

# 木曽川橋, 揖斐川橋の設計・施工

## —複合エクストラード橋—

小松 秀樹\*1・中須 誠\*2

### 1. はじめに

木曽川橋・揖斐川橋は、第二名神高速道路が木曽川および揖斐川の河口部を横過するところに架る橋長1kmを超える橋梁である。とくに堤体を横過する箇所は河川管理条件等から160m以上の径間長が必要となる。このため、長大橋としての形式を各種比較検討した結果、経済性および施工性等から世界で初めてのPC・鋼複合連続エクストラード橋を採用することとなった。

このPC・鋼複合連続エクストラード橋の概要についてはすでに発表されているため、本報文は、木曽川橋・揖斐川橋の上部工に関してその後行われた設計・試験結果について記述するとともに、現在の施工状況について紹介するものである。

### 2. 橋梁概要

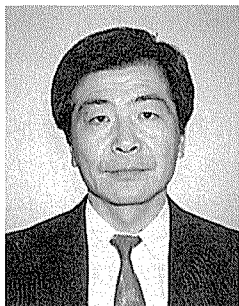
架橋地点での川幅が木曽川に比べて揖斐川が約250m長いこと、揖斐川橋の橋長が1径間分長くなっているが、規模および形式は両橋梁ともほとんど同じである。表-1に両橋梁の概要を、図-1に両橋梁の一般図を示す。

表-1 両橋の概要

橋梁名	木曽川橋	揖斐川橋
形式	PC・鋼複合5径間連続エクストラード橋	PC・鋼複合6径間連続エクストラード橋
橋長	1 145 m	1 397 m
最大支間長	275 m	271.5 m
桁高	4 m～7 m	

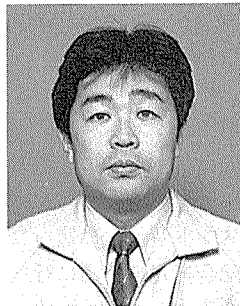
### 3. 設計方針

木曽川橋および揖斐川橋の基本的な設計方針は、経済性等を踏まえて以下のとおりとした。



\*1 Hideki KOMATSU

日本道路公団 名古屋建設局  
四日市工事事務所 所長



\*2 Makoto NAKASU

日本道路公団 名古屋建設局  
四日市工事事務所 長島工事長

- ① 斜ケーブルが定着される主桁区間はPC箱桁、径間中央部は死荷重軽減のため鋼床版箱桁とする。
- ② コンクリート桁部と鋼桁部との接合部は剛結合とし、PC鋼材で補強するとともに、鋼桁部にもコンクリート桁部から連続させた桁内ケーブルを下フランジ側に配置して、鋼重の減少および接合部における安全性の向上を図る。
- ③ 斜ケーブルは一面吊りで中央分離帯側に設置する。
- ④ 主塔高さは斜張橋の場合の1/2以下(30m)とすることで、斜ケーブルの活荷重による応力変動の低減を図り、応力度の制限値を $0.6\sigma_{pu}$ とする。
- ⑤ 防錆に十分配慮した桁内の外ケーブルおよび内ケーブルを斜ケーブルと併用することにより、斜ケーブルの一部が破断しても落橋しない程度の斜ケーブル量とする。

### 4. 設計検討

#### 4.1 限界状態設計法

設計に関する諸規定は、道路橋示方書に準拠することを基本とするが、構造上必要な性能を保持するために各部材に適切な限界状態を設定した照査法を取り入れることとした。

ここで、鋼部材やPC・鋼接合部については、現状において限界状態設計法が必ずしも確立されている状況ではないが、コンクリート部材と鋼部材の照査レベルを合わせ複合橋全体の設計思想を統一するという観点から、疲労設計や終局時に対する検討を実施して、安全性を確保するものとした。

構造解析は、微小変形理論による2次元骨組みモデルを主体としたが、拡幅部自重や活荷重偏載により発生するねじりモーメント等、対象荷重および着目断面力に応じて3次元骨組みモデルを用いた。

各部材における限界状態の考え方を表-2に示す。

#### 4.2 主桁断面(コンクリート桁部)

詳細設計前の主桁断面(図-2)は以下のことを考慮して決定した。

- ① 標準部断面の桁高4mは、側径間部堤防上管理用道路との交差条件を満たす最大値とした。
- ② 支点部断面の桁高7mは、死荷重作用時における下縁圧縮応力がコンクリート標準示方書に示された制限値( $0.4\sigma_{pu}=240\text{kgf/cm}^2$ )以内となるよう、また、設計荷重作用時にフルプレストレスとするために必要な桁内ケーブルが無理なく配置できるように決定した。
- ③ 4本のウェブ位置は、鋼桁部断面に合わせた(鋼桁部のウェブは鋼床版を意識して各レーンマークの直下に

