吊橋に列車が通る

田島二郎*

瀬戸大橋の竣工によって、本州と四国は陸路一体となり、これで日本の四つの島がすべて結ばれたことになる。この大工事は、数多くの人々の叡智と努力のたまもの、幾多の困難を乗り越えての成果である。技術の面のみをとっても、なかなか語り尽せぬものがある。この一文はその一端として、吊橋に鉄道を通すための開発努力のごく概要を記したものである。

Trains Run over the Suspension Bridges

Jiro TAJIMA*

The four main islands of Japan have now been linked by the Seto Bridges, forming part of the Honshu-Shikoku Permanent Link. This huge project was completed in accordance with the wisdom and efforts of the many people concerned. The technical aspects cannot by fully coverd in such a short space, so this paper is only a summary of the developments that took place, which eventually enabled trains to cross the suspension bridges.

1．プロローグ

鉄、石炭、そして鉄道。18世紀後半イギリスに始まる産業革命は、19世紀に入ってイギリス国内での鉄道建設の気運を高め、Darlington北部からの石炭をTees川の港Stocktonまで運ぶ世界最初の公共鉄道が、1825年9月27日に開業した。この鉄道はさらにStocktonの東にある工業都市Middlesbroughまで石炭を直送するため延伸することが企てられた。そこで、この路線を建設するためには、Tees川を渡ることが必要となった。

この橋の計画は、1926年から練られた。しかし、船舶運航組合から、河中の橋脚や支保工、桁下空間等、種々の難題が持ちこまれ、話合いは遅々として進まず、遂に吊橋をもってひとまたぎに渡河することを鉄道会社は決意した[1)]。

当時鉄製の吊橋は既に相当数の実績があったとは云え、荷重の大きい鉄道を通す吊橋は橋梁技術にとって大きな挑戦であった。

設計は当時吊橋にかけては名声を得て居たSamuel Brownにより、定礎は1829年6月18日。翌年12月27日には開通というおどろくべき速さであった。

Fig.1は、Londonのイギリス土木学会所蔵の額の複写である。そこには以下の諸元が記されている。

橋のスパン：281.4 ft (85.77m)

ケーブルのサグ：28 ft（サグ：ケーブルの垂れ下り量）

床の幅：16 ft (4.88m)

水面からの高さ：20 ft (6.10m)

鉄重量：111 t

設計活荷重：150 t（機関車1両、貨車24両で112t）

チエンの断面積：40inch^2 (258cm^2)

しかし、この吊橋は開業前の試験運転に於て撓みが甚しく、機関車1両、貨車16両70 tの荷重に耐えられず、石造のタワーにも変状を来たした。そのため、長い連結器を用いて荷重を分散させるような苦肉の策によって開通を図ったと云う[1)]。

＊埼玉大学工学部教授
Professor, Faculty of Engineering, Saitama University
原稿受理　昭和63年1月6日

Fig. 1　Stockton-Darlington 鉄道吊橋
（1987年７月、イギリス土木学会で筆者複写）
Stockton-Darlington railway suspension bridge

1841年に至りその橋は廃され、僅かにケーブルのみが残った。Stephensonによりそれは1942年鋳鉄の橋に架替えられた。この橋の不運な歴史は、イギリスにおける以後の吊橋の建設に不利な影響を与え、指導的技術者に吊橋は鉄道橋としては不適合であると思わせた。

この考えを改めさせたのが、1955年RoeblingによるNiagara峡谷を渡る道路・鉄道併用吊橋の竣工である（Fig. 2)。この橋を介して、N. Y. Central鉄道とカナダのGreat Western鉄道が往き交ったのである。

この橋はワイヤーケーブルを用い、木と鉄による補剛トラスを有し、さらに桁の撓みを押えるために斜め索がタワー頂部から張られ、両岸からの控え索も配置されている。

42年間にわたって無事機能を果したこの橋は、以後の鉄道吊橋への関心を高めるものとなった。

Roebling父子による1883年のBrooklyn橋は、タワー項部から多数の斜め索により補剛桁を吊った吊橋で、60年間程は道路、鉄道併用橋であり、これは現在道路橋として使われている。1903年のWilliamsburg橋、1909年のManhattan橋とNew Yorkには中央径間500ｍ前後の併用吊橋が続く。この２橋は現在も鉄道を通している。しかし、速度は制限を受け、その荷重の大きさも電車のそれであって大きな値ではない。

