

設計思想から見た鉄道高架橋の 構造形態の変遷に関する一考察

竹田 知樹¹・関 文夫²

¹正会員 川田工業株式会社 技術部 東京技術課 (〒114-0023 東京都北区滝野川1-3-11,
E-mail: tomoki.takeda@kawada.co.jp)

²正会員 工博 日本大学理工学部土木工学科 (〒101-8303 東京都千代田区神田駿河台1-8-14,
E-mail: seki@civil.cst.nihon-u.ac.jp)

鉄道高架橋を構造に着目して分類すると、水平荷重を特定の部材に局所的に負担させた変位拘束構造と、特に部材を設けず各々の柱で負担させた分散構造の2種類に大別できる。我が国初の本格的な鉄道高架橋である新永間市街線と、これに続く万世橋－東京間の高架橋は、連続アーチ形式の変位拘束構造であった。一方、現在は分散構造のビームスラブラーメン形式が標準設計として普遍的に採用されている。本研究は、我が国の鉄道高架橋の歴史の中で、変位拘束構造がどのような位置付けであったのかを明らかにするため、文献調査によって設計思想の変遷を明らかにし、背景にある技術の考えを示唆した。また、両構造の既往の比較に対し、構造特性・経済性から再検証を行い、公正に評価することを試みた。

キーワード: 鉄道高架橋, 変位拘束構造, 分散構造, 設計思想, 構造史, 構造特性, 経済性

1. はじめに

鉄道と道路交通の平面交差の排除を目的として、陸上に連続して構築される鉄道の高架橋は、技術の進歩に伴って様々な形式のものが建設されてきたが、これらは構造に着目すると、地震等の水平荷重に対し、変位を拘束する部材を設け、局所的に負担させた変位拘束構造と、特に部材を設けず、各々の柱を太くすることで、分散して負担させた分散構造の2種類に大別できる。我が国初の本格的な鉄道高架橋である新永間市街線と、これに続く万世橋－東京間の高架橋は、煉瓦から鉄筋コンクリートへ材料が変化したものの、同じ連続アーチの変位拘束構造であった。一方、現在はビームスラブ式ラーメンの分散構造が標準設計として普遍的に採用されている。

本研究では、我が国の鉄道高架橋の歴史の中で、変位拘束構造がどのような位置付けであったのかを明らかにするため、外部に公開された文献を用いて設計思想の変遷を明らかにし、背景にある技術の考えを示唆した。さらに、分散構造が標準設計として定められる基となった、東海道新幹線設計時に行われた両構造の比較に対し、構造特性・経済性の両面から再検証を行い、公正に評価することを試みた。

2. 鉄道高架橋の構造形式の変遷

(1) 調査対象及び時代区分の定義

JRと私鉄の在来線、および新幹線の既設の高架橋を調査対象とした。4つの時代区分に分けて調査を行い、海外から技術を導入して設計・施工がされた時期を黎明期、都市部の発展に伴って高架橋が普遍的に建設されるようになった時期を普及期、戦後の混乱期から東海道新幹線の建設が本格化する前までの、新構造が模索された時期を新構造模索期、新幹線の建設が全国に波及し、高架橋が量産された時期を量産期として定義した。

(2) 各時代区分における構造の変遷

①黎明期(1910～1919)

1910年竣工の新永間市街線高架橋は、ベルリン市街線高架橋の設計を担当したプロイセン邦有鉄道のフランツ・バルツァーを招聘して設計が進められた。この中で、濃尾地震で煉瓦構造物の被害を調査した震災予防調査会から、地震のせん断力に耐える大橋台を入れた構造とすることが提言され、端部の橋台または3～4径間おきに入れたグループ橋脚と称する太い橋脚に地震時の水平力を負担させた変位拘束構造が採用された¹⁾ (図-1, 写真-1)。

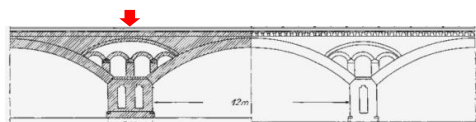


図-1 新永間市街線高架橋(左がグループ橋脚)¹⁾



写真-1 新永間市街線高架橋(矢印がグループ橋脚)¹⁾

続いて1919年に竣工した万世橋-東京間高架橋は、同じ連続アーチ形式とされたが、材料が煉瓦から鉄筋コンクリートへ変化した。これは阿部美樹志によって鉄筋コンクリートの技術が導入されたもので、単版桁、スラブ式ラーメンといった新形式も、条件に合わせて採用された²⁾。これらは、ユニットが長くなる場合に、5~8径間おきに太い橋脚を入れた、変位拘束構造である(図-2, 3)。

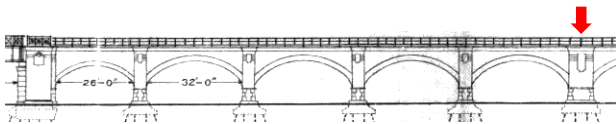


図-2 万世橋-東京間連続アーチ高架橋³⁾(矢印が太橋脚)

