

# 鋼とコンクリートの融合

Hybrid Structures by KAWADA

## 1. 複合構造と川田グループの歩み

### 「複合構造」とは？

複合構造とは、「合成構造」と「混合構造」を広く包含する構造の総称である。

合成構造は、構造物の断面が異質の材料で構成されている構造であり、鉄筋やPC鋼材とコンクリートが合成されているRC、PC桁、鋼桁とコンクリートが合成されたプレビーム桁等が代表的な構造物である。

一方、混合構造は、構造物を構成する「部材」が鋼やコンクリートなど、単一材料（鋼を主体とする合成桁やコンクリートを主体とするRC、PC桁の場合も含む）を組み合わせて構成されている構造で、複合斜張橋「生口橋」、鋼・PRC混合桁橋「新川橋」、複合エクストラード橋「木曽川橋」等が代表的な構造物である。

複合構造物を構成する代表的な材料は、言うまでもなく鋼とコンクリートであり、この両者を組み合わせることによって両者の弱点を補い合う合理的な構造物が可能となる。

### 川田グループと複合構造

川田グループでは、早くから合成構造の代表格であるプレビームの開発に取り組んできた。当時、川田グループは一つの組織であった。現在、PC橋梁を業の主とし

### <年表> 川田グループと複合構造の歴史

1956	堀切橋 川田グループ初のPC橋
1962	立山橋 連続合成桁橋
1968	玉津橋 日本初のプレビーム工法
1970	富山県議事堂 建築部材として初めてプレビーム梁を使用
1971	川田建設㈱創立
1975	本州四国連絡橋 着工
1976	女沼橋梁 東北新幹線プレビーム鉄道橋
1977	大直高架橋 海外初のプレビーム
1981	やすらぎ橋
1982	汎用クリープ乾燥収縮解析プログラム「CREEP」 開発
1983	大阪城新橋 鋼・コンクリート合成鋼床版橋
1987	第5公庄架道橋
1988	本四連絡橋 瀬戸大橋 開通 祖山橋
1989	仲良い橋（三共作業所連絡橋） トナミロイヤルゴルフ場内歩道橋 プレキャスト床版合成桁橋



SRC構造として設計  
(PC斜張橋として初)



脚にメラン材を使用した  
SRC構造



日本初のプレビーム連続合成  
桁橋



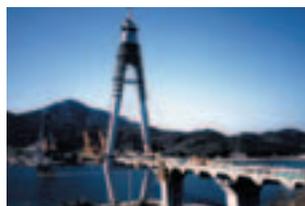
鋼工桁橋 (PCa PC床版)



分割工法によるプレビーム橋



PCa床版を用いた合成桁  
を鋼斜張橋に採用



日本初の複合斜張橋



CGPC梁 (建築用鋼・コン  
クリート合成梁) を使用

- 1990 尻無川新橋  
二上大橋  
プレビーム連続合成桁橋  
富士国際ゴルフクラブ5ホール連絡橋  
(本文写真3.4)  
プレキャスト合成アーチ橋
- 1991 生口橋
- 1992 新琴似高架橋
- 1993 大日本コンサルタント(株)本社ビル
- 1994 「複合構造橋梁」出版
- 1995 東葉高速線・飯山満駅
- 1996 ホロナイ川橋  
薄波橋  
SRC固定アーチ橋
- 1997 鳥野目橋(本文写真3.1)  
日本初のハイブックスビーム橋  
東海大府高架橋  
第二東名・名神高速道路で最初に鋼少数主桁橋を採用  
大府第一高架橋  
銀橋(本文写真2.1)  
プレビーム連続桁に分割施工を採用
- 1998 トナミ運輸(株)川崎支店  
荻安賀高架橋
- 1999 多々羅大橋
- 2000 高松大橋
- 以降 三尾河高架橋  
プレストレスにより中間支点部の応力調整をした鋼少数主桁橋  
利別川第一橋  
木曾川橋  
複合エクストラードロード橋  
新川橋・吉田川橋  
鋼・PRC混合構造  
鍋田高架橋  
川田グループ初の波形鋼板ウェブ橋  
(年表:川田建設(株)工事本部 伊達 安子)

ている川田建設(株)は川田工業(株)PC事業部が、鋼とコンクリート両方の構造解析を実施している川田テクノシステム(株)は川田工業(株)電算センターが、それぞれの前身である。

両方の分野の技術者を有し、技術を融合することのメリットは計り知れないにもかかわらず、同一会社が両方の分野で操業することはできず、昭和46年に川田建設(株)が別組織となり現在に至っている。以来、各々の分野での活動に専念するあまり、構造物として最も合理的な構造である鋼とコンクリートの複合構造への道が、そのときすでに実用構造物として完成されていたプレビームを除いて遠のいてしまったように思える。

しかし、近年、社会情勢の変化に伴い、より経済的で合理的な構造が模索されるにつれて複合構造が注目されている。その先鞭をつけたのがJH初のPC床版2主桁橋ホロナイ川橋ではないだろうか。ホロナイ川橋は受注は川田工業であるが、PC床版については川田建設が協力した。設計も施工も、両者が互いの技術を惜しみなく出し合い、融合させることで建設が実現できたと思う。ホロナイ川橋は、2径間連続非合成桁橋ではあるが、コンクリート床版を鋼主桁と同等の主部材として取り扱ったことで、複合構造と見直すことができる。ジャッキUP、DOWNによる床版の橋軸方向引張応力の低減、剛性の高いPC床版を採用することによる横桁の減少など、当時採用された種々の試みが、現在標準化が進められている鋼少数主桁橋の仕様の全体にわたり取り込まれている。ホロナイ川橋はわれわれ川田グループの技術が「複合」されることにより完成を成し得たと言っても過言ではない。

年表には川田グループが取り組んできた複合構造の代表的なものを示した。これらの実績をベースに培われてきた技術を、鋼橋、PC橋、建築、システム開発といった視点から以下に紹介していく。

(文責:川田建設(株)工事本部 小西 哲司)



PCa化したRCラーメン高架橋



第二東名・名神高速道路鋼少数主桁橋



SCデッキ(合成床版)採用



スパン・高さが日本一のRC固定ラーメン橋



鋼2主桁橋(PRC床版)



プレビーム建築梁を使用して27mスパンの無柱空間を確保



世界最大の複合斜張橋



連続合成桁の鋼少数主桁橋(変断面桁を押し出し施工)

