

(仮称) 矢部川橋の計画と設計

— PC 3 径間連続曲線斜張橋 —

小口 浩*1・横峯 正二*2・有角 明*3・山田 浩司*4

1. はじめに

(仮称) 矢部川橋は、一般国道 208 号有明海沿岸道路高田大和バイパスのうち一級河川矢部川を渡河する位置に建設される、橋長 517 m の PC 3 径間連続斜張橋である。

本橋は、平面曲線 $R = 1\,150\text{ m}$ を有する曲線橋である。このため、死荷重状態においても、主桁に橋軸直角方向曲げモーメントが発生するとともに、主塔位置の支承に橋軸直角方向水平反力が発生する。逆 Y 型の主塔を曲線外側に傾斜させることにより、主桁の橋軸直角方向曲げモーメントおよび、主塔位置の支承の橋軸直角方向水平反力を低減させ、ストッパー構造への負担を軽減した。

主桁断面は、有効幅員 19.0 m の広幅員であること、曲線を有することから、ねじり剛性の高い箱桁形式とした。また、自重軽減、施工性の向上、コスト削減の観点から、傾斜した中ウェブを有する逆台形箱桁断面とし、斜材定着部

の定着横桁を省略した構造を可能とした。

斜材吊り形式は、1 面吊りのファン形式で、斜材定着間隔を密にして定着部をコンパクトにするため、主塔の斜材定着構造は、分離固定方式のセパレート定着とし、鋼殻構造をコンクリートで巻き立てる合成構造とした。鋼殻は、各斜材定着部で分割されたユニット構造とし、コンクリートを巻き立てることにより斜材の鉛直分力は、鋼殻・コンクリートの合成構造で、斜材の水平分力は、鋼部材で受け持つ構造とした。