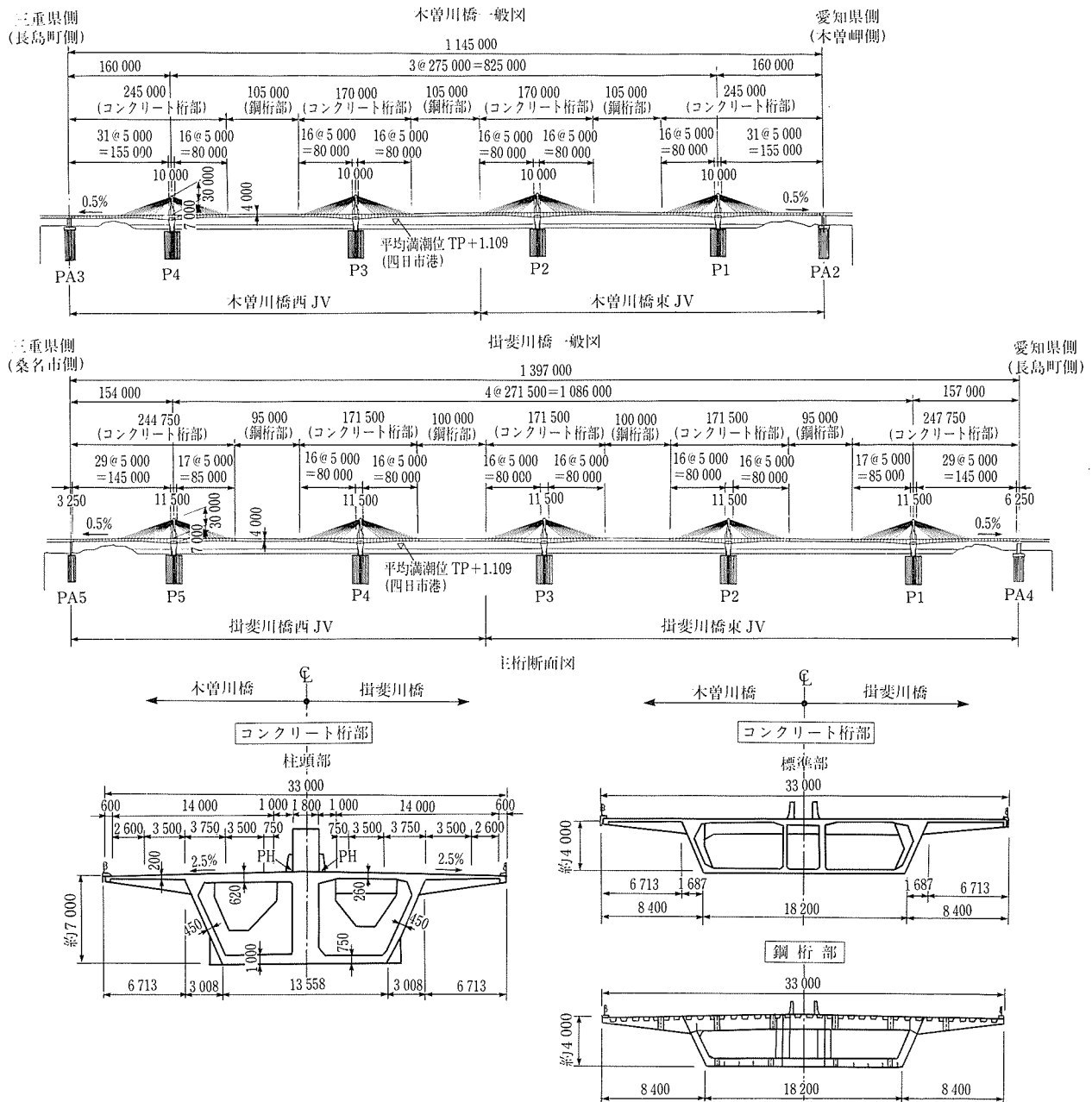


図-1 両橋梁の一般図

配置した)。

- ④ 標準断面の下床版幅は、下縁側の圧縮応力の照査結果から、16.2mとした。
- ⑤ 支点部断面の下床版幅は、支承の配置上必要な幅を確保した。

その後詳細設計により、以下の点を変更し最終の主桁断面を決定した(図-3)。

- ① 外ウェブに角折れを設けた場合、ウェブ下端に大きな引張応力が発生するため、角折れをなくした。
- ② 斜ケーブル張力により上床版部に大きな引張応力が発生するため、中央ウェブ間隔を3mに狭めた。
- ③ 斜ケーブル定着部中間隔壁の構造については、内型枠据付け・撤去の施工性を考慮して、全面隔壁タイプから水平・鉛直リブ併用タイプに変更した。

## 5. 試験検討

### 5.1 プレキャストセグメント実物大模型試験

プレキャストセグメント実物大模型試験とは、実物大の模型セグメントを2体マッチキャストで打設する試験のことで、打設方法の確認および硬化時の水和発熱によるバナナ変形(新旧コンクリートの温度差によるそり変形)の把握を目的に行ったものである。模型セグメントに用いたコンクリートの仕様を表-3に、配合を表-4に示す。これらは、セグメント製作に最適なワーカビリティとなるコンクリート配合選定を目的に行った部分模型試験の結果によるものである。