## 2. 鋼橋からのアプローチ

今日の複合構造橋梁の原点というべき橋梁形式は、鋼桁とコンクリート床版とをずれ止めを用いて結合し、外荷重の作用に対して両者が一体となって抵抗する合成桁橋である。わが国では、その合理性と経済性から昭和30年代後半から昭和40年代半ばにかけて数多く建設された。

しかしながら、昭和50年前後あたりから、鋼道路橋、特にプレートガーダー橋のRC床版にひび割れ損傷事故が多発するようになり、大きな社会問題となってしまった。この原因として、競争設計により鋼重を減らすために床版厚をできるだけ薄くして自重を減らし、主桁間隔を大きくしたこと、床版の設計法自体の問題、高度経済成長による交通量の激増に加え過積載大型車の混入が目立つようになったことが指摘され、原因究明のための研究が盛んに行われるようになった。

このような情勢から、昭和50年代中ごろには、合成桁形式が控えられるようになり、中でも補修が困難で施工も煩雑な連続合成桁橋についてはほとんど建設されなくなった。この床版損傷事故以来、輪荷重走行試験機を用いた床版疲労耐久性に関する研究が行われ、RC床版の劣化機構や防水層の重要性、プレストレスの導入による疲労耐久性の向上などが、現在では明らかにされている。今後の鋼橋の動向として、最近の研究成果を背景にしてわが国で一時期すたれてしまった連続合成桁橋の見直しを含めて、合成床版構造、上下部一体構造、混合構造などの複合構造について、再び開発が行われるようになってきている。

### (1) 連続合成桁橋

連続合成桁橋では、中間支点部の床版の取扱い方に留意することが重要であり、橋軸方向にプレストレスを与える方法とプレストレスしない方法がある。プレストレスを与える方法として支点のジャッキアップダウンによる方法が昭和30年代から40年代に行われていたが、プレストレスの導入が施工の煩雑さになっていたようである。このころに、川田工業㈱で施工を行った連続合成2主桁橋として立山橋（1962年、富山県、有効幅員6.0m、橋長138.6m、3@46.0m）がある。このようなプレストレスする方法に対して、プレストレスしない方法は、床版ひび割れが有害なひび割れ幅にならないように、鉄筋比と付着面積（周長率あるいは鉄筋径）によりひび割れ幅を制御する設計法であり、関西道路研究会を中心に開発が進められてきた。昭和48年にプレストレスしない方法が「道路橋示方書」に規定されるに至ったが、上述したように合成桁形式が控えられるようになり、この方法が

採用されたのは関西に限定された。例えば、淀川北線橋梁（1991年、大阪市、有効幅員15.0m、橋長98.0m、27.7+43.0+26.6m）があげられる。

このようなわが国の状況に対して、ヨーロッパでは連続合成2主桁橋が道路橋でも鉄道橋でも一般的に用いられ、経済性からひび割れ制限を取り入れた設計法による方法が一般的に採用されている。わが国で、再び連続合成桁橋が見直されているのは、このひび割れ制御によるプレストレスしない連続合成桁橋であり、川田工業㈱ではヨーロッパにおけるひび割れ制限の設計方法について、模型実験を行うなど研究を進めている。発注機関によっては、床版打設時にひび割れを許さない、あるいは、死荷重時にひび割れを許さないなどの性能が要求される場合があり、中間支点部に付加的なプレストレスをジャッキアップダウンにより与える方法が採用される場合もある。また、中間支点部のより高い耐久性のために繊維補強コンクリートにより施工される場合もある。

北海道横断自動車道の利別川第一橋（**年表**）は、移動型枠を用いて施工されたPC床版連続合成2主桁橋であり、最大支間86.5mは連続合成桁橋としてわが国で最大規模である。本橋では、移動型枠施工時における床版ひび割れ防止と、後死荷重時でひび割れを許さないように、中間支点部で10cmのジャッキアップダウンにより施工が行われた。

### (2) 合成床版 SCデッキ

SCデッキとは、**図2.1**に示すように鋼とコンクリート合成床版の一種であり、スタッドと横リブを溶接した鋼製型枠にコンクリートを打設し、両者を合成した床版形式である。このSCデッキの特徴は、床版施工用の足場・型枠支保工が不要に加え、床版工期が短い、RC床版に比較して耐荷力・耐久性が高い、現場施工にPC工などの特殊技術が不要である、床版支間7m程度までの適用が可能である、などであり、高架橋・跨道橋・跨線橋の新設および床版補修の床版取替等、適応範囲は広い。

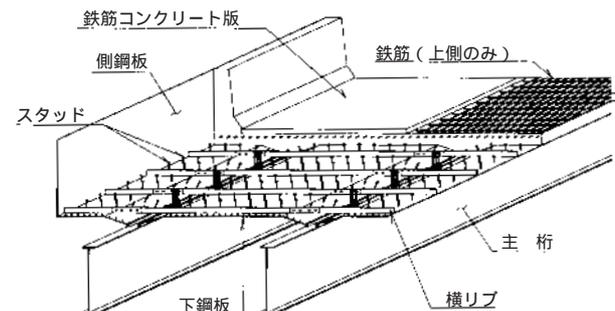
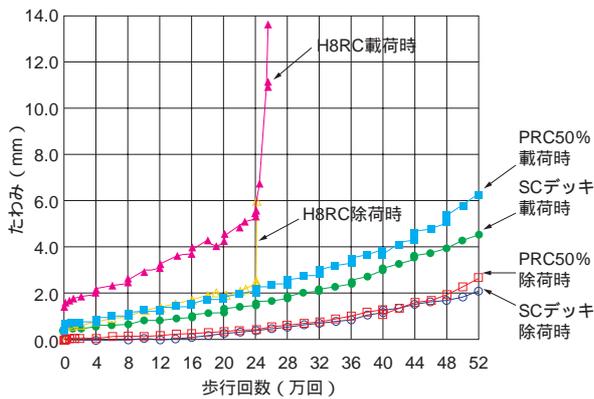


図2.1 SCデッキ構造図



H8RCは平成8年道示により設計された床版を示す。  
PRC50%はフルプレストレスに対し50%のPC導入量の床版を示す。

図2.2 輪荷重走行試験結果（建設省土木研究所）

図2.2は、建設省土木研究所で実施された輪荷重走行試験の結果であり、平成8年改訂の道路橋示方書によるRC床版と比較して十分な疲労耐久性のあることが確認されている。最近脚光をあびている少数主桁形式は、床版に十分な耐久性のあることが前提条件の構造であり、今後は合成床版の採用が期待されている。