本稿では橋梁計画のうち、斜材定着横桁を省略した主桁形状、傾斜主塔、ストッパー構造について報告する。

2. 橋梁概要

本橋の橋梁概要を以下に示す。また、全体一般図を図 - 1、主塔正面図を図 - 2、主桁断面図を図 - 3、に示す。

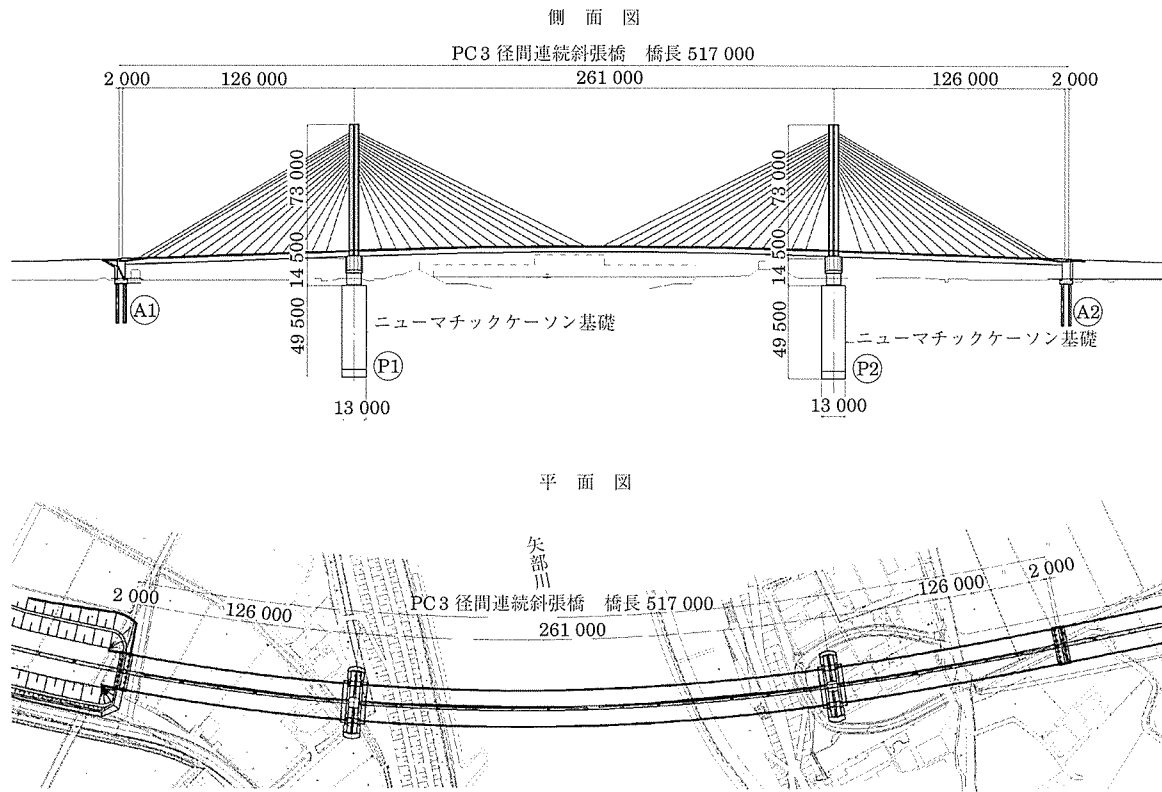


図 - 1 全体一般図

*1 Hiroshi OGUCHI : 国土交通省 九州地方整備局 福岡国道事務所 所長

*2 Masaji YOKOMINE : 国土交通省 九州地方整備局 福岡国道事務所 有明海沿岸道路出張所 所長

*3 Akira ARIKADO : (株)長大 大阪支社 第一構造技術部 主査

*4 Kouji YAMADA : (株)長大 福岡支社 構造技術部 主任

○ 設計報告 ○

構造形式：PC 3 径間連続斜張橋
 道路規格：第 1 種 第 3 級
 設計荷重：B 活荷重
 橋 長：517.000 m
 支 間 長：126.000 m + 261.000 m + 126.000 m
 有効幅員：19.000 m
 平面線形：R = 1 150 m ~ A = 500
 縦断勾配：3.5 % ↗ ~ 3.5 % ↘
 横断勾配：3.0 % ~ 2.0 %

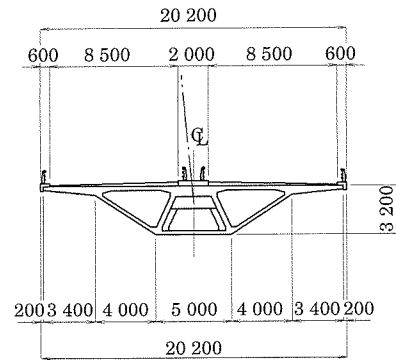


図 - 3 主桁断面図

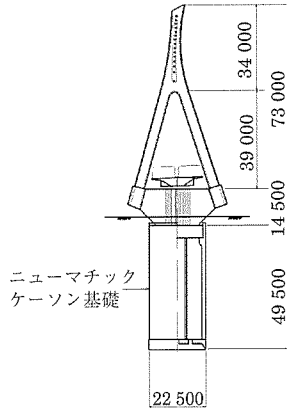


図 - 2 主塔正面図

3. 主桁の設計

3.1 主桁断面

PC 斜張橋では、主桁重量を軽減することにより橋梁全体のコストを下げる事が可能となる。本橋では、図 - 3 に示すように、下床版と中ウェブ、外ウェブの交点を一致させトラス構造とすることにより斜材張力の主桁への伝達性状を改善し、斜材定着部において重量増となる斜材定着横桁を省略できる構造を採用した。このため、表 - 1 の主桁断面形状比較表に示すように、斜材定着横桁がある従来形式に比べ主桁重量を約 12 % 軽減することが可能となった。以下に主桁の設計手法の概要を記す。

表 - 1 主桁断面形状比較表

	3 室箱桁断面	逆台形 3 室箱桁断面
形 状 図		
断 面 諸 元	断面積 $A = 13.8 \text{ m}^2$ 曲げ剛度 $I = 18.5 \text{ m}^4$ ねじり剛度 $J = 42.4 \text{ m}^4$	断面積 $A = 13.9 \text{ m}^2$ 曲げ剛度 $I = 15.3 \text{ m}^4$ ねじり剛度 $J = 31.0 \text{ m}^4$
構 造 性	斜材張力を主桁全体に伝達するために斜材定着部に隔壁を必要とする。	下床版、中ウェブ、外ウェブの交点を一致させることにより、斜材張力の主桁への伝達が優れる。斜材定着部に隔壁を必要としない。
施 工 性	隔壁は、主桁と一体施工となるため、配筋、型枠に設置撤去など施工が煩雑である。	斜材定着部は定着突起、ダイヤフラムのみで開口部が広く、施工性は良好である。
主桁コンクリート	$V = 9 600 \text{ m}^3$ (1.12)	$V = 8 600 \text{ m}^3$ (1.00)
評 価	主桁内空断面が広く、ウェブの傾斜が緩やかであるため、施工性は良好である。 斜材定着部に隔壁を必要とし、主桁自重が採用案より増加する。	主桁重量の低減は、斜材重量の低減にもつながり、橋梁全体のコスト縮減効果は高いと評価できる。また、施工性も良好である。

3.2 ウェブのせん断分担率

せん断力に抵抗する中ウェブ、外ウェブは、おのおの部材厚、傾斜角が異なる。また、隔壁を省略し2枚の中ウェブを直接、斜材が吊る構造であるため、中ウェブ、外ウェブのせん断分担率が明確でない。このため、1/4 橋部分をモデル化した3次元 FEM 解析を行い、着目斜材ごとのせん断分担率の算定を行った。この結果、せん断分担率は、ウェブ厚に比例せず、垂直に近い中ウェブにせん断力が寄る傾向となることが判明した。これは、断面中央での一面吊り形式であること、隔壁を省略しているため外ウェブへのせん断力の伝達遅れが生じていること、などが原因であると考えられる。

せん断に対する設計は、中ウェブ2本で主桁全体の安全性を保証し、外ウェブは、部材厚比をせん断分担率として行うものとした。図-4に解析モデル全体図、図-5に解析モデル(斜材定着部)、表-2に解析結果を示す。

