特集≫≫　新しい建設材料，最先端の高度な建設技術の開発と実用化

超高耐久橋梁の開発とその実証橋の建設

鋼材を一切用いない「Dura-Bridge」の実現

緒方辰男・大城壮司・永元直樹

将来の維持管理の負荷を低減するため，鉄筋やPC鋼材などの腐食による劣化の原因となる鋼材を一切使用しないプレストレストコンクリート橋を開発した。本橋梁構造は，高強度繊維補強コンクリートによって製作したプレキャストセグメントを，アラミドFRPロッドによるプレストレスで補強したものである。本橋の耐疲労性を検証するため，輪荷重走行試験を実施した。また，せん断耐荷性能を検証するため，せん断耐力実験を実施した。さらに，これらの成果を踏まえ，本構造の全体的な安全性や設計・施工の妥当性を検証するため，実証橋を建設し載荷実験を実施した。その後，工事用道路として供用しながら常時モニタリングを行い，安全性を確認している。

キーワード：維持管理性，超高耐久橋梁，高強度繊維補強コンクリート，FRPロッド，輪荷重走行試験

1. はじめに

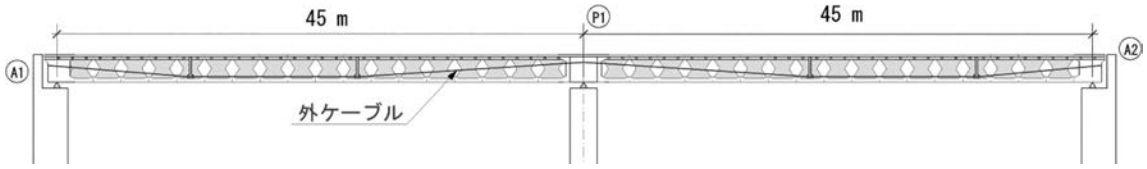
鉄筋コンクリート構造の発明以降，世界各国で鉄筋コンクリート構造の橋梁をはじめとする様々な構造物が建設されてきた。また，プレストレストコンクリートの発明以降は，コンクリート橋の適用支間が飛躍的に大きくなり，急速に普及し社会基盤の整備に貢献してきている。プレストレストコンクリート橋をはじめとするコンクリート構造物は，一般的に耐久性が高い構造といわれてきたが，近年，塩害や中性化などにより，鉄筋やPC鋼材が腐食し，構造的な性能の低下が発生したり，鉄筋の腐食膨張によりコンクリート片が剥落し，第三者へ影響する事態が発生したりしている事例が報告されている。すなわち，コンクリート構造もメンテナンスフリーではなく，適切な維持管理が必要であることが指摘されてきている。

世界各地で多くの社会インフラが存在し，これからも新興国を中心にますます社会インフラの整備が進みストック量が増大していくと考えられる。これに伴い，維持管理の負担は増大し，将来においてこの維持管理が負担になることが予測される。実際に，日本では，高度経済成長期以降に急速に整備した社会インフラは高齢化が進み，補修・補強などの維持管理費や更新費が増大しており，現在のままでは2035年以降は維持管理費・更新費の必要額が投資総額を上回ることが予想されている[1)]。このため，現存する社会インフラの効率的・戦略的な維持管理が必要であると共に，これから整備しなければならない社会インフラにおいても耐久性に富んだ構造とし，将来における負担を極力低減することが重要である。

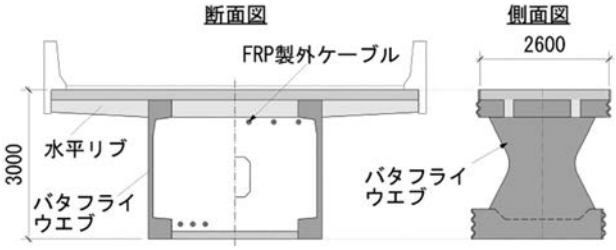
このような社会的な背景を鑑み，著者らは鉄筋やPC鋼材などの腐食による劣化の原因となる鋼材を使用しないプレストレストコンクリート橋，「Dura-Bridge」（以下「本構造」という）を開発した。さらに，本構造の実構造物への適用の前に，全体的な安全性や設計・施工の妥当性を検証するため，実証橋を建設した。本稿では，その開発と実証橋建設の概要を概説する。

