

波形鋼板ウェブ橋への取り組み

RESEARCH FOR PRESTRESSED CONCRETE GIRDERS WITH CORRUGATED STEEL WEBS

富本 信¹⁾
Makoto Tomimoto

辻本 敦亘²⁾
Atsunobu Tsujimoto

柴田 勝敏²⁾
Kastutoshi Shibata

土屋 誠²⁾
Makoto Tsuchiya

1. はじめに

橋梁の耐久性の向上と工費削減を目標として、新技術や新工法の開発が盛んに行われている。さらに、コスト縮減をめざした合理化・省力化の流れを受け、プレストレストコンクリート（以下 PC と略す）と鋼構造物が融合した複合構造物が脚光をあびている。その中でも、旧日本道路公団を中心にして、PC 橋のコンクリートウェブを波形鋼板ウェブに置き換えた波形鋼板ウェブ橋が多数施工されている。

本報告は、波形鋼板ウェブ橋の特色、当社における波形鋼板ウェブ橋への取り組み、継手構造の現状および当社の実績についてとりまとめたものである。

2. 波形鋼板ウェブ橋の特長¹⁾

波形鋼板ウェブ橋は、PC 箱桁橋のウェブを軽量の波形鋼板に置き換えたものである。すなわち、上下床版をコンクリート、ウェブに鋼板を使用した複合構造となっている。下記に波形鋼板ウェブ橋の特長を示す。

(1) 主桁自重の軽量化

PC 箱桁橋の自重の 2~3 割を占めていたコンクリートウェブを、軽量の波形鋼板にすることで、主桁自重の軽量化が図れる。上部構造を軽量化できることで、支間の長大化、下部構造にスレンダー化、上下部を含めたトータルコストの低減を図ることができる。

(2) 高いせん断抵抗性

鋼板を波形に加工して使用することにより、補剛材なしでも高いせん断耐力を得ることが可能となる。

(3) プレストレス導入効率の向上

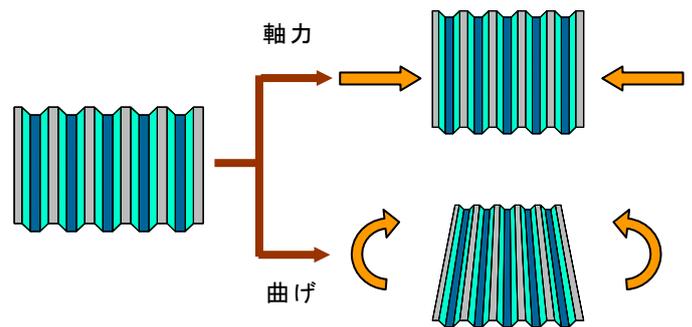
波形鋼板のアコーディオン効果により、コンクリート床版に効率よくプレストレスを導入できる。

(4) 施工の省力化

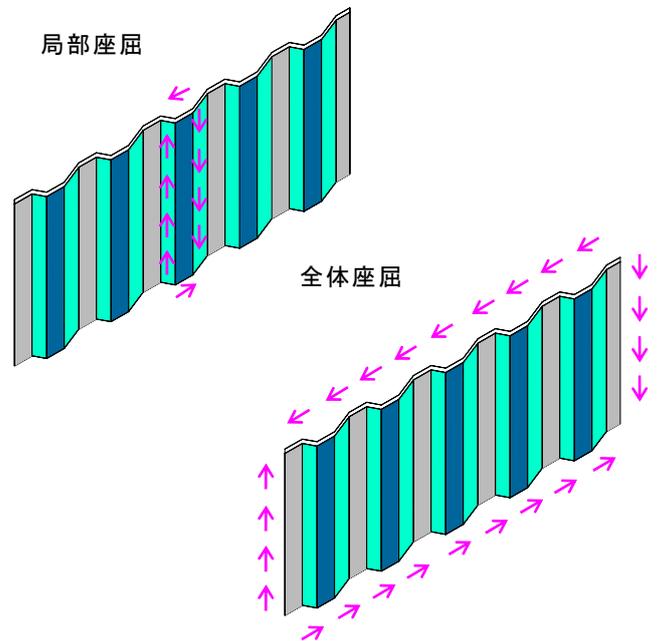
コンクリートウェブの施工が省略できるため、型枠組立、鉄筋組立などの現場作業が不要となり、施工の省力化が可能となる。また、型枠材が減少するため、環境への負荷を低減できる効果もある。

