

論文 孔あき鋼板ジベルを用いた超高強度繊維補強コンクリート桁間の接合構造に関する研究

田中 良弘^{*1}・福浦 尚之^{*2}・三桶 達夫^{*3}

要旨：超高強度繊維補強コンクリートの桁相互を孔あき鋼板ジベルを適用して、経済的に接続する構造を提案した。孔あき鋼板ジベルは、従来のようなウェブとフランジのせん断伝達としてではなく、曲げによる引張部材の引張伝達を主目的として適用した。この接続工法を適用した矩形断面のPC桁を供試体として製作し、曲げ載荷実験とFEM解析により接続部での力の伝達特性を明らかにし、薄肉断面の桁を接合するための設計資料を得た。

キーワード：孔あき鋼板ジベル、超高強度繊維補強コンクリート、接合構造、PC桁

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリートは、最密充填されたセメントマトリックスに高強度の短纖維を混入した圧縮強度 200N/mm^2 、曲げ引張強度 $30\sim40\text{N/mm}^2$ の特性を持つ新材料である。この材料の一つに反応性粉体コンクリート(Reactive Powder Concrete : RPC)があり国内での施工実績が報告されている¹⁾。RPCを適用した構造物は大幅な自重の軽量化が可能であり、橋梁では上下部工のトータルコストダウンと材料の高耐久性からライフサイクルコストダウンを期待することができる。しかし、RPCの部材を現場打設により製作する場合、熟養生や型枠などの制約から、現時点ではサイトプレファブか工場製作が有利である。そのために、長大スパンの橋梁を建設する場合には、接合構造が工期や建設コスト縮減の鍵となる。そこで本研究では、RPCの薄肉断面からなるPC橋梁のプレキャストブロックを経済的に接合する接合工法を、孔あき鋼板ジベル(PBL)を応用して考案した。PBLは、Leonhardtらの考案により鋼・コンクリート合成桁のずれ止めに適用してきた²⁾。ここでは、PBLを引張の補強材として適用する。接合部の施工法と力の伝達特性を実験により確認し、接合部の設計施工

法に関する基礎的な特性を把握した。

2. 接合構造の概念

RPCを適用して製作したプレキャスト(PCa)箱桁ブロックを接合する事例について接合構造の概念図を図-1に示す。接合しようとする PCa ブロックのウェブやフランジ面に予め直径 5~6 cm の円柱凸部を設けておく。相互の PCa ブロックを従来のウェット or ドライ・ジョイントにより PC 緊張鋼材により接合した後、円柱凸部に孔あき鋼板ジベルを設置して周囲に RPC を打設、養生して完成する。

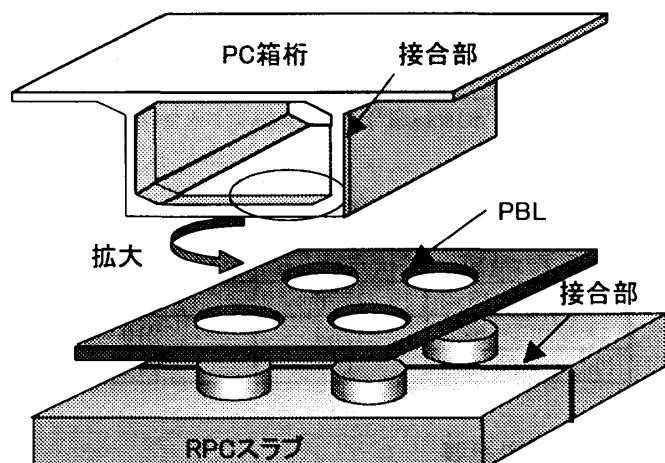


図-1 接合構造の概念

*1 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 Ph.D. (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 工博 (正会員)

*3 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 工修 (正会員)

