川田グループの吊橋に対する取り組み

KAWADA Group's Endeavors for Suspension Bridge

内海　靖
川田工業㈱鋼構造事業部
副事業部長

畠中 真一
川田テクノロジーズ㈱技術研究所
主幹

米山　徹
川田工業㈱北陸事業部　事業部長

北村 正見
川田工業㈱鋼構造事業部四国工場
橋梁技術課　課長

田口 吉彦
川田工業㈱鋼構造事業部
東京工事部　部長

山野 長弘
川田テクノシステム㈱　社長

渡部 寛文
川田建設㈱　技術部技術課　課長

大澤 浩二
川田建設㈱　技術研究所　所長

1．はじめに

我が国の吊橋の建設は，本州四国連絡橋の建設に向けて様々な技術開発や実橋での施工試験を繰り返し行い，我が国独自の技術で長大吊橋の建設を可能としてきた。

国内の吊橋の全盛期は，世界最長の明石海峡大橋や本州四国連絡橋として最後となる来島海峡大橋が完成した2000年頃までで，2008年に完成した豊島大橋を最後に，10年近く長大吊橋の建設が行われておらず，今後の予定も見えない。このままでは，アメリカと同じ道をたどり技術力が衰退して行き，日本の企業だけでは吊橋の建設が出来なくなることが懸念される。

一方，海外に目を向けると中国，韓国，トルコなどでは，2000年以降に1 000mを超える長大吊橋を次々と建設し，現在では，長大吊橋のトップテンの大部分がこれらの国の橋梁が占めている。

ここにきて「下関北九州道路（第二関門橋）」は，建設に向けた調査を開始することが発表され，久しぶりに我が国での長大吊橋建設の可能性を感じさせる朗報であった。

このような社会環境の中で，川田グループがこれまでに行ってきた吊橋に対する取り組みを年表にして回想するとともに，解析･耐風設計･工場製作･架設ごとに整理･伝承することにした。なお，同封のDVDの中には，本特集の紙面で引用していない対外発表論文を含めて，全文献リストを収録したのでご参照願いたい。

2．全体年表

最初に川田グループが関わってきた吊橋を年表（**表1**）に整理した。また，**図1**には，川田グループが関与した代表的な吊橋の架設年代と最大支間長を比較した。

⑴ 黎明期[1, 2, 3]；1970年代以前

川田工業が最初に吊橋を架設したのは，1932年に完成した富山県の庄川に架かる橋長104 mの平橋である。残念ながら，1960年に上路トラス橋に架け替えられ，今では川の両岸に残された主塔のみが吊橋の面影を残している。川田の二橋目の吊橋が，同じ庄川に架かる1958年に完成した大渡橋（**写真1**）で，橋長104mの単径間上路式補剛トラス吊橋であり，こちらは約60年経過した現在でも現役で活躍している。この橋の補剛桁の架設

写真1　大渡橋（1958）

には，川田工業で開発した「プレストレス工法（**注1**）」を採用した。なお，本橋は，1991年に著しく損傷していたRC床版を鋼床版に取替えている。鋼床板は，走行性に配慮して連続化したため，主構トラスと鋼床版をシアコネクターで結合して合成する方式を採用した。

次に，1969年に完成した奈良県の八幡橋（中央径間160m，重橋床式吊橋（**注2**）（**写真2**））では，主ケーブルの架設方法として，当時，国内外ではA.S工法（エアースピニング）が主流で，施工中のニューポート橋（米国）で採用されたP.W.S（パラレルワイヤストランド）工法を我が国で最初に採用した。また，キャットウォーク無しでケーブルの架設を行った。P.W.S工法の適用にあたっては，本橋の施工記録などのデータや技術が，この後の本州四国連絡橋に大いに生かされた。また，八幡橋での吊橋架設技術が評価され，1973年に完成した関

（**注1**）プレストレス工法：前死荷重（完成状態に於いて補剛桁に死荷重応力を生じさせない死荷重）と後死荷重（完成後の補剛桁に応力を生じさせ，活荷重と同等の扱いをする荷重）を明確に区別して計算する方法で，本州四国連絡橋以降の吊橋ではあたりまえのように行われている。プレストレス工法は，大渡橋以降の美恵橋，西羽賀橋，市野橋などに適用している。

表1　川田グループが関与した吊橋年表

完成年度	橋　名	所在地	橋長(m)	支間長(m)	技術的特徴（○は川田グループが関与した項目を示す）						関与した川田グループ企業
					概　要	主ケーブル	主塔	補剛桁	解析計算	風洞試験	
1870(明3)	山里の吊橋	東京	73.0	73.0	皇居内に架けられた国内初の鉄製吊橋						
1928(昭3)	清洲橋	東京	186.2	91.4							
1932(昭7)	平橋	富山	104.0	104.0	川田工業が最初に架設した吊橋	○	○	○	○弾性理論		川工
1940(昭15)	タコマナロウズ橋	アメリカ	1524.0	853.4	※落橋事故により，風による振動と桁の剛性に関する認識が変化する転機となった。						
1958(昭33)	大渡橋	富山	104.0	104.0	「プレストレス工法」を開発し，最初に適用	○	○	○	○弾性理論		川工
1961(昭36)	美恵橋	岐阜	107.6	107.6	「プレストレス工法」により施工	○	○	○	○弾性理論		川工
1962(昭37)	市野橋	秋田	92.0	90.0	重橋床式吊橋，スプリング付きセンターステイを開発 「プレストレス工法」により施工	○	○	○重床	○弾性理論		川工
1962(昭37)	若戸大橋	福岡	680.2	367.0	国内最初の長大吊橋。						
1962(昭37)	西羽賀橋	福島	128.7	128.7	「プレストレス工法」により施工，コンクリート製主塔	○	○RC	○	○弾性理論		川工
1966(昭41)	セバーン橋	イギリス	1597.0	988.0	※補剛桁に流線型箱桁が，またケーブルシステムには斜めハンガーが採用され，設計思想に大きな影響を与えた。						
1968(昭43)	箱ヶ瀬橋	福井	266.0	206.0	本州四国連絡橋の実験橋						
1969(昭44)	八幡橋	奈良・京都	160.0	158.0	主ケーブルを PWS 工法で施工	○PWS	○	○重床	○LARGE		川工
1971(昭46)	上吉野川橋	高知	316.0	250.8	本州四国連絡橋の実験橋	PWS/AS					
1973(昭48)	関門橋	山口・福岡	1068.0	712.0		○PWS					川建
1975(昭50)	東大維橋	熊本	264.0	264.0	大ブロックによる直下吊架設	PWS					
1976(昭51)	上若生子大橋	福井	203.2	201.6	補剛トラスをブロックに組立て，直下吊り工法で施工	○PWS	○	○			川工
1976(昭51)	平戸大橋	長崎	709.0	465.4	大ブロックによる直下吊架設	○PWS	○	○	○LARGE		
1978(昭53)	マガビット吊橋	フィリピン	256.6	256.6	補剛トラスをブロックに組立て，直下吊り工法で施工	○PWS	○	○	○LARGE		川工
1983(昭58)	因島大橋	広島	1270.0	770.0	本州四国連絡として最初の吊橋	○PWS		○	○KASUS		川工，川建，KTS
1985(昭60)	大鳴門橋	兵庫・徳島	1629.0	876.3	片側のみ側塔を持つ構造	○PWS					川建
1987(昭62)	大島大橋	愛媛	840.0	560.0	初めて補剛桁に箱桁を採用し，直下吊り工法で施工						
1988(昭63)	南備讃瀬戸大橋	香川	1723.0	1100.0	道路・鉄道併用橋 補剛桁に初めて FC による大ブロック架設を採用	○PWS		○	○KASUS		川工，川建，KTS
1988(昭63)	北備讃瀬戸大橋	香川	1538.0	990.0		PWS			○KASUS		KTS
1988(昭63)	下津井瀬戸大橋	岡山・香川	1400.0	940.0	主ケーブルを A.S 工法で施工	○AS			○KASUS		川建，KTS
1988(昭63)	麻生大橋	福島	210.8	126.9	耐候性鋼材を使用，塔基部を固定にした重橋床式吊橋	○	○	○重床	○KASUS		川工
1989(平元)	浮島橋	群馬	68.5	68.5	主塔がない重橋床式吊橋，	○		○重床	○KASUS		川工
1990(平2)	此花大橋	大阪	540.0	300.0	世界最初のモノケーブル吊橋						
1993(平5)	レインボーブリッジ	東京	798.0	570.0	主塔にアクティブ型制振装置を使用	○PWS		○			川工，川建，KTS
1994(平6)	竜神大吊橋	茨城	446.0	375.0	当時，日本一の歩道橋						
1994(平6)	加茂ゆらりんこ橋	福岡	100.0	75.0	モノケーブル＋斜めハンガーの歩道橋	○	○	○	○KASUS		川工
1998(平10)	明石海峡大橋	兵庫	3911.0	1991.0	ヘリコプターによるパイロットロープ渡海	○PWS	○	○	○LADAN		川工，川建，KTS，東邦
1998(平10)	白鳥大橋	北海道	1380.0	720.0	両側に側塔を持つ構造，補剛桁をスイング工法で架設	○PWS		○			川工，川建
1998(平10)	東雲さくら橋	栃木	96.5	94.5	国内初の PC 吊橋，モノデュオ式ケーブル	○	○	○	○KASUS		川建
1998(平10)	もみじ谷大吊橋	栃木	320.0	320.0	観光目的の有料の人道橋	○	○	○	○LADAN	○	川工，KTS
1999(平11)	来島海峡第一大橋	愛媛	960.0	600.0	補剛桁（箱桁）を自航台船による直下吊り架設	○PWS		○	○LADAN		川工，川建，KTS，東邦
1999(平11)	来島海峡第二大橋	愛媛	1515.0	1020.0	補剛桁（箱桁）を自航台船による直下吊り架設	○PWS			○LADAN		川建，KTS，東邦
1999(平11)	来島海峡第三大橋	愛媛	1570.0	1030.0	補剛桁（箱桁）を自航台船による直下吊り架設	○PWS			○LADAN		川建，KTS，東邦
2000(平12)	安芸灘大橋	広島	1175.0	750.0	補剛桁（箱桁）を自航台船による直下吊り架設	PWS		○			川工
2000(平12)	イルティッシュ河橋	カザフスタン	1086.0	750.0	日本企業が建設，気温差が -50℃～ +50℃						
2000(平12)	永宗大橋	韓国	550.0	300.0	川工が技術支援	○AS	○	○	○LADAN		川工，KTS
2000(平12)	大日橋	栃木	75.0	73.0	PC 吊橋，コンクリート製主塔	○		○	○KASUS		川建
2001(平13)	南アルプス接咀大吊橋	静岡	240.0	160.0	人道橋，コンクリート主塔，補剛桁に鋼管を使用	○		○	○KASUS		川工
2002(平14)	大金吊り橋	栃木	97.0	95.0	PC 吊橋	○	○	○	○KASUS		川建
2003(平15)	ニューカルキネス橋	アメリカ	1056.0	728.0	日本企業が桁の製作						
2004(平16)	虚空蔵吊橋	青森	68.2	68.2	PC 吊橋，コンクリート製主塔	○		○	○KASUS		川建
2006(平18)	九重 " 夢 " 大吊橋	大分	435.0	390.0	観光目的の有料の人道橋で，当時，日本一	○	○	○	○LADAN	○	川工，川建，KTS，東邦
2007(平19)	新タコマナロウズ橋	アメリカ	1646.0	853.4	日本企業がケーブルと補剛桁製作と架設のエンジニアリングを行う	○AS		○			川工
2008(平20)	豊島大橋	広島	903.0	540.0	我が国最後の吊橋，ケーブルは AS 工法	○AS					川建
2009(平21)	鷺舞橋	神奈川	129.0	63.7	国内初の 1 面吊り曲線 PC 吊橋，DINA ケーブルを使用	○	○	○	○LADAN		川建，KTS
2015(平27)	箱根西麓・三島大吊橋	静岡	400.0	400.0	観光目的の有料の人道橋で日本一，民間資金で建設	○	○	○	○LADAN	○	川工，川建，KTS
2016(平28)	第３ボスポラス橋	トルコ	2164.0	1408.0	斜張吊橋，日本企業が関与						
2016(平28)	オスマンガーズィー橋	トルコ	2682.0	1550.0	日本企業が建設，イズミット湾横断橋	PWS					