打設方法の確認については、部位により次のようなことが明らかになり、本セグメントの製作に活かされることに

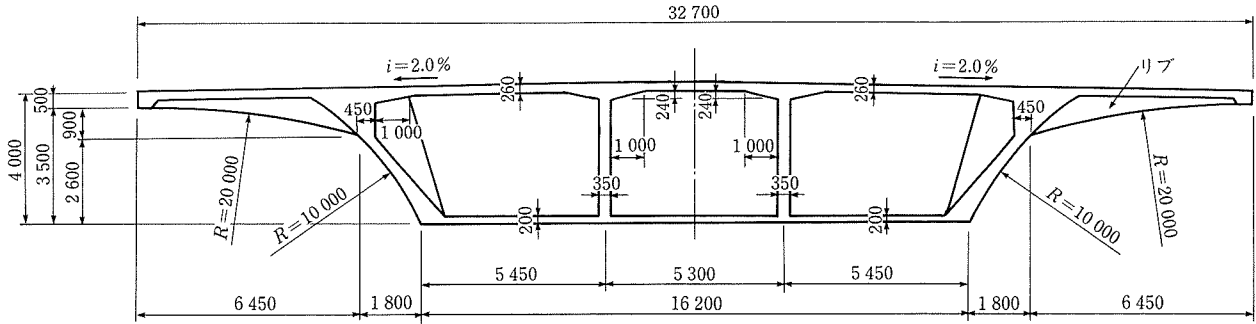


図-2 詳細設計前の主桁断面(標準部)

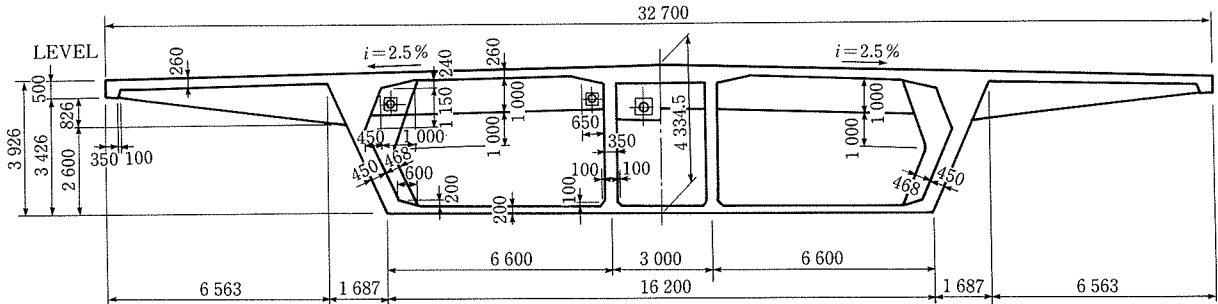


図-3 詳細設計後の主桁断面(標準部)

なった。

- ① 下床版については、下床版とウェブ1層目を同時打設するとウェブからの噴出量が多く下床版天端の仕上げが困難となることから下床版を2層打ちとし、さらに押さえ型枠を適宜使用することとした。ただし、コールドジョイントが発生しないよう打継ぎ時間の間隔をできる限り短くする必要がある。
- ② ウェブ部分は鋼材が密に配置されており締固めが非常に困難となることから、鉄筋組立て時にあらかじめバイブレーター挿入を模したスパーサー（たとえば、 $\phi 76.3\text{mm}$ の鋼管）を取り付けておくなどの配慮を施す。
- ③ 縦リップもウェブと同様しっかりした締固めができるように配慮しておく必要がある。

バナナ変形の変位計取り付け位置を図-4に、計測結果を図-5に示す。打設直後より切放し直前までのOLDセグメントに対する相対変位は、張出し床版先端部が最大で、約2mmの変形が計測されたが、その後は徐々に小さくなる傾向であり、NEWセグメントの温度がほぼ外気温と同等まで低下した81時間後では約1mmの残留変形となっており、その程度であれば接着剤等での対応が可能と考えられるため、実施工に支障がないことが分かった。

## 5.2 コンクリート・鋼接合部疲労試験

### (1) 目的

本橋梁の特徴の一つであるコンクリートと鋼との接合部は、作用曲げモーメントの小さい交番部に位置されているが、コンクリート桁部と鋼桁部との力の伝達を円滑に行える接合構造でなければならない。とくに、コンクリート床版および鋼床版部は、曲げモーメントやせん断力およびねじりモーメントを受けるだけでなく、T荷重による床版・床組み系の力も作用することになり、静的な強度を満足する