2. 超高耐久橋梁（Dura-Bridge）

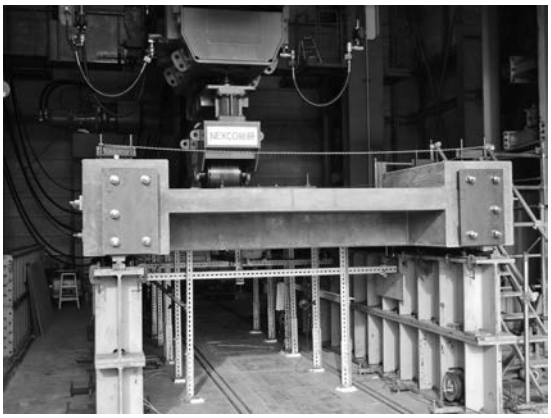
本構造は設計基準強度80 N/mm^{2}の高強度繊維補強コンクリートを用いたコンクリート構造である。曲げモーメントや軸引張力によって発生する引張応力に対しては，アラミドFRPロッドを緊張材として用いることで補強し，PC鋼材及び鉄筋の使用を一切排除している。また，用いるコンクリートには短繊維を混入することにより，せん断強度の向上を図っている。これにより，通常のコンクリート橋に配置されているせん断補強鉄筋を排除している。さらに，桁形式の橋梁にはウエブに蝶型のコンクリートパネルを用いたバタフライウエブ構造[2), 3)]の適用を前提とし，軽量化とせん断補強の合理化を図っている。なお，提案橋梁の施工は二次製品工場で製作したプレキャストセグメントを現場に搬入し，接合することによって高品質化と



図―２　本構造の概要図



図―１　セグメント概要図



写真―１　輪荷重走行試験状況

現場作業の省力化を図ることを前提としている。

提案構造の概要を**図―１，２**に示す。

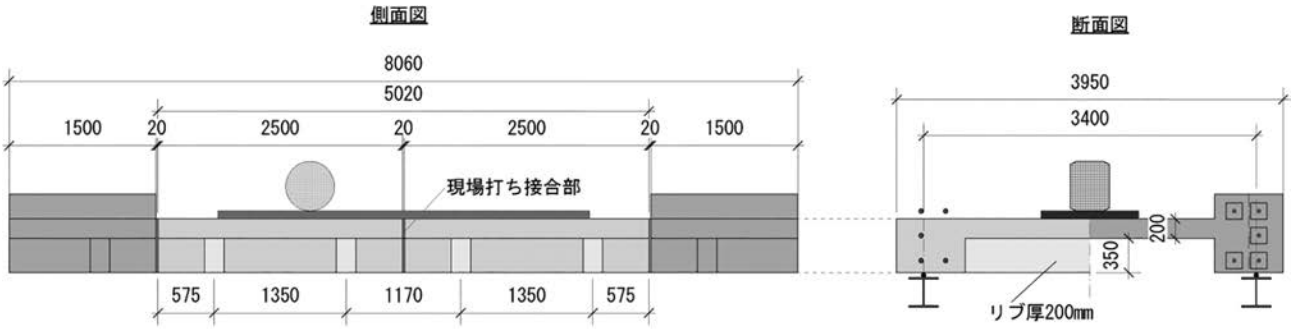
3. 上床版の疲労耐久性の検討

(1) 実験概要

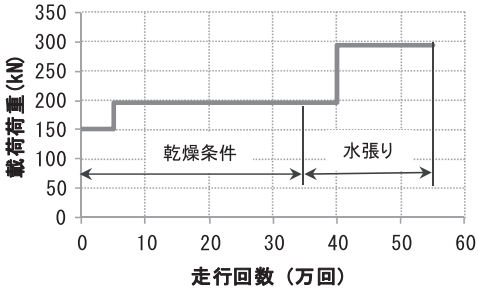
道路橋の上床版は，重交通による疲労損傷が顕在化する可能性が高い部位である。提案橋梁の上床版構造は通常のコンクリート床版に使用されている補強鉄筋やPC鋼材を一切配置せず，高強度繊維補強コンクリート製のリブ付き床版をFRPロッドによる緊張力により補強する構造である。また，前述のようにプレキャストセグメントを現場にて接合する構造であり，通常のコンクリート床版と大きく構造が異なる。そこで，このリブ付き床版構造を対象とし，リブ付き床版自体およびプレキャスト部材間の接合部に着目した実物大の輪荷重走行試験により，疲労耐久性を検討した(**写真―１**)。