**年表** は東海北陸自動車道の荻安賀高架橋での施工状況である。下鋼板の防錆処理として亜鉛メッキが採用されているが、他に耐候性鋼材の裸使用、塗装による方法もある。

### (3) プレベーム合成桁橋

プレベームは、鋼桁の曲げ剛性を利用して下フランジコンクリートにプレストレスを導入するプレフレクション工法を用いて、鋼桁とコンクリートを合成した桁である。プレベーム合成桁橋は、プレベームとコンクリート床版を合成した桁橋をいい、通常の鋼・コンクリート合成桁と同様に、床版コンクリートはずれ止めにより上フランジと合成している。プレベーム合成桁の大きな利点は、桁剛性が大きく活荷重たわみが小さいので桁高を低くできる、塗装の必要がない、桁1本あたりの重量が軽く、桁重心が低いので架設が容易なこと、などであり、河川改修にともなう橋梁架替工事により、桁高制限を受ける場合、跨道橋や跨線橋等における桁下空間の確保と架設の容易性を求める場合、維持管理の低減を求める場合に多く使用されている。

プレベーム合成桁は、単純桁としての実績も多いが、近年、耐震上有利な連続桁に用いられる場合も急増している。また、架設現場でのヤード作業を軽減し工期を短縮できる分割工法や、桁高制限が非常に厳しい下路桁まで、架設条件に応じた多様な施工方法・構造形式が考慮され、現在の実績は600橋を超えるまでに至っている。**写真2.1**は、連続桁に分割工法を採用した銀橋である。

最近では、構造の合理化を推進することを目的に、平成7年10月に建設省から出された「鋼道路橋ガイドライン



写真2.1 銀橋

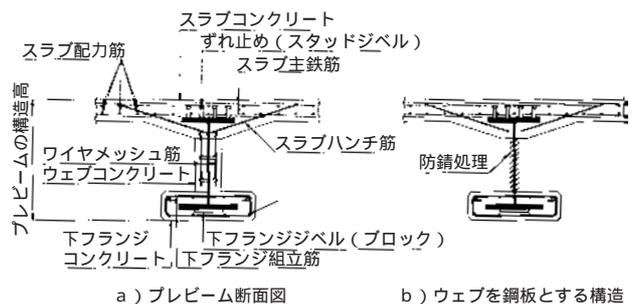


図2.3 プレベーム断面図

(案)」に従い、一部材同一断面とした設計により、プレベーム合成桁でも建設コストの縮減を図っている。また、さらなる合理化を目指して、ウェブコンクリートにプレキャストパネルを用いた構造、ウェブを鋼板とする構造(図2.3参照)などが試みられている。

### (4) 複合斜張橋

複合構造のもつ自由度を大きく利用できる構造物は斜張橋である。複合斜張橋の代表例として、桁に合成構造を適用した合成桁斜張橋、側径間がコンクリート桁、中央径間が鋼桁からなる混合桁斜張橋が挙げられる。

合成桁斜張橋は、鋼斜張橋に比べて、主桁鋼重が減少する、コンクリートによる減衰効果が大きいので振動性状が改善される、質量効果により耐風安定性が改善される、床版分だけ塗装面積が減少する、などの利点がある。一方、死荷重が増加する分ケーブル、塔、基礎工費が増加するため、経済性はこれらの要因も含めて検討する必要がある、コンクリート床版の耐久性の確保が条件となる、床版のクリープ・乾燥収縮への配慮が必要である、などの課題もあり、この課題に対してクリープと乾燥収縮の影響が小さく耐久性が高いプレキャスト床版を適用した例が報告されている。**年表**は、プレキャスト床版を用いた合成桁斜張橋としてわが国初の「仲良い橋」である。

混合桁斜張橋は、側径間長が中央径間長に比べて短い場合に用いられる。この場合、死荷重のアンバランスのため、端支点に大きなアップリフトが生じる。このアッ

プリフトを生じさせないためには、中央径間の鋼桁に対して側径間の桁を相対的に重くする必要があり、その方法として側径間にコンクリート桁を採用したのが混合桁である。混合桁斜張橋では、側径間の桁剛性が大きいため、中央径間の変形が減少し、側径間ではケーブルの変動応力が小さくなる。課題としては、コンクリート桁のクリープ・乾燥収縮が斜張橋全体の変形に影響し、無視できない場合もあるので設計および施工面からの対応が必要である。中央径間が世界最長の斜張橋「多々羅大橋」(年表)はこの形式の斜張橋である。

混合桁斜張橋と同様な形式として複合エクストラードード橋がある。エクストラードード橋は、PC橋で用いられる外ケーブルを桁外に小さな主塔を設けて大偏心させたもので、桁橋と斜張橋の中間的性質を有する。これに鋼桁を組み合わせた構造が複合エクストラードード橋である。第二東名高速道路の木曾川橋・揖斐川橋は、ケーブルの主桁定着部付近までPC箱桁とし、径間中央部に鋼床版箱桁を用いている。

#### (5) ずれ止め構造の開発

鋼とコンクリートの合成を確保するためのずれ止め構造については、一般に鉄道橋では馬蹄形ジベルが、道路橋では頭付きスタッドが、その他のずれ止め構造として角鋼ジベルが用いられているが、一時期の連続合成桁の衰退とともにずれ止めについても必ずしも積極的な開発は行われていなかった。

最近になり、レオンハルトにより提唱された孔あき鋼板ジベル(図2.4参照)の見直しがわが国で行われるようになり、四国横断自動車道の「新川橋」では混合桁の接合部のずれ止めとして、北陸新幹線「北陸道架道橋」では連続合成箱桁橋の中間支定点のずれ止め構造として採用され、最近になりずれ止めの構造についても開発が行われるようになってきた。

川田工業(株)では、この他にクリープ、乾燥収縮や、プレストレスによるコンクリートの変形を拘束せず、供用時には高い剛性を有して、鋼とコンクリートを合成させるような新しいコンセプトのずれ止めの開発も進めている。

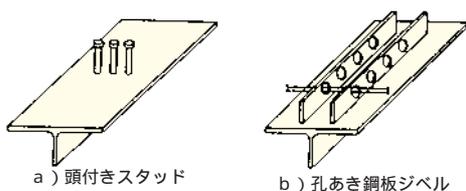


図2.4 ずれ止め構造

(文責：川田工業(株)橋梁事業部 橋 吉宏)