だけでなく、疲労に対しても十分な構造を有していなければならない。

そこで、本橋における接合部の一部を取り出した実物大の試験供試体を製作し、移動輪荷重による繰返し載荷を実施して疲労に対する安全性の評価および確認を行った。

### (2) 試験概要

コンクリート桁部と鋼桁部との接合部の構造および試験供試体を図-6に示す。

試験供試体の縮尺は実寸とし、供試体幅は設置可能な幅(7m)、実橋におけるトラフリップ間隔(0.9m)および内外腹板間隔の7割(供試体は単純版となるため連続版の7割程度とした)を考慮し、床版支間を5.4m、総幅5.8mとした。供試体の長さについても、設置可能な供試体長さ(15m)を考慮して、鋼床版部 $2\text{@}2.5\text{m}$ 、接合床版部1m、PC床版部2.1m、総延長9.4mとした。これは接合部の前後にある着目部において実橋の挙動が再現可能な長さとなっている。また、試験機は、静岡県富士市にある日本道路公団試験研究所が所有する大型移動載荷試験機を用いて行った。

試験方法は、まず静的載荷試験により供試体において最も危険側となる移動載荷位置と応力振幅を計測および把握した。その結果をもとに、移動載荷位置において繰返し載荷試験を行った。試験における載荷荷重と繰返し回数との関係を表-5および図-7に示す。

### (3) 接合部の疲労耐久性の評価

移動載荷を所定の繰返し回数行ったが、鋼桁部の疲労亀裂やコンクリート桁部のひび割れ等供試体に損傷は見られなかった。接合部およびコンクリート桁部では、輪荷重によって発生する変位や応力が非常に小さいことから、静的な耐力も確保していることが確認できた。しかし、鋼床版部ではデッキプレート部に、大きな応力集中が発生してい

表-2 各部材における

		使用限界状態			根 拠
		引張応力発生限界	ひび割れ発生限界	ひび割れ幅限界状態	
プレキャストセグメント					
(主方向)	曲げに対して 継ぎ目部の過載荷重時 せん断およびねじりに対して	○	○ ○		軸方向鉄筋が連続して配置していないため 過載荷重が床版に局部的に作用した場合の照査 曲げに対してひび割れを許容しないため
(横方向)	上床版・リブ上面 リブ下面(張出し床版部) 〃 (箱桁内部) ウェブ 下床版		○ ○	○ ○ ○	輪荷重の影響を直接受ける部材である 外気に接する部材であることに配慮 ひび割れが部材の耐久性上、構造上問題がないため ひび割れが部材の耐久性上、構造上問題がないため ひび割れが部材の耐久性上、構造上問題がないため
端 支 点	曲げに対して せん断に対して			○ ○	PRC部材としてひび割れ幅限界状態とする 〃
柱 頭 部	曲げに対して せん断に対して			○ ○	PRC部材としてひび割れ幅限界状態とする 〃
中 間 隔 壁	曲げに対して せん断に対して			○ ○	PRC部材としてひび割れ幅限界状態とする 〃
主 塔	曲げに対して せん断に対して			○ ○	RC部材としてひび割れ幅限界状態とする 〃
そ の 他	斜ケーブル定着部 外ケーブル定着部 デビエーター			○ ○ ○	輪荷重が直接載荷しないこと、局部応力であることを考慮 RC部材としてひび割れ幅を制御する 〃
斜ケーブル			0.6 $f_{pu}$		
外ケーブル			0.6 $f_{pu}$		
内ケーブル			0.6 $f_{pu}$		

表-3 コンクリートの仕様

項 目	仕 様
スランプ(現場到着時)	20±2.5 cm
空 気 量	4.5±1.5 %
脱型時強度	300 kgf/cm <sup>2</sup>
設計基準強度(材齢28日)	600 kgf/cm <sup>2</sup>
スランプ保持時間	90分確保

表-4 コンクリートの配合

目標のスランプ	空気量	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (kg/m <sup>3</sup> )	
				セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE減水剤 SP	AE剤 AE
20 cm	4.5 %	32.0	42.0	509	163	681	967	7.38 (1.45%)	1.5A