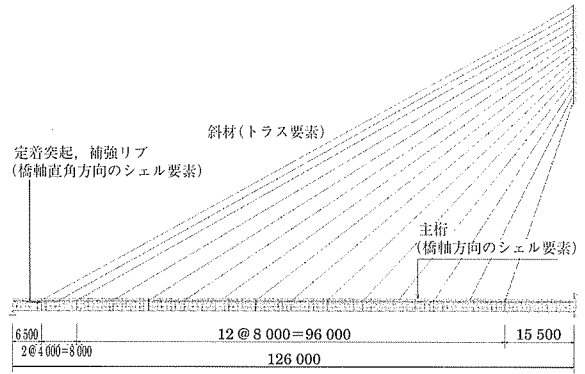


図-4 解析モデル全体図

表-2 解析結果

	ウェブ厚比	FEM 解析によるせん断分担率	設計に用いたせん断分担率
外ウェブ	38 ~ 42 %	32 ~ 38 %	38 ~ 42 %
中ウェブ	58 ~ 62 %	62 ~ 68 %	100 %

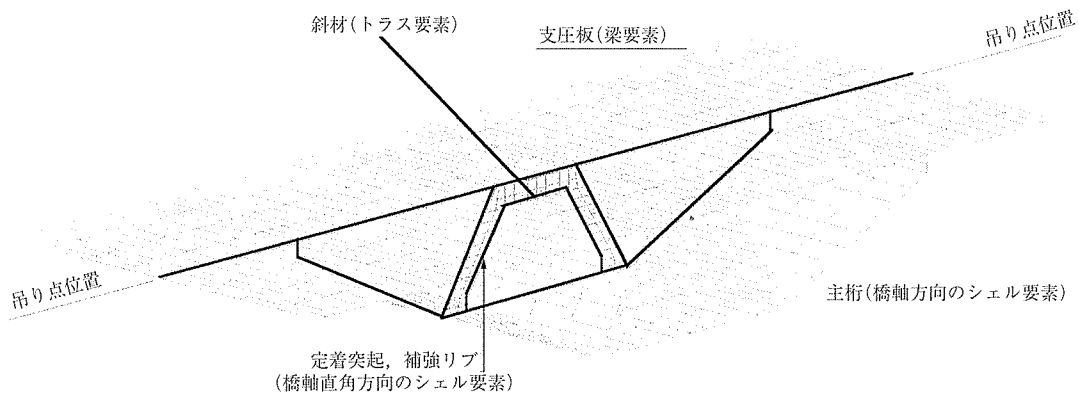


図-5 解析モデル(斜材定着部)

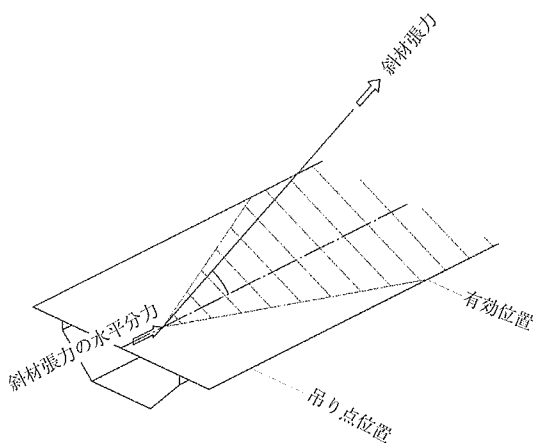


図-6 斜材張力による主桁軸力分布

3.3 主桁内有効軸力分布

本橋は、広幅員の一面吊り形式である。このため、図-6に示すように、斜材張力により主桁に作用する軸力が主桁断面に有効に作用する位置は、斜材定着点と一致せず、斜材定着点の主塔側となる。3次元 FEM 解析により主桁の軸方向応力分布を求め、斜材張力により主桁に作用する軸力が主桁断面に有効に作用する位置を把握するものとした。

この結果、主桁の軸方向応力分布は、斜材定着点から14mの位置で均等になっており、図-7に示すように、軸方向応力の広がり、 $35^{\circ}20'$ で、道路橋示方書Ⅲ編に示されるプレストレスの広がり角度 $\beta = 33^{\circ}40'$ とよく一致していることが判明した。以上より、主桁断面の設計は、斜材張力による軸力を斜材定着点から16m主塔側(2斜材主塔側)へシフトした位置から有効に作用するものとし、斜材張力によるせん断力、曲げモーメントは、斜材定着点から有効に作用するものとした。