### 3. コンクリート橋からのアプローチ

#### (1) ハイブックスビーム橋

ハイブックスビームは、道路橋において桁高を低く抑えることを目的として、主桁の圧縮域に補強鋼板を配置したプレレストコンクリート桁である。その特徴は、補強鋼板による断面剛性の増加と、クリープ・乾燥収縮による断面内の応力転移(補強鋼板の拘束効果)を活用し、主桁圧縮縁の応力度を改善する点にある。

写真3.1は、実績第1号として1997年に栃木県黒磯市に架設された橋長18.9mの鳥野目橋で、プレテンション方式のスラブ桁である。図3.1に桁断面のイメージ図を示す。コンクリート断面の2.3%の補強鋼板を配置することにより、桁高を70cmから60cmに低減することが可能になっている。

また、この補強鋼板の拘束効果を確認するために、恒温恒湿室(気温20℃、湿度70%)の環境下でのクリープ試験を行った。図3.2にモデル供試体のひずみ-材齢曲線を示すが、解析値と実測値が非常に良く一致しており、この効果を設計に見込むことができることがわかる。現在、設計手法の統一化を行っており、今後は適用範囲の拡大を検討する予定である。



写真3.1 鳥野目橋(全景)

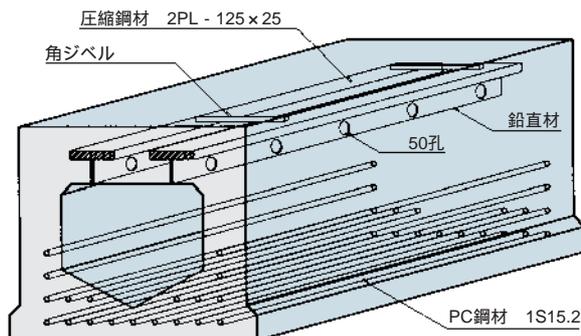


図3.1 ハイブックスビーム桁断面イメージ

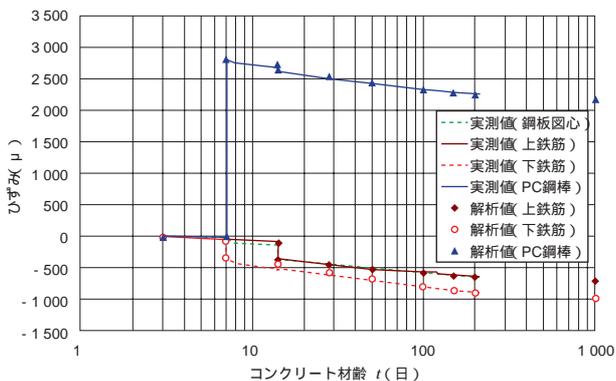


図3.2 ハイブレスビームのクリープ試験結果

### (2) 波形鋼板ウェブPC橋

PC箱桁橋のウェブを波形形状に加工した構造用鋼板（波形鋼板）に置き換えたものが、波形鋼板ウェブPC橋である（写真3.2）。主な特徴は、PC橋において自重全体の10～30%程度を占めるウェブを軽量化でき、主桁自重の軽減が図れる、波形鋼板には、アコーディオンのように伸縮する性質があるため、プレストレス導入効率の向上が図れる、ウェブが高いせん断座屈耐力を有するため、補剛材の省略が図れ、コスト低減が図れる、等の点があげられる。また、ウェブの施工がコンクリートに比べ省略できる部分が多く、施工の省力化と工期の短縮も見込まれ、施工性、経済性の面で優れているとして、現在新たな構造形式として注目されている。

波形鋼板を使用するにあたっては、コンクリートと波形鋼板の接合部や、波形鋼板の接合部、連続ケーブル（外ケーブル）の配置に留意しなければならない。また、平面線形や斜角を有する場合には死荷重・活荷重によりねじりが発生することになるので、ねじりに対する部材の安全性も特に検討する必要がある。

日本では、施工中を含め5橋の実績があるが、様々な方法で設計・施工されており、まだ確立されていないこれから楽しみな分野である。



写真3.2 波形鋼板ウェブ橋

### (3) 鋼トラスウェブPC橋

波形鋼板ウェブPC橋と同様に、近年注目されている複合橋梁としてウェブを鋼製トラスに置き換えたPC橋がある。第2東名高速道路で検討されている猿田川橋・巴川橋のパーズをご覧ください。写真3.3に示すスパン10.0m、桁高0.9mのモデル供試体を作成し、静的破壊試験および屋外環境下でのクリープ試験を行ってきた。この供試体は、写真でもわかるように外ケーブルを配置した本格的なPC構造である。鋼トラス部材としては、サイズ100mmのH鋼を用いており、フランスで1984年に試験施工されたアルポア橋（橋長100.1m）で採用された鉛直材付きのワーレン形式としている。

川田建設(株)では、1996年からこの構造に着目し、写真3.3に示すスパン10.0m、桁高0.9mのモデル供試体を作成し、静的破壊試験および屋外環境下でのクリープ試験を行ってきた。この供試体は、写真でもわかるように外ケーブルを配置した本格的なPC構造である。鋼トラス部材としては、サイズ100mmのH鋼を用いており、フランスで1984年に試験施工されたアルポア橋（橋長100.1m）で採用された鉛直材付きのワーレン形式としている。



写真3.3 鋼トラスウェブPC梁（荷重試験状況）

これらの試験結果より、上下フランジのコンクリートだけを考慮した梁構造とした簡易モデルによっても、概ね静的耐力やクリープ挙動を推定できることがわかっている。ただし、フランジとトラスを接合する格点部の構造によっては、無視し得ない大きな局部曲げモーメントが発生するため、留意する必要があることも確認できた。このような場合には、格点部を剛結合としたトラスモデルとして詳細に解析する必要がある。図3.3に静的破壊試験でのスパン中央の荷重～ひずみ曲線を示す。

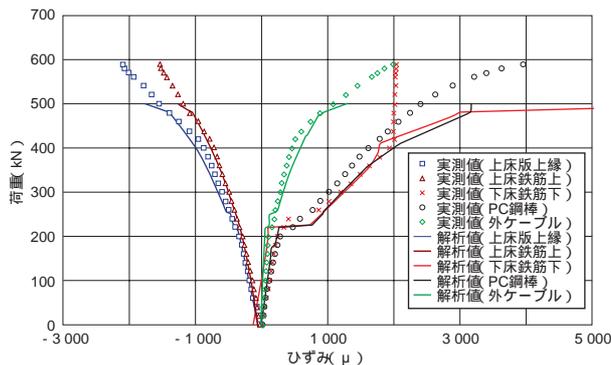


図3.3 鋼トラスウェブPC梁の破壊試験結果

掲載している解析値は、トラスモデルを用いて材料非線形を考慮した非線形解析の結果である。解析値と実測値はほぼ一致しており、計算はかなり煩雑となるが、シミュレーションは可能なことがわかる。現在、トラス構造等の検討を行っている。