黎明期

1973 四国工場完成

1992 風洞施設完成

全盛期

熟成期

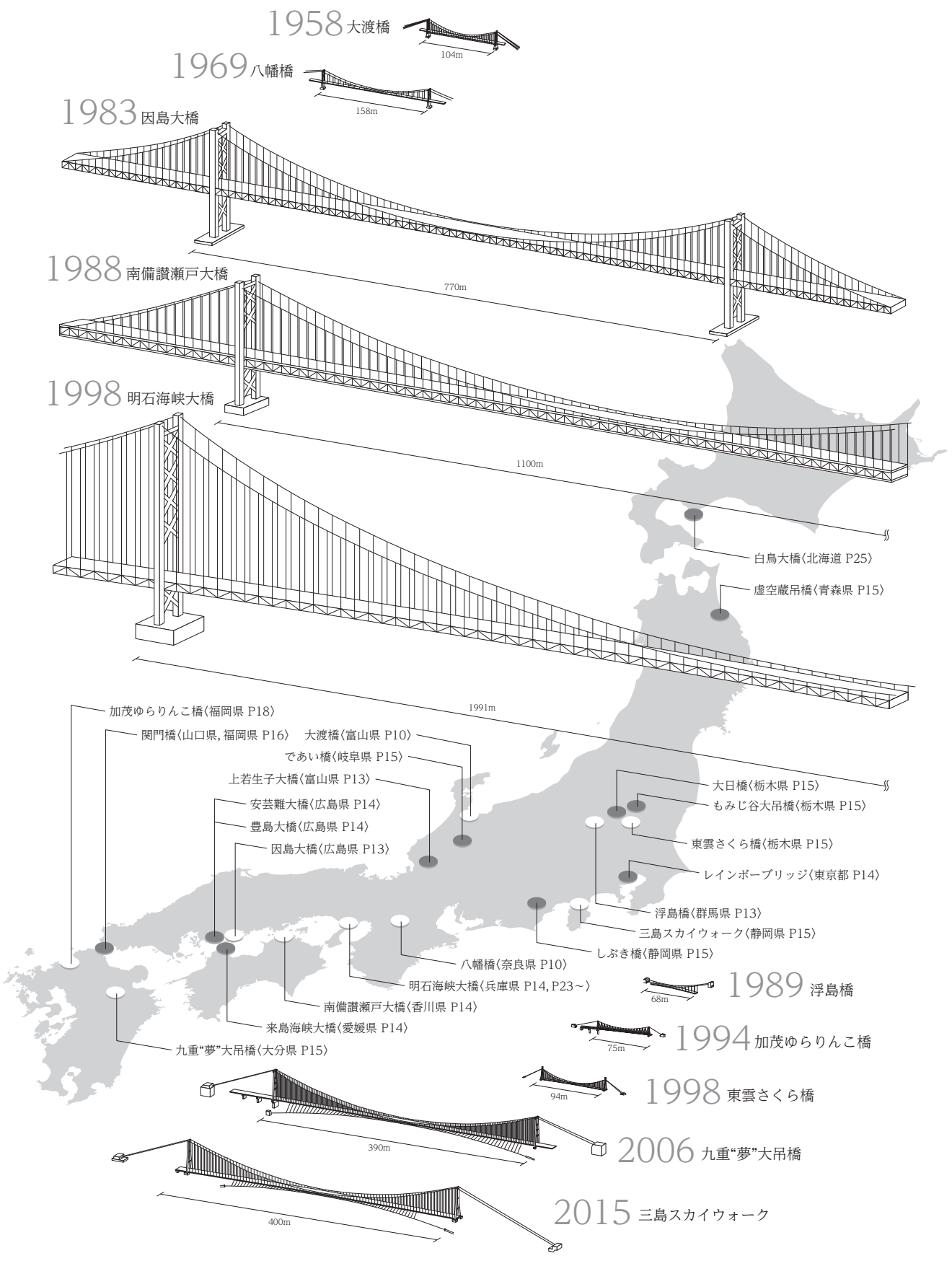


図１　吊橋の長大化（比較のため，同じ縮尺で描いてある）

門橋（中央径間 712m）のケーブル工事（新日鐵・神鋼共同企業体）に参画した。その後，福井県の上若生子大橋（中央径間 203m）（**写真３**）や日・比友好道路の一環をなすフィリピンのマガピット橋（中央径間 257m）（**写真４**）などの吊橋を架橋した。重橋床式吊橋は，前記の市野橋，八幡橋（**図２**）の他に，1988 年に完成した主塔基部を固定にし，耐候性鋼材を使用した福島県の麻生大橋（支間長 126.9m），1989 年に完成した主塔を設けずに主ケーブルを直接橋台に定着した群馬県の浮島橋など十数橋の実績がある。

写真２　八幡橋（1969）

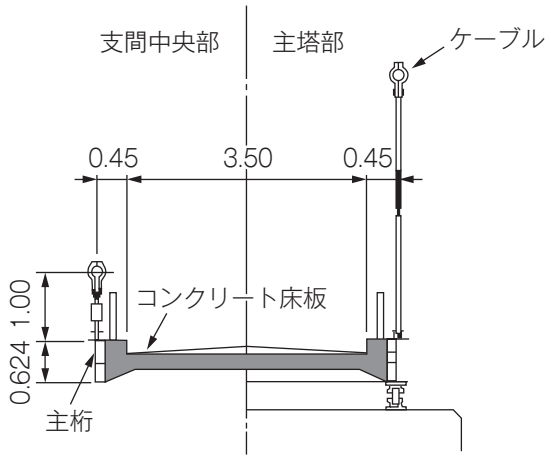


図２　重橋床式吊橋の桁断面の一例（八幡橋）

写真３　上若生子大橋（1976）

写真４　マガピット橋（1978）

⑵ 本州四国連絡橋全盛期；1980 ～ 1990 年代

1983 年に完成した本州四国連絡橋の最初の吊橋で，３径間２ヒンジ補剛トラス形式の因島大橋（中央径間 770m）（**写真５**）の補剛桁工事を川田工業が共同企業体の代表として施工した。補剛桁はトラス構造で，床版には我が国で初めて吊橋に鋼床版が，また，高力ボルトに防錆処理ボルトが採用された。補剛桁の架設は，両主塔から中央，橋台に向かって逐次剛結しながら張出し，ハンガー張力が超過するのと，ハンガーの引き込み力が大きくなって，桁に過大な応力が発生することを防ぐため，途中に架設ヒンジを１箇所設けた。本州四国連絡橋として最初の吊橋であったため，補剛桁架設途中に振動試験や応力計測を実施し，データ収集を行い，その後の長大吊橋の施工に活かされた。

また，川田建設がケーブル工事（P.W.S 工法，新日鐵・神鋼共同企業体）に参画した。

1981 年に川田建設が鉄道・道路併用橋で設計された大鳴門橋（中央径間 876m）のケーブル工事（P.W.S 工法，新日鐵・神鋼共同企業体）に参画した。

写真５　因島大橋（1983）

（**注２**）重橋床式吊橋[4]：吊橋の剛性は，補剛桁によるもののほかに死荷重が寄与する。重橋床式吊橋は，コンクリート床板によって，その死荷重を増加させ剛性を与えることを意図したもので，比較的支間長の長い中小吊橋に有利な形式である。

1983年に当時，我が国最長で，道路・鉄道併用橋で３径間連続補剛トラス形式の南備讃瀬戸大橋（中央径間1 100m）の補剛桁工事を川田工業が共同企業体の一員として施工した。補剛桁はトラス形式で，架設時の耐風安定を確保するため，架設先端数本のハンガー張力を調整し，架設ヒンジを設けない逐次剛結工法で行った。

また，同時期に川田建設が南備讃瀬戸大橋（P.W.S工法）と下津井瀬戸大橋（A.S工法，中央径間940m）のケーブル工事（新日鐵・神鋼共同企業体）に参画した。

川田テクノシステム（以下KTS）は，南備讃瀬戸大橋，北備讃瀬戸大橋（中央径間990m），下津井瀬戸大橋の補剛桁の設計計算業務を共同企業体から受託し，当グループで開発した吊橋設計支援システム「KASUS」を駆使して主構部材の設計断面力の計算を行った。