(5) 波形鋼板ウェブの性質

波形鋼板ウェブの性質を図-1 に示す。



(a) アコーディオン効果



(b) 高いせん断座屈耐力

図-1 波形鋼板ウェブの性質

1) 技術グループ 設計部 大阪チーム
2) 生産第二グループ 大阪工場 生産技術チーム

(6) 波形鋼板ウェブの挙動

波形鋼板ウェブに面内曲げモーメントが作用すると、図-2に示すように面外方向に変形しようとする挙動を呈す。そのような挙動を解明し、さらに波形鋼板の座屈や床版との接合方法の安全性および疲労耐久性についての検討が行われることとなった。

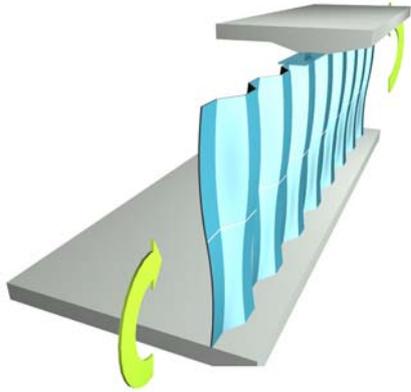


図-2 波形鋼板ウェブの挙動イメージ

3. 波形鋼板ウェブ橋への取り組み

3.1 波形鋼板ウェブ橋へのかかわり

1999年3月に旧日本道路公団本社が(財)高速道路技術センターに委託して、波形鋼板ウェブ複合橋の委員会が発足した。これは、前述の2.2にも示すように、PC箱桁橋の自重の2~3割を占めていたコンクリートウェブを軽量波形鋼板に置き換えることで、上下部工を含めた、トータルコストの低減が可能となると判断されたからである。しかし、旧日本道路公団としては、過去に数橋の実績はあるが、詳細にいたる検討を行わないうちに本格的な導入をすることはできなかったため、委員会を発足し、検討することとなった。

委員会での主な検討内容は下記の2点である。

- a) 波形鋼板ウェブの挙動の解析・検討
 - b) 波形鋼板ウェブ現場継手構造およびその疲労性能
- また、上記検討内容に関連して下記に示す実験が行われ、波形鋼板ウェブ座屈解析専用プログラムが開発された。

- ① 波形鋼板ウェブのせん断座屈実験
- ② 床版つき波形鋼板ウェブのせん断座屈実験
- ③ 波形鋼板ウェブ現場継手構造の要素疲労試験
- ④ 波形鋼板ウェブ現場継手構造の大型疲労試験
- ⑤ 波形鋼板ウェブの曲げ強度確認試験
- ⑥ 波形鋼板ウェブに関する弾塑性有限変位プログラムの開発

当社は、鋼橋メーカーの代表の一社として、本委員会に参画し、主に波形鋼板ウェブの挙動の解析方法の確立

とせん断座屈実験を担当した。委員会は、当時(財)高速道路技術センターの委員会「波形鋼板ウェブを有する鋼コンクリート複合構造橋梁の長支間化に伴う技術検討(委員長:京都大学大学院渡邊英一教授)」(開催当時の名称)として開催された。

3.2 波形鋼板ウェブのせん断耐力評価

(1) 弾塑性有限変位解析プログラムの開発²⁾³⁾

旧日本道路公団の指導の下、当社とJIPテクノサイエンス(株)との共同開発により、弾塑性有限変位解析プログラムJ-F-C-Pを開発した。その特長は、下記に示す通りである。

- ① 弾塑性有限変位解析により波形鋼板ウェブのせん断座屈強度を精度よく求めることができる。
- ② 波形鋼板ウェブの全体座屈、部分パネルの局部座屈、およびこれらの連成が考慮できる。
- ③ 初期不整(残留応力、初期たわみ)、鋼材の降伏、およびひずみ硬化が考慮できる。