#### (4) 合成アーチ橋

以上、PC構造からのアプローチを紹介したが、ここでは、RC構造からのアプローチとして、アーチ橋のリブを複合構造化し、施工の合理化を図った事例の説明をする。



写真3.4 5ホール連絡橋（全景）



写真3.5 5ホール連絡橋（架設状況）

写真3.4は、静岡県のゴルフ場内連絡橋として1990年に施工されたアーチスパン42.0mのRC固定アーチである。架設中の状況を写真3.5に示すが、架設用鋼桁の下フランジコンクリートを事前に打設し、プレキャスト合成断面とすることにより、足場工と型枠工の大幅な削減を達成している。中小規模のアーチ橋やカルバート等の施工に有効であり、鋼桁添接部周りのさらなる合理化を検討中である。

（文責：川田建設(株)工事本部 大澤 浩二，伊達 安子）

## 4. 建築からのアプローチ

建設業界では、労務者の減少と高齢化による技能労働者の不足を補うため、施工の省力化と構造物の標準化、システム化、量産化、品質確保などが求められ、住宅産業を中心として複合構造の研究開発が盛んに行われ、建築生産の工業化が進められている。

川田工業(株)、川田建設(株)でも、20年ほど前から研究開発を進めている2例を以下に紹介する。

### (1) プレビーム建築梁の開発

橋梁において使われているプレビーム（Prebeam）を、建築梁としても使用するため、1969年に研究を開始し、1970年から体育館、会議場、プールの屋根に単純梁として採用されるようになった。さらに、1978年建築事業部発足と同時に新たに開発室を設け、ラーメン構造に使用するための開発に取り組んだ。

以下に開発の経過を示す。

1969年 千葉工業大学にて「プレビーム建築梁に関する試験」を実施。

（財）建材試験センター中央試験所にて「プレビーム建築梁の耐火性能試験」を実施。

1972年 建築基準法第38条にもとづく「プレビーム建築梁の総括的確認」の申請を（財）日本建築センターへ提出。評定書（BCJ C580）を受領。

1981年 建設大臣よりプレビーム建築梁の認定書（建設省富住指発24号）を受領。

特願56 187895「建築用プレストレス鋼梁の架設方法」を出願。

1982年 日本大学理工学部本岡研究室にて「仕口を有するプレビームの復元力特性に関する実験」を実施。

1988年 大阪工業大学工学部南研究室にて「繰り返し曲げモーメントを受けるプレビームの弾塑性性状の実験」および「プレビームとSRC部材との継手部における弾塑性性状の実験」を実施。

プレビームによる架構を採用する最大の利点は、スパン/梁成比を大きく取れることである。屋上に駐車場やプールを持つスーパーマーケットや重層工場など、大スパンの低・中層建物はもちろん、階高をできるだけ低く抑え、しかも多目的な用途に対応できる空間が要求される市街地の中・高層建築にも広く利用されている。工法的には、前者はSPF工法（現場で鉄骨建方後、プレストレスを導入する方法）が、後者はプレビーム標準工法が適している。施工実績は、富山県議事堂新築工事（単純梁、スパン18.0m、1970年完成）から、トナミ運輸(株)川崎

支店(年表, 物流センター; ラーメン構造, スパン27m, 1998年4月完成)まで, 約80件ほど施工されている。

## (2) プレキャスト化建築工法の開発

1990年から, 高品質・建築生産の合理化・工期短縮を目的に, 工業化工法と従来の場所打ち工法を有機的に結合した複合化工法である, CGPC (Composite Girder Precast Concrete) を開発した。

以下に開発の経過を示す。

1990年 特願2 90929「鋼板コンクリート複合梁」を出願。  
1998年に特許取得。

CGPC梁押し抜き試験を実施。

CGPC梁曲げ試験を実施。

1992年 CGPC梁の設計方法の確立。

(財)日本建築センターで個別評定を取得。

大日本コンサルタント(株)本社ビル(年表)の小梁として薄肉PCa版とともに使用した。

CGPC梁の構造(図4.1)は, 鋼板ウェブの上下端をY状に交互に折り曲げ, フランジに鉄筋を内蔵しコンクリートと一体化させた, 工場製作による複合プレキャストコンクリート梁で, 次のような特長がある。

従来のコンクリート造に対し, 重量を60%程度まで低減できる。

一般のコンクリート梁と同様に, 梁の剛性を確保できる。

大梁との接合は, 鋼板ウェブにより容易に行える。

ウェブの耐火被覆は接合部を除き, フランジコンクリートを工場製作する段階で取り付けられ, 現場での施工は不要である。

今後も建築生産と施工技術を高めるため, プレハブ化, 工業化を進めるべく研究開発を行っている。

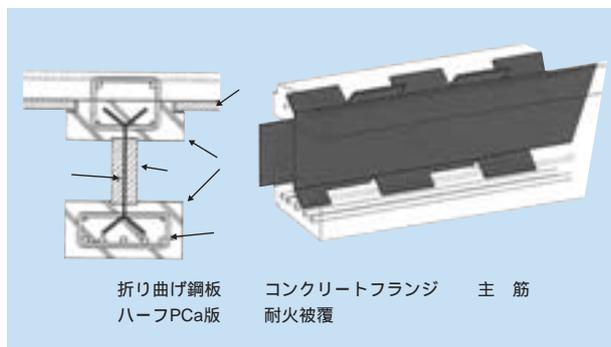


図4.1 CGPC梁

(文責: 川田工業(株)建築事業部 大塚 功一)

## 5. コンピュータからのアプローチ

複合構造を設計するうえでやっかいなのが, クリープ・乾燥収縮の問題である。時間とともに変化するコンクリートの変形を鋼材が拘束することによって2次応力が発生する。これを求めるのは, とくに不静定構造物の場合は大変面倒である。汎用のFEM構造解析プログラムをやりくりして解くことも可能であるが, 煩雑さは免れない。通常の鋼合成桁のように構成部材が一様で, しかも完成系でのみ扱うのであれば定式化も可能であるが, 合成構造にしても混合構造にしても, 複雑な断面構成, 部材構成になるとクリープ・乾燥収縮問題を解析的に解くのは大変困難になってくる。