1993年に完成した東日本で初めての長大橋で３径間２ヒンジ補剛トラス形式のレインボーブリッジ（中央径間570m）の補剛桁工事を川田工業が共同企業体の一員として施工し，川田建設がケーブル工事（P.W.S工法，新日鐵・神鋼共同企業体）に参画した。

1998年に完成した補剛桁が箱桁形式の白鳥大橋（中央径間720m）の補剛桁工事を川田工業が共同企業体の一員として施工し，ケーブル工事（P.W.S工法，新日鐵・神鋼共同企業体）に参画した。補剛桁の架設は，箱桁の特徴を活かし，海上の台船から直接吊り上げる直下吊り工法で，仮設ヒンジで連結しながら行われた。

1998年に完成した世界最長の明石海峡大橋（中央径間1 991m）（**写真６**）では，川田工業として初めて主塔工事に共同企業体の一員として，補剛桁工事を共同企業体の代表として施工した。また，川田建設がケーブル工事（P.W.S工法，新日鐵・神鋼共同企業体）に参画した。KTSは補剛桁の設計計算業務を共同企業体から受託し，三次元有限変位プログラム「LADAN」などを駆使して補剛桁の設計断面力の計算を行った。

主ケーブルや主構トラスの材料には，死荷重の低減を目的に高張力鋼が多く採用された。また，主ケーブルのパイロットロープの渡海は，世界で初めてヘリコプタにより行われ，東邦航空と川田建設が参画した。

写真６　明石海峡大橋（1998）

1999年に完成した，３径間２ヒンジ補剛箱桁形式の来島海峡第一大橋（中央径間600m）（**写真７**）の補剛桁工事を川田工業が共同企業体の代表として施工した。また，川田建設が第一大橋，第二大橋，第三大橋のケーブル工事（P.W.S工法，新日鐵・神鋼共同企業体）に参画した。KTSは補剛桁の設計計算業務を共同企業体から受託し，三次元有限変位プログラム「LADAN」を駆使して，補剛桁の設計断面力の計算を行った。

補剛桁の架設は，新たに開発した自航台船を用いて直下吊り架設工法で行った。

2000年に完成した３径間２ヒンジ補剛箱桁形式の安芸灘大橋（中央径間750m）の補剛桁工事を川田工業が共同企業体の一員として施工した。補剛桁の架設は，来島海峡大橋で開発した自航台船を使用して直下吊り工法で行った。

写真７　来島海峡第一大橋（1999）

2007年に完成した３径間連続補剛トラス形式の新タコマナロウズ橋（中央径間853m）（**写真８**）では，共同企業体の一員として，主ケーブルおよび補剛桁の製作・輸送，現地工事のエンジニアリングを行った。

2008年に完成した３径間２ヒンジ補剛箱桁形式の豊島大橋（中央径間540m）のケーブル工事（A.S工法，新日鐵・神鋼共同企業体）に川田建設が参画した。

写真８　新タコマナロウズ橋（2007）

⑶ ポスト本四の技術熟成期：2000 年代以降

a）人道吊橋への挑戦

観光に力を入れる自治体が増える中，2000 年頃から周辺の観光名所を束ねる新たなランドマークとして特徴ある吊橋を建設し，集客スポットを創造する試みがなされ，現実に観光客の誘致に成功している。川田工業は幸いにも 1998 年から 2015 年にかけて 3 度にわたり日本一の人道吊橋のプロジェクトに参加してきた。

1998 年に完成した「もみじ谷大吊橋」（**写真９**）は，栃木県那須塩原のダム湖にかかる支間長 320m の吊橋であり，川田工業は耐風検討と上部工の架設工事に携わった。観光目的の有料の橋であり，建設当時，無補剛形式の人道吊橋としては日本一の支間長であった。那須塩原は古くからの温泉地であり，関東エリアからのマイカー客やバスツアー，大自然に囲まれたアウトドアな環境を求めて今なお観光客が絶えない。

写真９　もみじ谷大吊橋（1998）

2006 年完成した「九重 " 夢 " 大吊橋」は，大分県九重町にかかる支間長 390m の人道吊橋で，耐風検討と上下部工の架設工事に携わり，日本一の支間長を更新した。九重町には，四季の景色の移り変わりの美しい鳴子川渓谷や，日本の滝百選にも選ばれた「震動の滝」があり，吊橋を渡ることでこれらの絶景を一望できる。橋から谷底までの 173m の落差と，777m という標高の高さは今なお日本一であり，近隣の別府や湯布院などとともに大分の観光名所となっている。

2015 年には，静岡県三島市内にて，支間長 400m の「箱根西麓・三島大吊橋」（**写真 10**）が完成し，日本一の支間長をさらに伸ばした。本橋は三島市内の民間企業，株式会社フジコーが発起し，観光目的に建設された有料の吊橋であり，「三島スカイウォーク」の愛称で親しまれている。吊橋からは富士山と駿河湾を同時に展望でき，箱根や伊豆から少し足を伸ばせば立ち寄れる優れた立地ということもあり，開通からわずか 9 ヶ月で観光客を 100 万人以上集めたことでも話題になった。川田工業は，それまでの大型人道吊橋の実績を認められ，耐風検討と上下部工の架設工事に携わることができた。

写真 10　箱根西麓・三島大吊橋（2015）

橋は隔たれた二つの地点を結ぶものであり，社寺などにおいては古くから象徴的な含みを持たせる例も多い。中でも人道吊橋は，谷底からの高さや揺れに対する程良いスリル感も相まって非日常的な印象を醸しており，観光地とはとても相性のよい構造物である。日本一長いというだけではない，地域の魅力と一体となって，末永く観光スポットとして地域に守られ続けられるのも，吊橋ならでは役割だと思われる。

b）PC 吊橋への挑戦[5, 6, 7]

PC 吊橋は，常に圧縮力が作用する主塔にコンクリートを使用し，補剛桁をプレキャスト PC 桁とすることで，死荷重が増え（質量付加）ケーブル剛性が高まり，振動を抑える特徴を有する形式である。

1998 年に日本で初めて川田建設が PC 吊橋の東雲さくら橋（橋長 96.5m）を完成させ，その後，2000 年に大日橋（橋長 75m）（**写真 11**），2002 年に大金吊り橋（橋長 97.0m），2004 年に虚空蔵吊橋（橋長 68.2m），2009 年に鷺舞橋（橋長 129m）を完成させている。

また，吊床版橋として，1993 年にであい橋（橋長 107m），1999 年にしぶき橋（橋長 114m）を完成している。

PC 吊橋は重橋床式吊橋と同じ構造であり，西羽賀橋の RC 塔，市野橋のコンクリート製の桁（床版）や付加質量吊橋などの技術や経験がこれらの PC 吊橋の建設に大いに役立った。

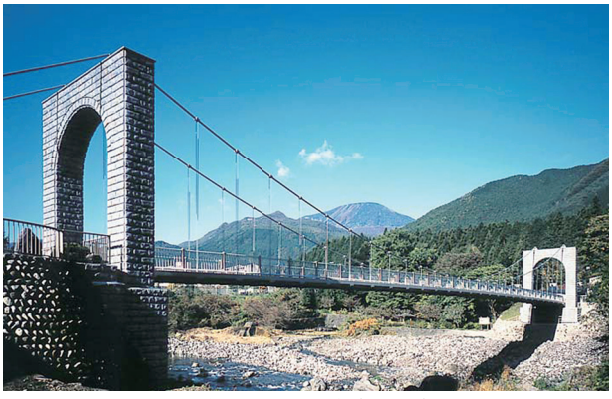


写真 11　大日橋（2000）

3．吊橋の解析

(1) 吊橋の解析に関する研究開発 [2, 3, 8, 9]

骨組構造物としての解析プログラムは，1967 年にブロットン法によるプログラムを開発し，関門橋の「補剛桁の製作・運搬・架設に関する施工計画」の中で，架設計算に使用している。また，本プログラムは，八幡橋の架設計算にも使用した。1969 年には，当時の業界では画期的な有限変位理論による解析プログラム（LARGE）を完成させ，関門橋のキャットウォークの解析に適用した。

1982 年には，補剛桁をトラスにモデル化した大容量の解析が可能な有限変位理論による面内解析プログラム [10]「KASUS（面内）」が完成し，因島大橋の補剛桁架設時の形状管理に適用した。さらに，影響線解析の機能を加えるとともに，ケーブル張力の剛性を考慮した線形化有限変位理論による面外およびねじれ解析プログラム「KASUS（面外）」を完成させ，瀬戸大橋の設計業務に使用した。また，KASUS には，汎用構造解析システムには無い，主ケーブルの二次応力の影響や架設時に一次的に圧縮になるケーブル部材（非抗圧部材）など吊橋の解析に必要な機能を付加した。

長大吊橋の主ケーブルは，大径断面となり表面温度と内部温度に差が生じ，精度良く形状管理を行うためにはケーブル内部温度をより精度良く推定する必要があり，「有限要素法による非定常温度応答解析法」を用いた解析プログラムを開発し，因島大橋の補剛桁架設時の形状管理に適用した。

1990 年代に入ると，コンピュータの発達と相まって低コストで精度の高い構造計算が求められるようになった。そのニーズに応えるべく，1993 年にはトラス構造を間接的な構造モデル（魚骨モデル）に置換せず，実際の挙動を忠実に再現可能な三次元有限変位解析システム [11]（LADAN）を開発した。本システムは，明石海峡大橋以降の吊橋の設計や架設計算に数多く適用された。

(2) 吊橋設計用解析プログラムの変遷

吊橋を設計する場合の解析理論として，吊橋面内に対しては撓度（とうど）理論が用いられ，面外やねじれ解析に対しては膜理論などが用いられる。川田工業では 1970 年頃に同理論による解析プログラムを整備し，多くの吊橋の設計に用いられた。なお，撓度理論は，有限変位理論より簡単に計算ができ，解析結果の差が 15% 以下と小さいため，現在でも基本設計などに十分通用する。

因島大橋の補剛桁の設計では，ケーブル張力の剛性を考慮した線形化有限変位理論での影響線解析，有限変位理論による固定荷重による検証が行われた。また，解析モデルは，面内および面外に分け，トラスを梁に置換し