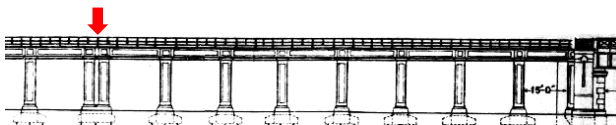


図-3 神田駅付近 単版桁高架橋³⁾(矢印が太橋脚)

② 普及期(1920~1941)

阿部美樹志は、1920年に鉄道省を辞して設計事務所を設立し、ここで私鉄の高架橋の設計を担当した。最初に手掛けた1926年竣工の阪急梅田高架橋は、接続形式をゲルバー式としたビームスラブ・フラットスラブの複合形式であったが、これは関東大震災の鉄筋コンクリート構造物の被害を教訓に、ユニット端部に丁字型の耐震壁を配置した⁴⁾変位拘束構造であった(図-4, 写真-2)。

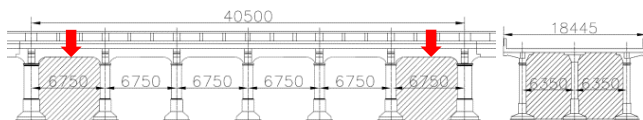


図-4 阪急梅田高架橋⁵⁾(矢印が橋軸方向の耐震壁)



写真-2 阪急梅田高架橋(矢印が橋軸方向の耐震壁)

一方の鉄道省では、都市化に伴う高架化の要請の高まりに対し建設費が捻出できないという問題が起きていた。そこで、東京改良事務所の中山忠三郎は、高架下を広く使用でき、賃料を高く設定できるスラブ式を採用することを提唱し⁶⁾、1925年竣工の上野-神田間高架橋(写真-3)以降、全国で普遍的に採用されるようになった。この形式は、橋脚に版を載せた単版桁、柱と版を剛結したスラブ式ラーメン、梁と柱を剛結したビームスラブ式ラーメンの総称で、特にビームスラブ形式は使用するコンクリート量が少なく経済的で、地震に対しては構造全体で抵抗することから強い構造である⁵⁾として推奨された。



写真-3 上野-神田間 スラブ式高架橋

阿部美樹志の高架橋は、1927年の東急大井町高架橋(写真-4)以降は耐震壁を橋軸直角方向のみに配置した構造に、1933年の近鉄鶴橋高架橋(写真-5)からは接続形式が突合せ式に変更されると共に、耐震壁が完全に無い構造へ順次移行し²⁾、変位拘束構造の考えは消滅した。



写真-4 東急大井町高架橋



写真-5 近鉄鶴橋高架橋

③ 新構造模索期(1950~1962)

戦後の高架橋建設は、1950年に東京駅側から着工した山手・京浜東北線分離工事から再開された。神田駅以南の区間は、戦前と同じ分散構造の突合せ式ビームスラブ形式が採用された⁶⁾が、神田駅以北の区間に着手した1953年頃から国鉄の財政悪化が顕著になったことで、建設費を圧縮する必要が生じた。そこで、東京工事事務所の五味信は、建築分野で資材を節約できる構造として普及していた壁式構造を、高架橋に適用することを考案した。当初は高架下建築を一体で構築する計画であったが、実際は建築部分を除いた剛性ラーメン(図-5, 写真-6, 7)、壁式ラーメン(図-6, 写真-8)形式で建設された⁷⁾。これらは、端部または中央に設けた橋軸方向の壁柱に、水平力を局所的に負担させた変位拘束構造である。

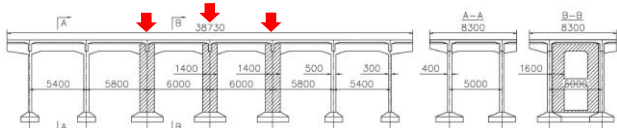


図5 御徒町高架橋 剛性ラーメン構造⁷⁾ (矢印が橋軸方向の壁柱)

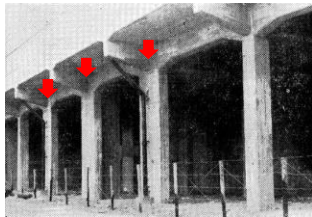


写真-6 剛性ラーメン中央部⁷⁾

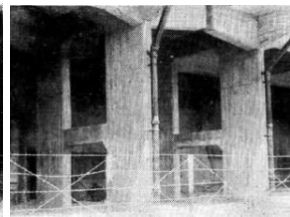


写真-7 剛性ラーメン端部⁷⁾

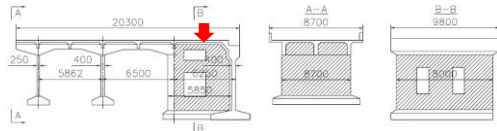


図6 神田高架橋 壁式ラーメン構造⁷⁾ (矢印が橋軸方向の壁柱)