(2) 各種実験によるプログラムの検証

① 波形鋼板ウェブのせん断座屈実験

波形鋼板ウェブのせん断座屈に至るまでの挙動は、弾塑性有限変位解析により精度良く評価できた。実験状況を写真-1に、荷重と鉛直たわみの関係の比較結果を図-3に示す。



写真-1 実験状況

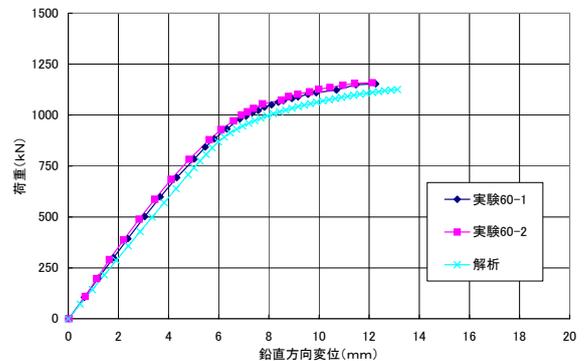


図-3 波形鋼板ウェブせん断座屈実験 (荷重と鉛直方向変位の関係)

② コンクリート床版を有する波形鋼板ウェブのせん断座屈実験

コンクリート床版を有する波形鋼板ウェブの座屈に至るまでの挙動も、弾塑性有限変位解析により精度良く評価できた。実験状況を写真-2に、荷重と鉛直たわみの比較結果を図-4に示す。



写真-2 実験状況

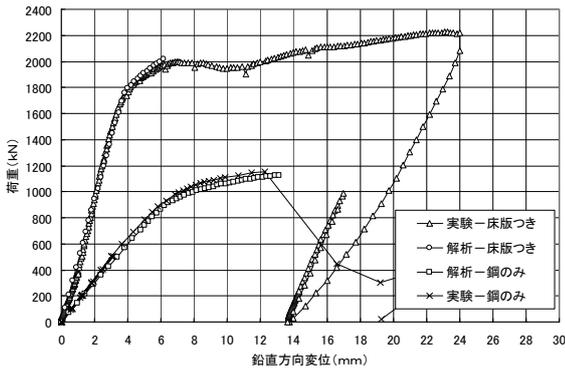


図-4 波形鋼板ウェブせん断座屈実験
(荷重と鉛直方向変位の関係)

3.3 波形鋼板ウェブの製作段階での取り組み

(1) 当社保有の 1000t プレスの活用

1969 年竣工の京都タワー製作時に導入した下記能力の 1000t プレスに左右のシリンダーの同調機能を加え、補修・補強を行い、今回波形鋼板ウェブの曲げ加工に用いることで、有効寸法 11m までの曲げ加工を可能とした。

- ・最大加圧能力： 1000t
- ・最大引上能力： 106t
- ・ストローク： 600 mm
- ・ディライト： 1800 mm
- ・ダイスペース： 1200 mm
- ・加圧速度： 200 mm/min
- ・引上速度： 1800 mm/min
- ・チェーンブロック： 3t

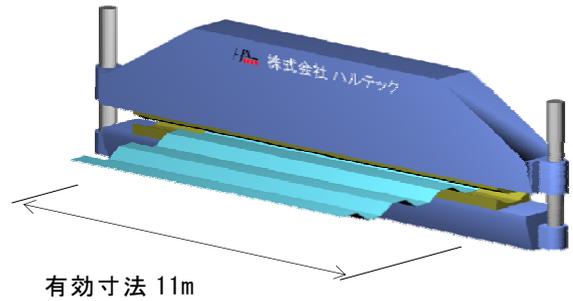


図-5 1000t プレスイメージ図

(2) 2つの曲げ加工法

当社における波形鋼板の曲げ加工法としては、次の 2つが挙げられる。

a) 金型曲げ (写真-3)