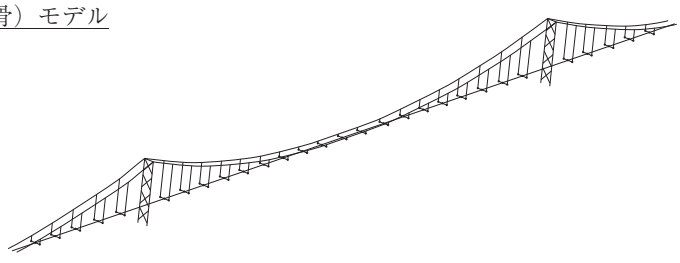
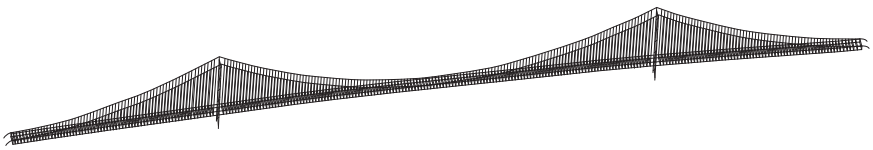
解析コード	解析モデル
撓度（膜）理論	
有限変位理論 【LARGE】 【KASUS】	二次元梁モデル
有限変位理論 【KASUS】	二次元トラスモデル
線形化有限変位理論 【KASUS】 有限変位理論 【LADAN】	三次元梁（魚骨）モデル 
有限変位理論 【LADAN】	三次元トラスモデル 

図３　吊橋の全体解析モデル

た二次元の骨組みモデルで行われた。

瀬戸大橋では，面内を有限変位理論（二次元のトラスモデル），面外およびねじれを線形化有限変位理論（三次元の魚骨モデル）での影響線解析などが行われた。

明石海峡大橋では，三次元トラスモデルで有限変位理論により，面内，面外およびねじれの影響線解析が行われた。明石海峡大橋以降は，三次元の有限変位理論により設計断面力を計算するのが主流となってきた。

図３に全体解析のモデルを示す。

⑶ 三次元有限変位理論による解析プログラムの開発

ａ）LADAN の開発経緯

吊構造物設計支援システムとしての LADAN の開発は 1989 年 12 月，長岡技術科学大学の林正教授（当時）のご指導のもと始まった。明石海峡大橋の施工を数年後に控え，補剛桁をトラス構造のまま三次元モデルで解析できる解析システムを開発しようという川田グループの挑戦であった。また，三次元モデルによる解析は，吊橋の長大化に伴い，実橋に忠実なモデルによって，構造物の挙動における不確定要素を可能な限り排除したいという設計者からの要請もあった。

ｂ）LADAN の機能概要

LADAN は，一般の汎用構造解析システムと同等の解析機能の他に，実際の部材特性を忠実にモデル化するために開発した特殊要素等を実装した解析コア部，吊橋特有の機能（初期形状解析と架設解体計算），および膨大な入出力データを扱うための前後処理システムによって構成される吊構造物設計支援システムである。

特に中核を成す解析システムは立体有限変位理論を基礎とし，有限回転を厳密に扱った座標変換とこれから導かれる非線形剛性行列とが組み込まれているため，解の収束安定性に優れている。

また，特殊要素は，架設時に設置される固有の機能を有する部材や架設設備を忠実にモデル化するためのものである。特殊要素としては，剛比を無限大とする場合の収束性を高めるための独立剛体要素と従属剛体要素，部材軸力に許容軸力の上下限値を設定し，軸力がその数値を超える場合には自動的に部材が除去される緩衝要素，一定遊間（間隙）を越えると接触する間隙要素や接触要素がある。これらの特殊要素によって，リンク構造部，ハンガーロープや補剛桁架設時の耐風対策ロープ等の非抗圧部材，ウィンドタングなどについて，実際の構造機能のままにモデル化することができる。

ｃ）LADAN の適用事例

最初の適用は，1993 年の明石海峡大橋補剛桁詳細設計における設計断面力算出のための全体解析，および架設計算である。また，同時期に架設管理・形状管理システム[12]開発も共同企業体から受託した。このシステムは，当時，最先端のグラフィカルユーザインターフェースを駆使し，特殊かつ多大な労力を要する非線形構造解析手順を簡易化し，一般の設計者がこのシステムを運用する場合でも効率よく解析作業ができるよう配慮した。なお，1995 年には，明石海峡大橋地震後検討業務を共同企業体から受託し，地震による橋脚，主塔位置の移動によって生じた吊橋全体の形状変化を考慮した形状決定（ハンガー定着部の移動），および地震による影響評価を行った。

1993 年には，来島海峡第一大橋，第二大橋，第三大橋の主塔詳細設計における全体解析，固有値解析を各共同企業体から受託した。このうち，来島海峡第一大橋，第二大橋については，1996 年に補剛桁詳細設計における全体解析と架設計算および架設管理システムと形状管理システムの開発を共同企業体から受託した。なお，来島海峡第一大橋では，後死荷重を考慮した初期形状解析を行った。

1997 年には，本格的なモノデュオ形式吊橋の永宗大橋（韓国）の初期形状決定と架設計算に使用された。

LADAN は吊材が斜めに配置される吊橋，また斜張橋やアーチにも適用可能である。この他にも，九重“夢”大吊橋，三島スカイウォークなどの人道吊橋にも使用され，これまで多数の吊形式橋梁に使用されてきた実用性，応用性の高い解析システムである。

４．耐風設計[8,9]

長大吊橋は，死荷重の占める比率が極めて大きく，施工可能な支間長は，最新技術におけるケーブルの材料強度に依存するという状況にある。規模が大きくなれば，風を受ける面積もおのずと大きくなり，長大吊橋における支配的な荷重は風力であることも事実であり，明石海峡大橋の主構トラスの大部分は風荷重で断面が決定されている。

吊橋は，そのフレキシブルな構造の故に，風やその他の荷重により比較的大きな変形を生じやすく，ケーブルの静的な水平変形として大きな変形量が予想されても強度的には殆ど問題がない。横風への抵抗力としては，長大橋では補剛桁の剛性と自重であり，中小規模の吊橋で

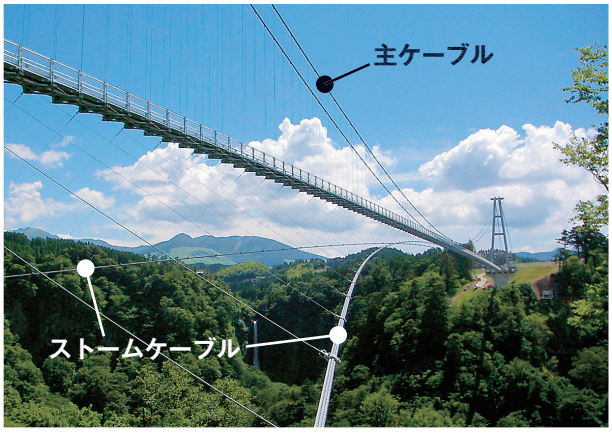


写真 12　九重＂夢＂大吊橋（2006）

は耐風索（ストームケーブル）を追加することで，変形を抑制する場合が多い。**写真 12** に示す「九重 " 夢 " 大吊橋」のストームケーブルは，主ケーブルとバランスして桁の変位を安定させる働きをしている。

しかしながら動的な現象，すなわち，風によって振動が発生する場合には注意が必要であり，使用性や疲労に対する耐久性の観点から許容を越えるような振動現象が予想される場合には，何らかの制振対策を施す必要がある。橋梁の動的な挙動の原因と対策に関する研究は，1940 年に旧タコマナロウズ橋[13]が風による振動で崩落した事故をきっかけに急速に進展した。

風による振動の対策方法としては，構造物の剛性を増加させるなどして振動が始まる風速を高める方法（構造力学的対策）や，風を乱さない翼状の断面の採用や断面周辺の気流を強制的に補正するフラップの採用，あるいは風の力を受けにくいネット状のグレーチング構造を使用する方法（空気力学的対策）など，いくつもの対策が提案されており，これらと制振装置を組み合わせるなどして，風に強い吊橋を作る技術が整備･実用化されてきた。

長大吊橋の場合には，ギャロッピングやねじれフラッターと呼ばれる発散振動に加え，これらが複合的に発生する連成フラッターなど，他の形式の橋梁ではさほど問題とされなかった破壊的な振動現象の発生も予想されている。ここでは吊橋の構造特性を活かし，吊橋に特化して提案されている制振方法について紹介する。

⑴ 吊橋特有の耐風性向上対策

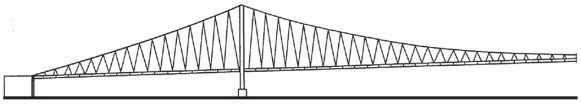
a）ケーブルシステム

吊橋はもともと，谷などで隔たれた 2 地点をたわんだロープで結び，たわみの影響を解消するように長さを調整したハンガーロープで歩廊（補剛桁）を吊り下げた構造である。この発想起源からすれば，歩廊を吊り下げるハンガーロープは，鉛直に垂らすのが基本の形状だと言える。しかしながら，鉛直のハンガーロープでは水平方向の変位に抵抗することができないため，補剛桁の遊動円木振動や，面外振動に対しては無抵抗となる弱点があった。このような点を改良するために，ハンガーロープを斜めに設置する構造が提案（**図 4 (a)**）され，最初にイギリスのセバーン橋で採用された。[14]

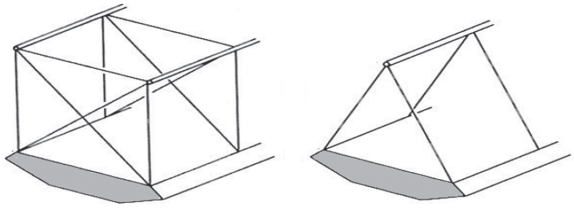
斜めハンガー方式では，補剛桁の自重のみならず水平荷重によりハンガーロープに張力が発生し，振動抑制や水平変位に抵抗できることが実証されたものの，活（交通）荷重や風，温度荷重による張力変動に関する検討が極めて複雑であったことから，施工と補修・補強の試行錯誤の時期がしばらく続いた。やがてコンピュータが高性能化してくると，解析技術の進歩とともに前述の LADAN などの解析コードを用いて複雑な構造解析ができるようになり，現在では，耐久性の高い合理的な斜めケーブル形式吊橋の適切な製作や管理について，設計できる技術が確立されていると言える。