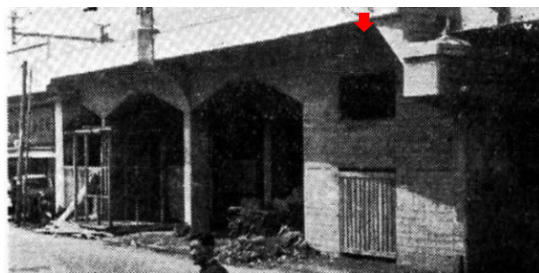


写真-8 壁式ラーメン高架橋⁷⁾ (矢印が橋軸方向の壁柱)

壁式ラーメン構造は新幹線用の新形式(図-7)へ進出し、東海道新幹線で先行して建設された鴨宮試験線で全面的に採用された⁸⁾(写真-9)。これは、梁に鉄筋コンクリート桁のディテールを用いることで(写真-10)支間長を従来の6mから10mへと長くすると共に、水平力をアバットメントピアと称する壁部材に全面的に負担させ、代わりに一般部の柱を300mm×2000mmの薄い壁柱としている。この柱はスラブの温度伸縮を拘束しないため、ユニットを86mまで長くできる。なお、水平・直角の造形を強調するため、柱頭部のハンチを省略している⁹⁾(写真-11)。

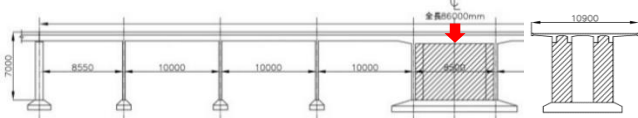


図-7 壁式ラーメン高架橋⁸⁾ (矢印が変位拘束部材)

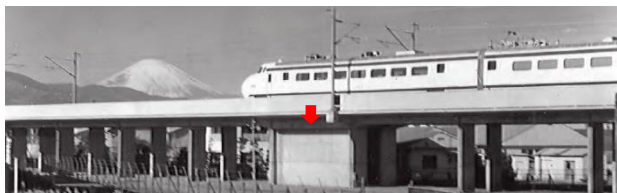


写真-9 鴨宮試験線高架橋⁸⁾



写真-10 梁のディテール



写真-11 梁と柱の接合部

一方のビームスラブ形式も、ユニット中央の柱を太くし、これに水平力を全面的に負担させた変位拘束構造の形式が根岸線吉浜高架橋で採用されるなど¹⁰⁾(図-8, 写真-12)、一部で新形式を模索する動きがあった。

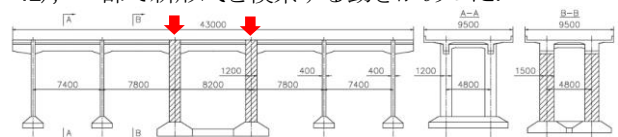


図-8 根岸線吉浜高架橋¹⁰⁾ (矢印が太い橋脚)



写真-12 根岸線吉浜高架橋¹⁰⁾ (矢印が太い橋脚)

④ 量産期(1963～1990)

東海道新幹線の工期は、新丹那トンネルの建設にかかる期間をもとに5年と定められたが、高架橋は総延長116kmを短期間に構築する大掛かりな工事となった¹²⁾。そこで、新幹線総局の河野通之は、既設橋の経済性比較をもとに、分散構造のビームスラブ形式(図-9, 写真-13)を標準設計として選定した。この形式は、軟弱地盤向けに、剛性の高い地中梁を設けた形式が考案されたことで、条件によらず、全線での普遍的な採用が可能とされた¹⁰⁾。

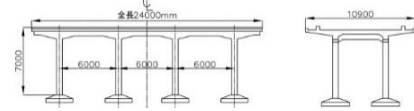


図-9 東海道新幹線標準設計高架橋¹⁰⁾

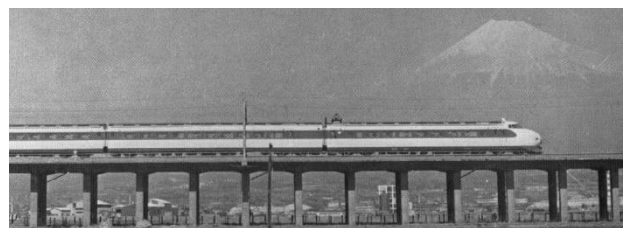


写真-13 東海道新幹線 吉原付近高架橋¹⁰⁾

当初の壁式ラーメンは、品鶴線沿いの目黒川工区(写真-14)、名神高速道路と交差する向日町工区(写真-15)などで採用された。これらは施工試験としての側面も強く¹³⁾、条件に合わせてアバットメントピアの大きさや、ユニットの長さを変えた4形式が試作された。