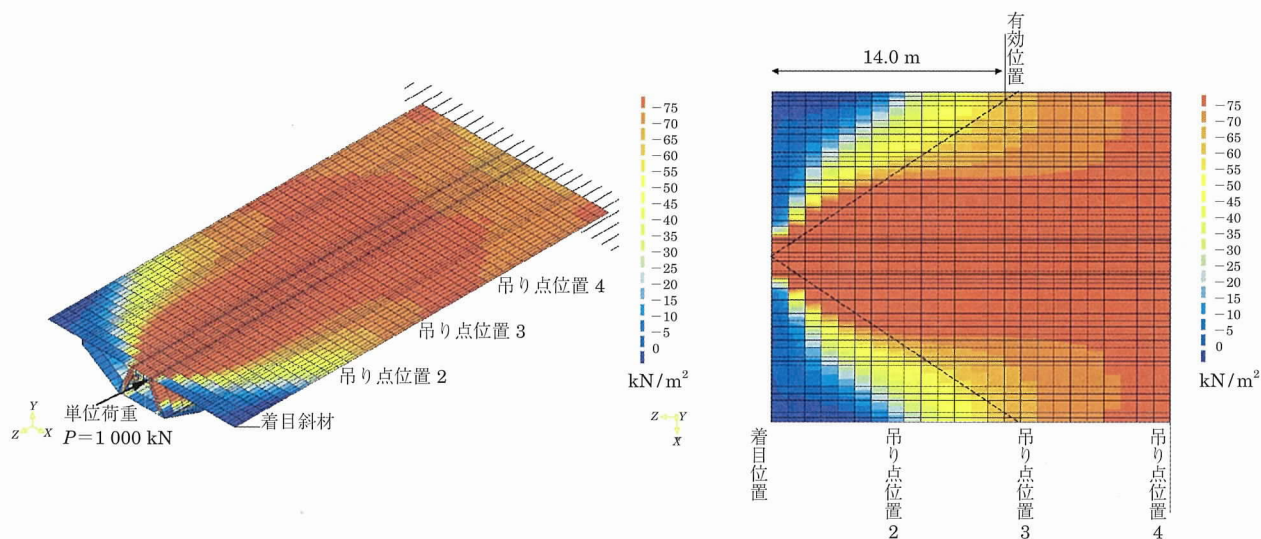


図 - 7 FEM 解析結果

4. 主塔の設計

4.1 主塔形状

本橋は、平面曲線を有する斜張橋であるため、死荷重状態で直線橋には見られない以下の断面力が発生する。

- ① 主桁橋軸直角方向曲げモーメント
- ② 主塔橋軸直角方向曲げモーメント
- ③ 主塔位置の支承に橋軸直角方向水平反力

主桁および主塔に作用する橋軸直角方向曲げモーメントに対しては、主桁内に配置する PC 鋼材、塔柱に配置する鉄筋で十分に断面構成可能である。しかしながら、主塔位置の支承には、免震ゴム支承を計画しているため、水平方向に持続荷重が作用したときの免震ゴム支承の長期的な安定性に不安が残る等の問題が生じた。図 - 8 に主桁および塔柱の断面力図を示す。

本橋の設計に先立ち、塔柱を傾斜、偏心させる等の水平反力の低減方法について検討を行うものとした。図 - 9 に主塔形状の分類を示す。

支承に作用する水平反力の低減と相反して主桁に作用する橋軸直角方向曲げモーメントは増加する傾向にある。こ

のため、主桁および主塔に作用する橋軸直角方向曲げモーメントの限界値を以下のように設定した。

- ① 主桁断面は、全死荷重時にフルプレストレス状態とする。
 - ② 塔柱断面は、全死荷重時に全断面圧縮状態とする。
- (1) 偏心主塔の検討

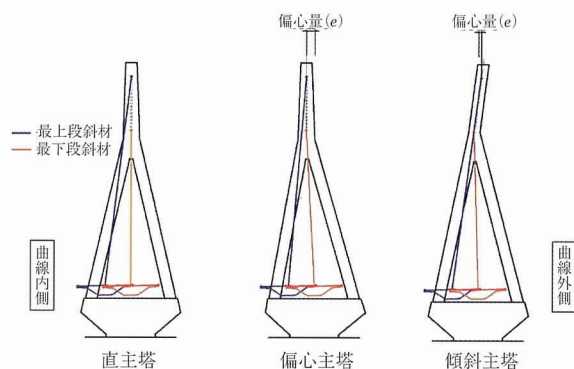
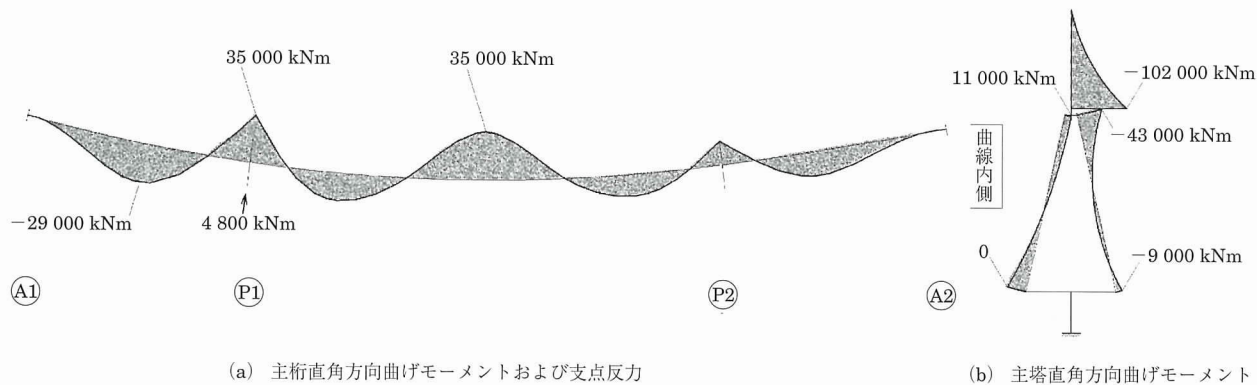