1936年竣工のSan Francisco-Oakland-Bay橋は、橋長1,412ｍ、中央径間704ｍの吊橋が２橋連なる橋で20年ほどの間は電車を通していた。これも交通事情の変化により、軌道は撤去されて道路橋として使われている。その地域には通勤輸送等を考えて電車を通すトンネルがその後増設されている。

このほか、DelawareのBenjamin-Franklin橋（1926年—中央径間525ｍ）も併用橋である。

日本にも昭和30年代まで、数橋の鉄道吊橋が存在した。それらは営林署管轄の森林軌道あるいは発電

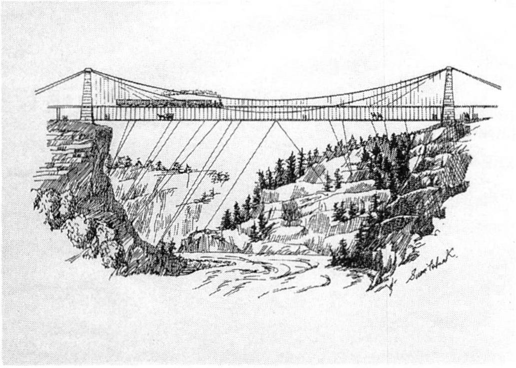

Fig. 2　Niagara 吊橋（本四公団栗野純孝画）
Niagara suspension bridge

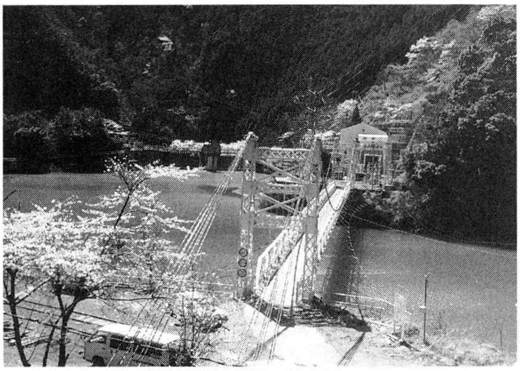

Fig. 3　市代吊橋（1987年３月、筆者撮影）
Ichishiro suspension bridge

所のためのものであった。

大井川鉄道で千頭まで上り、さらに森林鉄道に乗換えて井川までの途中、川根市代駅から別れて奥泉発電所に渡る側線に、タワー間距離106.68ｍの単径間の吊橋が架っている。昭和11年竣工、昭和30年には鉄道吊橋の性状研究のため、東大橋梁研究室で実測も行われている[2)]。設計荷重は８ｔ機関車、５ｔ貨車17両という。この橋はその後間もなく軌道を撤去し、現在は発電所への通路として使われている。昨年３月末そこを訪れたが、丁度桜が満開、中部電力によってきれいに銀色に塗られた橋が陽光にかがやき、一年後にひかえた本格的鉄道吊橋の誕生に喜び一杯の風情を示すが如くであった（Fig. 3)。

この他、昭和33年、秋田の二つ井営林署管内の高岩橋でも鉄道走行試験が行われている。この吊橋は75.12ｍの単径間吊橋である[3)]。なお、この橋は昭和38年頃の大水害の後、とり壊されたようである。

これらの実測は、来るべき瀬戸内海を渡る長大鉄道吊橋へ向けての一歩となったものである。

2．吊橋に列車を通すときの問題

吊橋は他形式の橋に比べて撓み易く、揺れ易い。一方、列車は集中荷重が連行した1単位として重量が大きく、高速運転を立前とし、その頻度は一般に大である。さらにその走行は僅か30㎜ほどの車輪フランジがレールによってガイドされる。

そのため、次のような解明すべき問題を有する。

(1)走行する列車が吊橋に与える影響。すなわち、橋に生ずる振動、変位および荷重が数多く繰返し載荷される場合の部材の疲労など。

(2)吊橋の挙動が列車の走行性に与える影響。すなわち、大きな撓み、撓み角、桁端での伸縮および橋の振動の影響など。

このような2面からの問題の解明を要するが、問題によってはそれらは相互に影響を与えるため、その相互作用について検討しなければならない。

さらに、軌道構造、架線構造および信号保安設備などが、上記の吊橋の挙動に対応して確実に機能を果すことが要求される。

これらの問題を解明し、実用的に満足できる鉄道を通すためには、鉄道工学・橋梁工学におけるそれまでの経験の上に立って、新しい技術を一歩一歩進めて行くことになる。これらの検討は、昭和30年代に入ってから次第に加速されて行く。