川田グループでは, プレブームの連続化を検討するにあたって, この問題に対処するための有効な手段が必要とされたため, 実用的な解析手法を考案し, 1982年に変形法骨組み解析理論を用いた汎用のクリープ・乾燥収縮解析プログラム「CREEP」を開発した。

これは以下のような特徴を有している。

- ・1つの部材断面の構成として, 5つまでの鋼またはコンクリート要素が扱える。しかも, これは部材ごとに設定可能。
- ・クリープ・乾燥収縮の進行は, 関数, 係数, 直接数値などで与えられる。
- ・材齢とともに変化するコンクリートの弾性係数が扱える。
- ・コンクリートの遅れ弾性が考慮できる。
- ・引張が働くコンクリートを無視し, 断面力を再配分できる。
- ・張り出し施工や押し出し工法など, 構造系そのものが逐次変化する場合にも適用可能。
- ・PC鋼棒または鋼線によるプレストレスが扱える。
- ・ヒンジやケーブルといった不連続部材が扱える。
- ・部材荷重, 節点荷重, 温度荷重, 支点移動といったほとんどの静荷重が扱える。ただし, 活荷重はクリープ・乾燥収縮には影響を及ぼさないため, 対象外としている。

このプログラムによって, 複合構造のクリープ・乾燥収縮が非常に容易に解析できるようになった。さらに, 施工ステップを追った解析が可能であるため, 連続桁の床版打設順の検討などにも大いに威力を発揮できる。

当初, 大型汎用機で開発されたこのプログラムも, その後, EWS, そしてパソコンへと移植され, 複合構造の普及とともにますます使い勝手のよいものになってきている。

(文責: 川田テクノシステム(株)開発部 藤江 和久)

## 6. 複合構造の将来 ～川田グループの取り組み～

今回、2000年を迎えるに節目の本号にふさわしい特集として「複合構造」を取り上げた。年表に示したように、川田グループは多くの複合構造に携わってきた。

特に、プレビームについては、その設計・施工法について、絶え間ない技術開発を重ねてきた結果、連続桁形式、分割工法なども生みだし、道路橋だけでも600橋以上の実績をあげている。ホロナイ川橋に始まる最近の少数主桁橋についても、一部に単なるリバイバルではないかとの批判もあるが、根本的に、床版はメイン部材で、壊れないもの、交換しないものにとらえているところが昔の2主桁橋とは異なっている。それを実証するためには、各発注機関や大学等の研究機関のご指導を賜りながら、研究開発に多くの労力を注いできた。本特集の最後には、そういったわれわれの研究成果として対外的に公表してきた成果の一覧表を付した。

最近では、多種多様な新しい複合構造が各発注機関、大学、民間業者などで研究されつつある。しかしながら、現在のわが国では、橋梁業界は鋼とコンクリートの分野に明確に二分され、お互い良きライバルとして競合して

きたため、相互の技術の理解や習得に足かせとなってきたことは否めない。複合構造の発展にとっては甚だ残念なことである。

今後、複合構造をより一層発展させるためには、鋼においては座屈、疲労、腐食など、コンクリートにおいては、クリープ・乾燥収縮、ひび割れ、中性化等の劣化現象、などといったお互いの物理的特質はもとより、材料入手、製作手法、施工体制といったそれぞれに特異な業界の機構までも、相互に十分理解しあい協力し合うことがなによりも重要である。

また、最近では入札時におけるVE提案も見受けられるが、より合理的な複合構造を実現していくためには、海外のように、オリジナル設計案に対し受注者側の自由な代替設計案が受け入れられるような土壌も必要であろう。

そういった時代のために、川田グループは「橋なら何でもできます」といえる本当の「橋屋さん」になりたいものである。

鋼とコンクリートといったそれぞれの専門分野を越えて技術を融合させるため、本特集が次世紀を担う若き技術者達にとって指標となれば幸いである。

(文責：川田工業(株)技術開発本部 越後 滋)

表 複合構造に関し対外的に発表した川田グループの研究成果

発行年	掲 載 誌	タ イ ト ル
1965	橋 梁	プレフレックス梁
1969	土木学会年次学術講演会	Preflex桁に用いるための高強度コンクリートの配合に関する実験的研究
	橋 梁	プレフレックス梁に関する研究
1970	橋梁構造工学研究発表会	四ツ谷川橋載荷試験
	橋梁と基礎	プレフレックス梁の施工時における横座屈安定性について
1971	橋 梁	大阪市 玉津橋
1972	土木学会年次学術講演会	服部跨道橋の設計施工
	橋 梁	プレビーム橋の載荷試験について
1974	プレストレストコンクリート	平和橋の調査、設計、施工
	構造物設計資料	プレビームについて
1975	日本道路会議一般論文集	プレフレックストビームけたの疲労実験
1976	日本道路協会建設技術発表会	プレビーム合成げた橋の品質管理の現状と今後の対策
	JSSC	プレビーム合成桁の連結および連続形式への応用
1977	橋梁と基礎	プレビーム合成げた
	Composite Construction in Steel and Concrete (ASCE)	新しい合成構造のおもな製品工法紹介・プレビーム合成げた 別冊 大直高架橋(プレビーム) Strengthening of Pre-beam Composite Girders by an Outer Cable System
1978	土木施工	東北新幹線鉄道橋におけるプレビーム合成げたの設計と施工
1980	土木学会年次学術講演会	断続合成桁の静的載荷試験
	学会関西支部年次学術講演会	プレビームを用いた連続げたの静的載荷試験
1981	橋 梁	自然休養村連絡路PC斜張橋の計画
	土木学会年次学術講演会	自然休養村連絡路やすらぎ橋の設計と施工
1982	橋梁と基礎	やすらぎ橋(PC斜張橋)の載荷試験について
	土木学会年次学術講演会	橋梁における合成構造の一例
1983	橋梁と基礎	やすらぎ橋の設計と施工
	橋 梁	鋼・コンクリート合成構造の汎用クリープ乾燥収縮解析
1984	土木学会年次学術講演会	合成構造橋梁の設計—モーゼル黄金橋について
	学会関西支部年次学術講演会	プレビーム工法による橋梁架設の可能性" 遠州鉄道・新川橋万年橋" の設計施工
1984	土木学会年次学術講演会	プレビームのブロック工法について
	学会関西支部年次学術講演会	鋼・コンクリート合成鋼床版の静的載荷実験について
	建築学会大会学術講演梗概集	プレビーム・ブロック桁の設計と施工
	橋梁と基礎	合成鋼床版の静的載荷実験 プレフレックスビームの耐荷特性に関する実験的研究 Tjorn新橋の耐風検討

