の離間量の変化



写真3 補強板の疲労亀裂部

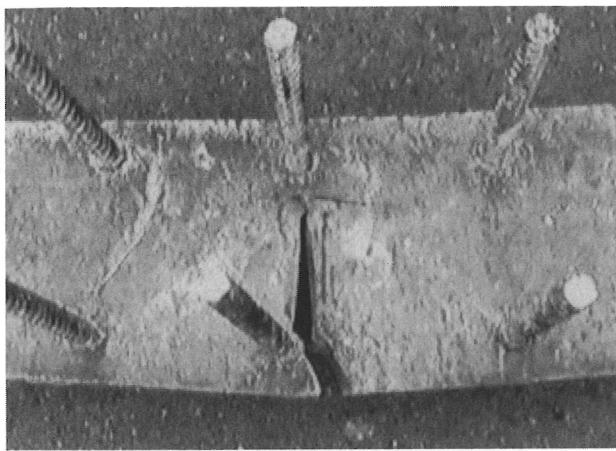


写真4 定点載荷での補強板の疲労亀裂

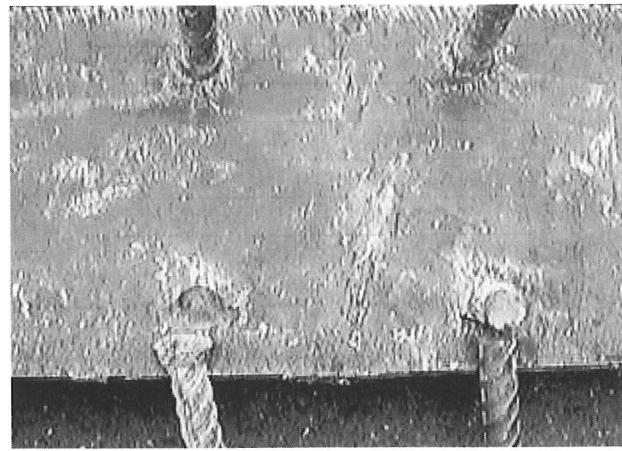


写真5 交互載荷での異形スタッドの疲労亀裂

b) 交互載荷試験結果

交互載荷試験の状況は、ほぼ定点載荷試験と同様であった。下記に差異点のみを述べる。

- ① 第2載荷点(床版部)側の補強板に、モルタル側ではなく床版側に離間が見られた。
- ② 繼手部よりも、荷重載荷下面のPC床版本体に発生したクラックの伸展速度およびクラック幅が大きい。
- ③ 第1載荷点(継ぎ目部)側のスタッドジベルの下面に橋軸直角方向に微小な疲労亀裂が見受けられる。また、第2載荷点側の補強板に溶接された異形スタッドが溶接部から引き抜かれている(写真5)。

(3) 結果および改良点

- ① 実験結果は、FEM解析結果より小さいが、ほぼ同様な傾向を示した。
- ② 補強板厚による差異は見られなかったことより、補強板厚は $t=12\text{mm}$ を用いる。
- ③ 終局状態は、パンチング・シアであり、終局耐力は1枚版と同等であった。
- ④ FEM解析結果より、主鉄筋方向の曲げモーメントの算出は、道示に示される床版の式の1割増しとする。また、配力鉄筋方向曲げモーメントは、FEM解析結果からは5割程度低減できるが、安全を見て道示と同等とする。
- ⑤ 設計荷重相当の荷重で200万回の繰り返し載荷を行っても、継手部は充分の耐力を有している。
- ⑥ 補強板背面の異形スタッドは、補強板とコンクリート面との離間が見受けられたことから、鉄筋の定着長を確保するため、 $l=20\text{cm}$ から $l=30\text{cm}$ とする。
- ⑦ スタッドジベルピッチおよび異形スタッドピッチは、床版鉄筋ピッチに合わせ $\phi=10\text{cm} \sim 15\text{cm}$ とする。
- ⑧ スタッドジベルと異形スタッドは、疲労性状の改善のため溶着点をずらす。