3．橋梁形式の選択

昭和26年に、明石・鳴門海峡を横断し、淡路島を縦貫する鉄道構想の記事がある[4]。そこには両海峡ともトンネルで横断する計画と、鳴門海峡では中央支間500mのカンチレバートラス橋と中央支間600mのバランスド・タイドアーチ橋が示されている。

昭和33年度から3箇年、土木学会に長大橋梁及び高張力鋼鉄道橋研究委員会が作られた。国鉄委託によるもので、田中豊委員長のもと、各種の調査研究が行われた。この委員会での審議の相当部分は、昭和32年に設置された高張力鋼鉄道橋研究委員会の内容を引継いだもので、50キロ級鋼および溶接構造を鉄道橋に採用するに当っての問題の検討であり、戦後の溶接を中心とした設計示方書の基になったものが作成された。

長大橋については、長大橋のための60キロ鋼までを考えた設計基準と橋梁形式の検討がなされた。橋の形式としては、中央径間1,200mまでの吊橋、中央支間750mまでのカンチレバートラス橋、支間500mのアーチ橋などの試設計が検討された。

一方、列車が吊橋上を走行する際に生ずる振動について、東京大学橋梁研究室において模型実験ならびに理論的研究がなされつつあった。その進捗に伴って、鉄道吊橋実現の可能性について確度が高まり、明石海峡の1,500m吊橋を含む主要橋梁として吊橋形式を中心とした検討が進んで行くことになる。

長大吊橋の一般的な形式は、Fig. 4（a）に示す鉛直ハンガーを用い、Fig. 5（a）に示すように補剛桁がそれぞれの径間で単純支持されている通常2ヒンジ吊橋と称されるものである。しかし、1章で述べ

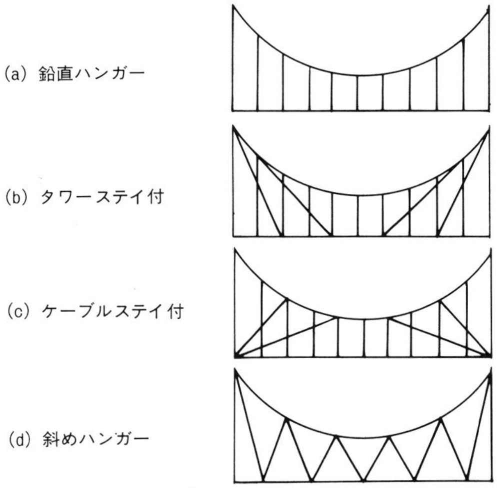

Fig. 4　ハンガー形式
Type of hanger

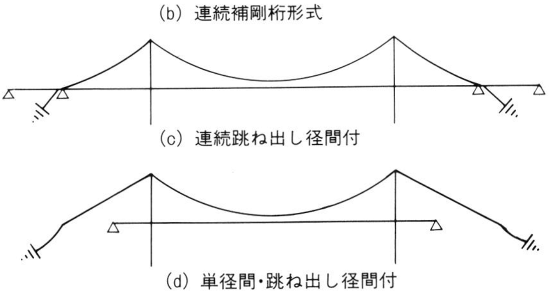

Fig. 5　補剛桁形式
Type of stiffening girder

たように、剛性を高めるためにタワーステイ、ケーブルステイ（Fig. 4（b），（c））などを設けることも考えられ、同様の目的で斜めハンガーを用いた形式（1964年、イギリスのSevern橋、ただし道路橋）も現れた。また、2ヒンジ吊橋で生ずるタワー位置に生ずる走行面の大きな角折れと伸縮を避けるために、Fig. 5（b）～（d）のように補剛桁を連続させることも望ましい形式である。1966年竣工、将来鉄道を通し得るように考えて設計されているポルトガルのDe-Vinte-e-Cinco-Abril橋は（c）のように補剛桁を両端にさらに伸している形式である。