実験供試体は上床版のみを切り出した形状とし，セグメント中央とセグメント間の接合部双方に着目できるように，２セグメント分をモデル化し，その両方の外側にプレストレス伝達用のセグメントを設置した(**図―３**)。実験供試体は全てプレキャストセグメントで製作し，接合目地20 mmを確保して設置した。その後，接合目地部にセグメントと同じ設計圧縮強度を有する無収縮モルタルを流し込み，硬化後に橋軸方向にプレストレスを導入した。なお，橋軸方向のプレストレス量は**図―２**に示す提案橋梁の設計結果より，負曲げモーメントが最も大きい中間支点部に着目し，その位置における設計荷重時の上床版応力度を再現する値とした。

載荷方法は鉄輪による１軸載荷とし，床版支間の中央を橋軸方向に3.0 mの往復走行をさせた。鉛直荷重は**図―４**のように段階的に増加させた。なお，日本で最も重交通な高速道路の路線である東名高速道路の交通量調査をもとに，供用年数100年に相当する本試験の繰り返し載荷回数を算出すると35万回になる。そこで，35万回以降はさらに厳しい条件として床版上に水を張った状態で輪荷重走行を続けた。また，40万回以降は，さらなる対疲労性を検証するため，載荷



図―３　輪荷重走行試験の概要図



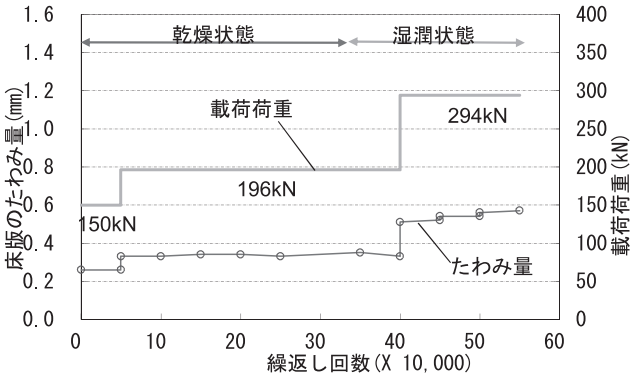
図―４　輪荷重走行試験載荷ステップ

荷重を日本における設計輪荷重の 3.0 倍まで荷重を増加させ，15 万回の繰り返し載荷を実施した。その際，さらに厳しい条件となるように，5 万回毎に橋軸方向のプレストレス応力を設計値の 1.0 倍，0.25 倍，0.125 倍と減少させた。

(2) 実験結果

載荷荷重と床版中央部の鉛直たわみ量との関係を**図―５**に示す。これより，40 万回までは繰り返し回数の増加に伴う鉛直変位の増加は認められない。荷重を 3 倍に増加した 40 万回以降も鉛直変位量の増加はわずかである。また，50 万回までは載荷によるひび割れや接合部の目開き等は確認されなかった。橋軸方向のプレストレス量を 0.125 倍とした 50 万回以降に接合部に 0.05 mm 程度の目開きが認められたが，荷重を除荷すると目開きは閉じた。55 万回の載荷終了後に目視確認したところ，ひび割れ等の変状は一切確認できなかった。

この結果，東名高速道路の交通量調査に基づいた供用年数 100 年に相当する繰り返し載荷後も特に変状は見られず，その後の繰り返し載荷においても健全性を確保していたといえる。これらの結果は，同様の輪荷重走行試験を実施した通常の PC 床版の試験結果と比べても同等以上であり，本構造は十分な疲労耐久性を有しているといえる。