写真-14 目黒川地区高架橋(軟弱地盤のためユニットを短くした)



写真-15 向日町地区高架橋(躯体高さ 15m)

しかし、本形式は標準設計と比較してスラブのコンクリートの打設単位が大きいことから、施工性に難があるとされ、山陽新幹線以降は採用が見送られた¹⁴⁾。

一方、新線建設のために1964年に設立された鉄道公団では、条件が有利な場合に限定して壁式ラーメンが引き続いて採用された。北陸本線と合流する関係で躯体高さが25mとなった、1973年竣工の湖西線塩津高架橋¹⁵⁾(写真-16)や、地盤が強固で直接基礎とすることができる、1974年竣工の上越新幹線深谷地区高架橋¹⁶⁾(写真-17)などの採用例がある。しかし、供用後に架線柱が共振して、架線が切断する事故が起きたり¹⁷⁾、躯体が高い場合に一般部の壁柱が風で揺れ、足場が安定せず作業に支障が出る¹⁵⁾など、デメリットが目立つ結果となった。



写真-16 湖西線塩津高架橋(躯体高さ 25m)



写真-17 上越新幹線深谷地区高架橋(矢印が共振対策バンド)

一方、国鉄の構造物設計事務所では、壁柱式と称する、地盤の良い所に水平力をまとめて負担させた形式の高架橋が設計された。おぼろ谷を横断する1967年竣工の常磐線小高瀬高架橋¹⁸⁾(図-10)や、V字谷を横断する1968年竣工の篠栗線黒石高架橋¹⁹⁾(図-11、写真-18)などの例がある。

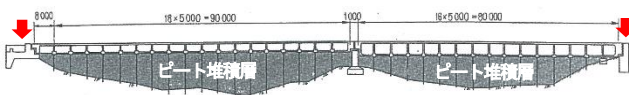


図-10 常磐線小高瀬高架橋¹⁸⁾(矢印が変位拘束部材)

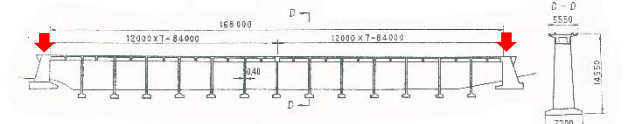


図-11 篠栗線黒石高架橋¹⁹⁾(矢印が変位拘束部材)



写真-18 篠栗線黒石高架橋

この形式は、トンネル坑口に水平力を負担させた1985年竣工の津軽海峡線重内高架橋²⁰⁾(写真-19)などで、その後も暫く採用される動きがあったものの、いずれも特殊構造物としての扱いであった。また、国鉄を退職後に復建エンジニアリング(株)の会長となった五味信によって、全ての橋脚に変位拘束の役割を持たせたV字橋脚の新形式が提案された²⁰⁾(図-12)。しかし、分散構造のビームスラブ形式を標準とする流れを変えることはなかった。



写真-19 津軽海峡線重内高架橋(トンネル坑口が変位拘束部材)

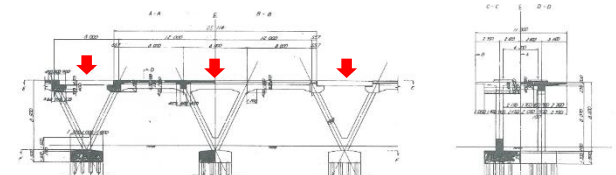


図-12 V字橋脚式高架橋²⁰⁾(全ての橋脚が変位拘束部材)

(3) 考察

黎明期から普及期にかけての変位拘束構造は、濃尾地震や関東大震災といった、地震被害の調査を設計に反映して誕生した。連続アーチ構造では橋脚を太くすることで、ラーメン構造では、耐震壁を入れることで地震荷重に抵抗させた構造とされた。しかし、建設費を補填するために高架下を貸し出す賃料が重視されるようになると、耐震壁の無い分散構造の方が有利であると判断されたものと推察される。鉄道省では、スラブ式を本格的に採用した1925年から早くも分散構造へと移行し、阿部美樹志設計の高架橋も、1927年から段階的に耐震壁の無い構造へと移行し、変位拘束構造の考えは消滅した。

新構造模索期以降の変位拘束構造は、建設費の圧縮を目的として誕生した。変位拘束部材は戦前期と同様の壁部材によるものであったが、全ての水平荷重を変位拘束部材に局所的に負担させ、一般部の柱を極限まで薄くしたという点に差異がある。五味信による壁式ラーメン構造は、新幹線用の新形式へ進化を遂げたものの、河野通之によって分散構造のビームスラブ形式が標準設計として定められてからは、経済性が劣ることや、施工性に難があることを理由に、特殊構造物として一部で限定して採用されるにとどまった。以降の新幹線で標準設計が定着したのは、盛土区間が維持管理上の問題から減り、高架橋が採用される割合が増えたため²⁰⁾、設計の標準化に一層の重点を置くようになったためと推察される。