図 - 9 主塔形状の分類



(a) 主桁直角方向曲げモーメントおよび支点反力

(b) 主塔直角方向曲げモーメント

図 - 8 断面力図 (直主塔のケース)

主塔位置における主桁軸線から斜材定着点を橋軸直角方向に偏心させ、偏心量と各断面力の関係を把握するものとした。偏心量は最上段から最下段まで一定とした。偏心量と各断面力の関係は、曲線外側に偏心させると主桁の曲げは減少し、主塔の曲げおよび水平反力は増加する傾向にある。

主桁、主塔の限界値を満足し、水平反力をもっとも小さくできる偏心量は、曲線内側に 0.5 m であることが判明した。

(2) 傾斜主塔の検討

傾斜主塔の偏心量は、偏心主塔と異なり、最上段斜材と最下段斜材の偏心量を直線的に変化させるものである。その組合せは無数にあるため、予備検討を行い、もっとも効果が期待できる最下段斜材位置で偏心量を曲線内側に 1.2 m とし、最上段斜材位置の偏心量を変化させるものとした。偏心量と各断面力の関係は、曲線外側に偏心させると主桁の曲げは減少し、水平反力は増加する傾向にある。主塔の曲げは、偏心主塔と異なり顕著な変化はなかった。

主桁、主塔の限界値を満足し、水平反力をもっとも小さくできる最上段斜材位置は、主塔位置における主桁軸線上であることが判明した。

(3) 主塔形状の決定

偏心主塔、傾斜主塔の検討結果より、水平反力の低減に最も効果がある形状は、偏心量を最上段斜材位置で主塔位置における主桁軸線上、最下段斜材位置で曲線内側に 1.2 m 偏心させた傾斜主塔が最適であることが判明した。

この形状を採用することにより、主塔形状を直主塔とした場合と比べ、主桁の橋軸直角方向曲げモーメントは 25 % 増加するものの、塔柱の橋軸直角方向曲げモーメントは 40 %、主塔位置の支承の水平反力は 25 % 軽減することが可能となった。

また、水平反力の低減は可能であるが、水平反力を 0 にすることは困難であったため、主塔の支承位置に常時および L1 地震時には固定、L2 地震時には免震支承の変形を阻害しないように可動となるストッパー構造を設ける計画とした。

5. ストッパー構造

5.1 ストッパー構造の選定

ストッパー構造は、主桁の所要の耐震性能を確保するためには、免震支承を用いてエネルギー吸収を図り主桁の応答曲げモーメントを低減する必要があることと、持続荷重としてゴム支承に作用する水平反力に対して、ゴム支承が長期的安定性を保証できないことから、本橋に必要な構造である。ストッパー構造の要求性能を図 - 10 にまとめる。

ストッパー構造の選定は、地震後の交換が容易な構造(修復性)である必要があるため、アンカーバー、サイドブロック等を破壊することを前提とした構造は選定から除外し、地震後も地震前と同等の機能が確保できる多機能ダンパーをストッパー構造として選定した。

多機能ダンパーは、大きな内圧を与えることによって、ある一定荷重までは固定として機能し、それ以上の荷重に

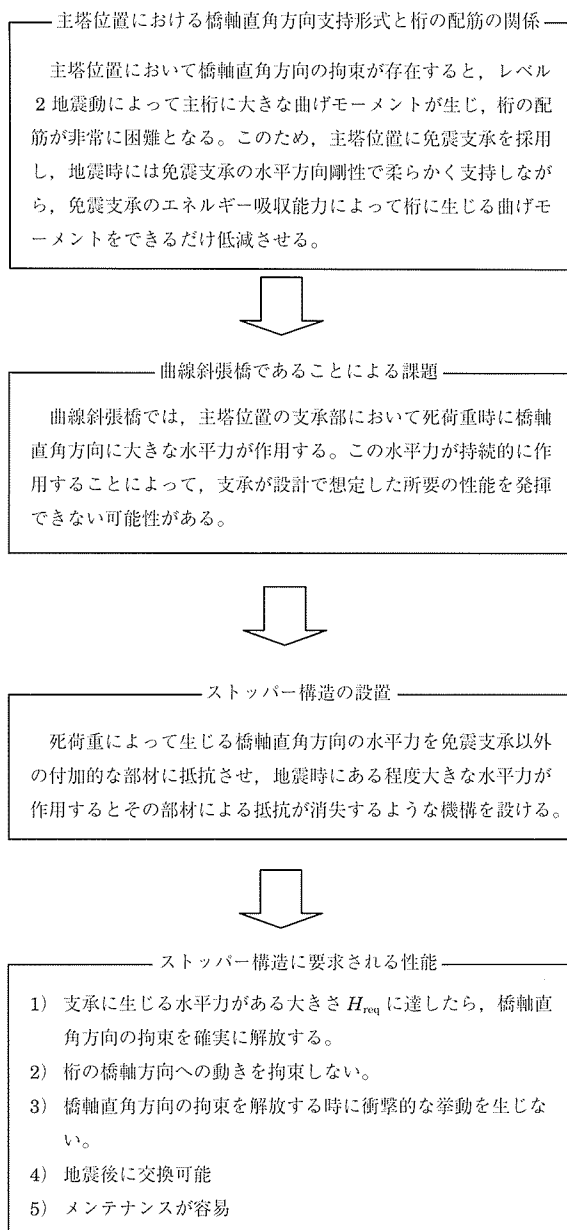


図 - 10 ストッパー構造の要求性能

対しては軟らかいばねとして機能するダンパーである。

多機能ダンパータイプのストッパーとしては、表 - 3 に示す各種の構造が考えられる。本橋では、製作性および製作コストからトリガータイプ(スプリング型)を採用した。

