

橋梁技術 半世紀の歩み

九州大学大学院 大塚 久哲



1960~2010

昭和30年(1955年)



橋長316m, 支間長267m
上路式 鋼 プレースドリップ
固定 アーチ橋

写真-1.1 針尾瀬戸に架かる西海橋

昭和37年(1962年)



橋長627m, 支間長367m

写真-1.2 洞海湾に架かる若戸大橋

昭和41年



橋長502m, 支間長300m
写真-1.3 天草1号橋(天門橋)



橋長178m, 支間長126m

写真-2.4 天草5号橋(松島橋)

新天門橋の設計の基本方針

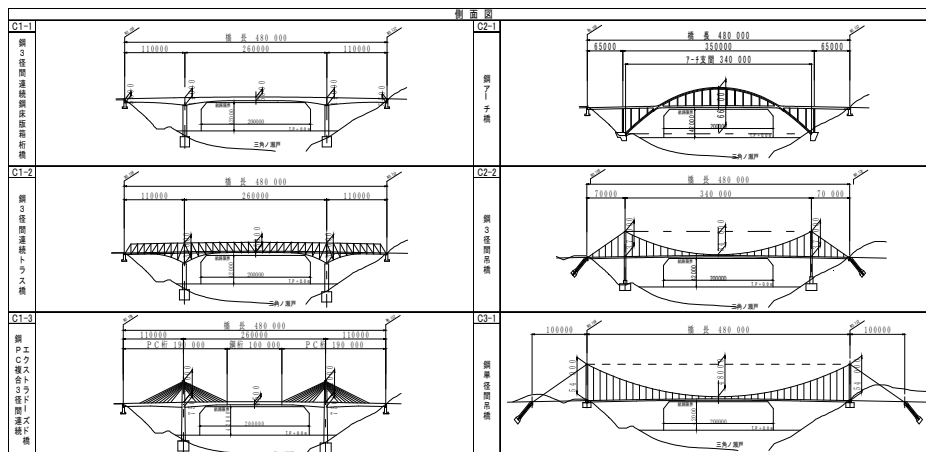
- ・初期建設コスト及び維持管理費等のライフサイクルコストの縮減を追求し、
- ・周辺環境との調和、現天門橋との対比に配慮した橋梁デザインとする。
- ・景観対策方針は、周辺の景観に調和するとともに、現天門橋の繊細でありながら緊張感を内在する力強さを損なわず、対比的に技術的進歩が見てとれ、地域にも新しい物語が生まれる魅力的な橋を創造することとした。