このような，主ケーブルやハンガーロープを斜めに設置して構造特性の改良を図る手法をケーブルシステムの改良と呼んでいる。代表的な例としては，2 本の主ケーブルから下がったハンガーロープを路面上空で交差させて設置する「クロスハンガー（**図 4 (b)**）」システム，1 本の主ケーブルから桁の両側へ向けてハンガーを設置する「モノケーブル（**図 4 (c)**）」システムが提案されている。モノケーブル方式と斜めハンガー方式を併用した「モノケーブルダイアゴナルハンガー」方式は実際に加茂ゆらりんこ橋で適用されている[15]。

未来の超長大橋構想では，支間長 3 000m を越える吊橋の検討[16]がなされているが，部分的にクロスハンガーを設置した構造補強案も多数挙げられている。



（a）斜めハンガー



（b）クロスハンガー　　（c）モノケーブル

図 4　耐風効果を考慮したケーブルシステム

b）質量付加方式

死荷重が増加すると，ケーブルシステム全体の張力が増加する。大きな張力の作用したケーブルは，変形に対する復元力も大きいことから，構造物全体として剛性を増加させた場合と同様の挙動を示すようになる。すなわち，耐風挙動を安定化させる効果を発揮する。このような考え方に基づき，極端な強風が予想される場合に，一時的な荷重を載荷して耐風安定性を確保するのが，暴風時質量付加型吊橋[17]である。

耐風設計における照査風速は，観測データの統計値を元に種々の要因を勘案して算出されるが，個別の最大風速の発現時期をピックアップすると，大型台風の襲来時に一致する。昨今の気象観測技術の進歩から，台風の襲来は数日前から正確に予測できるようになっており，暴風となる時間帯に限って補剛桁内への重量物の積載（**図 5**）や，桁内のタンクに水を注入するなどして，対策を取ることができる。

荷重の大きさは施工時に許容される一時的な割増応力の範囲内とするなど，いくつかの基準となる考え方を明

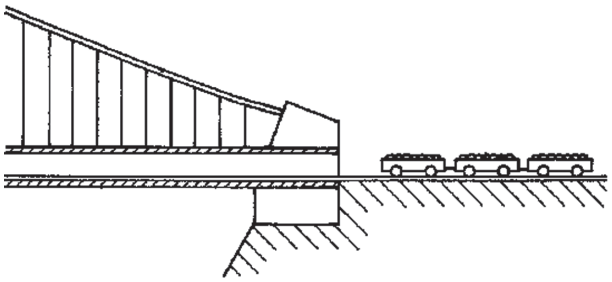


図５　トロッコを使用した質量付加案

確にする必要があるが，実現されればより合理的な設計ができるようになり，建設費用も削減できると試算されている。

⑵ 川田における耐風検討

ａ）風洞設備

川田工業では，橋梁技術への貢献を目的に 1992 年に風洞施設を導入し，橋梁をはじめとした各種の構造物の性能確認や安全確保に貢献してきた。一台の送風機から開放型と境界層型の２種類の測定洞に分岐できる独特の構造を有し，橋梁風洞として使用する境界層型測定洞（閉鎖型測定洞）（**写真 13**，**図６**，**表２**）の断面寸法は，幅 2.0m ×高さ 2.5m で最大風速は毎秒 45m である。橋梁試験用としては，バネ支持試験装置や三分力天秤を具備しており，風の流れを可視化するための発煙装置や可視化動画から風速分布を解析する PIV（Particle Image Velocimetry= 粒子画像流速測定法）も利用できる。

写真 13　多目的風洞施設の外観

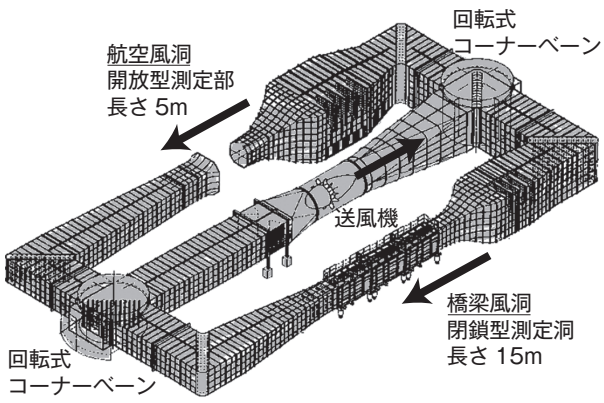


図６　多目的風洞施設の風路構成

表２　橋梁風洞の主要な仕様

項　目	仕　様
形式	水平回流式ゲッチンゲン型 エッフェル型としての使用も可能
測定部断面	幅 2.0m× 高さ 2.5m
風速範囲	0.2 ～ 45 m/s（時速 160 km）
分布偏差	±0.6% 以内
乱れ強さ	0.3% 以内
縮流比	6.0
バネ支持装置	標準模型長：1620mm 設定迎角：±30° 以内
加振減衰装置（２台）	最大加振力：30N/1 台 周波数範囲：0.1 ～ 50Hz ストローク：125mm（peak-peak）
静的空気力測定	３分力天秤（２次元試験用）
動的圧力測定	48ch 高速スキャニング圧力計
風速測定装置	超音波式風速計
その他	可視化用発煙装置 乱流格子（固定幅タイプ × ３種類）

ｂ）風洞試験実績

川田工業が直接関わって実施した耐風検討の中から，吊橋に関する実績の例としては，次のような事例がある。

耐風性および経済性に優れた超長大橋の開発

1990 年代には，２ 500 ～３ 000m 級の超長大吊橋の実現化に向けた研究開発が盛んに行われており，当時の土木研究所，本州四国連絡橋公団，土木研究センターおよび民間企業８社による共同研究として，「耐フラッター性の向上」を目標に掲げた研究開発を行った。土木研究所に設置されていた幅 41m（世界最大）の大型風洞試験施設に，長さ 40m の全橋模型を設置した大規模な実験に並行して，川田工業の風洞施設においても**写真 14** に示すような補剛桁の部分模型を製作し，グレーチングやその他の耐風付加物の効果について詳細な検討が進められた[18)]。

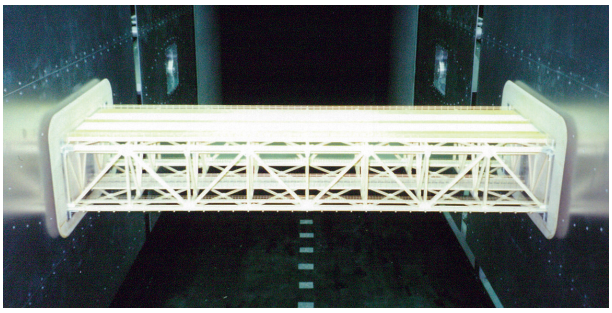


写真 14　超長大吊橋補剛トラス風洞模型

経済性を考慮した超長大橋の耐風設計法に関する共同研究

2000 年代には，明石海峡大橋を上回る規模の新形式橋梁の設計に向けた検討として，斜張吊橋の耐風性と構造特性に関する研究開発が（独）土木研究所，本州四国連絡橋公団，（財）土木研究センター，（財）海洋架橋・橋梁調査会および民間企業９社による共同研究として行われ，川田工業もこのプロジェクトに参画した。

斜張吊橋は，吊橋と斜張橋を併用したケーブルシステムを持つ構造であり，**図7**のように主塔近傍の桁は斜張ケーブルで支持され，支間中央部は主ケーブルから懸垂したハンガーロープで支持される。各種解析による検討が行われ，斜張橋と吊橋区間の比率や，より構造特性の優れた桁形状の提案がなされた。机上検討に加え，1/125 縮尺模型（全長 40m）を使用した風洞試験が実施され，経済性や耐風性の観点から「一箱／二箱併用」と呼ばれる桁形状の有効性が確認された。詳しくは，文献19）などを参照されたい。

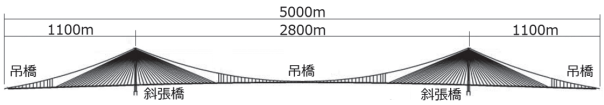


図7　斜張吊橋の検討モデル橋 [19]

アドベンチャーブリッジ（八幡山公園吊橋）

1998 年に栃木県宇都宮市内の公園内に架設された 150m の人道橋（**写真 15**）であり，主ケーブルの上に鋼製床版を載せた「鋼製吊床版橋」の形式となっている。渦励振やギャロッピング振動を抑制するために，適切なフェアリングの形状が検討された [20]。

写真 15　アドベンチャーブリッジ（1998）

もみじ谷大吊橋

もみじ谷大吊橋（**写真9**）の耐風検討では，ねじれフラッター振動を抑制して安全性を確保するための床版中央のグレーチングのサイズを決定するための風洞試験を行った。桁下はダムの水面であり落下物の懸念や，恐怖感の緩和，車いすへの対応などを勘案しグレーチングの設置幅や必要長さについて検討を行った結果，**写真 16** のように，全長ではなく径間中央にのみグレーチングを設置する対策に決定された。

写真 16　もみじ谷大吊橋のグレーチング

グレーチングは通風性が高いため，床版の上面と下面の圧力差を緩和して，橋体が受ける風力を弱める効果がある [21]。

九重＂夢＂大吊橋 [22]

九重＂夢＂大吊橋（**写真 12**）は，架橋地点が九州の大分県であり，台風襲来の頻度が高いことから，本橋のフラッター照査風速は 67m/s と比較的高い風速が設定された。最終的にはフェアリングと床版中央にグレーチングを有する断面が採用された。ただし，谷底までの高さが 173m あることから，グレーチングを通して真下が見えると，歩行者が恐怖感を持つことが懸念されたことから，グレーチング部の通風性を確保しつつ桁下が見えにくくなる工夫がなされた。具体的には，**図8**に示すように，グレーチングの開口ピッチに合わせて丸棒を２段に配置し，真下の視界を遮る構造となっている。