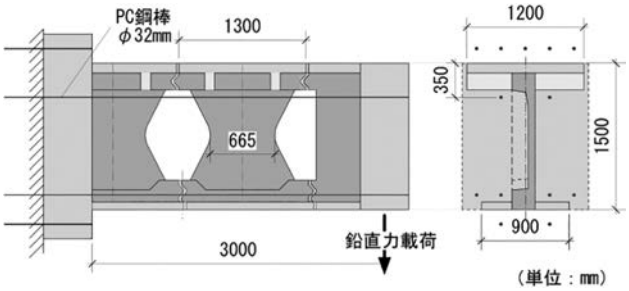


図―５　繰返し載荷回数と鉛直変位の関係

4. 提案構造のせん断耐力に関する検討

(1) 実験概要

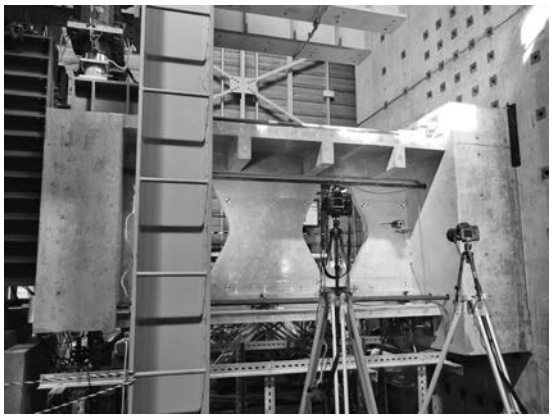
提案構造は橋軸方向の曲げモーメントに対してはアラミド FRP ロッドによるプレストレスによって補強しており，通常の橋梁とほぼ同等の設計が可能である。一方，せん断については，バタフライパネルとコンクリート自体で抵抗する構造である。特に，施工はプレキャストセグメント構造で建設することを前提としており，その接合部は上下床版のみが連続する構造であり，応力が集中すると考えられる。そこで，**図―６**に示す片持ち梁形式の実験供試体によってせん断挙動を検討した。



図―６　セグメントのせん断耐力実験概要図

実験供試体は対象橋梁の片ウエブのみに着目し，載荷設備の関係から縮尺 1/2 の I 桁の実験供試体とした。また，せん断破壊が先行するように曲げ破壊耐力を確保することとし，上床版の幅を 1.2 m，下床版の幅を 0.9 m とするとともに，橋軸方向に合計で 3640 kN のプレストレスを導入した。セグメント間の接合部はコンクリートの斜引張破壊強度のみで抵抗するとし，ウエブ上下端の増厚部の形状を設定した。

提案橋梁はプレキャストセグメント工法で架設することを前提としており，このせん断実験はセグメント間の接合部に着目している。よって，製作方法の違い



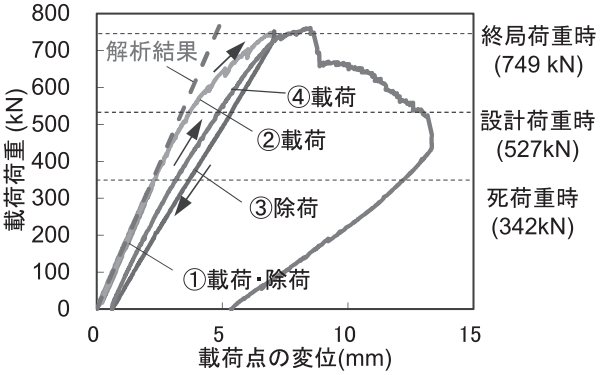
写真―２　せん断耐力実験状況

が接合部の耐荷性能に影響を及ぼす可能性があるため，実験供試体は，実際の提案橋梁のセグメント製作手順と同じ手順で製作した。

なお，載荷は実験供試体にねじり変形が生じないように，端部の横桁に2点載荷することとし，両方のジャッキの変位を同期させながら載荷した(**写真―2**)。鉛直荷重は，死荷重時相当の荷重まで載荷したあと一度ゼロまで除荷した。その後載荷を再開し，終局荷重に相当する値に達したところで，再び除荷した。その後，再び実験供試体が破壊するまで漸増載荷した。

(2) 実験結果

図―7に載荷荷重と変位の関係を示す。死荷重時相当までは弾性的な挙動を示し，除荷後も原点に戻っている。その後の載荷で，設計荷重時相当の載荷状態で実験供試体に曲げひび割れが発生した。そのまま荷重を増加すると，曲げひび割れの進展に伴い鉛直変位量が徐々に増加した。また，その際，セグメント間の接合部にせん断力による斜めひび割れが進展していった。