橋梁形式比較案の選定

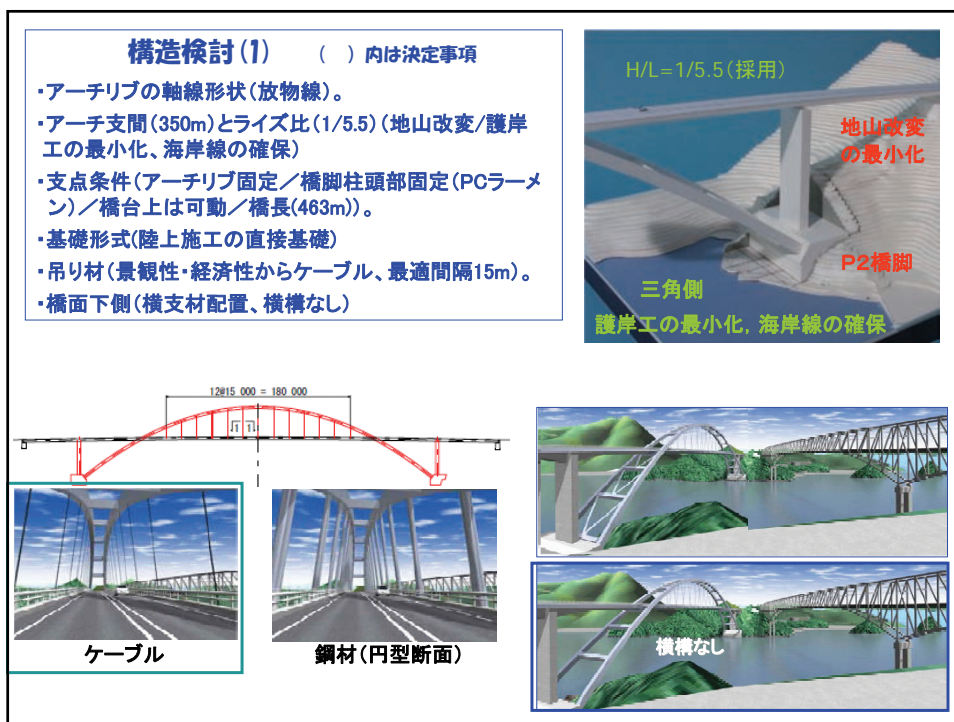
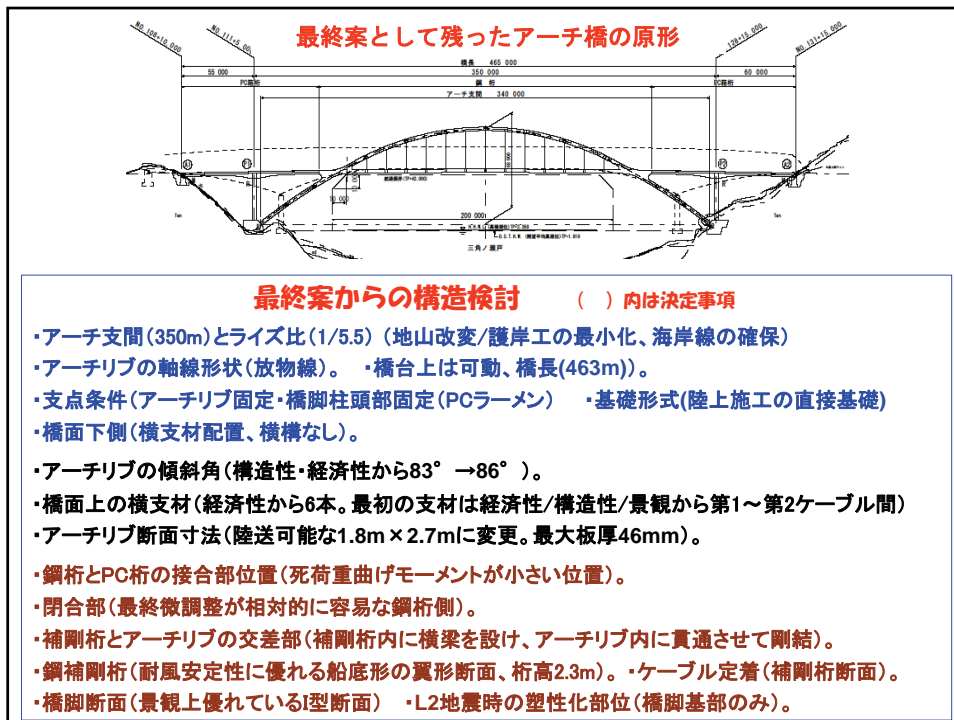
- ①案 『鋼3径間連続鋼床版箱桁橋』
- ②案 『鋼3径間連続トラス橋(現天門橋タイプ)』
- ③案 『PC3径間連続斜張橋』
- ④案 『鋼PC複合3径間連続エクストラード橋』
- ⑤案 『鋼PC複合3径間連続V字橋脚を有するラーメン箱桁橋』
- ⑥案 『鋼PC複合3径間単弦ローゼ補剛箱桁橋』
- ⑦案 『鋼PC複合3径間連続斜張橋』
- ⑧案 『鋼3径間連続バランスドアーチ橋』
- ⑨案 『鋼3径間吊橋』
- ⑩案 『鋼単径間吊橋』

橋梁案の絞り込み (第1段階～10案から6案に)

橋脚を海上に設ける案、橋脚を陸上に設ける案、橋脚を設けない案の全10案から、経済的及び力学的合理性を考慮して6案を抽出した(図—3.1)。

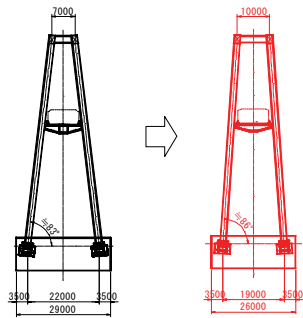


図—3.1 1次抽出案の6橋

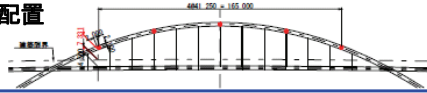


構造検討(2) ()内は決定事項

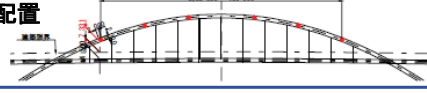
- ・アーチリブの傾斜角(構造的・経済性から83° → 86°)
- ・橋面上の横支材(経済性から6本。最初の支材は経済性/構造的/景観から第1～第2ケーブル間)
- ・アーチリブ断面寸法(陸送可能な1.8m×2.7m。最大板厚46mm)。