これらの各形式について種々の検討が行われたが、吊材は鉛直ハンガーのみでよく、長大吊橋を架けるという点のみからは2ヒンジ形式が望ましく、列車走行性をより安全確実なものとするためには、補剛桁を連続させるのが良いとの結論となった。この両者の選択は、昭和48年頃、児島・坂出ルートの基本計画を決める際にひとつの問題となったが、結果として連続構造を採用することとし、下津井瀬戸大橋はFig. 5の（d）、南北備讃瀬戸大橋は（b）の形式とした。

4．使用鋼材と疲労

長大吊橋で、さらに鉄道と道路の荷重を支えるため部材力が大きくなるので、橋桁の自重を軽くすることが経済設計につながる。そのため使用鋼材は調質80キロ級の鋼材まで考えた。このような高張力鋼は発電所の水圧鉄管などで開発され、来るべき長大橋時代を考えて、各製鋼所での改良が進められていた。その成果は、昭和49年竣工の大阪・港大橋（中央支間510m、世界第3位のカンチレバートラス橋）の建設となる。そこでは橋の本体鋼重3.1万トンのうち、80キロ鋼4.2千トン、70キロ鋼1.1千トン、58キロ鋼8.7千トンの調質高張力鋼が使用された[5]。

本四連絡橋では、公団発足当初の集計（昭和47年）によると、上部構造用鋼材約100万トン（ケーブル類20万トンを含む）のうち、80キロ鋼5％、60キロ鋼11％の調質鋼を予定した。

70、80キロ鋼の溶接性については、港大橋時点でほぼ満足できる状態に達していた。しかし、疲れ強さについては、昭和40年代に入って鋭意各種の疲労試験を行い、データの蓄積につとめた。

これらの成果を基に、本四連絡橋の疲労設計の基準は整えられた[6]。しかし、それまでの疲労試験は主として溶接継手部分をモデル化した小型の試験片を用いたものであった。昭和50年から稼動した本四公団の大型疲労試験機（動的容量400 t）を用いた大型試験片およびトラス格点構造の疲労実験（Fig. 6）は、それまでに得られた結果に対し、調質高張力鋼の場合の、溶接欠陥が疲れ強さに与える影響についての知見を加えた。また、従来の自動溶接施工の状況では、部材をボックス断面形に組立てる際の角溶接で、期待する疲れ強さが得られないことも明らかとなった[7),8)]。このため、昭和52年、橋梁製作に当るであろう会社に対し、本四公団は問題の所在と製作方法に対する一層の研究が必要であることを喚起した。また、超音波探傷試験によって溶接部の欠陥が許容限界内にあることを検査すべく、その機器開発

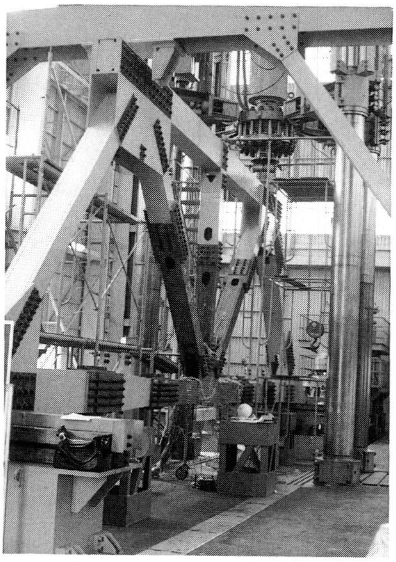

Fig. 6 トラス格点模型疲労試験（1981年筆者撮影）
Fatigue test of truss panel point

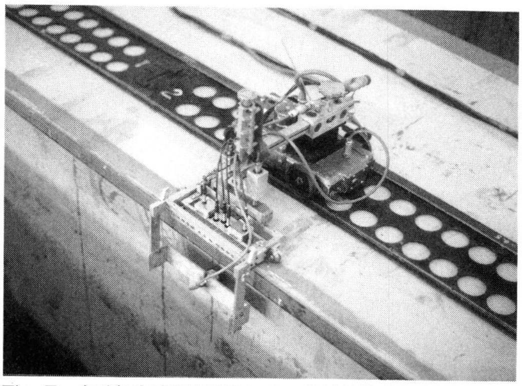

Fig. 7 自動超音波探傷試験による弦材角溶接の検査（1983年筆者撮影）
Inspection of corner weld of chord member by AUT