図―7　せん断実験の荷重と変位の関係

載荷荷重が終局荷重時相当に達したところでいったん除荷したが，除荷時の勾配は弾性変形時の勾配と遜色ない程度であり，曲げひび割れおよび斜引張ひび割れが発生したものの，その損傷度合いは大きくなく，健全性が保たれていることがうかがえる。

荷重を0まで除荷した後に再度破壊まで載荷したところ，終局荷重時相当までほぼ除荷曲線と同じ経路で戻り，その後セグメント間の接合部に斜めひび割れがさらに進展したと共に上床版とウエブとの接合部にもひび割れが進展し，荷重が低下していった(**写真―3**)。

以上の結果より，セグメント間の接合部は，今回開発した高強度繊維補強コンクリートのみで抵抗するとして設計することが妥当であるといえ，今回設定した形状で所定の耐力が確保できているといえる。

写真―3　上床版の接合部の破壊状況

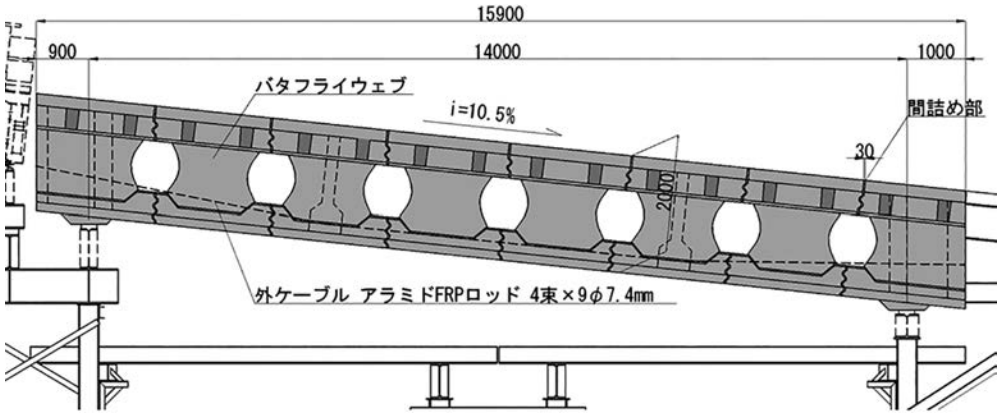
5. 実証橋の建設

(1) 橋梁概要

前述のように，今回開発した超高耐久橋梁に対しては，材料の開発に始まり，床版の耐疲労性およびセグメントのせん断耐力特性など種々の検討を進めてきた[4)]。今後，実構造物へ展開するにあたり，構造物全体の安全性や設計，施工の妥当性などを包括的に検証するため，実証橋を建設して実際に使用することとした。対象の橋梁は長崎自動車道のⅡ期線工事における工事用道路の仮桟橋の一部である。橋梁概要を以下に示す。また，橋梁概要図を**図―8**に示す。

・架設位置：長崎県長崎市平間町地内
・支間長：14.0 m（橋長：15.9 m）
・総幅員：6.0 m
・構造形式：単純桁橋
・架設方法：固定式支保工架設

対象橋梁は8基のプレキャストセグメントとして2次製品工場において製作し，公道を輸送した。使用したコンクリートは，今回開発した設計基準強度80 N/mm^{2}の高強度繊維補強コンクリートである。架設位置においては，220 t吊りのトラッククレーンにおいてセグメントを吊り上げ，固定支保工上に30 mmの隙間をあけて設置した（**写真―4**）。全セグメントを設置後，セグメント間を設計基準強度80 N/mm^{2}の高強度無収縮モルタルによって間詰めした。なお，端部セグメントにおいては，クレーンによる架設時のセグメント重量を低減するため，端支点横桁部を中空として製作し架設した後に中詰めコンクリートを打設した。無収縮モルタルと端支点横桁の中詰めコンクリートの強度発現を確認後，アラミドFRP製の外ケーブルを挿入，緊張して全長にわたり一体化して支保工を下げて橋梁を自立させた。