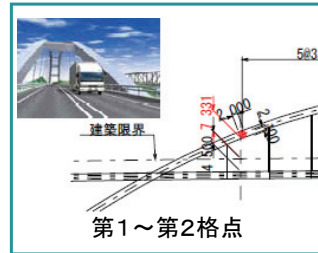
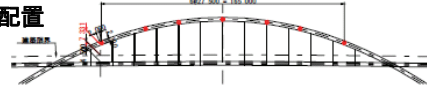
5本配置



6本配置

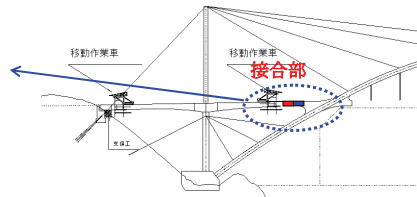
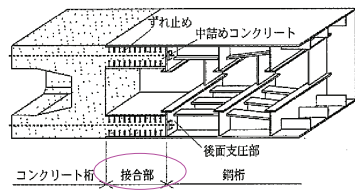


7本配置



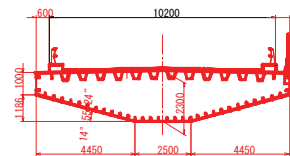
構造検討(3) ()内は決定事項

- ・鋼桁とPC桁の接合部位置(死荷重曲げモーメントが小さい位置)。
- ・閉合部(最終微調整が相対的に容易な鋼桁側)。
- ・補剛桁とアーチリブの交差部(補剛桁内に横梁を設け、アーチリブ内に貫通させて剛結)。
- ・鋼補剛桁(耐風安定性に優れた船底形の断面、桁高2.3m)。
- ・ケーブル定着(補剛桁断面)。
- ・橋脚断面(景観上優れているI型断面)。
- ・L2地震時の塑性化部位(橋脚基部のみ)。



交差部の構造

鋼断面(標準部) ← → 鋼断面(ケーブル定着部)



耐震検討 (1)

- ・1996年道路橋示方書からの橋梁の耐震設計では、震度法レベルの地震動(レベル1地震動)以外に、橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動(レベル2地震動)に対しても耐震性能を照査している。
- ・長大橋に対しては、架橋近傍で想定される最大級の地震動(想定断層によるサイト波)に対しても照査することが行われている。

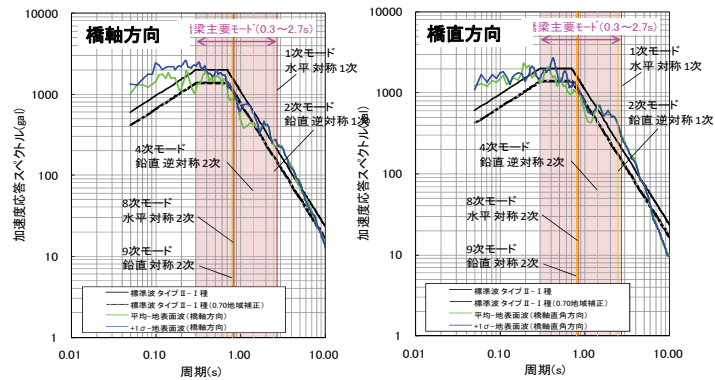


図-3.4 標準波形と布田川・日奈久断層帯波形の加速度応答スペクトル

耐震検討 (2)

- ・1996年以後の道路橋の耐震設計は、性能照査型設計に移行したと言える。性能照査は要求される耐震性能に対して、各部材ごとの限界状態(許容状態)を想定して行う。
- ・本橋の場合、アーチリブ/鋼桁/交差部/接合部/ケーブル/支承部などはいずれも弾性域を超えない状態、PC桁は副次的な塑性化にとどまる状態、横支材/RC橋脚は損傷の修復が容易に行い得る状態としている。
- ・解析モデルは、軸力変動と2軸曲げの影響を直接的に考慮できるファイバーモデルを使用した