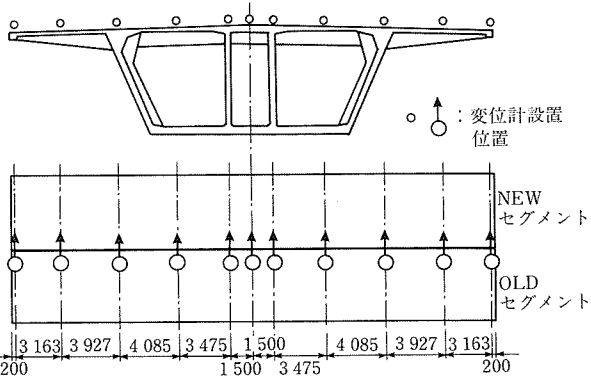


図-4 変位計取付け位置

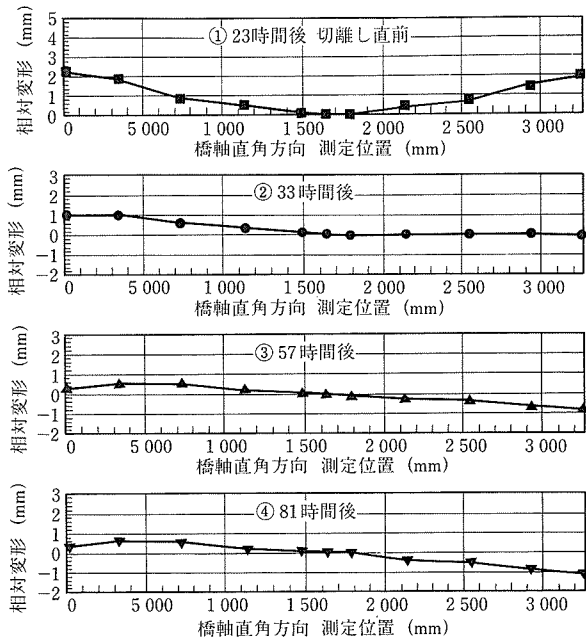


図-5 相対変形測定結果

表-5 実験での繰返し回数とT荷重換算回数

載荷荷重 (tf)	回 数	T荷重換算回数(累積)
1.26×20=25.2	50万回	100万回 (100)
1.50×20=30.0	30万回	100万回 (200)
2.00×20=40.0	20万回	160万回 (360)

限界状態の考え方

疲労限界状態	終局限界状態	施工時			仮置き・運搬時		
		引張応力発生限界	ひび割れ発生限界	ひび割れ幅限界状態	引張応力発生限界	ひび割れ発生限界	ひび割れ幅限界状態
○ ○ ○	○ ○ ○	○	○ ○ ○				
○ ○	○ ○	○					
○ ○	○ ○	○					
○ ○	○ ○	○					
○ ○	○ ○	○		○ ○			
○ ○	○ ○	○		○ ○			
○ ○	○ ○	○		○ ○			
○ ○	○ ○	○					
○ ○	○ ○	○					

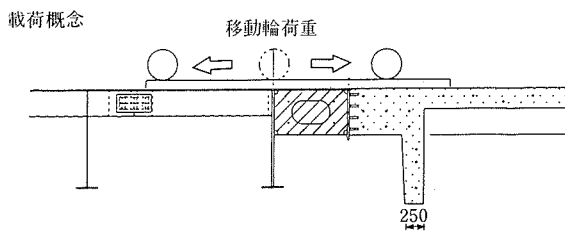
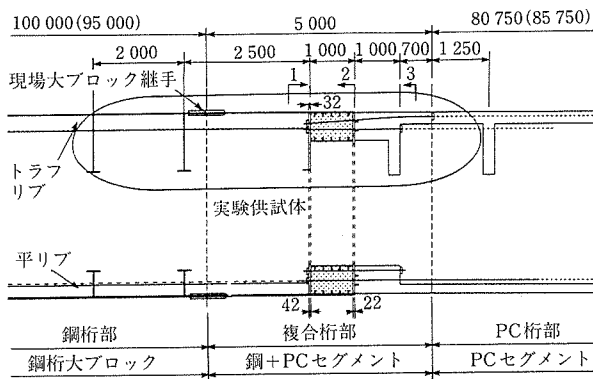


図-6 接合部側面図

た(鋼床版部からPC床版部へ移動するとき最大1 500kgf/cm<sup>2</sup>程度が計測されている)。

デッキプレート部およびトラフリブR部における応力度と応力振幅を表-6に、これらの応力と繰返し回数をJSSC(日本鋼構造協会)の疲労設計基準値<sup>2)</sup>とともにS-N線図にプロットしたものを図-8に示す。

デッキプレート部において予想される継手分類は、ホットスポット応力で評価しているためE等級となる<sup>2)</sup>。今回の実験結果は、E等級の設計線上に位置していることから、

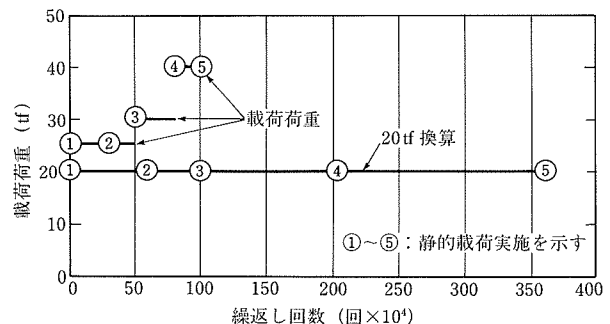
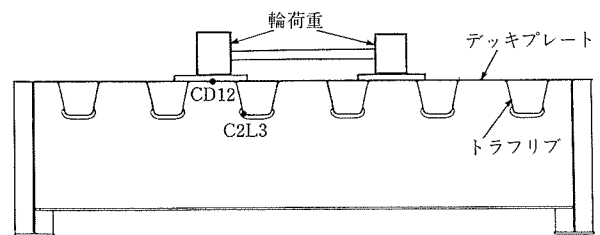