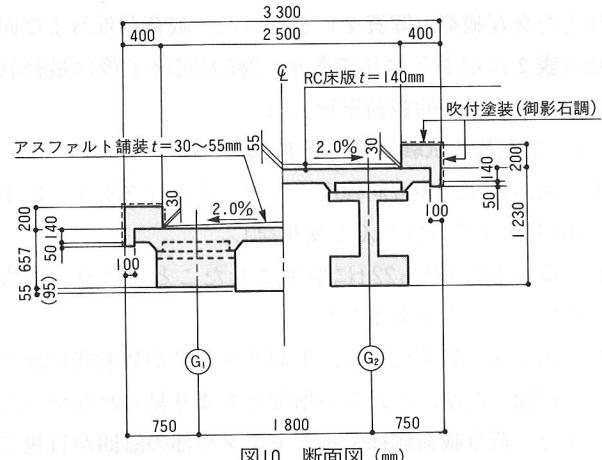


写真6 継手部断面

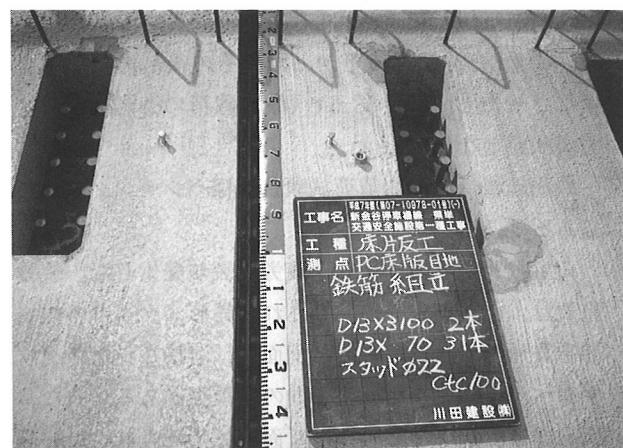


写真7 目地部

表3 実測振動数

5. 実橋施工例

静岡県島田土木事務所発注の大代橋（歩道橋）にSTスラブが使用された。本橋は、2主桁のプレビーム合成桁橋であり、ウェブおよび横桁もプレファブ化がなされた橋梁である（図10、写真6,7）。

[設計条件]

形式：単純プレビーム合成桁

活荷重：群集荷重

橋長：40.000m

支間：39.100m

幅員：2.500m

6. 実橋試験

設計計算上、STスラブは主桁と一体化された合成構造と考えているため、実橋試験は合成効果を確認することを目的として振動試験を行った。

(1) 実験概要

一般的に、梁の曲げ剛性(EI)と固有振動数には相関関係があることが知られており、固有振動数を測定することにより所定の曲げ剛性を有しているか判断できる。振動を与える手段には多くの方法があるが、本橋の場合は、歩道橋であること、比較的揺れやすい橋梁であることから、特別な加振装置などを必要とせず簡単に計測が行える人力加振法により試験を行った。振動計測は、高感度で設置の容易なサーボ型加速度計を用い、固有振動数の解析にはFFTアナライザを用いた。また、床版動ひずみも同時に測定した。

(2) 実験結果

固有振動数（1次）の実測値は、表3に示すように平均で1.92Hz程度であった。これは、床版・地覆・ウェブ・高欄を考慮し、かつ、下フランジの実強度相当のヤング係数を用いた計算値にはほぼ等しい（表4）。このことより、STスラブと主桁とは完全に合成されていると判断できる。

床版の動ひずみは、最大でも 3μ 程度と小さかったが、近接する床版下面の動ひずみ性状（振動周期、位相等）は等しく、お互いにズレなどを生じることなく、連続版と同様な挙動をしていると想定できた。

7. あとがき

今回の開発実験は、せん断連結部の性能評価に主眼をおいた実験であり、定点載荷による静的および疲労試験であった。しかし、定点載荷による試験結果と実際に供用されている床版に発生しているクラック等の状況は異なっており、走行する輪荷重を本格的にシミュレートするためには、輪荷重走行試験機による試験が必要である。

表4 固有振動数計算結果

試験項目	振動数(Hz)
ジャンプ試験	1.888
歩行試験	1.933
走行試験	1.947
早足走行試験	1.912
平均	1.920

No.	床版	地覆	ウェブ・高欄	ヤング係数	振動数(Hz)
1	○	○	○	3.6×10^5	1.86
2	○	○	○	3.3×10^5	1.78
3	○	○	×	3.3×10^5	1.62
4	○	×	×	3.3×10^5	1.46
5	×	×	×	3.3×10^5	1.04

このため、現在、前述の点を改良した供試体を製作し、最終成果を確認するための移動走行試験を行っており、別の機会に報告したい。

最後に、本実験にあたり、多大なるご指導を賜った京都大学・藤井学教授、ならびに、本橋の完成にご尽力いただいた静岡県島田土木事務所の各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレキヤスト床版設計施工マニュアル、1994年3月。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I・II・III、丸善、1996年12月。
- 3) 前田・松井：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式、土木学会論文集、第348号/V-1, pp. 133~141, 1984.