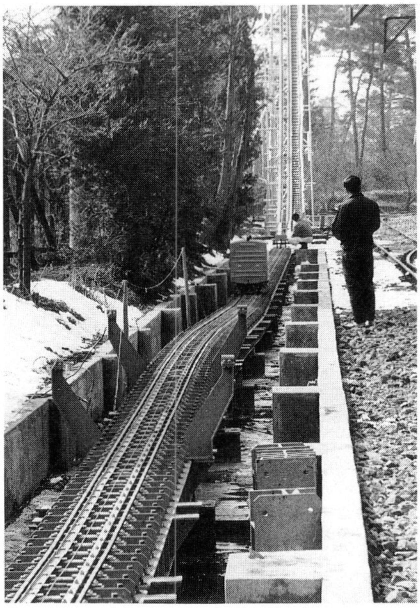

Fig. 8　鉄道技術研究所での模型車両走行実験
（鉄道技術研究所撮影）
Running test with model car

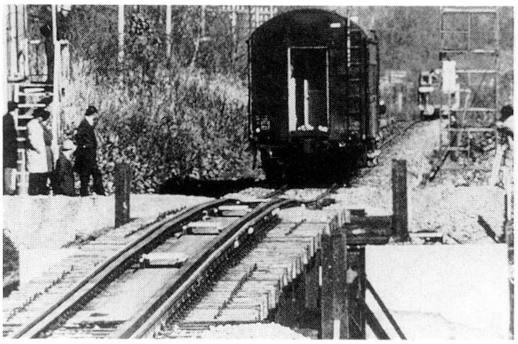

Fig. 9　狩勝実験線での実車走行試験
Running test with actual car

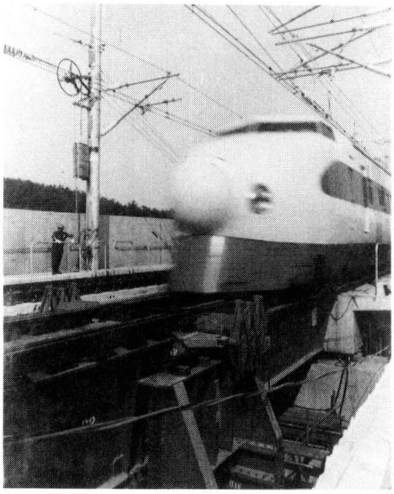

Fig. 10　新幹線車両による走行試験
Running test with Shinkansen

の必要性を非破壊検査グループにアピールした。

昭和55年、大鳴門橋上部構造の製作開始に伴い、海洋架橋調査会に製作検討委員会(奥村敏恵委員長)が設けられ、瀬戸大橋の製作完了に至るまで、溶接施工上の問題を検討し、製作上の指導に当った。また､､超音波探傷装置も大鳴門橋において１社がほぼ実用の域に達し、その後さらに改良、開発も進み、製作の最盛期には８社までが所要の機能を有する自動超音波検査をなし得るまでとなった（Fig. 7)。

５．吊橋の撓み、角折れの走行性への影響[9]

吊橋の撓みは一般に大きく､中央径間1,100ｍの南備讃瀬戸大橋では、設計で考慮した列車荷重、自動車荷重と温度30度上昇の場合、その値は４ｍになる。しかし、列車走行性に影響を与えるのは撓みの値自身ではなく、列車位置での勾配および桁端あるいは２ヒンジ補剛桁形式ではタワー位置に生ずる軌道の角折れである。

列車勾配は列車の牽引力に影響を与えるが、路線の縦断線形も含めてそれを検討した結果、実用上支障ないとの計算結果を得た。

角折れの影響については、昭和41年の鉄道建設公団の報告書[10]において､それまでの鉄道としてのポテンシャルを基に検討の結果、一応の目安を得た。

この問題については、以後鉄道技術研究所において理論的検討、模型実験（Fig. 8）が続けられた。さらに昭和45、46年と北海道狩勝の実験線における実車走行試験（Fig. 9）および凸角折れ部でブレーキをかけた場合の車両の浮上り状況を模した試験が行われ、理論・模型と実車との対応が検討された。また昭和49年には、開業をひかえた山陽新幹線の倉敷付近において、実際の路線にそれまでに鋭意開発に努め完成の域に達していた吊橋端に設置する軌道伸縮装置を挿入し、軌道には角折れを設けて、新幹線車両による走行試験を実施した(Fig. 10)。開業前のあわただしい中、よくこれだけの試験が出来たものだと思う。