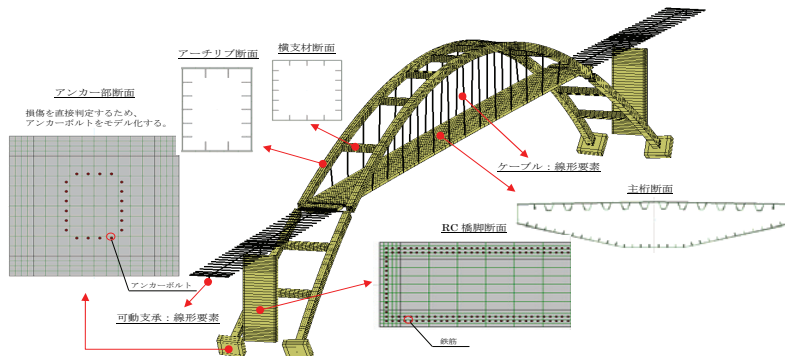
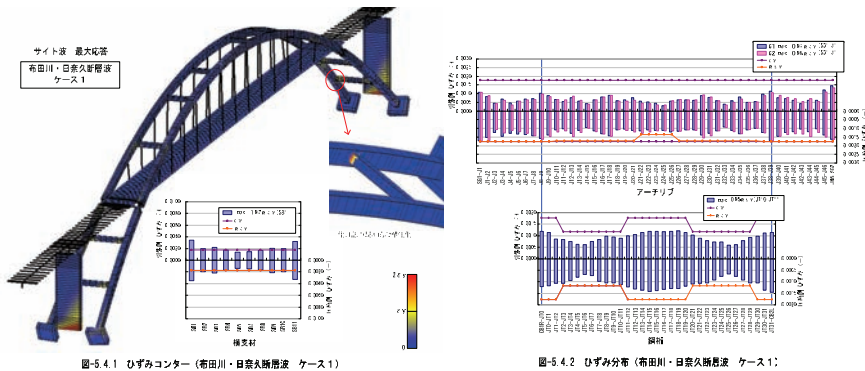


図-3.5 耐震照査用3次元解析モデル

耐震検討 (3)

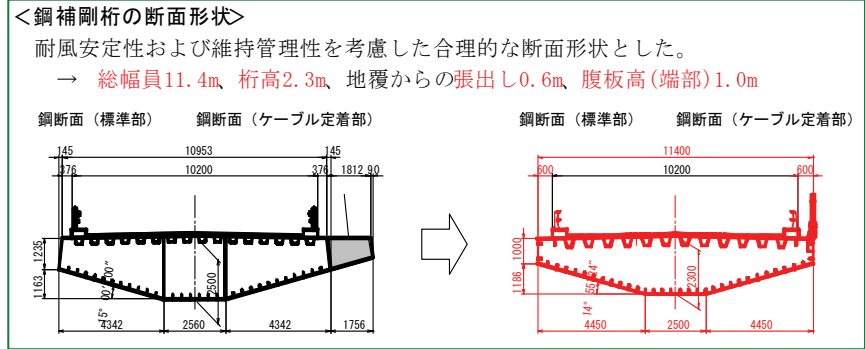
・静的解析により決定した断面構成に対して、材料非線形とともに幾何学的非線形性を考慮できる複合非線形時刻歴応答解析を実施した結果、橋脚を除く全ての部材が弾性域に収まり、所定の耐震性能を満足。



図—3.6 サイト波による動的解析結果

耐風検討 (1)

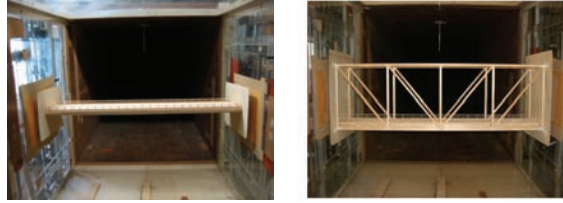
・補剛桁断面は最終的には、図—3.7に見られるように3室箱桁が1室箱桁に変更され、また、ケーブル定着のために定着断面ごとに付加されていた定着用張り出し部を省略して補剛桁腹板部に直接ケーブルを定着する構造を採用した。