図-7 載荷荷重と繰返し回数との関係

表-6 応力振幅

(単位:kgf/cm<sup>2</sup>)

	デッキプレート部(CD12)			トラフリブR部(C2L3)		
	最小応力度 $\sigma_{min}$	最大応力度 $\sigma_{max}$	応力振幅 $\Delta\sigma_{max}$	最小応力度 $\sigma_{min}$	最大応力度 $\sigma_{max}$	応力振幅 $\Delta\sigma_{max}$
移動開始前	-942	0	942	-497	76	573
30万回載荷後	-812	0	812	-371	79	450
50万回載荷後	-778	0	778	-388	78	466
80万回載荷後	-796	0	796	-406	84	490
100万回載荷後	-860	0	860	-368	89	457



デッキプレート部の継手分類はE等級を確保していることが言える。ただし、発生応力は942 kgf/cm<sup>2</sup>発生しており、E等級の打ち切り限界 (822 kgf/cm<sup>2</sup>) を超えているので供用期間中

に疲労亀裂が発生しないと言い切れないことから、デッキプレートの増厚について検討した。増厚は、この部分がPC桁部と鋼桁部の遷移区間であることから、剛性の急変を避けるということにもつながる。

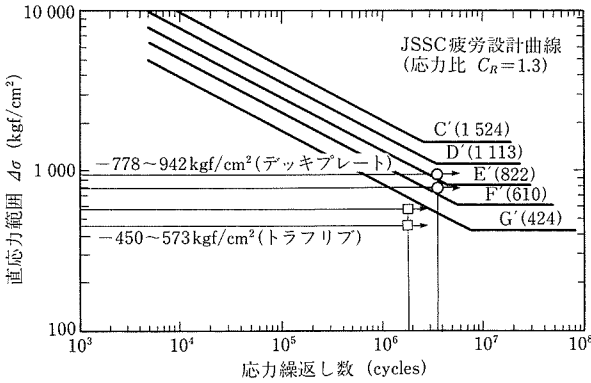


図-8 S-N線図

FEM解析によると、デッキプレート厚を25 mmとすると、試験体の厚みである18 mmに比べて静的荷重による発生応力が半分になることから、移動荷重によるデッキプレートの応力振幅もE等級の打ち切り限界を下回ることが確実なため、疲労亀裂発生の可能性がほとんどないと言える。なお、実際のデッキプレート厚は接合部における斜ケーブル定着部デッキプレート厚との整合および大ブロック部と現場添接部フィラープレート厚を考慮し26mmとした。