5.2 ストッパー構造の性能試験

本橋で採用するトリガータイプのストッパー構造は、これまでに採用事例がない新しい構造である。このため、現場での使用環境条件に応じた実験的な性能検証を必要とした。性能検証実験は、独立行政法人土木研究所耐震研究グループの指導の下で行われた。実験実施要領を表 - 4 に示す。

実験の結果、ストッパー構造はすべての要求性能を満たしており、本橋への適用に問題ないことが確認された。

表 - 4 実験実施要領



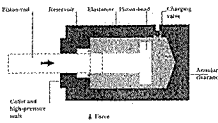
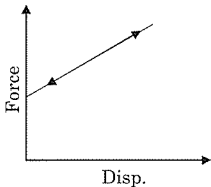
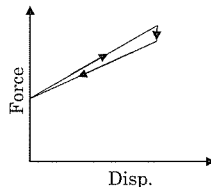
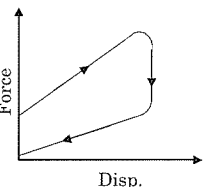
	実験内容
温度依存性試験	気温変化に対する特性確認を目的とする。 外気温度を低温、常温、高温と変化させて、静的載荷を行う。
動的載荷試験 1	温度および載荷速度への依存性の確認を目的とする。 外気温度を低温、常温、高温の3段階に設定し、それぞれの温度状態で載荷速度を低速、中速、高速に変えて9ケースの試験を行う。
動的載荷試験 2	地震時の動的な繰返し荷重に対する安定性の確認を目的とする。 連続 50 回の繰返し載荷実験を行う。

5.3 ストッパー構造の設計

主塔位置に設置する支承システムは、免震支承と持続的な水平力に対応するストッパー構造と動的な動きに対応するダンパー構造から構成するものとした。主塔部での主桁橋軸直角方向固定方法は、図 - 11 に示すように、常時水平荷重に対しては、ストッパー構造が固定装置として機能し、ストッパー構造のトリガー荷重を超える地震荷重が作用した場合には、曲線外側方向の荷重に対して免震支承、ストッパー、ダンパーで、曲線内側方向の荷重に対して免震支承、ダンパーで、共同して荷重を分担する。

曲線内側に設置したダンパーは、地震や風荷重により主桁が曲線内側に移動し、元の位置に復元したときにストッパーと主桁が衝突する懸念があるため、その衝撃を緩和する目的で設置した。ダンパーには、荷重分担機能とエネルギー吸収機能があるため、設計にそれを考慮するものとした。

表 - 3 ストッパー構造比較表

構造タイプ	スプリング型 (鋼コイルスプリング等)	トリガータイプ (スプリング型)	トリガータイプ (アブソーバー型)
構造			
			
	プレストレスを与えたコイルばねの初期荷重以下の荷重に対しては変位しない。初期荷重以上の荷重に対してはコイルばねの剛性で変形する。荷重が除荷されると初期位置に復元する。プレストレスおよびストロークを大きくとれないので構造規模の小さいものに限定される。	シリンダー内に注入された特殊充填材の内圧相当以下の荷重に対してはピストンが動かない。内圧相当以上の荷重が除荷されると初期位置に復元する。ピストンとシリンダーの間の流動抵抗による減衰力がほぼない。抵抗力はシリンダー内に進入するロッドの体積によって生じ、速度には依存しない。	シリンダー内に注入された特殊充填材の内圧相当以下の荷重に対してはピストンが動かない。内圧相当以上の荷重が除荷されると初期位置に復元する。ピストンとシリンダーの間の流動抵抗による減衰力が発生する。抵抗力は速度に依存するため、定格速度の決定を高いレベルにする必要がある。
温度依存性	コイルばね素材の温度依存性は少ない。	温度依存性がある。20℃を基準としたトリガー抵抗力に対し、-10℃で25～30%低減、40℃で20%程度上昇する。	静的トリガーには、スプリングタイプと同様に温度依存性がある。動的な動きに対しては、温度依存性が少ない。
振動数依存性 (速度依存性)	振動数依存性は少ない。	振動数依存性は少ない。	振動数の影響を受ける。その割合は振動数のおおむね0.1乗以下と少ない。
製作性	スプリング自体の製作は可能であるが、ストッパー構造としての構成が難しい。	製作可能	製作可能
デバイス規格	45 kN × 124 機	トリガー 1400 kN × 4 機 (温度依存性考慮)	トリガー 1400 kN × 4 機 (温度依存性考慮)
本橋への適合性	配置本数が多くなり、施工面を考慮すると適合性はない。	アブソーバタイプより経済性に優れる。	減衰機能も有するがストッパーの要求性能として減衰機能は必ずしも必要ない。スプリングタイプより割高である。
評価	△	◎	○