発行年	掲 載 誌	タ イ ト ル
1985	土木学会年次学術講演会	16年間供用されたプレビーム合成げた橋の載荷試験 プレビームのブロック工法に関する実験的研究(続) 合成鋼床版の走行荷重による疲労試験 組合わせ応力を受けるスタッド付鋼板の疲労強度の一評価方法 複合構造橋梁の継手部の応力
		16年間供用されたプレビーム合成げた橋の載荷試験 プレビームブロック工法の実験的研究 プレビームを用いた下路式鉄道橋の工事報告 プレビーム床版の振動実験及び解析
	学会関西支部年次学術講演会	Application of Preflexed Composite Beams to Continuous Bridges 複合斜張橋(Tjorn新橋)の設計施工
	建築学会大会学術講演梗概集	16年間供用されたプレビーム合成桁の載荷試験(続) 合成床版のスタッドに作用するせん断力の評価方法について 複合構造桁の継手部の応力性状について特にくり返し荷重を受けた場合
	U.S./Japan Joint Seminar 橋梁と基礎	16年間供用されたプレビーム合成桁橋の供試体静的載荷試験 鋼・コンクリート合成鋼床版のずれ止め配置に関する研究 プレビームブロック工法について 鋼・コンクリート合成床版におけるスタッドの設計に関する基礎的研究
1986	土木学会年次学術講演会	ロックシェッドに合成構造を用いた場合の一考察
	学会関西支部年次学術講演会	プレビーム建築梁の設計と施工
	合成構造の活用に関するシンポジウム	合成鋼床版合成桁/田中橋の設計と施工
	落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシン ポジウム	Fatigue Strength of Tension Flange with Stud Shear Connectors
	プレストレストコンクリート 橋 梁 IABSE	16年間供用されたプレビーム合成桁の実物大疲労試験結果について(続) 走行荷重下における合成床版の疲労特性 第5公庄Bv(プレビームブロックげた)の間詰部解析 16年間供用されたプレビーム合成桁の実物大疲労試験結果について 合成床版の走行荷重による疲労試験(第2報) 第5公庄Bv.(プレビーム下路ブロックげた)の設計と施工
1987	土木学会年次学術講演会	合成鋼床版合成桁の設計と施工
	学会関西支部年次学術講演会	プレビームブロック桁の設計と施工
	九州橋梁構造工学研究会-土木構造材料論文集 橋梁と基礎	走行荷重下における鋼板・コンクリート合成床版の疲労特性に関する研究 プレビーム合成桁の残存応力について 回転せん断力を受けるスタッドの疲労特性 各種防錆処理鋼板とコンクリートの付着強度について 鋼・コンクリート合成床版の疲労強度 鋼コンクリート結合はりの曲げ強度試験
	土木学会年次学術講演会	合成床版の走行荷重による疲労試験
	学会関西支部年次学術講演会	ブロック工法を用いた下路プレビーム鉄道橋の設計・施工 大スパン床の防振-プレビームを使用した建物-
1988	構造工学論文集	鋼・コンクリート結合はりの曲げ強度実験
	土木学会年次学術講演会	プレキャスト床版を用いた合成桁斜張橋の設計について 合成逆アーチの実験的研究
	学会関西支部年次学術講演会	プレビーム合成桁の残存応力について 回転せん断力を受けるスタッドの疲労強度(その2)
	橋梁と基礎	プレビーム連続合成桁の設計と施工
	建築と社会	鋼・コンクリート連結はりの曲げおよびせん断強度実験 プレビームを用いたSRC構造の開発研究、繰り返し曲げモーメントを受けるプレビームの弾塑性 性状(その2) プレビームを用いたSRC構造の開発研究、繰り返し曲げモーメントを受けるプレビームの弾塑性 性状(その1)
1989	構造工学論文集	Field and Fullsize Laboratory Tests of First Built Pre-Beam Composite Girder Bridge in Japan
	土木学会年次学術講演会	鋼・コンクリート連結はりのせん断強度実験 合成桁斜張橋・プレキャスト床版の設計法とルーパ状重ね継手の耐久性に関する研究 プレキャスト床版を用いた合成桁斜張橋の施工について-(その1)張力調整によるプレストレス 導入- プレキャスト床版を用いた合成桁斜張橋の施工について-(その2)載荷試験、色彩計画、照明計 画-
	学会関西支部年次学術講演会	プレビーム合成桁のバーゼル溶接部の疲労強度試験について 回転せん断力を受けるスタッドの応力と疲労寿命との相関について
	合成構造の活用に関するシンポジウム	RCプレキャスト床版を用いた合成桁斜張橋における膨張コンクリートの使用について 生口橋主桁接合部の設計について
	建築学会大会学術講演梗概集	二上大橋上部工の施工 プレキャスト床版を用いた合成桁斜張橋における膨張コンクリートの使用について
1990	土木学会年次学術講演会	Ultimate Strength of Bonding of Composite Beams Fatigue Strength of Steel Plate-Concrete Composite Deck Segmental Prefabrication Method for Long Span Preflexed Beam
	コンクリート工学年次論文報告集	合成桁ずれ止めの水平伝達せん断力評価のための基礎実験 桁高の低いPC桁の開発
	橋梁と基礎	プレキャスト合成部材を用いたアーチ橋
	セメント工業	Study on Durability of a Cable-Stayed Composite Girder Bridge with Precast PC-Slabs
	IABSE	プレキャスト合成部材を用いたコンクリートアーチ橋 プレキャスト床版合成桁の乾燥収縮に伴うクリープ係数に関する実物大室内実験 プレファブビームの開発と静的曲げ試験結果について 圧縮側に補強鋼材を用いたPC桁 合成桁の負曲げモーメントによる残留回転角に関する研究
1992	土木学会年次学術講演会	
	PCの発展に関するシンポジウム 橋梁と基礎 Pacific Structural Steel Conference	
1993	土木学会年次学術講演会	