この試験の結果、速さ180km/ｈまでの走行に成功し、これまでの研究の成果を実証することができた。なお、予定されている新幹線の走行速度は、線形選定の上から曲線半径を特例として1,300ｍとしたこと、および列車走行に伴う吊橋の振動の影響から、

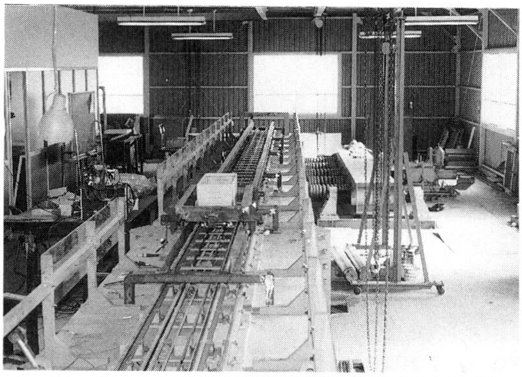

Fig. 11 振動台上の模型車両走行実験（1981年埼玉大学）
Running test on shaking table

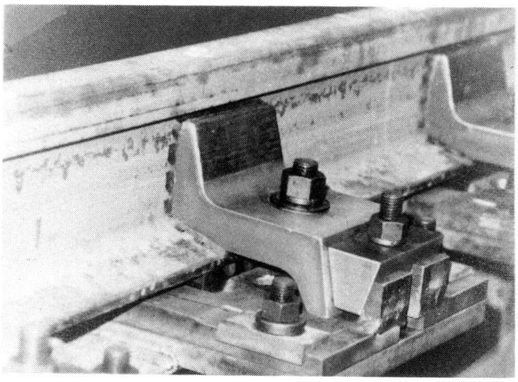

Fig. 12 開発中の軌道締結装置
Developed fastening

160km/hとするものである。

6．吊橋の水平振動の影響[9]

軌道の水平変位が列車走行性に与える影響は大きいため、それについて入念な解析と実験が繰返された。

車両の蛇行動は、車両重量に比して補剛桁重量が大分大きいこと、吊橋の水平振動固有周期が長いことで、吊橋の水平振動を増加させることはない。

吊橋上で列車が横風を受けた場合に対しては、吊橋中の車両に対する空気力を風胴実験により求め、吊橋の動的特性を入れて解析した結果、限界風速は平地における場合より多少低下するが、現行の規制は安全範囲にあることを示した。実際の運行に当っては、適処に風速計を配置し、それにより十分な安全運行管理がなされる。

また、風により桁端に水平角折れが生じた場合（南備讃瀬戸大橋で風速30m/s時に1.4/1,000）、タワーで風がさえぎられた場合を想定して、強風・無風・強風と極端に風が変化する場合などについても照査している。

地震により軌道が変位した場合については、前記狩勝実験での国鉄の目的であった競合脱線に関する研究成果を応用し、水平振動軌道上の走行性を検証した。なお、振動台を用いた模型実験が、昭和37年より東大八十島研究室において、それを引継いで昭和51年からは埼玉大学において実施され、脱線転覆についての研究が続けられた（Fig. 11）。

7．吊橋の軌道[11]、架線構造

将来の鋼桁直結軌道時代を目指して、国鉄では昭和40年代に入って、鋼桁直結軌道構造の開発、敷設が進んだ。海上に架かる吊橋上の軌道は、飛来する塩分の付着が著しく、また、上層に道路があるため雨洗効果が期待できないため、レールや締結装置の腐食、電気絶縁の低下が特に懸念された。それに対し、材質、防錆処理方法、電気絶縁方法など、暴露試験により、検討改良が行われた。また、従来の締結装置よりレールの変形限度を大きくした締結装置（Fig. 12）も作られ、各種のテストを経て、昭和58年より北海道の実線に敷設して性能の確認を続けた。