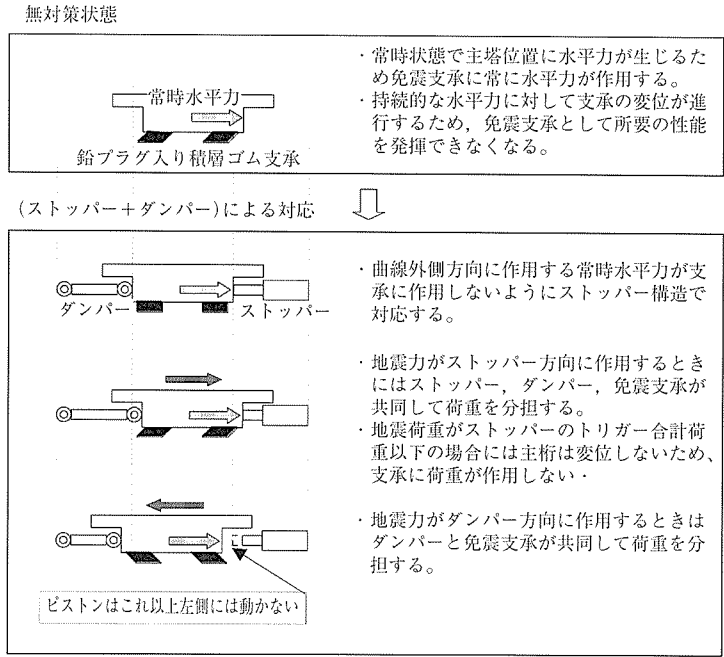


図 - 11 各装置の荷重分担方法

ストッパー構造のトリガー荷重は、主塔位置での支承の水平反力から、低温時のストッパーの抵抗力の低下 30% を考慮して決定した。これは、先の性能検証実験で低温時 (-10℃) に 25 ~ 30% の抵抗力の低下が見られたためである。

また、ストッパー構造の最大ストローク量は、免震支承、ストッパー、ダンパーをおおの非線形ばね要素でモデル化した非線形動的解析から求めた最大応答変位に余裕量 10% を考慮して 300 mm に決定した。図 - 12, 13 に各装置の応答履歴と荷重分担を示す。