発行年	掲 載 誌	タ イ ト ル
1993	学会関西支部年次学術講演会	プレファブビームの開発および押し抜き試験
	鋼構造年次論文報告集	合成桁ずれ止めの水平せん断伝達性状に着目した実験的研究
	East Asia Pacific Conference on Structural Engineering and Construction	Construction of a Cable Composite Girder Bridge with Precast RC Slabs
1994	一般刊行物	複合構造橋梁
	土木学会年次学術講演会	プレファブビームのクリープ・乾燥収縮解析 外ケーブルを有する鋼コンクリート合成桁のクリープ・乾燥収縮解析 変形法を用いたクリープ・乾燥収縮解析の複合構造橋梁への適用例
	学会関西支部年次学術講演会	プレファブビームの長期挙動に関する解析と実験
	建築学会大会学術講演梗概集	遠心力成形CFT柱の施工試験（柱・梁仕口部と柱継手部の溶接熱測定試験）
	PCの発展に関するシンポジウム	圧縮鋼材を有するPC桁の疲労試験
	Association for international Cooperation and Research in Steel-Concrete Composite Structures	New Fabrication Method for Prestressed Concrete Encased Steel Beams
	Developments in Short and Medium Span Bridge Engineering	Segmental Prefabrication Methods For Preflexed Beam
	U.S./Japan Joint Seminar	Experimental Study Creep Coefficient Followed with Shrinkage of Concrete Steel Concrete Composite Girder Bridges
	UJNR US/Japan Bridge Workshop	New Type Hybrid Structure and Practical Analysis Method of Creep & Shrinkage
	土木学会論文集	プレキャスト床版合成桁橋の設計と施工
1995	土木学会年次学術講演会	プレビーム桁の外ケーブル補強に関する定着部押し抜き試験 ルーブ状継手を有するプレキャスト床版接合部の疲労耐久試験 鋼床版とRC床版の剛結接合構造に関する実験
	合成構造の活用に関するシンポジウム	外ケーブルによるプレビーム合成桁の補強方法の開発 限界状態設計法に基づく鋼・コンクリート合成床版設計指針（草案）について 鋼床版とRC床版の剛結接合構造に関する実験
	PCの発展に関するシンポジウム	頭付きスタッドを連結継手に用いたプレキャスト床版の静的挙動 ホロナイ川（鋼2径間連続2主桁橋）PRC床版の設計・計画その1 ホロナイ川（鋼2径間連続2主桁橋）PRC床版の設計・計画その2
	プレストレストコンクリート	圧縮鋼材を有するPC桁のせん断試験
	建設コンサルタンツ協会近畿支部業務研究発表会	プレキャスト合成パネルを用いたジオゼシックドームの施工-すみだ生涯学習センター- プレビーム橋のプレファブ化
	土木学会年次学術講演会	PC床版2主桁橋ホロナイ川橋の載荷試験 外ケーブルで補強したプレビーム合成桁の静的載荷試験 外ケーブルにより補強されたプレビーム合成桁の長期挙動に関する研究 外ケーブル定着部前面における鋼桁ウェブパネルの局部挙動と補剛に関する研究 第二東名神における少数主桁橋のスタッドと垂直補剛材上端部の応力性状に関する検討
	学会関西支部年次学術講演会	RC柱-鋼製梁複合橋脚の現場載荷試験 外ケーブルによるプレビーム桁の補強について 外ケーブル定着部前面における鋼桁ウェブパネルの局部挙動と補剛に関する研究
1996	PCの発展に関するシンポジウム	圧縮鋼材を有するPC桁のクリープ・乾燥収縮挙動について
プレストレストコンクリート	PC床版2主桁橋の設計・施工-ホロナイ川橋の床版施工- PC床版2主桁橋ホロナイ川橋の設計および解析・試験検討	
橋梁と基礎	PC床版2主桁橋ホロナイ川橋の現場施工	
橋 梁	中国の長大合成桁斜張橋の設計と施工-南浦大橋と楊浦大橋-	
Composite Construction III Conference Proceedings	プレファブ化したプレビーム橋（長田橋の計画と施工） STRENGTHENING METHOD OF PRE-BEAM COMPOSITE GIRDER BY OUTER CABLE SYSTEM	
1997	土木学会年次学術講演会	スラブ止めの静的水平せん断ずれ性状および疲労強度について 横リブで補強したロビンソン型合成床版の開発
	学会関西支部年次学術講演会	プレビーム合成桁の経年変化について
	PCの発展に関するシンポジウム	鋼トラスウェブPC梁の静的載荷試験
	建築学会大会学術講演梗概集	プレビーム合成梁の耐火性能（その1）載荷加熱実験の計画 /（その2）載荷加熱実験の結果
1998	構造工学論文集	押し抜きおよび桁試験によるスラブ止めの水平せん断ずれ性状と疲労強度の検討 鉄道用連続合成桁に用いるずれ止め構造のせん断特性に関する実験的研究
	土木学会年次学術講演会	鉄道複線2主 断面合成桁橋のずれ止め配置に関する解析的検討 鉄道橋への複線2主 断面合成桁橋の適用に関する解析的検討 30年間供用された連続合成桁橋の断面性能とシステム性能評価 鉄道用連続合成桁橋に適用されるずれ止めのせん断特性に関する実験的研究 プレビーム合成桁橋の外ケーブルによる連続化工法 鋼製・合成橋脚柱の塑性率、等価弾性耐荷力および卓越応答振動周期に関する調査・研究
	学会関西支部年次学術講演会	30年間供用されたプレストレスしない連続合成桁橋の性能評価 鋼製・合成橋脚柱の耐震設計を行うために必要な力学的パラメーターの調査・研究
	PCの発展に関するシンポジウム	頭付きスタッドを連結継手に用いたプレキャスト床版の耐久性に関する研究 鋼トラスウェブPC梁の長期挙動 高松大橋（仮称）の計画と設計
	鋼構造と橋に関するシンポジウム	連続合成桁への取組み
	鋼橋床版シンポジウム	鋼・コンクリート合成床版の開発と実橋への適用について 鋼道路橋に適用されるPC床版の現状と課題について
	鋼構造年次論文報告集	鋼製断面を用いた部分PC連続合成桁の曲げ性能に関する実験的研究
	橋梁と基礎	スペインにおけるユニークな鋼コンクリート混合形式橋梁
	Construction and Building Materials	New type hybrid structure and practical analysis method of creep and shrinkage
	Developments in Short and Medium Span Bridge Engineering	MODEL TEST OF A PRESTRESSED COMPOSITE BOX GIRDER WITH STEEL TRUSSED WEB