- ① プレスのヘッド部を解体し、金型を直接取り付け、一度に一山を施工するものである。
- ② 曲げ効率が良い反面、鋼板の引き込み量が多いため、波形の精度が悪い。
- ③ 鋼板長の長い製品の製作には可能であるが、桁高の高い橋梁では分割製作となり、水平継手が生じる(溶接施工が困難)。
- ④ 金型製作費が高価である。
- ⑤ 加工形状が一定でない場合には採用が困難



写真-3 金型曲げ

b) ブレーキ曲げ (写真-4, 5)

- ① 順次外側に折り曲げて、反転していくことで、パネルの製作をするものである。
- ② 曲げ効率は悪いが、曲げの精度を向上することが可能。
- ③ 鋼板長の長い製品の製作は、施工段階でプレス本体と干渉し製作が困難(3波長程度が最大寸法)
- ④ 桁高の高い部材も対応可能(板継施工が容易)。
- ⑤ 設備費が安価である。

したがって、当社での曲げ加工法は、「ブレーキ曲げ」を採用している。



写真-4 プレーキ曲げ 写真-5 専用金型

(3) プレーキ曲げにおける当社の曲げ能力

現時点で当社保有の曲げ治具より、下記に示す板厚 (t) とウェブ高 (h) の関係で製作可能である。また、治具を追加製作すれば、11m までの製作が可能となる。

- 22 mm ≥ t : R=154 用治具 (10m ≤ h)
 - 16 mm ≥ t : R=112 用治具 (8m ≤ h)
 - 14 mm ≥ t : R= 98 用治具 (6m ≤ h)
- 曲げ半径としては 7t 以上としている。

(4) 波形鋼板ウェブの品質における工夫

a) レーザー切断機の導入

当社では、切断に伴うひずみが無く、高精度で切断できるように、写真-6 に示すレーザー切断機 (主要能力: 有効切断幅は 3.5m, 有効切断長は 31m) を 2001 年に導入した。

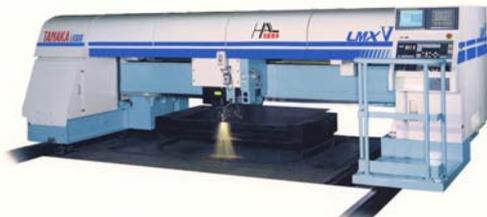


写真-6 レーザー切断機

また、このレーザー切断機の導入と前述の 1000t プレスの利用により、波形鋼板を高精度で切断・曲げ加工できることから、フランジと波形鋼板とをほぼ密着することが可能となった (図-6, 写真-7)。そこで、フランジと波形鋼板との密着性を規定では 1mm までの肌隙が許されているが、社内規格値として 0.5mm としている。

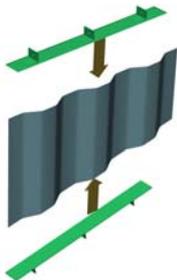


図-6 組立イメージ図



写真-7 密着状況写真

さらに、フランジの変形を少なくするために、波形鋼板との組立溶接が終わるまで、部材等の溶接を仮付溶接とし、組立後の本溶接としている。

b) 溶接姿勢の改善

フランジと波形鋼板との溶接部を均一化するために、波形鋼板ウェブを建てて下向き溶接とするなど、溶接姿勢の改善に努めている (写真-8)。

しかし、近年ウェブ高が高くなり、板厚も厚くなったことにより、フランジと波形鋼板のすみ肉溶接の脚長サイズが大きくなることで、不等脚長や溶接ビードの凹凸が現れやすくなる傾向にある。そこで、溶接品質を向上させるために、溶接技能者の指導を強化し、より一層の品質の向上を目指している。



写真-8 フランジとウェブの溶接状況

c) 塗装時の配慮

塗装の際には、水が溜まりやすく、ショットの付着が懸念されるため、波形鋼板ウェブを立てて、十分にショット材の付着を落とした後に塗装作業を行っている。

この時、一般的な鉄桁と異なり下フランジなどがない場合が多いため、写真-9 のような治具を用いることで波形鋼板ウェブを立てている。

さらに、波形の仮置きにおいても、水勾配に配慮して多少の高低差をつけて水が溜まり難くしている。さらに、耐候性鋼材の場合には、プライマーが塗布されている方が上になるように仮置きしている。