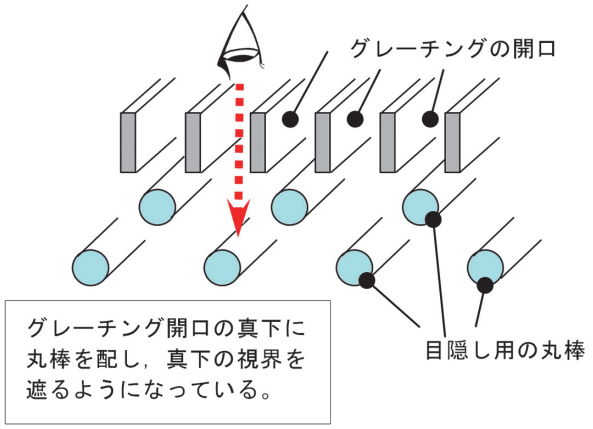


図8　九重＂夢＂大吊橋 グレーチング部の模式図

三島スカイウォーク [23]

三島スカイウォーク（箱根西麓・三島大吊橋　**写真 10**）の，架設場所は伊豆半島の海岸線から内陸側に十数キロ離れた立地であるが，駿河湾が見渡せる高台であり，海側から吹き上げる強い風が心配されていた。設計風速の決定には，①架設地点での風観測を１年間行い強風・風向・乱流の特性を把握，②近隣の気象官署である三島測候所における過去 80 年間の観測データとの相関分析，③風況解析コード「MASCOT」（東京大学 石原孟教授）による，周辺地形を含めた気流解析，等を実施し，架設地点の上空までを含めた最大風速の予測を行った上で，最終的に技術検討委員会（宮田利雄委員長）で協議の末，耐風検討の対象となるフラッター照査風速は

63（m/s）と決定された。

過去の耐風対策を参考に，設計の早い段階からフェアリングと中央グレーチングを組み込んだが，風洞試験の結果から特定の条件下でねじりフラッター振動の発生が懸念された。そこでさらなる対策として，床版の上面と下面の圧力差を緩和させる幅 20mm のスリット状の空気抜きを**写真 17** のように地覆近傍に設けたところ，振動が抑制できることが確認された。断続スリット付き PC 床版という耐風対策はこれまでの人道吊橋では例が無いものの，機能的にも意匠的にも優れた耐風対策用床版として川田建設のプレキャスト工場にて製造し，採用された例となった。

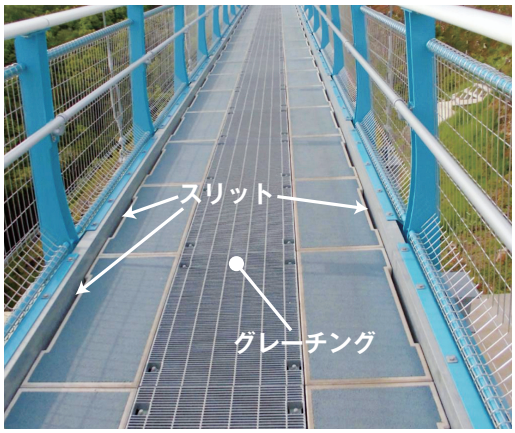


写真 17　三島スカイウォークの床版

5．工場製作

⑴ 本州四国連絡橋への取組み

本州四国連絡橋の製作は，尾道・今治ルートのアーチ橋である大三島橋から本格的に始まり，同じルートの因島大橋と神戸・鳴門ルートの大鳴門橋の吊橋の主塔，補剛桁へと進んで行った。その後は，児島・坂出ルートへ移っていったが，このルートは，道路・鉄道の併用吊橋として計画されていたため，補剛桁は疲労を考慮した設計・製作方法が行われた。

瀬戸大橋完成後に建設を開始した世界一の支間長を持つ明石海峡大橋の補剛桁の製作では，瀬戸大橋の設計・製作思想が踏襲されているが，死荷重軽減のため高張力鋼（HT780 など）が多用されており，この高張力鋼に対応した製作方法が取られた。

明石海峡大橋と同時期の来島海峡大橋では，経済性の観点より，補剛桁をこれまでのトラス形式ではなく箱型形式が採用されたため，箱桁形式に対応した製作方法が取られた。

以下に，補剛桁について，道路・鉄道併用橋の瀬戸大橋での製作方法，高張力鋼を用いた明石海峡大橋の製作方法，箱桁形式の来島海峡大橋の製作方法を，主塔については明石海峡大橋での製作方法について紹介する。

⑵ 補剛桁の製作

a）南備讃瀬戸大橋の製作 [24]

瀬戸大橋の補剛桁は，道路･鉄道併用橋であったため，当時の道路橋では考慮されなかった疲労設計が導入され，製作では，疲労に強い構造詳細が採用されるとともに，高い製作精度が要求された。具体的には，疲労き裂の起点となる溶接ルート部に溶接欠陥（ブローホールなど）を残さないため，部材組立時の材片の隙間を 0.5mm 以下の部材精度に高め，溶接前には徹底して汚れを排除し，溶接電源も電圧変動がないようにクレーンなどとは別系統にするなど細心の注意を払って溶接を行った。また，応力に直交するリブ十字継手は，始端形状がフランク角で 135° 以上になるように仕上げを行い，すべての箇所について，写真付きの記録を付けて管理を行った。

また，製作に先駆けて製作方法の妥当性を確認する目的で，主構トラスの中間支点のタワーリンク部を含むパイロットメンバー（**写真 18**）を製作し，検証した。

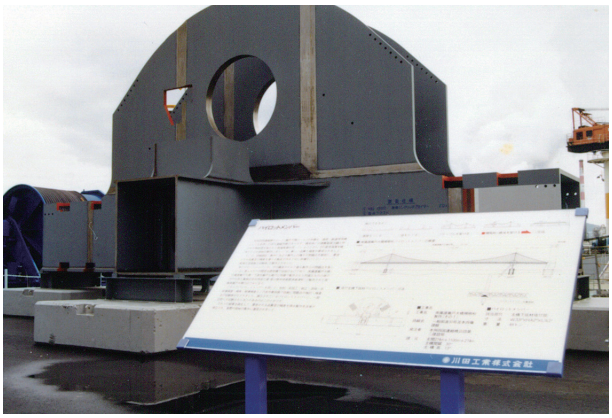


写真 18　南備讃瀬戸大橋パイロットメンバー

b）明石海峡大橋の製作 [25]

明石海峡大橋の補剛桁は，死荷重を低減するため，主構トラスに高張力鋼の HT780，HT690 が使用されている。多くの合金元素を添加して強度を発現させた高張力鋼は，溶接性が悪く，冷却速度が速いと割れなどの有害な溶接欠陥が発生しやすいため，要求される温度（HT780 で 100℃ 以上）まで高めた予熱が必要であった。一方，高い温度での予熱は，溶接作業環境上の問題に加えて，予熱による局部的な鋼板の伸びにより部材精度の低下も問題となった。そこで，本橋では予熱温度を 50℃ まで低減した予熱低減型の高張力鋼が採用された。予熱低減型鋼には，Cu 析出強度型と低 Pcm（溶接割れ感受性）型の二種類が開発されたが，どちらのタイプについても事前に主構トラス弦材のパイロットメンバーを製作し，予熱温度（50℃）と溶接性の検証を行った。また，予熱装置も高周波予熱装置が開発され，溶接直前に 50℃ 以上となるよう溶接装置と連動させるようにし，溶接作業性や品質への影響を無くした。また，本橋の塗装には，従来まで用いられていたポリウレタン樹脂塗料か

ら，より耐候性の良いふっ素樹脂塗料を上塗り塗料とした重防食塗装系が採用された。初期コストは高くはなるが，本橋のような長大橋で塗り替えが困難な場合，ライフサイクルコスト低減に有効である。

c）来島海峡大橋の製作

来島海峡大橋は，耐風安定性を確保するため，補剛桁に偏平な箱桁が採用されている。

本橋のハンガー定着部は，ピン定着方式で定着部材を直接，鋼床版に溶接する構造となっている。製作では，ピン定着部材と鋼床版を介してウェブといかに芯ずれなく溶接するかが重要であったため，芯ずれを照査する冶具を作り，芯ずれ量を 2mm 以下となるよう管理した。

鋼床版部の構造は，疲労を考慮し下記の構造詳細が採用されている。これらの構造詳細は，現在の疲労設計指針の先駆けとなっている。

・トラフリブの現場継手は，ボルト連結構造を採用。
・継手部の板厚は6mmとすることで現場継手部の8mmと6mmの板継溶接を廃止。
・鋼床版現場溶接部のスカラップを80mm以下とする。
・トラフリブと横リブ交差部のスカラップは廃止し，埋め戻し構造とする。
・トラフリブと鋼床版の溶接すみ肉の溶け込みは，板厚6mmに対して4.5mm以上とする（**写真19**）。

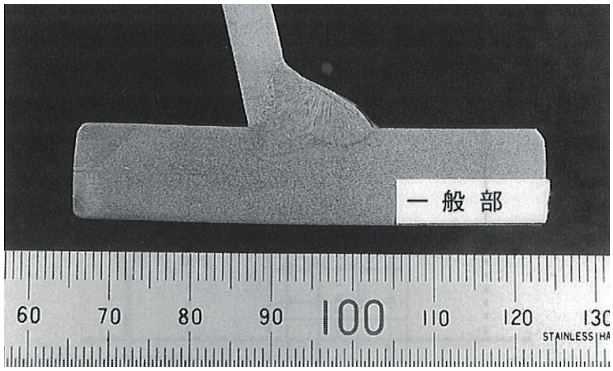


写真 19　トラフリブの溶接溶け込み量マクロ試験

(3) 主塔の製作

明石海峡大橋の主塔の製作では，3P 側（淡路島側）の塔柱部材（８部材），斜材（第５段），上部水平材の製作を行った。以下に明石海峡大橋の主塔の製作に関する特徴を紹介する。

・当時としては，世界最大の主塔であり，塔高 282.8m，鋼重 24 650（ton/ 塔柱）の大きさは，南備讃瀬戸大橋に比べ塔高で 1.6 倍，鋼材重量で約 2.5 倍の規模である。
・塔柱は，最大部材重量 144ton，断面（**図９**）は中外３セル（７室）から構成され，塔下部 14.8m × 6.6m（約 86m^2）～塔上部 10.0m × 6.6m（約 58m^2）と南備讃瀬戸大橋に比べて断面積で 1.7 倍と大きい。
・鋼橋等塗装基準・同解説（案）（本州四国連絡橋公団）の改訂により，新規塗料・塗装基準が適用されることになり外面塗料には，より耐候性に優れたふっ素樹脂塗料が本格的に採用された。
・**表３**に塔柱の寸法許容差の一例を示す。