表-1 鉄道高架橋の構造形式の変遷¹⁻²⁰⁾

		変位拘束構造あり	変位拘束構造なし				論文・工事誌	備考
			ビームスラブ(BS)	プレートスラブ(P)	背割式(B)	フラットスラブ(FS)		
明治	1900年代		張り出し式(C)	ゲルバー式(G)	背割式(B)	フラットスラブ(FS)	橋脚・バルツァー(新永年市街線建築事務所) 東京の高架鉄道(1903)	濃尾地震(1891)
							グループ構法は、活荷重のかかっているアーチの一方からの剪断応力にも耐えられるような強度で設計される。(震災予防調査会の意見を反映)	日露戦争(1904~1905)
大正	1910年代	フランツ・バルツァー 煉瓦造連続アーチ(1910)※1 新永年市街線高架橋					阿部美樹志(鉄道省東京改良事務所) 市街高架線東京萬世橋間建設紀要(1920)	※1 3~4径間おきに太い橋脚を入れた構造
		煉瓦造連続アーチ(1912)※2 万世橋高架橋					白旗橋の両側を連続版板として橋台、橋脚と共に一体的構造とするに在り。此の如き構造となすときは計算上種々なものを免れられども、底版土容積を減じ、且つスラブは其の橋脚と共に「フレーム」を形成し、頗る堅固なる建造物となるの利点あり	※2 5径間おきに太い橋脚を入れた構造
	1920年代	阿部美樹志 RC連続アーチ(1918)※3 RCラメンベ(1919)※4 RC単版板式(1919)※5 RC-C-B(1919) 万世橋-東京高架橋					阿部美樹志(阿部美樹志事務所) 鉄筋混泥土の施工において(1924)	※3 6径間おきに太い橋脚を入れた構造 ※4 白旗橋橋台と一体化したラメン構造 ※5 8径間おきに太い橋脚を入れた構造
		RC-Q-B-S(1926)※6.7 阪急梅田高架橋	中山忠三郎 RC-G-B(1925) 東北本線土野-神田間高架橋				高架構のエクステンションジョイント-区間ごとの両端部には、耐震壁を丁字形に縦横に使い、地震に対する高架構の抵抗力を増している。(関東大震災における鉄筋コンクリート建造物の被害調査結果を反映)	※6 外側の柱をビームスラブ、中央の柱をフラットスラブとした3柱式の複合構造
	1930年代	RC-G-B(1926)※7 東急神奈川高架橋	RC-G-B(1928)※8 大阪臨港線高架橋				中山忠三郎(鉄道省東京改良事務所) 高架鉄道(1929)	※7 エキステンション・ベンの手前に、耐震壁を橋軸・橋軸直角方向に挿入
		RC-Q-B-S(1930)※9 鶴見臨港線鶴見-新横浜間高架橋	RC-G-B(1930)※10 市式鉄道土手-浜川崎間高架橋				高架構の形式については①ゲルバー、②背割、③張り出しの3形式があるが、①は柱間を等間隔に配置できるが防水上に弱点がある。②は橋脚の柱、ビームの断面が太くなり、本等速に対する構造上の欠陥がある。③は等速でないため見た目に悪いという見方もあるが、橋脚部が安全で構造上最もすぐれている。	※8 将来の橋化に備えて壁式橋脚を採用
	1940年代	RC-Q-B-S(1930)※9 鶴見臨港線鶴見-新横浜間高架橋	RC-G-B(1931) 神戸市街線1期高架橋				高架構の形式については①ゲルバー、②背割、③張り出しの3形式があるが、①は柱間を等間隔に配置できるが防水上に弱点がある。②は橋脚の柱、ビームの断面が太くなり、本等速に対する構造上の欠陥がある。③は等速でないため見た目に悪いという見方もあるが、橋脚部が安全で構造上最もすぐれている。	※9 耐震壁を橋軸直角方向に挿入
		RC-G-B(1932)※11 城東線天王寺-京橋間高架橋	RC-B-S(1932) 山陽本線線路川崎橋梁				高架構の形式については①ゲルバー、②背割、③張り出しの3形式があるが、①は柱間を等間隔に配置できるが防水上に弱点がある。②は橋脚の柱、ビームの断面が太くなり、本等速に対する構造上の欠陥がある。③は等速でないため見た目に悪いという見方もあるが、橋脚部が安全で構造上最もすぐれている。	※10 開閉式橋脚と車柱を組合せた特殊形式
	1950年代	RC-C-Q-B(1935) 阪急三宮高架橋※9	RC-G-B(1937) 近鉄鶴橋-今里間1期高架橋				五味信(国鉄東京工務事務所) 高架構の新構造方式と設計法(1958)	※11 躯体の高さの低いものに、つなぎばりを入れた構造とした