写真-9 波形鋼板ウェブの塗装状況

4. 継手構造について⁴⁾

4.1 床版と波形鋼板ウエブの継手構造

耐久性や接合部の一体性を向上させる目的で、施工初期においては図-7に示す、フランスで実績のあるアングルジベル接合構造を技術導入し、上下床版ともにアングルジベル接合の波形鋼板ウエブ橋が幅広く施工された。

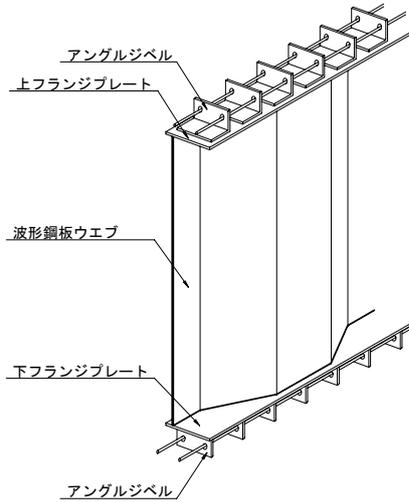
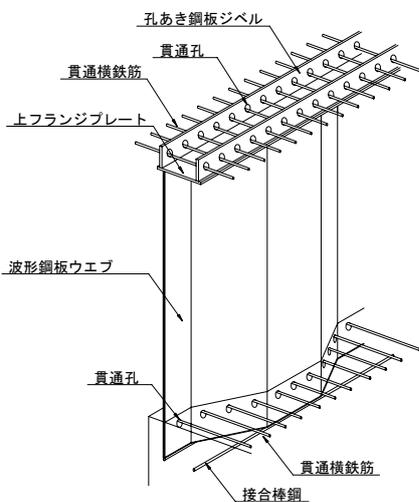
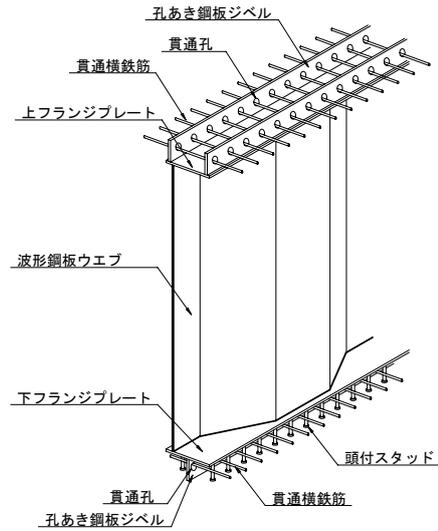


図-7 アングルジベル接合

2003年になって、図-8に示す孔あき鋼板ジベルを2枚ならべたツインパーフォボンドリブ (T-PBL) 接合方法が提案された。この接合方法は、アングルジベル接合同等の性能を有することが証明され。また、アングルジベルの場合より溶接量が減少するという観点からも、製作性、経済性にすぐれた接合法として、注目される構造である。なお、下床版は、埋め込み接合 (タイプ1) の場合と、シングルパーフォボンドリブ (S-PBL) 接合 (タイプ2) の場合の2種類が施工されている。



(a) タイプ1



(b) タイプ2

図-8 ツインパーフォボンドリブ接合 (T-PBL)

4.2 現場継手構造

波形鋼板ウエブは、基本的にせん断力のみ負担する構造のため、図-9に示すような、フランスで実績のあるすみ肉溶接による現場継手構造が採用された。また、スカールアップの構造についても、大型疲労試験による確認を経て採用された。

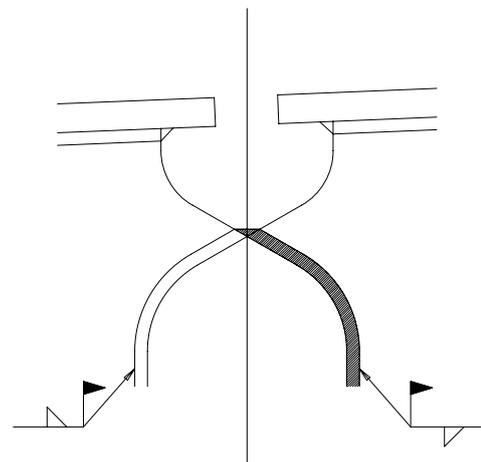


図-9 すみ肉溶接接合 (一例)