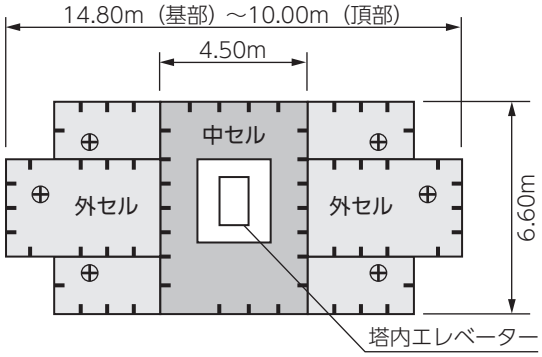


図９　明石海峡大橋塔柱断面

表３　塔柱寸法許容差（特に厳しい項目の一例）

計測項目			許容差
単セル断面	辺長		±2mm
	対角長		±3mm
３セル一体断面	辺長	橋軸直角方向	±2mm
		橋軸方向	±2mm
	対角長		±3mm
部材長（塔柱部材の高さ）			±1mm
塔柱仮組立時の鉛直度			1/10 000 以上
塔柱現場継手部密着度（メタルタッチ率 *）		スキンプレート	50% 以上
		縦リブ	25% 以上

*0.04mm のスキ間ゲージが停止する状態をメタルタッチと判定し，許容最大スキ間は 0.2mm とする。

以上の高い要求品質を確保するため，製作では次のような項目に留意して行った。

a）断面寸法精度の確保

断面の寸法精度を確保するため，断面構成材のうち板厚の誤差が断面寸法に及ぼす影響の大きい鋼板を板厚厳格材として JIS 規格より厳しく管理された鋼板を使用した（板厚の規格値：± 1mm 以下，JIS 材：± 1.3mm 以下）。併せて，塔柱部材の断面形状を決めるダイアフラムの外周を組立前に切削を行い，部材断面寸法誤差を厳しい規

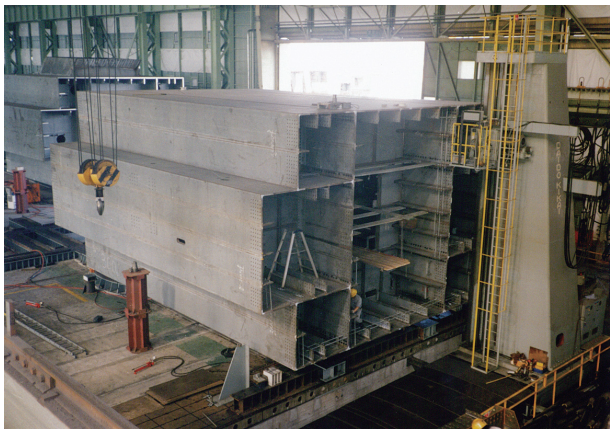


写真 20　塔柱部材の端面切削

定値以内に収めた。

b）メタルタッチ精度の確保

塔柱部材の端面についても高い要求品質が求められているため，多セル一体組立後に大型フェーシングマシーンによる端面切削（**写真 20**）を行った。なお，切削工程に当たっては，1/10 000 以上の厳しい基準を達成するため，温度変化の少ない時間帯での作業を基本とし，芯出し，切削，計測管理は夜間作業で行われた。また，切削面の粗さに影響を及ぼす切削中の振動は，縦リブ同士を治具で仮連結して防いだ。

c）塔柱の部材・仮組立検査方法

塔柱の部材・仮組立検査は，一般橋梁の工事でよく見られる全体形状を仮連結して行うのと異なり，塔柱単部材を縦置き状態で部材検査を行った後，隣り合う部材と横置き状態で連結し仮組立検査を行った。

縦置検査は，部材端面の切削完了後，部材精度および切削精度，鉛直度，ねじれなどを確認するため，定盤上に縦置きし，トランシット，ウォーターレベル，隙見ゲージなどを使用して各寸法の計測を行った。検査は精密測定作業のため，温度変化の少ない環境で行い，かつ工場クレーンなどの振動が無い夜間に行った。

縦置検査が終わった塔柱は，横置き状態で現場継手部の精度確認を目的として，屋内作業場で隣接する部材を２段ずつ連結して仮組立を行った。また，連結板の孔明けは，端面切削後に塔柱本体のボルト孔の第１孔寸法を計測後に行った。

仮組立時の継手部のメタルタッチ率は，ウェブとフランジ（許容値の 50%以上），縦リブ（許容値の 25%以上）ともに 90%以上を確保しており良好な結果であった。

また，塔柱部材の縦置検査と仮組立検査後，塔柱仮組立時の鉛直度（1/10 000 以上）の確認を行うため，JV 各社の検査結果を基に主塔全体の累積管理（シミュレーション）を行った。

結果として，工場製作時塔頂部倒れ量± 28.28mm（± 282.800/10 000）に対して，川田側 JV の 3P 側では，最大 4.20mm の範囲におさめることができた。

6．架設

吊橋（主塔，主ケーブル，補剛桁）の施工方法の詳細は，参考文献8),9),26)を参照してもらうこととし，本文では，当グループが取組んできた代表事例を紹介する。

⑴ 主ケーブルの架設

主ケーブルの架設は，最初に主塔間にパイロットロープを張り渡し，その後，ケーブル架設時の作業足場となるキャットウォークを作り，ケーブルを架設する。

a）パイロットロープ渡海工法

パイロットロープの渡海工法（**図 10**）は，因島大橋までロープに浮き玉を取付け，船でロープを引っ張る方法で行われていたのが，瀬戸大橋では，航路閉鎖時間の短縮を図るため，フローチングクレーンでロープを海面に浸けないで引っ張る方法を採用し，明石海峡大橋では，中央径間が約 2km と長いのに加えて，さらに航路閉鎖時間を短縮するため，軽量で高強度のアラミド繊維ロープをヘリコプタで引っ張る方法[29]を採用した（**写真 21**）。川田建設および東邦航空が元請 JV と協力して，多くの実験を繰返して実用化した。その後，来島海峡大橋や九重 " 夢 " 大吊橋のパイロットロープの張り渡しにはヘリコプタが使用された。

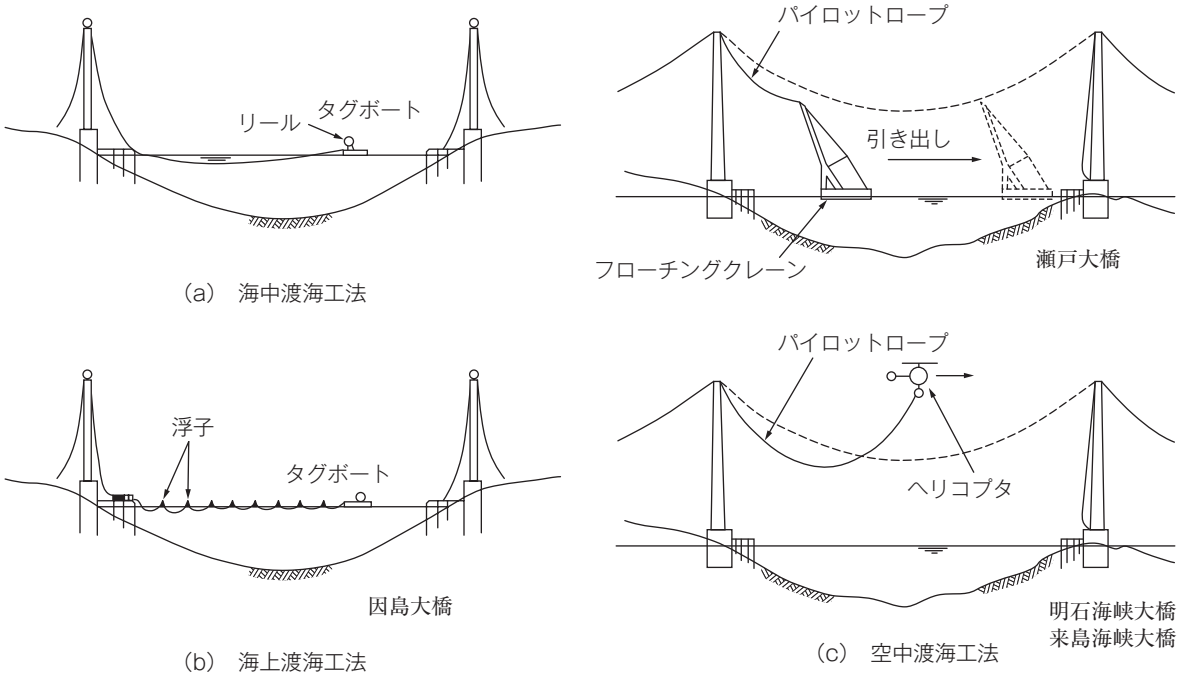


図 10　パイロットロープの渡海方法

写真 21　明石海峡大橋のケーブル渡海

b）キャットウォークシステム

かつて上若生子大橋[27]では，キャットウォークのストームロープ（揺れを抑える補助ロープ）の形式（**図 11**）を斜めハンガー形式とし，新しい試みとしてハンガーの張力抜けを防ぐため，格点に滑車を入れて一本（連続）のロープでつないだ。

明石海峡大橋では，キャットウォーク（**写真 22**）に制振装置を取り付けることで，ストームロープが省略されるようになり，それ以降の吊橋では，ストームロームが無い形式が主流となった。