		RC-Q-B-S(1939) 第3五ヶ瀬川橋梁	RC-C-Q-B(1937) 近鉄鶴橋-今里間2期高架橋				1)高架構の経済設計を考へるものは、"温度変化+乾燥収縮"である。これによる応力を最小にするのができれば非常に有利である。 2)高架構の中央部に水平力に対応する構造的な支柱を設け、これを中心として両端は自由に伸縮する構造が上記に対する一つの回答となる。 3)柱間を全部壁で結合し構造物全体が一体として伸縮し得る構造(橋梁)の建物の屋上を交通の用に供するが第一の回答である。 いずれの場合においても、一方に対して断面係数が大きく、せん断抵抗力の大きな構造部分=壁。あるいは剛性大なるラメンが必要な構造要素となる。	※12 中央の柱に水平力を負担させた構造
	1960年代	RC-Q-B-S(1939) 第3五ヶ瀬川橋梁	RC-C-Q-B(1937) 近鉄鶴橋-今里間2期高架橋				1)3スパンでは柱の剛度を変えてもその工費はほとんど変わらない。外観および施工上から柱の断面は同一にするのがよいといえる。 2)近時工事費ばかりでなく、美的要素を重視するようになっている。将来の種の形式の高架構を用いる場合が多くなり、今後の設計上および施工上における問題点があり、今後の検討によってさらに経済的な設計とすることが出来る余地があるが、現状では工事費の点でもまた構造上の利点でも、一般の高架構としてビームスラブラーメン高架構が適当であると考えられる。	※13 変位拘束部材として橋脚方向壁部材
		RC-Q-B-S(1939) 第3五ヶ瀬川橋梁	RC-C-Q-B(1937) 近鉄鶴橋-今里間2期高架橋				河野通之(国鉄新幹線総局) 鉄筋コンクリート高架構の経済的設計に関する研究(1962)	※14 中央の柱に水平力を負担させた構造
	1970年代	RC-Q-B-S(1939) 第3五ヶ瀬川橋梁	RC-C-Q-B(1937) 近鉄鶴橋-今里間2期高架橋				河野通之(国鉄新幹線総局) 鉄筋コンクリート高架構の経済的設計に関する研究(1962)	※15 アバウトメントピアで水平力を負担
		RC-Q-B-S(1939) 第3五ヶ瀬川橋梁	RC-C-Q-B(1937) 近鉄鶴橋-今里間2期高架橋				河野通之(国鉄新幹線総局) 鉄筋コンクリート高架構の経済的設計に関する研究(1962)	※16 地盤の弱い所に水平力をまとめて負担させた構造
	1980年代	RC-Q-B-S(1939) 第3五ヶ瀬川橋梁	RC-C-Q-B(1937) 近鉄鶴橋-今里間2期高架橋				河野通之(国鉄新幹線総局) 鉄筋コンクリート高架構の経済的設計に関する研究(1962)	※17 美観を考慮し、接続形式を特殊な背割式とした
		RC-Q-B-S(1939) 第3五ヶ瀬川橋梁	RC-C-Q-B(1937) 近鉄鶴橋-今里間2期高架橋				河野通之(国鉄新幹線総局) 鉄筋コンクリート高架構の経済的設計に関する研究(1962)	※18 スラブ軌道に対応するため、接続形式がゲルバー式とされた
	1990年代	RC-Q-B-S(1939) 第3五ヶ瀬川橋梁	RC-C-Q-B(1937) 近鉄鶴橋-今里間2期高架橋				河野通之(国鉄新幹線総局) 鉄筋コンクリート高架構の経済的設計に関する研究(1962)	※19 軟弱地盤に対応するため、接続形式が背割式とされた
		RC-Q-B-S(1939) 第3五ヶ瀬川橋梁	RC-C-Q-B(1937) 近鉄鶴橋-今里間2期高架橋				河野通之(国鉄新幹線総局) 鉄筋コンクリート高架構の経済的設計に関する研究(1962)	※20 PC桁挿入工法を採用
	2000年代	RC-Q-B-S(1939) 第3五ヶ瀬川橋梁	RC-C-Q-B(1937) 近鉄鶴橋-今里間2期高架橋				河野通之(国鉄新幹線総局) 鉄筋コンクリート高架構の経済的設計に関する研究(1962)	※21 トンネル坑口に水平力を負担させた構造
		RC-Q-B-S(1939) 第3五ヶ瀬川橋梁	RC-C-Q-B(1937) 近鉄鶴橋-今里間2期高架橋				河野通之(国鉄新幹線総局) 鉄筋コンクリート高架構の経済的設計に関する研究(1962)	※22 トンネル坑口に水平力を負担させた構造