架線部品についても、塩分付着度の検出、絶縁碍子の洗浄等の検討から、それらの自動装置の開発研究がなされ、その試作品は、番の州ヤードの一隅に設置して検討された。

一方、吊橋の軌道構造としての大きな問題は、桁端に生ずる軌道の大きな伸縮と角折れに対応できる構造の開発である。

軌道の伸縮装置は、新幹線橋上伸縮継目では容量±20cmのものが実用化されていた。しかし、それは温度変化による伸縮に応えるものであり、吊橋の場合のように、1列車の通過によって±10cm程度の動きが毎回繰返されるものでは、その様相は全く異なるものがある。また、自動車、列車が載荷され、温度も最大30度の変化を考えるとき、動き得る範囲は1.5mに達することが推定された（竣工図での計算値は、南備讃瀬戸大橋の場合で1.2mである）。

これに対応するため、動程1.5mの移動まくら木式と、さし込み桁式の2つの伸縮装置の概念設計が、鉄道建設公団より本四公団に引継がれた。

移動まくら木式伸縮装置は、Fig. 13（a）に示すように、軌道支持桁間の動きに伴い、リンク装置によって等間隔を保つまくら木を用いたものである。レール伸縮部はトングレールと受けレールから成り、

見掛け上は従来の伸縮装置と似ている。移動するまくら木は、当初はすべり支承を用いた案であったが、移動をスムーズにするため、荷重を支える鉛直ローラーと、レールを横から支持する水平ローラーを具えた鋳鋼製のものが試作された。

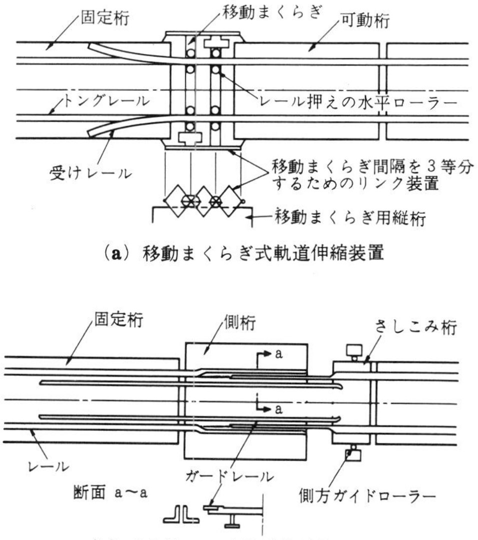

Fig. 13　1500形伸縮装置概念図
Conceptual design of 1500 type expansion joint

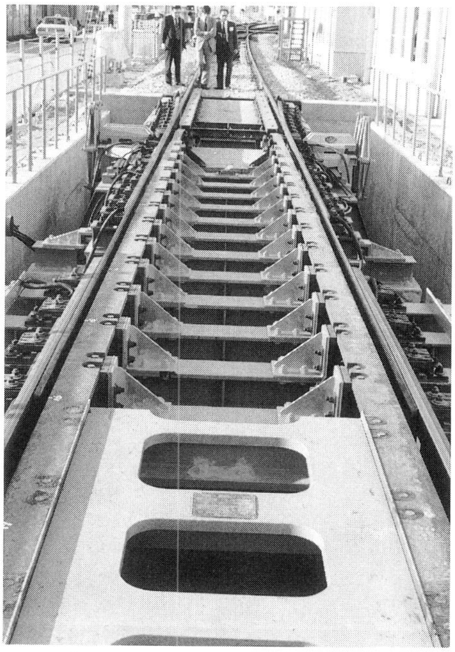

Fig. 14　博多での1500形伸縮装置の耐久性試験（1976年筆者撮影）
Durability test of 1500 type expansion joint

さし込み桁式伸縮装置は、Fig. 13（b）に示すようにさし込み桁に固定されたレールが側桁の間を出入りするもので、伸縮部にあるレールはL字形をなし、双方のレールで車輪を受けるようになる。この場合、移動する双方のレールはふれ合わないという長所があるが、図でわかるように軌間線に欠線部が生ずる。そのため、軌間内側にはしっかりしたガードレールを設け、それによって車輪の内側から車輪を導くものである。

この両者にはそれぞれに特徴があるため、早急に一方に決することが出来ず、図面上での検討、試作、実験の結果の反省を繰返した。

Fig. 10に示した走行実験では、この両形式の装置が設置されている。さらにそこに用いた装置は、走行試験後、新幹線博多車両基地内に移され、塩水を散布する等の実験も加えて、使用状態における耐久性の検討も行った（Fig. 14）。