図—3.7 補剛桁断面形状とケーブル定着位置の変更

2次元風洞試験

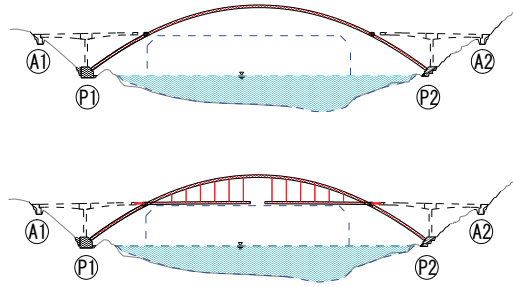
- ・単独橋としての耐風安定性
- ・新天門橋と現天門橋との並列橋としての耐風安定性



写真—3.2 2次元風洞試験模型(左：新橋，右：現橋)

3次元風洞試験

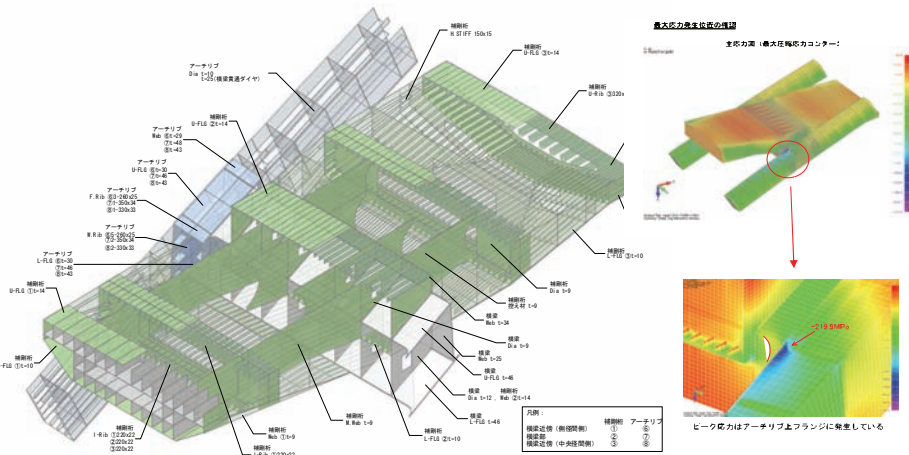
- ・上：アーチ自立時、
- ・下：補剛桁閉合直前



図—3.8 架設系の3次元風洞試験

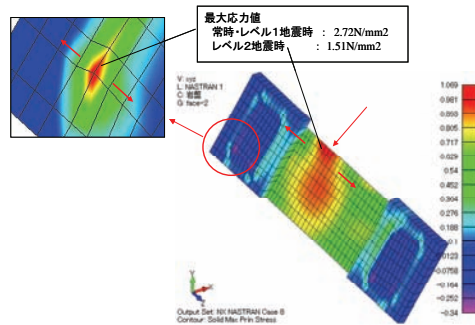
交差部の設計検討

- ・静的・動的骨組解析により設計した結果に対し、これを照査する目的でFEMによる部分構造の応力解析を実施した。交差部の板厚は、最大厚46mmとなった。
- ・交差部は力の伝達に無理がなく、局所的な応力集中を避けた構造とする。横梁仕口部の応力集中に対し、細部構造の形状変更（フィレット部の新設）で対応した。



アーチアバットの検討

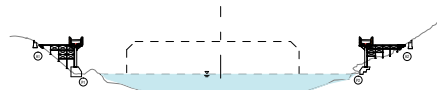
- ・アーチリブおよび橋脚基部からアーチアバットに作用する力に対し、アーチアバットの安定性照査を行った。また、立体FEM解析を行い、アーチアバットの応力状態を確認して、引張応力が発生する箇所における引張鉄筋の配置を検討した。



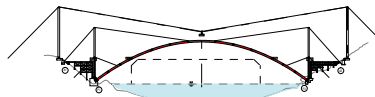
アーチリブ基部の曲げモーメントにより、アーチリブ縁端に発生した局部引張応力
図—3.11 FEM解析によるアバット部応力コンター

施工法の検討(1)