図―８　実証橋概要図

写真―４　セグメント架設状況

(2) 載荷実験

橋梁本体が完成後に橋梁の安全性と設計の妥当性を検証するため，静的載荷実験を行った（**写真―５**）。載荷は重量が既知である 50 t ラフタークレーンを用い，橋軸方向に移動させながら各種ひずみや変位などを計測した。その結果，各位置での鉛直たわみは解析値とほぼ同等であることが確認された。また，セグメント間の継ぎ目に目開き等は見られず上下床版のひずみも解析値とほぼ同等の値を示していたことから，設計の妥当性が確認されたと考えられる。

写真―５　載荷実験状況

(3) 使用時のモニタリング

載荷実験によって橋梁の安全性を確認した後，2015 年 9 月 15 日より工事用道路として供用を開始した。供用中は土運搬通路として使用されるとともに，橋梁の上下部工を施工するため，生コン車やトレーラー，クレーン等が通過する。そこで，供用中の桁において上下床版のひずみやセグメントの目開き，および外ケーブルの張力などを各種計測装置によって常時モニタリングしている。また，変形については可視光通信を用いた 3 次元位置計測システム[5] により常時計測しており，これらにより橋梁の安全性や挙動を把握している。

6. おわりに

今回提案した橋梁は，橋梁に鉄筋や PC 鋼材，鋼板などの鋼部材を一切使用せず，耐久性を向上させることによって将来のメンテナンス費用や労力を縮減することを可能とする構造であり，近い将来に到来する社会基盤の大量維持管理時代の負担を低減するのに有効な構造である。主要材料である高強度繊維補強コンクリートの開発から構造の提案，実験による力学的な挙動の評価，交通荷重による床版の疲労耐久性の確認などを行ってきた。本研究で得られた成果は以下の通りである。

(1) 設計基準強度 80 N/mm^2 の高強度繊維補強コンクリートに FRP 緊張材でプレストレスを与えた非鉄製の床版について，実物大の上床版模型によって輪荷重走行試験を実施した。その結果，日本における重交通路線の交通量についても 100 年相当の耐疲労性を有していることが確認できた。

(2) セグメント間の接合部は，今回開発した高強度繊維補強コンクリートのみでせん断に抵抗することが可能であり，その設計手法は斜引張破壊に対す

る通常の手法が適用可能である。

(3) 橋梁全体の安全性や設計・施工の妥当性を検証するため，実証橋を建設した。プレキャストセグメントで施工された本橋は問題なく設計・施工され，静的載荷実験および供用中のモニタリングで安全性が確認されている。

今回開発した本構造「Dura-Bridge」は，錆びる材料を使用しないことにより耐久性の大幅な向上を目指した構造であり，将来のメンテナンスに関する負荷低減に大きく貢献する構造と考えられる。今後わが国では少子高齢化が急速に進展し，労働人口の減少に対応しながら現在の生活水準を維持・向上していくためには建設時点から将来の負荷低減を考慮していくことが重要である。本構造のような耐久性を高め，将来の負荷低減に資する技術開発とともに効率的な維持管理手法の開発も我が国が持続可能な発展を続けるために期待されるところである。

JCMA

《参考文献》

1) 国土交通省：国土交通白書 2012 平成 23 年度年次報告，2012.7
2) 永元直樹，片　健一，浅井　洋，春日昭夫：超高強度繊維補強コンクリートを用いた新しいウェブ構造を有する箱桁橋に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.66，No.2，2010.4
3) Kasuga, A., Kata, K., Nakatsumi, K. and Takaki, Y. "New Concept of Composite Bridges", Proceedings of 2nd fib Congress. June 2006.
4) Ohshiro, T., Matsui, T., Kasuga, A. and Nagamoto, N.: Development of Non-Metal Bridge, Proceedings of fib congress 2014, Feb. 2014.
5) 永元直樹，春山真一郎，内山　英昭，掛橋　孝夫：可視光通信技術を用いた 3 次元位置計測システムの開発と PC 橋施工への適用，第 19 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，pp.137-140，2010.10

［筆者紹介］

緒方　辰男（おがた　たつお）
西日本高速道路㈱　技術本部　技術環境部
構造技術課長

大城　壮司（おおしろ　たけし）
西日本高速道路㈱　技術本部　技術環境部
構造技術課
課長代理

永元　直樹（ながもと　なおき）
三井住友建設㈱　技術本部
第一技術部長