工事は進み、両者択一の時が来た。昭和57年、列車走行委員会・軌道分科会（佐藤裕主査）はさし込み桁式採用の方針を決定した。これまでの検討結果を慎重に比較した結果である。さらに本四備讃線3橋の吊橋では、伸縮装置はアンカレイジあるいは鉄筋コンクリート橋台の上に設置出来るため、数種の桁を精度良く据えることが可能であり、それにしっかりと締結された軌道によって構成されるこの方式を有利と見たためである。

なお、伸縮装置は、このほか600形、800形（数値は伸縮容量mmを表している）が、吊橋以外の橋端に対して開発されている。これらはトングレール・受けレールを用いた見掛け上は従来のものと同様であるが、それぞれに工夫がなされている。

桁端に生ずる角折れについては、桁端に渡り桁を挿入することによりその値を2分してある（Fig. 15）。2ヒンジ吊橋だとしたら、渡り桁を二重に用いて4分散することも必要となり、その構造ははるか

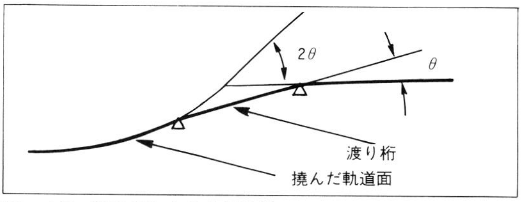

Fig. 15　渡り桁による角折分散
Dispersion of bent angle by a transition girder

に複雑なものとなろう。

スムーズな走行性を与えるためには、フレキシブルな連続縦桁を用いる案も当初から考えられたが、鉛直および水平の角折れに対応できる構造として、実用に耐えるものを得るまでには至らなかった。

8. 吊橋に列車が通る

昭和63年1月29日、いよいよ試運転列車が吊橋の上を走る。4月10日には供用開始。具体的に対象を定めてから30年の成果が問われる時である。地道に、こつこつと積み重ねて来た、数多くの人々の努力の成果である。

開業後も、これらの成果は注意深く見守られ、次への改善、発展へと進まなければならない。世界の長大併用吊橋として、中央径間3,300mのイタリア、メッシナ海峡計画がある。また、デンマーク、グレートベルト計画でも、200km/hの高速運転まで考えた延長6.4kmの併用橋（ただし吊橋ではない）が検討されている。それらの関係者の熱いまなざしは、じっと本四連絡橋に注がれている。

おわりに

瀬戸大橋の実現は、計画・設計・工事の推進と、あらゆる面での幾多の困難をのり越えて達成された。ここに述べた一文は、そのうちの一部、そしてその極く概要をひろい書きしたものである。書き尽くせない諸々のことが、30年ずっとそれに係わったひとりとして想い出されて来る。

参考文献

1）成瀬輝男「吊橋史拾遺」『カラムNo.107』1988年1月
2）平井敦、伊藤学「大井川鉄道吊橋振動実測報告」『東京大学橋梁研究室報告24号』昭和31年1月
3）伊藤学「高岩橋実測報告」『東京大学橋梁研究室報告57号』昭和34年2月
4）桑原彌壽雄「明石・鳴門海峡横断、淡路島縦貫鉄道の構想」『交通技術』1951年1月
5）阪神高速道路公団『港大橋工事誌』昭和50年3月、土木学会、P.976
6）土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会『昭和48年度報告書別冊2　本州四国連絡橋の疲労設計』昭和49年3月
7）田島二郎、奥川淳志「80キロ鋼を使用したトラス格点構造の疲労試験」『橋梁と基礎』1978年9月
8）Tajima J., Takena K., Miki C., Ito F.: Fatigue Strength of Truss made of High Strength Steels, Proc. of JSCE, No. 341, 1984.1
9）本州四国連絡橋列車走行委員会『昭和56年度報告書別冊1　走行分科会報告書』昭和57年3月、日本鉄道施設協会
10）日本鉄道建設公団『本州四国連絡鉄道吊橋技術調査委員会中間報告』昭和41年4月
11）本州四国連絡橋列車走行委員会『昭和61年度報告書別冊　軌道分科会・緩衝桁分科会報告書』昭和62年3月、日本鉄道施設協会