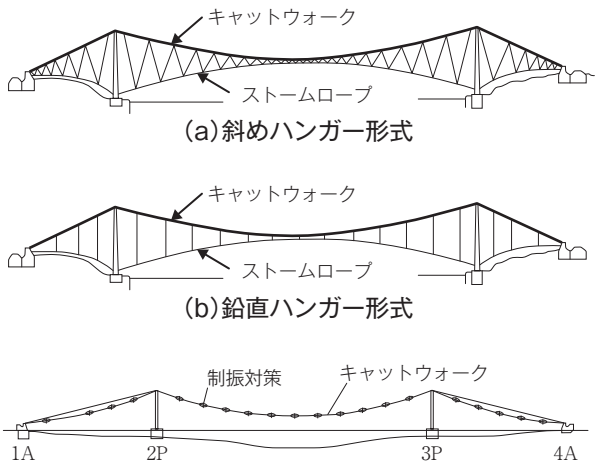


図 11　ストームロープ形式

写真 22　明石海峡大橋キャットウォークシステム

c）主塔のセットバック

吊橋は，補剛桁の死荷重が作用した状態で主塔が鉛直になるように設計しているため，主塔完成後にセットバック（主塔を強制的に傾ける）する。

マガピット橋[28]では，本州四国連絡橋に先駆けてキャットウォークロープで主塔のセットバックを行う方法を採用した。その後に施工される吊橋では，一般的に用いられるようになった。

d）ケーブル架設

主ケーブルの架設は，直径 5mm の素線を平行に束ねて断面（**図 12**）を構成することになるが，その工法としては，現場で素線からケーブル断面を作る A.S 工法と，あらかじめ素線を工場で束ねたもの（ストランドと呼ぶ）現場に搬入してケーブル断面を作る P.W.S 工法がある。本州四国連絡橋の吊橋は，下津井瀬戸大橋を除いて P.W.S 工法で架設されているが，当グループは，国内初の実績となる八幡橋，それに続く関門橋で経験を積み，その後の吊橋のほとんどに参画することになる。また，豊島大橋では，下津井瀬戸大橋以来 20 年ぶりに A.S 工法が採用され，素線には斜張橋で用いられている直径 7mm のものが採用され川田建設が参画した。

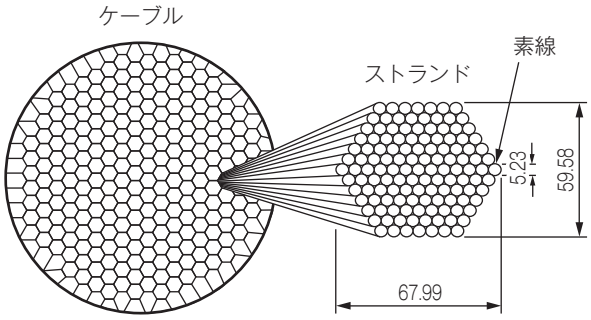


図 12　主ケーブル断面

(2) 補剛桁の架設

a）面材架設工法

補剛桁がトラス形式で，桁下の海上を使用できない場合には，主塔あるいは橋台からトラベラークレーンを用いてトラスを面材に組立てたブロックを架設する。

関門橋・因島大橋では，途中に架設ヒンジを 1 箇所設けていたが，南備讃瀬戸大橋では，架設時の耐風安定性を考慮して，架設ヒンジを設けない逐次剛結工法が採用され，それ以降の吊橋（**写真 23**）でも採用されている。

b）大ブロック架設工法

南備讃瀬戸大橋[30]では，主塔部の補剛トラスを四国工場で大ブロックに組立て，フローチングクレーンで現地まで吊り運搬して架設した。瀬戸大橋で吊橋の補剛桁の架設に初めてフローチングが採用され，明石海峡大橋[25]では，さらに大きなブロックをフローチングクレーンで架設した（**写真 24**）。

写真 23　明石海峡大橋補剛桁面材架設

写真 24　明石海峡大橋補剛桁大ブロック架設

c）直下吊り工法

上若生子大橋やマガピット橋では，本州四国連絡橋の補剛桁の架設に向けて，補剛トラスを立体ブロックに組立て，直下吊り工法で架設し，途中に架設ヒンジを１箇所設けた逐次剛結工法で行い，各種データの収集を行った。

来島海峡大橋では，主ケーブルにリフティングクレーンを載せて，海上の台船から補剛桁を吊上げる直下吊り工法が採用された。これまで台船は，事前に海底に置いたシンカー（錘）に係留していたが，来島海峡大橋では，シンカーが不要となる自航台船を使用した（**写真 25**）。

また，台船が吊り上げ直下に入れない箇所では，２台のリフティングクレーンを使用して，橋軸方向に移動させるスイング架設（**写真 26**）により行われた。スイング架設は，白鳥大橋，新タコマナロウズ橋などでも採用された。

写真 25　自航台船による直下吊り架設

写真 26　スイング架設

d）現場管理へのコンピュータの導入

因島大橋[31)]では，橋梁工事として初めて現場事務所に大型電算機のインテリジェント端末機を導入した。補剛桁の架設の進捗によって逐次変化する形状や応力を現場事務所で，有限変位理論の「KASUS（面内）」を使ってリアルタイムで解析し，安全性の確認や形状管理を行った。現場事務所にコンピュータを導入してリアルタイムで解析する方法は，その後の長大橋で一般的に行われるようになった。また，コンピュータの進歩により，現在では，三次元有限変位理論の「LADAN」を現場事務所のパソコンで簡単に解析を行えるようになった。

7．おわりに

今回の特集では，川田グループ各社がこれまでに行ってきた吊橋への取り組みについて駆け足で振り返ってみた。付録の参考文献をご覧いただいても分かるとおり，1960 年頃から今日に至るまでの膨大な成果を限りある紙面に納めようとしただけに，多少の不備についてはご容赦いただき，具体的な内容については，同封の DVD の対外発表論文を参照願いたい。

本州四国連絡橋の一大プロジェクトの後，残念ながら我が国においては長大吊橋の建設は皆無となり，実橋での技術の伝承は難しくなっている。しかし，いずれまた超長大吊橋を架ける日が来ると信じている。それは，東京湾なのか伊勢湾なのか，はたまた紀淡海峡か関門海峡かは判らないが，その日のために「夢の架け橋」と言われた本四架橋に至るまでの半世紀以上にわたる技術者達の研究開発と研鑽について整理し，未来の技術者達に託したい。

参考文献

1）川田忠樹：吊橋の設計と施工，理工図書，1965.11
2）川田忠樹：長径間吊橋の理論と計算，橋梁編纂会，1969.3.
3）野村國勝，片山哲夫：“今、道は拓かれた。”（瀬戸大橋とのあゆみ），川田技報 Vol.8，1989.1.
4）平井敦，伊藤學：重橋床式無補剛吊橋について，土木学会論文集第 64 号，1959.9.
5）渡部寛文，大高俊雄，横山勝裕：えっ，コンクリートの吊橋!? ～東雲さくら橋～，川田技報 Vol.18，1999.1.
6）渡部寛文，横山勝裕：大日橋の設計と施工 ～吊橋の補剛桁をプレキャスト PC 化～，川田技報 Vol.21，2002.1.
7）渡部寛文，横山勝裕：大金吊り橋の設計と施工，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，2003.10.
8）川田忠樹編著：現代の吊橋，理工図書，1987.12.
9）伊藤學，川田忠樹共著：超長大橋時代の幕開け，建設図書，1999.5.
10）野村國勝，中崎俊三，内海靖，前田研一：ケーブル橋梁構造（吊橋，斜張橋）の設計，架設計算プログラム ”KASUS”，橋梁，1982.12.
11）斎藤道生，山野長弘，千原申三，前田研一，内海靖，勝俣盛：長径間吊橋の立体有限変位解析に関する研究，川田技報 Vol.11，1992.1.
12）越後滋，杉原賢治，勝俣盛，畠中真一：長大吊橋の架設計算も大幅に省力化 ―架設計算支援システムの開発―，川田技報 Vol.15，1996.1.
13）川田忠樹：だれがタコマを墜としたか，建設図書，1975.8
14）川田忠樹：セバーン吊橋の栄光と悲劇，橋梁と基礎，1984.4
15）鵜飼昌一，江崎正浩：加茂ゆらりんこばしの設計と施工－モノケーブルダイアゴナルハンガー人道吊橋－，橋梁と基礎，1995.3.
16）野村國勝，中崎俊三，米田昌弘，木村公男，大野克紀：3000m 級吊橋の静的特性と連成フラッター特性に及ぼす各種ケーブルシステムの効果について，川田技報 Vol.13，1994.1.
17）川田忠樹，野村國勝，中崎俊三，江崎正浩：暴風時質量付加型超長大吊橋，橋梁と基礎，1995.2.
18）大野 克紀・内海 靖・田巻 嘉彦・宮地 真一：超長大箱桁形式吊橋の耐風安定性に関する解析的および実験的研究，川田技報 Vol.18，1999.1.
19）須澤雅人：一箱／二箱併用斜張吊橋の耐風対策，土木学会第 60 回年次学術講演会，2005.9
20）高桑正直，内海靖：アドベンチャーブリッジの設計と架設および実橋振動試験－鋼製主桁の吊床版橋－，橋梁と基礎，2000.1.
21）島田清明，田口吉彦，大野克紀，畠中真一：もみじ谷大吊橋の設計と架設，橋梁と基礎，2000.7.
22）本摩敦，新谷順也：九重 ”夢” 大吊橋の建設，橋梁と基礎，2007.11.
23）田中寛泰，畠中真一，田口吉彦，長尾悠太郎：箱根西麓・三島大吊橋（三島スカイウォーク）の設計・施工，橋梁と基礎，2016.1.
24）今井謙二郎，原章，高田和守，尾崎元宣，菅野啓行：本州四国連絡橋（道路・鉄道併用橋）のトラス部材の製作，川田技報 Vol.5，1986.1.
25）金田高康，山田秀美，金野千代美，内海靖，和田浩介，大江慎一：明石海峡大橋補剛桁の設計・製作・架設～本州四国連絡橋公団「神戸･淡路･鳴門ルート」～，川田技報 Vol.17，1998.1.
26）土木学会編：吊橋［技術とその変遷］，鋼構造シリーズ 8，1996.12.
27）池田浩一：上若生子橋工事報告，川田技報 Vol.1，1978.1.
28）金田高康，高橋幸雄：マガピット吊橋工事報告，川田技報 Vol.2，1981.1.
29）横山仁規，田口吉彦，清水隆裕，浅倉豊紀，山梨善弘，内藤尚人：明石海峡大橋のヘリコプタ渡海工事，川田技報 Vol.14，1995.1.
30）大橋勇，中崎俊三，高田和守，池田浩一，大村外志男，木村公男：南備讃瀬戸大橋補剛桁の設計・製作・施工，川田技報 Vol.8，1989.1.
31）高桑稔，原章，枝典郎，寺井和夫，高田和守，内海靖：因島大橋補剛桁工事報告，川田技報 Vol.4，1985.1.