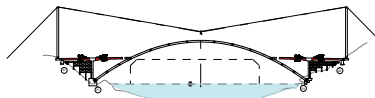
施工手順の主なステップは、6ステップとなる。



STEP 1: 下部工(橋台・アーチアバット・橋脚)施工

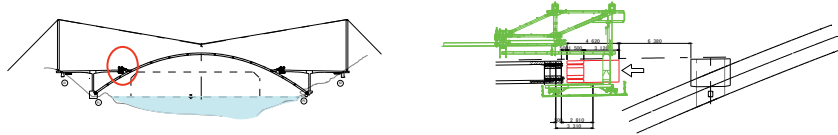


STEP 2: アーチリブ架設
ケーブルクレーンと斜吊りの設備配置

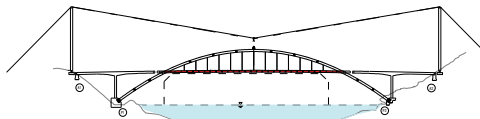


STEP 3: PC桁架設(場所打ち片持ち架設)
一旦PC桁として成立させる。

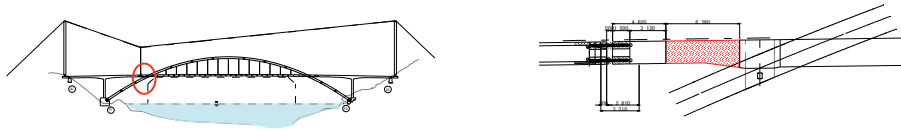
施工法の検討(2)



STEP 4: 接合桁架設—PC桁間詰め部で施工誤差等の調整を行う。



STEP 5: 鋼桁架設



STEP 6: 閉合用鋼桁ブロック架設

接合部の実験

- ・接合部の構造は図-3.14に見られるように中詰めコンクリート部と間詰め部からなる。
- ・中詰めコンクリート部は合計26個のセルから構成されており、各セルに1本ずつのPCケーブルが配されPC桁部と連結される。
- ・各セルには軸方向鉄筋・横方向鉄筋・ずれ止め(孔空き鋼板)、充填コンクリートが配されるが、構造上大きなねじりモーメントが作用する部位であり、安全性の確認が必要。

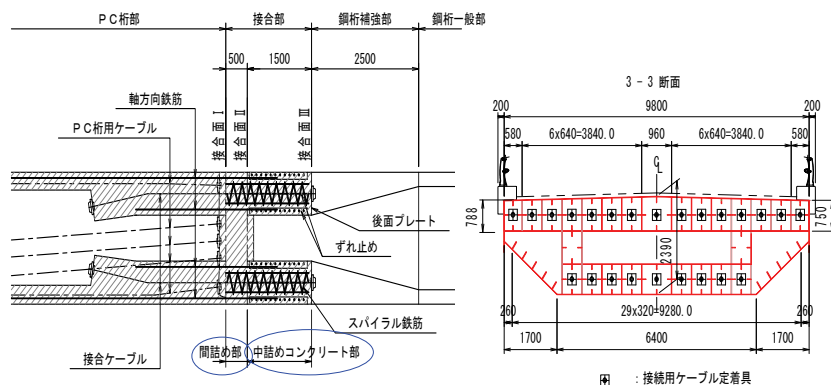
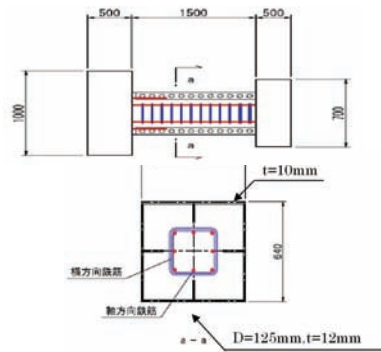
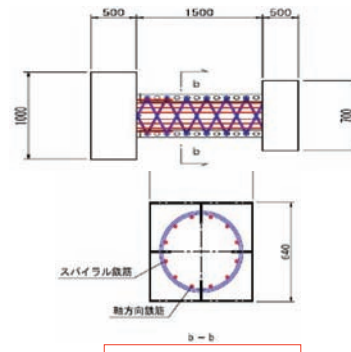


図-3.14 PC桁・鋼桁接合部の一般図と中詰めコンクリート部の断面図

単体セルによる接合部応力伝達の確認と、帯状鉄筋と螺旋鉄筋の比較実験



帯状鉄筋供試体



螺旋鉄筋供試体

実験用供試体の種類

No.	セル数	帯鉄筋	载荷方法
1	単セル	螺旋	純ねじり
2	単セル	螺旋	曲げねじり複合
3	単セル	帯状	曲げねじり複合

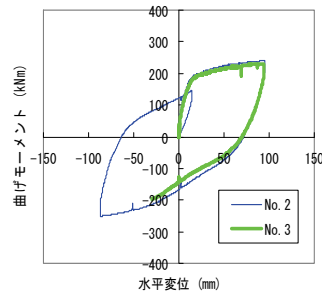
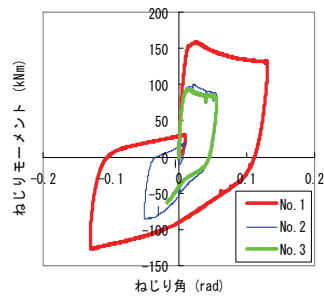
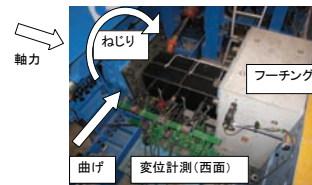