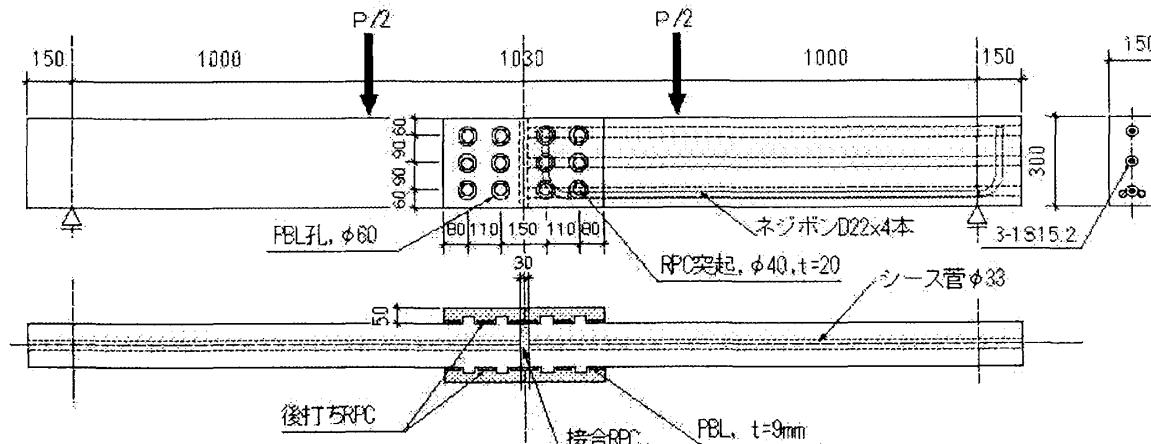


図-2 供試体

単位 : mm

従来の接合方法では、接合部以外の部材では鋼纖維の引張抵抗を設計的な特性値として $8\sim10\text{N/mm}^2$ 程度期待できるので、使用限界状態でフルプレストレスとする必要がない。しかし従来の接合方法では、弱部となる接合面のために余分の緊張力を与えフルプレストレスにする必要があった。考案した接合構造では接合面においてPBLが引張力を伝達するので、フルプレストレスとする必要がなくなる。そのため緊張材や定着部を縮減することができ、経済的となる。

表-1 RPC の配合

水	セメン	珪石微粉末、シリカ、他	鋼纖維	減水剤
180	818	1479	157	24

単位 : kg/m^3 、水180kg/m³は高性能減水剤の水分19kg/m³を含む

表-2 鋼材の材料特性

鋼材の種類	降伏点(N/mm ²)	ヤング率(kN/mm ²)
PC鋼線 φ15.2	1776	200
ネジボン D22	1214	210
PBL SS400 t=9	310	210

3. 実験の概要

3.1 供試体の製作方法

橋梁の桁断面は、I型断面や箱断面となることが多い、一般的には図-1に示すような接合構造となる。今回の実験では基礎的な実験なので矩形断面を採用し、供試体の作成にあたっては

実際の施工を反映した。図-2に示すように 150x300x1665 mm の矩形断面のRPC桁を 2 本製作し、90°Cx48 時間の熱養生を実施した。桁相互の接合面に 30mm の隙間をあけて、そこにRPCを打設して養生し、所定の強度に達したら桁全長にわたり φ 15.2mm のモノストランド 3 本で緊張する（導入力 : 144kNx3=432kN）。次に、φ 60 の孔を 12 個設けたPBLを事前に設けたRPC円柱凸部（φ 40）に合うように両側からセットし、その周囲にRPCを増打ちして完成する。PBLのセットに際しては既設RPCとの隙間が発生するのを防止するために、片面にペースト状のエポキシ樹脂を塗布する。供試体は接合部の耐力実験の位置付けがあるために、接合部以外の桁で曲げ破壊が生じないように、超高強度鉄筋（ネジボンD22）で補強した。実験に使用したRPCの配合表を表-1に示す。圧縮強度 209N/mm²、曲げ強度は 43.2N/mm²である。また鋼材の材料特性を表-2に示す。