3. 変位拘束構造と標準構造の評価

(1) 評価項目の選定

東海道新幹線設計時に行われた両構造の比較は、経済性と施工性に主眼を置いてなされたが¹⁰⁾、当時から半世紀が経過し、現在設計される構造物は、より多くの要求性能を満たす必要がある。ここでは、構造特性・経済性の両面から比較を行い、公正に評価することを試みた。

(2) 比較対象の概要

①変位拘束構造（壁式ラーメン構造）

この形式は、条件に合わせて4種が建設されたが、ここでは、最も採用実績の多い、中央にアバットメントピアを設けた支間10m×9径間の直線用の形式を対象とした（図-7）。躯体高さが10mを超えるものは、一般部の壁柱およびアバットメントピアに橋軸直角方向のつなぎ梁が入る構造となっている¹³⁾。

②分散構造（ビームスラブ式ラーメン構造）

最も普遍的に用いられた、支間6m×3径間で地中梁の無い直線用の形式を対象とした。躯体高さが12mを超えるものには、つなぎ梁が橋軸・橋軸直角方向に1径間おきに入る構造となっている⁹⁾。

(3) 構造特性比較

①比較項目及び解析条件

橋軸直角方向の挙動は岩田らの研究²⁰⁾で明らかにされているため、ここでは橋軸方向に限定して平面骨組み解析を行い、変位量を比較した。解析に用いたモデルは、壁式ラーメンは壁部材をブレース材に置換することで、ビームスラブ形式はハンチ部を剛部材とすることで定義している。荷重は、地震荷重を簡易的に再現した、1mあたり100kNを橋軸方向に載荷した。

②比較結果

骨組み解析による計算結果を図-13に示す。変位拘束構造は分散構造の20%以下の変位量で推移しており、その差は躯体高さが高くなるにつれて大きくなっていることが読み取れる。これより、変位拘束構造は、一般部の柱を薄くしても、変位拘束部材の基礎が変位しない限り、変位を抑えられることが分かった。

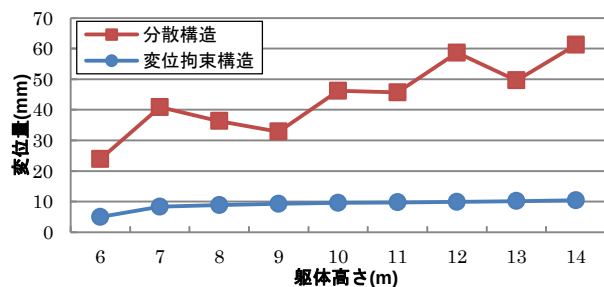


図-13 水平変位量の比較

③考察

現在、東海道新幹線で進められている大規模改修工事では、ビームスラブ形式は、柱の鋼板巻き立て、目違い防止工の設置（写真-20）、橋軸直角方向のX型ブレース補強（写真-21）が行われているが、壁式ラーメンは対象とされていない²²⁾。これらが地震係数が0.2とされた時代の構造物であることを考えると、壁式ラーメン形式はオーバースペックな設計であったと見なすことができる。



写真-20 目違い防止工



写真-21 X型ブレース補強

(4) 経済性比較

①比較項目及び計算条件

工事誌記載の一般図と既設橋の計測を基に、コンクリート体積の比較を行った。基礎のフーチングからスラブ上面までの躯体体積を数量計算にて算出し、これを10mあたりに換算して比較を行った。

②比較結果

数量計算による結果を図-14に示す。これより、10mを越えたあたりから両構造が拮抗していることが読み取れる。また、変位拘束部材を壁部材から剛性の等しいブレースに置換し、強度に寄与しない部分を削除したモデルで算出すると（図-15）、10～15%の減少となり、変位拘束構造が全ての躯体高さで有利となることがわかった。

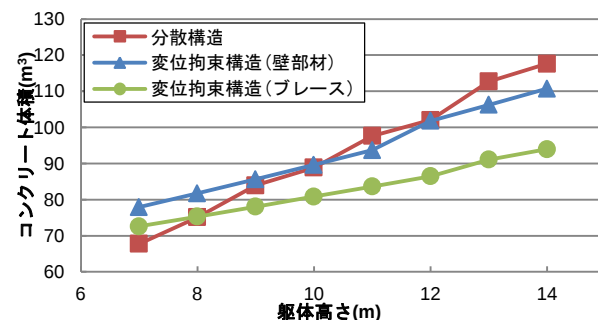


図-14 10m当りのコンクリート体積

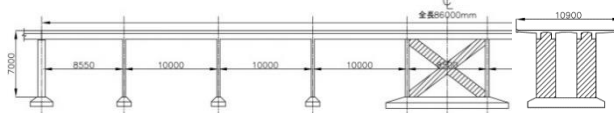


図-15 ブレース構造高架橋

③考察

高架橋の躯体高さは、東海道新幹線では7mとする場合が多かったが、以降の山陽新幹線からは、交差道路との関係から10mとする場合が多い²⁰⁾。これより、現在の条件では変位拘束構造が全面的に有利であることが分かる。