図-3.16 ねじりモーメント-ねじり角(左図)と曲げモーメント-水平変位(右図)

・鉄筋配置の違いが耐力、靱性に及ぼす差は小さいが、内部コンクリートのひび割れ本数・幅などからは螺旋配置の方が耐久性の面から優れていると判断された。

・どちらの接合部もコンクリート部分より剛性と耐力が大きく、どちらも構造的な弱点にはならないことが確認できた。

・曲げねじりが同時に作用する場合には、ねじり耐力は純ねじりより大幅に低下することから、曲げとねじりの相関を考慮することが必要である。

実験用供試体の種類

No.	セル数	帯鉄筋	载荷方法
1	単セル	螺旋	純ねじり
2	単セル	螺旋	曲げねじり複合
3	単セル	帯状	曲げねじり複合

新旧橋梁の比較

1) 解析技術面での歩み

ハード・ソフト両面におけるコンピューターの発達により、高度な解析が可能になった。例えば、大規模地震を予測・評価して解析できるようになり、長周期化により地震力を緩和し、柔軟性を高めて耐震性に優れた構造を提案できた。これにより、現時点では、**日本一長いソリッドリブアーチ橋**を設計できた。

2) 設計技術の歩み

永年にわたる数多くの実験と、研究の積み重ねにより、新技術や新工法の採用が可能になった。例えば、鋼部材とコンクリート部材を適材適所に使用した**複合構造の採用**により、力学合理性に優れ、初期建設コストを縮減できる橋梁を設計できた。また、風洞実験を活用して、**主桁形状そのものの工夫**で、**耐風安定性に優れた構造**とすることができた。

3) 保全技術の歩み

新材料や防食技術等の進歩により、**将来の維持管理費の削減**を可能にした。例えば、橋を構成する部材数をなるべく少なくし、部材形状を単純化して、塩害等に強く、維持管理しやすい構造を設計した。ちなみに、再塗装等の100年間の維持費は、トラス橋(現橋)と比べ1/5.6(67億円を12億円)に削減できる予定である。



終わりに

- ・ 設計技術に関しては、平成7年(1995年)の兵庫県南部地震による橋梁被災を教訓に、特に耐震設計に格段の変化が生じた。他にも、耐風設計、疲労設計、景観設計などの研究の蓄積・ツールの整備によって、より合理的な設計が可能になった点が多い。
- ・ また、海洋架橋の幕開けとも言べき天草五橋完成から、45年を経過し、設計期間も含めると、ちょうど半世紀を経た時期になる。
- ・ 平成19年からの三年間、天草一号橋に近接して架橋される新天門橋の技術検討委員会では、現天門橋に恥じない橋をと言う思いで、知恵を出し合ってきた。

終わりに(続き)

- ・ 橋梁技術はこの半世紀でどう変わったのかを述べて、進歩の足跡を振り返りたいと思ったが、ここに述べたことが必ずしも進歩であったとの判断は行えないと考え、標題を進歩ではなく歩みとした。
- ・ 橋梁は他の産業製品のようにコスト縮減を何処まで達成できたのかを判断することは難しい。労働者の安全を確保すること、工事期間を短くすること、周辺環境に配慮すること、地球に優しい材料を使用することなどで、架橋コストはむしろ割高になっているのかも知れない。また、橋種選定の評価項目の一つである経済性は、あくまでも現時点での技術のコスト比較である。
- ・ 明石大橋で世界一記録を達成できた日本の橋梁技術者は、日本経済の沈滞化と新規公共事業に振り向けられる予算の大幅な減少により、諸外国で活発に行われている架橋事業を羨ましく眺めているように見える。
しかし、架橋技術は海外において、日本人技術者の活躍と日本技術の利用が期待される分野の一つであり、今後における土木技術者の諸外国での活躍も期待して、本講演を終えたい。

ご静聴有り難うございました