また、トラフリブ部においてもホットスポット応力で評価しているため継手分類はE等級となるが、発生応力がその打ち切り限界を下回っていることから、疲労亀裂の発生はな

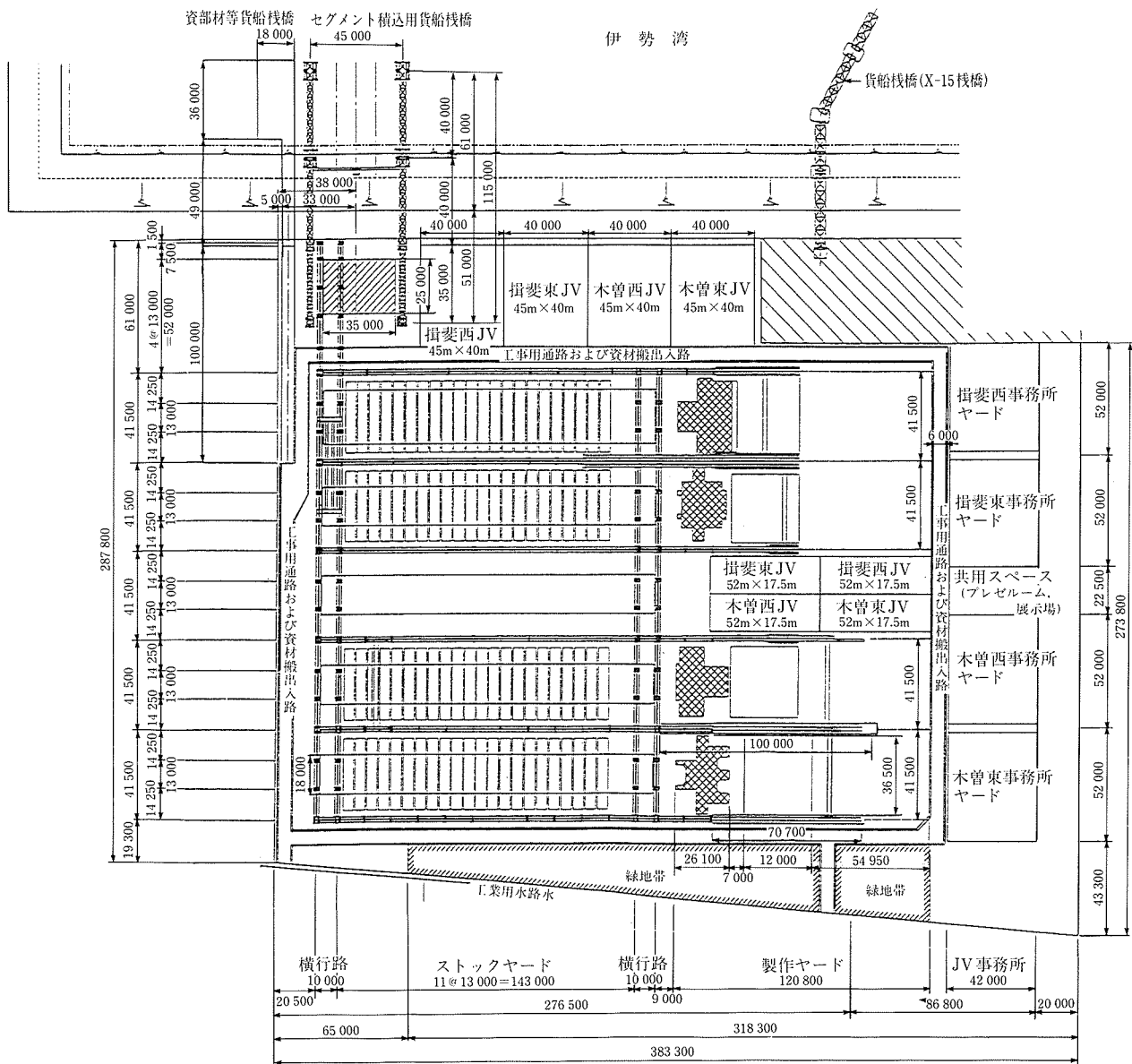


図-9 セグメント製作ヤード平面図

いものと考えられる。

## 6. 施工概要

ここで、PC桁部はプレキャストセグメント工法とし、木曾川および揖斐川の架橋現場から航路延長でそれぞれ約15km、約10km離れた場所で製作されたセグメントを台船で運搬し架設することとしている。また、鋼桁部は約100mの桁を製作工場から海上運搬してきて、一括で吊上げ架設することとしている。

### 6.1 セグメント製作

セグメントの製作については施工性および経済性等を考慮して以下のとおりとした。

- ① 1個のセグメントの大きさは、総幅員33m(6車線)に対してバナナ変形を抑制できる細長比 $6^3$ に近いセグメント長=5mを基本とし、最大セグメント重量を施工性・経済性等を考慮して400tで計画した。
- ② セグメントの製作方法は、現場製作ヤードの地盤状況から小規模な基礎工で製作可能な、ショートラインマッチキャスト工法とした。

セグメント製作ヤードの平面図を図-9に示す。製作ヤードは工事発注単位ごとに製作およびストックスペースを設けており、それぞれ資材等運搬のための門型クレーンおよび上屋を有している。また、セグメントの場内運搬は400tクレーンを2基、場内から台船に載せるための400tクレーンを1基により行う。

現在(平成10年11月)、各製作ラインとも柱頭部セグメントを製作している(写真-1)。柱頭部のセグメントは重量制限により横桁部のコンクリート打設を架設後行うようにしており、ウェブや床版部に鉄筋の継手部があるため型枠セット等が煩雑になり、1個のセグメントの製作に約14日程度費やすこととなっている。今後標準セグメントについては、鉄筋のプレファブ化や型枠の機械化などを図りより短いサイクルで製作する予定である。

### 6.2 セグメント架設

本橋の架設の特徴は、河口部での海上(水上)架設となるとともに、桁等の運搬についても海上運搬となる。そのため、運搬・架設は気象条件にかなり影響されるが、さらに架橋地点は水深が浅いため、潮の干満の時間を見越した工程調整が必要となる。また、非常に浅い場所については、船底が着底することもあるため、必要な作業船については着底用の艀装を行っている。

現在、架設は柱頭部架設を行っているため、本報文のセグメント架設については柱頭部の架設について記述する。

柱頭部のセグメントは最大重量400t以下とするため、橋軸方向に3分割して架設しており、1日1個のセグメントを搬出・運搬・架設(実際に架設に要する時間は1時間30分程度)するため、柱頭部架設完了には計3日を要する。その後、両サイドに載せたセグメントを1個ずつ引き寄せ、一体化して柱頭部を完成させる。柱頭部セグメントの架設要領を図-10に、クレーンで架設している様子を写真-2に示す。