当初、3-ウェブ構造の中桁では使用されていた、図-10に示すような高力ボルト継手構造も、現場での管理の容易さより、溶接に代わって使用する橋梁も増加してきた。

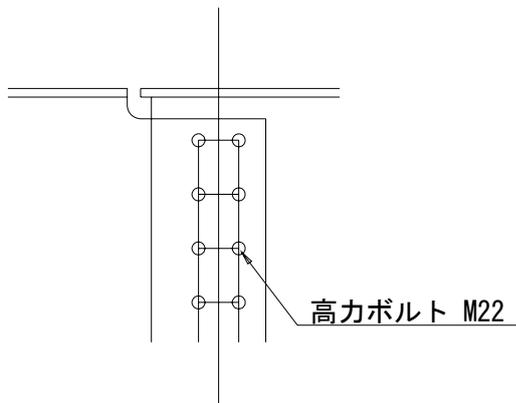


図-10 高力ボルト接合（一例）

4.3 新工法の採用

波形鋼板ウェブ橋は、通常、張出し架設工法で架設される場合が多いため、上記、4.2 に示すような、波形鋼板ウェブのみが接合されており、フランジプレート役割は、床版と波形鋼板ウェブの接合のために用いられている。しかし、最近では施工の合理化・省力化を含めたさらなるコストダウンを行うために、波形鋼板ウェブを先行架設し、その接合だけでなく、フランジを高力ボルト接合することで、波形鋼板ウェブの剛性を確保し、架設材として利用する橋も見られる⁵⁾。

4.4 ハルテックの実績

当社における波形鋼板ウェブ橋の実績を、次頁表-1 に示す。

5. おわりに

フランスで産声をあげた波形鋼板ウェブ橋が、日本で花が開いたとあってよいほど、日本中で建設されている。

当社における波形鋼板ウェブに関する技術は、旧日本道路公団が当初立ち上げた委員会に参画し、様々な実験や検討の場に立ち会ったため、当社の技術として吸収・発展させることができた。また、波形鋼板ウェブを製作する技術においても、当社が所有している 1000t プレス機を最大限に活用したため、公共工事における最大のニーズであるコストダウンにも貢献が可能となった。今後も、波形鋼板ウェブ橋の発展にさらに協力するとともに、今までご指導・ご尽力を頂いた渡邊京都大学名誉教授、旧日本道路公団および波形鋼板ウェブ橋に携わる会社の関係各位の皆様には、厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 角谷務：今後の PC 橋の将来展望＝波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋への展開＝，第 10 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，プレストレスト技術協会，特別講演 pp(7)～(15)，2001 年 1 月
- 2) 角谷務・青木圭一・富本信・狩野正人：波形鋼板ウェブのせん断耐力評価，プレストレストコンクリート Vol.43,No.1, pp.96～101, 2000 年 1 月
- 3) T.Kadotani,K.Aoki,K.Ashizuka,T.Mori,M.Tomimoto,and M.Kano:Shear Buckling Behavior of Prestressed Concrete Girders with Corrugated Steel Webs, The first fib Congress 2002,Concrete Structures in the 21st Century, Session 5,pp269～276,2002.10.
- 4) 角谷務・池田尚治：長支間を有する波形鋼板ウェブ PC 橋の波形鋼板とコンクリート床版の新しい接合構造について，プレストレストコンクリート Vol.45,No.3, pp.79～86, 2003 年 5 月
- 5) 村尾光弘・宮内秀敏・毛利俊彦・田中克典・佐川信之・西村公：信楽第七橋，津久見川橋の設計と施工，橋梁と基礎，pp.5～13, 2004 年 2 月