⑤比較の総括

構造特性比較，経済性比較共に，現在の条件では変位拘束構造の優位性が際立つ結果となった。なお，今回は施工性の問題については取り上げなかったが，現在は施工機械の能力が向上し，さらにCFTなどの複合構造や，部材のプレキャスト化といった新技術が採用されるようになったことから，十分に解決されたものとする。

4. まとめ

我が国の鉄道高架橋の歴史の中で，変位拘束構造は地震被害を設計に反映した結果や，厳しい財政状況下で経済性を極限まで追求する中で誕生し，一時は主流とされた時期もあったが，高架下を貸し出す賃料が重視されて高架下の利用に制約が無い構造が推奨されたことや，大量の構造物を限られた工期内で建設するために，設計の標準化が進められた中で消滅していたことがわかった。特に後者の考えは，現代まで半世紀以上にわたって引き継がれ，分散構造を普遍的なものとしている。

次に行った比較では，既往の比較に対し再検証を行うことで，現代の設計条件下では変位拘束構造が優位となることを明らかにすることができた。また，従来の変位拘束部材は，太い橋脚か壁部材によるものであったが，これをブレース構造などに置き換えると，さらに経済性を高められることがわかった。

5. おわりに

近年，ドイツ鉄道(DB)では，構造合理性の向上を目的として，変位拘束構造の高架橋が採用される事例が増えている(写真-22, 23)。これらは，我が国の壁式ラーメン形式と共通点が多く見られる構造となっている。五味信が提唱した水平力に抵抗する部材を設けて構造合理性を高めるという設計思想は，世界的に見ても先見の明があったといえる。なお，ドイツ鉄道の事例は条件に合わせて変位拘束部材を使い分けており，我が国の変位拘束構造も変位拘束部材を壁部材に限定せず，最適な構造を選択することで，今後さらなる発展が見込まれる。



写真-22 ゲンゼバッハ高架橋 (躯体高さ 10m)



写真-23 ウンシュトルト高架橋 (躯体高さ 50m)

参考文献

- 1) 島秀雄; 東京駅誕生, 鹿島出版会, pp54-56, 1990
- 2) 小野田滋; 阿部美樹志と黎明期の鉄道高架橋 pp118-120, 2001
- 3) 鐵道省東京改良事務所; 市街高架線東京萬世橋間建設紀要 pp40-64, 1919
- 4) 阿部美樹志; 鉄筋混凝土の施工に就て(一), 土木建築雑誌 第4巻 第6号, シビル社, pp217-219, 1925
- 5) 中山忠三郎; 高架鉄道, 日本文化協会, pp105-107, 1929
- 6) 日本鐵道施設協会; 鐵道施設技術發達史, pp262-265, 1988
- 7) 五味信; 高架橋の新構造方式と設計法, pp10-17, 1956
- 8) 小野田滋; 在来線から新幹線へ 新幹線の土木構造物の源流, 鐵道ピクトリアルNo. 643, pp54-63
- 9) 日本国有鐵道; 東海道新幹線工事誌土木編, pp272-279
- 10) 河野通之; 鉄筋コンクリート鐵道高架橋の經濟的設計に関する研究, pp13-14, 91, 99, 1962
- 11) 長谷川弘和; 横浜都市發展記念館収蔵
- 12) 谷内田昌熙; 高架橋の歴史, 鐵道土木Vol. 20, pp14-17
- 13) 日本国有鐵道大阪幹線工事局; 東海道新幹線工事誌, pp566-623
- 14) 高橋浩二; 鐵道高架橋の具備すべき基本条件と構造形式の変遷に関する研究, pp298, 1978
- 15) 湖西線建設における施工上の諸問題, 開發往来15巻2号, pp16-27, 1971
- 16) 日本鐵道建設公団東京新幹線建設局; 上越新幹線工事誌 (大宮・新潟間), pp127-153, 1983
- 17) 丸山泉, 小池政男, 町田昭夫; 壁式高架橋における電柱の振動特性(その1), pp288-289, 1990
- 18) 森重龍馬; 軟弱地盤における特殊高架橋の設計, 土木技術, 土木技術社, pp77-83, 1967
- 19) 内田聰吉, 森重龍馬, 辻秀紀; 壁柱式高架橋(上), 鐵道土木 9巻 1号, 日本鐵道施設協会, 1967
- 20) 五味信; 鐵道高架橋における形態の開発, 復建エンジニアリング(株), pp74, 1980
- 21) 岩田秀治, 関雅樹, 前川宏一; 壁柱部材を有するRCラーメン高架橋の載荷実験とFEM解析による耐震性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 2, 2010
- 22) 村松造成; 東海道新幹線における地震対策, コンクリート工学 Vol. 49, 2011
- 23) Mike Schlaich, schlaich bergemann und partner, Germany; Integral Railway Bridges - New Bridges in Germany, pp9-14, 2012, www.vegvesen.no/_attachment/731589/binary/1001687