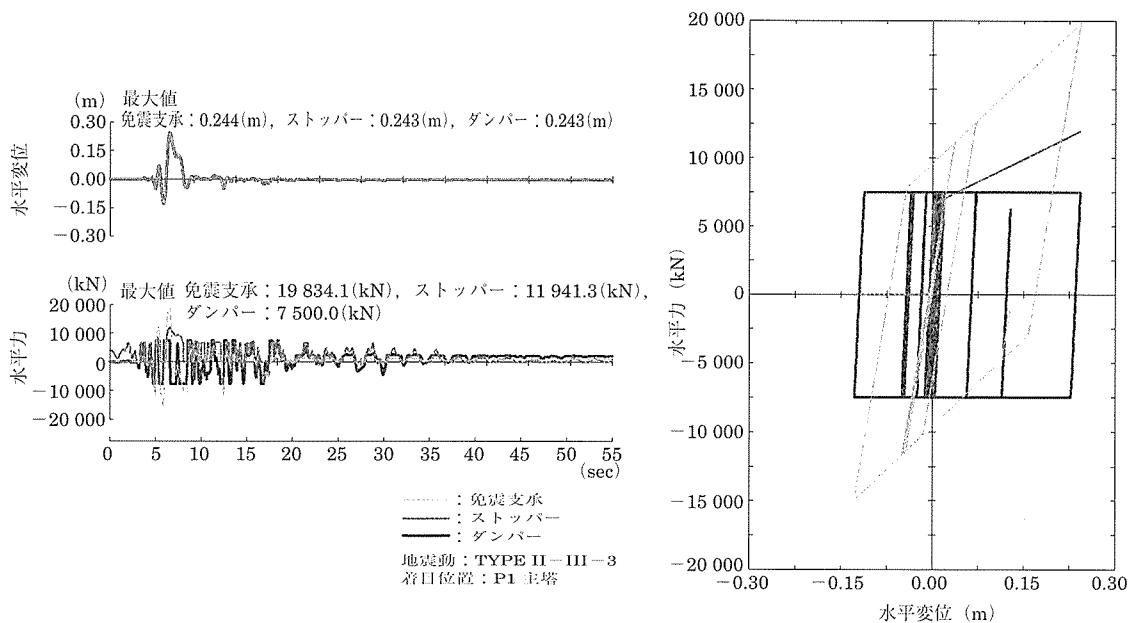


図 - 12 各装置の応答履歴

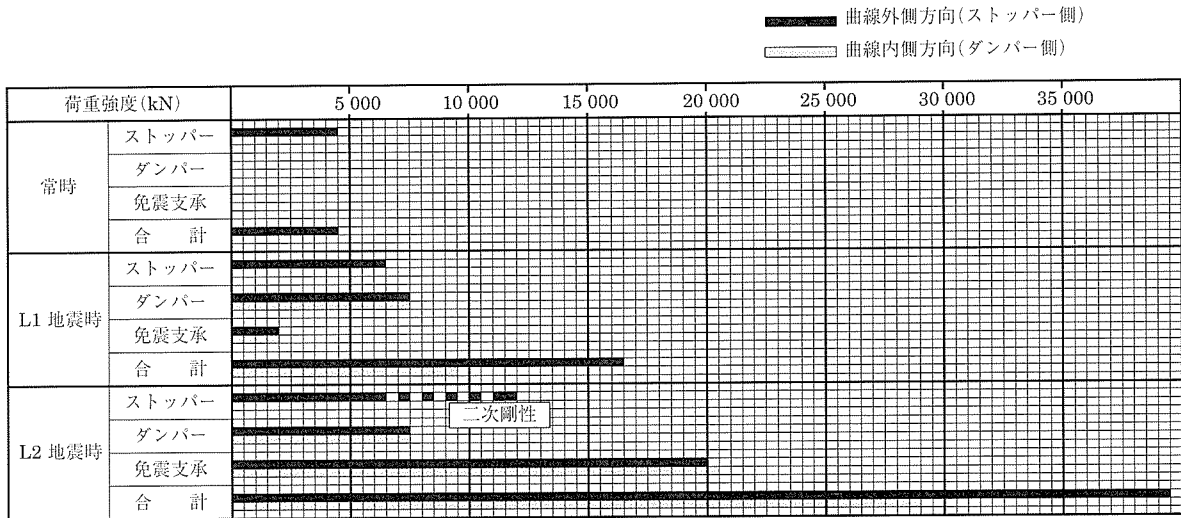


図 - 13 各装置の分担荷重

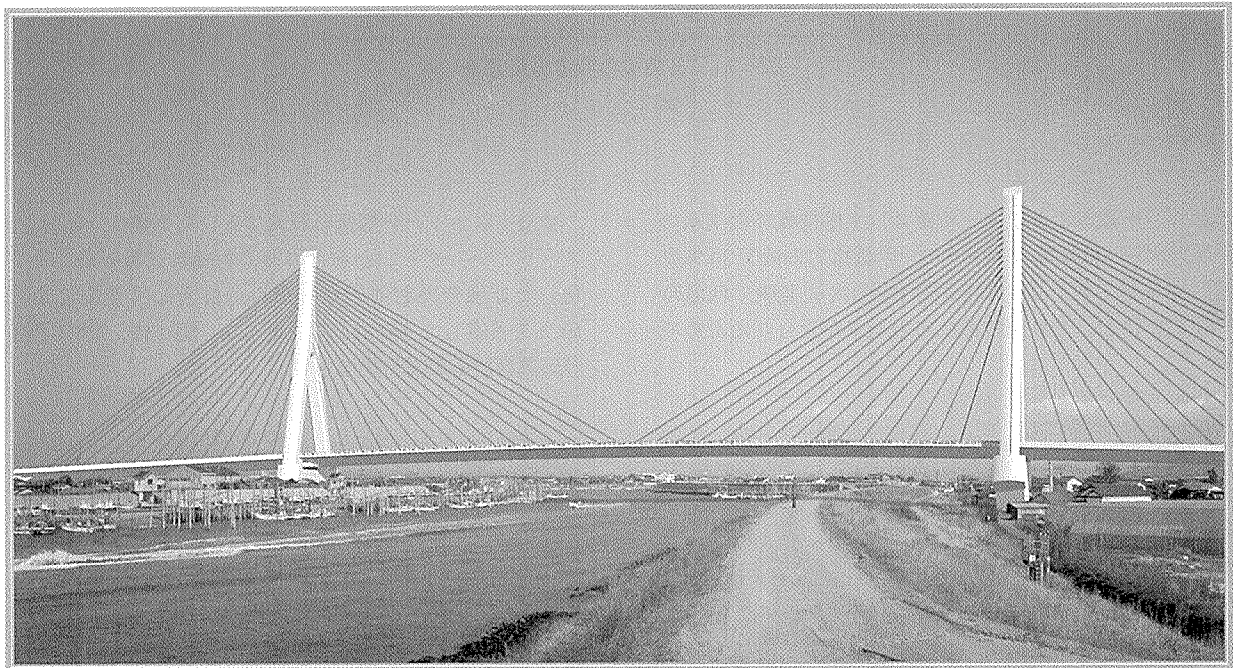


図 - 14 (仮称) 矢部川橋完成予想図

6. おわりに

本稿では、曲線斜張橋であるため、国内に採用実績のない多機能ダンパーなど、(仮称) 矢部川橋で新しく採用した事例について報告した。

本橋は、現在ニューマチックケーソンの沈設が終了し上部構造の建設に着手している。平成 20 年春には、完成する予定である。計画段階から、ご指導、ご援助をいただきました「有明海沿岸道路橋梁検討委員会」の委員長を務めていただきました九州大学彦坂教授(当時)を初め委員の

方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 横峯正二, 運上茂樹, 遠藤和男, 貴志友基: 曲線斜張橋に用いるスプリングダンパーに関する性能検証実験: 土木技術資料第 47 巻第 2 号, 2005, (財) 土木研究センター
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編

【2006 年 3 月 8 日受付】