表-1 実績一覧表

橋梁名称	発注者	請負者	竣工年度	波高(mm)	床版定着構造		現場継手方法	ウェブ高x板厚(mm)	製作重量(ton)
					上側	下側			
小犬丸川橋	日本道路公団 関西支社 姫路工事事務所	住友建設・川田建設JV	2001年	220	L	L	すみ肉溶接	3600x16	238
大内山川第二橋	日本道路公団 中部支社 松阪工事事務所	大成建設・飛鳥建設JV	2002年	220	L	L	すみ肉溶接	4800x14	241
鍋田高架橋西工事	日本道路公団 中部支社 名古屋工事事務所	ピーエス三菱・ 富士ピーエスJV	2002年	220	L	L	すみ肉溶接	4584x22	251
中野工区PC桁	阪神高速道路公団	ピーエス三菱・ 川田建設JV	2002年	220	S-PBL+STUD	埋込	すみ肉溶接	3471x19 1684x22	180
粟谷川橋	日本道路公団 中国支社 津山工事事務所	富士ピーエス	2002年	220	L	L	すみ肉溶接	4500x16	331
谷川橋	群馬県	ドービー建設工業	2002年	170	T-PBL	STUD	高力ボルト	3000x10	32
第二上品野橋	日本道路公団 中部支社 岐阜工事事務所	富士ピーエス・ 日本高圧コンクリートJV	2004年	220	L	L	すみ肉溶接	3200x22	594
温海川橋	日本道路公団 東北支社 鶴岡工事事務所	ピーエス三菱	2004年	220	L	L	すみ肉溶接	2300x16	157
曾宇川橋	石川県	ピーエス三菱	2005年	100	埋込	埋込	高力ボルト	885x9	17
荒巻本沢橋	仙台市	ドービー建設工業	2006年	220	L	L	すみ肉溶接	2300x25 (SM570)	93
栗東橋	日本道路公団 関西支社 大津工事事務所	ピーエス三菱・ ピーシー橋梁・ ドービー建設工業JV	2006年	220	L	L	すみ肉溶接 高力ボルト	5580x18	2200
入野高架橋	中日本高速道路 横浜支社 静岡工事事務所	富士ピーエス・ 日本鋼弦コンクリートJV	2006年 施工中	220	T-PBL	埋込	すみ肉溶接	6000x16	270
刈屋橋	西日本高速道路 四国支社 高知工事事務所	ピーエス三菱・ SNCJV	2006年 施工中	220	T-PBL	S-PBL+STUD	高力ボルト	3588x16	195
伊佐布高架橋	中日本高速道路 横浜支社 清水工事事務所	ピーエス三菱・ 銭高組JV	2006年 施工中	330 220	T-PBL	埋込 S-PBL+STUD	すみ肉溶接	7177x16 1641x28	1007
長谷橋	西日本高速道路 九州支社 大分工事事務所	三井住友建設・ 鴻池組JV	2006年 施工中	220	L	埋込	高力ボルト	5700x18 3800x20	431
貝付橋	中日本高速道路 中部支社 岐阜工事事務所	昭和コンクリート	2006年 施工中	220	T-PBL	S-PBL+STUD	すみ肉溶接	5130x20	236
杉谷川橋	西日本高速道路 関西支社 大津工事事務所	ピーエス三菱・ コアツ工業JV	2006年 施工中	220	T-PBL	新工法	すみ肉溶接	5045x14	510
瀬戸石橋	西日本高速道路 九州支社 大分工事事務所	極東工業	2006年 施工中	220	T-PBL	埋込	高力ボルト	4354x12	180
谷津川橋	中日本高速道路 横浜支社 工事事務所	ドービー建設工業	2006年 施工中	220	T-PBL	埋込	すみ肉溶接	6650x14	500
上好間川橋	東日本高速道路 東北支社 いわき工事事務所	川田建設	2006年 施工中	220	T-PBL	埋込	高力ボルト	8000x16	90
高田川橋	西日本高速道路 九州支社 鹿児島工事事務所	大成建設	2006年 施工中	220	T-PBL	埋込	高力ボルト	7270x15	220

注記 S-PBL+STUD シングルパーフォボンドリブ+頭付きスタッド接合
T-PBL ツインパーフォボンドリブ接合
L アングルジベル接合
STUD 頭付きスタッド接合
波形鋼板材質 特記なき材質はSM490Y