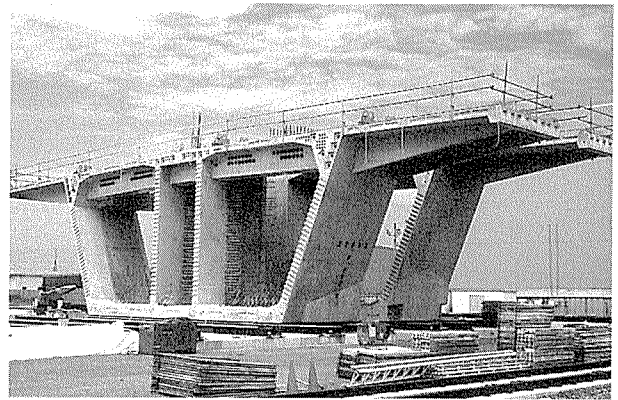


写真-1 セグメント仮置き

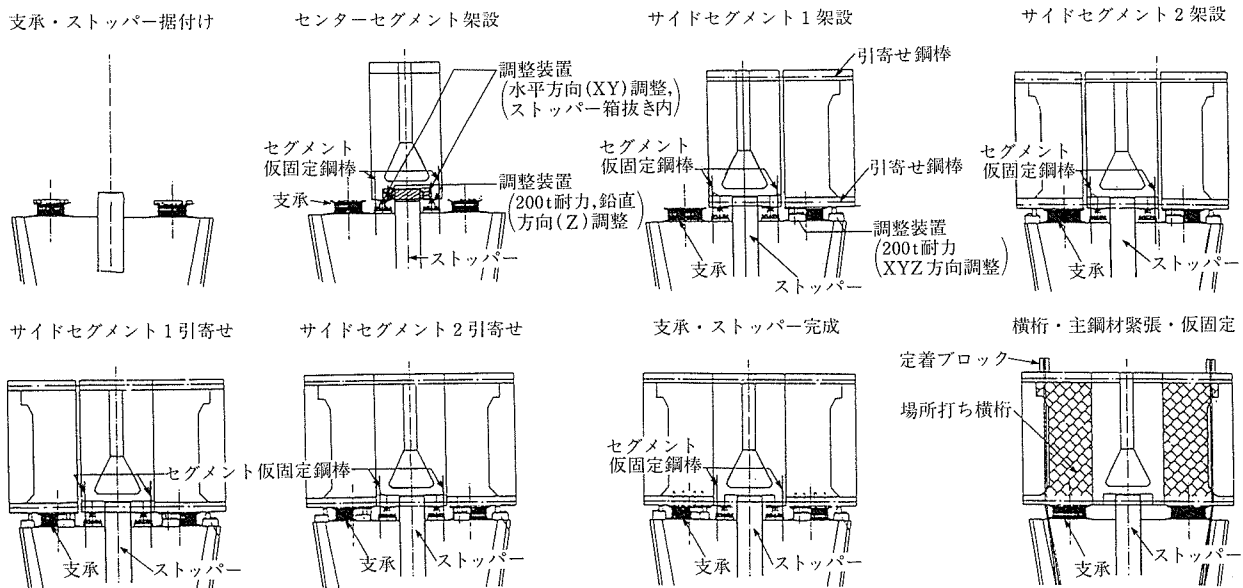


図-10 柱頭部セグメント架設要領

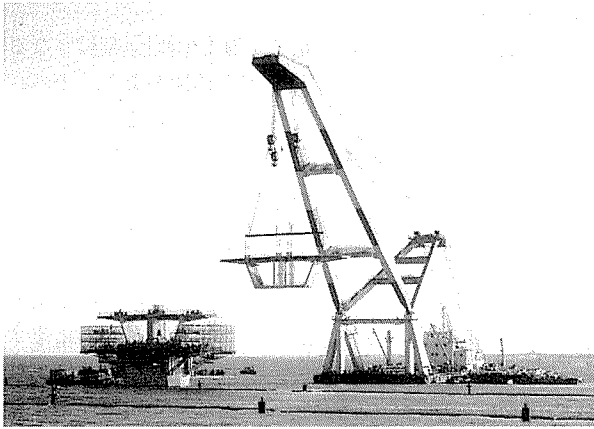


写真-2 セグメント架設

## 7. おわりに

本橋は、前章までで記述したような試験・解析のほかに

もさまざまな検討を行い設計・施工に生かしている。

現在、詳細設計もほぼ終わり、柱頭部の製作・架設を行っており、順調に進めば標準部のセグメントの製作は年内に開始され、張出し架設も来年3月には始まる予定である。

今後工事を進めていくにあたっては、いまだ解決すべき課題も残されており、これらを解決して無事両橋を完成させることが今後の長大橋の設計・施工に関して有意義な技術資料になるものと考えられる。

### 参考文献

- 1) 角谷, 酒井: 木曾川橋・揖斐川橋の計画—第二名神高速道路—, プレストレストコンクリート, Vol.39, No.2, pp.100~105, 1997
- 2) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 1993
- 3) Carln L. RobertsWollmann: Temperature Induced Deformations in Match Cast Segments, PCI Journal, pp.62~71, Jul-Aug 1995

【1998年12月22日受付】

### ◀ 刊行物案内 ▶

## 新しいPC技術の動向

— 第26回PC技術講習会 —

(平成10年2月)

頒布価格: 5 000円 (送料 500円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会