3.2 実験方法

載荷は 10,000kN アムスラー型試験機を使用し、等曲げ区間 1,030mm、せん断区間 1,000mm の曲げ載荷とした。写真-1に載荷実験終了後の状況を示す。計測は、載荷荷重はじめ、鉛直変位、支承水平変位、RPC と PBL のひずみ、接合部の開き変位について実施した。

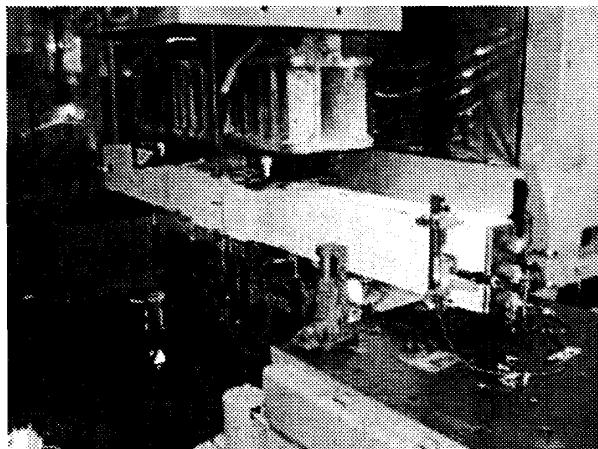


写真-1 載荷実験の状況

4. 実験結果と考察

4.1 荷重とたわみの関係

中央部（接合部）から左右に 75mm の位置における変位と荷重との関係を図-3 に示す。また、各荷重時におけるたわみ分布を図-4 に示す。初期ひび割れが発生した荷重 120kN までは弾性変形で、その後ひびわれの発生と共に剛性が低下し、最大荷重 282kN に達した。荷重 200 ~ 250kN 付近からたわみ角度が接合部に集中しはじめていることが、たわみ分布からわかる。ひび割れは、載荷点付近に分散して発生した。接合部の側面には 4~5 本のひび割れ程度で顕著なひび割れとならなかった。最終破壊は接合部から 3cm 外側の RPC 底部の引張破壊であった。これ程度で顕著なひび割れとならなかった。最終破壊は接合部から 3cm 外側の RPC 底部の引張破壊であった。

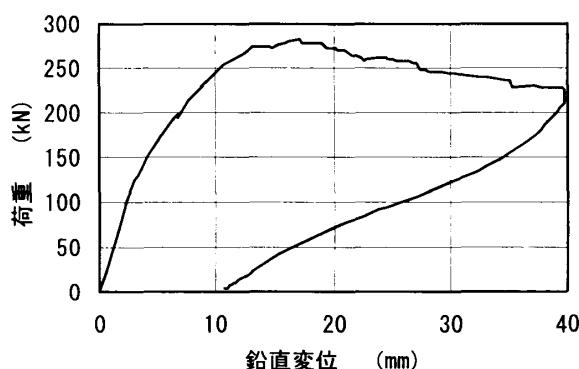


図-3 荷重と鉛直変位

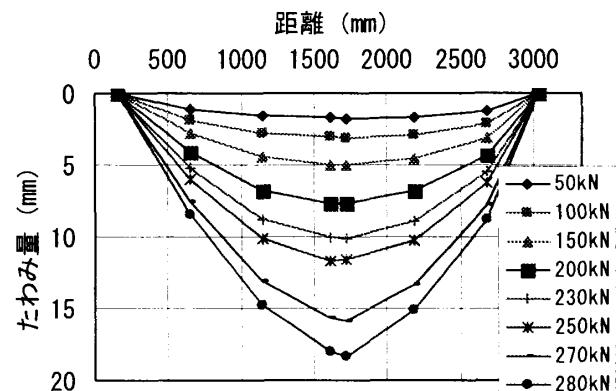


図-4 荷重とたわみ分布

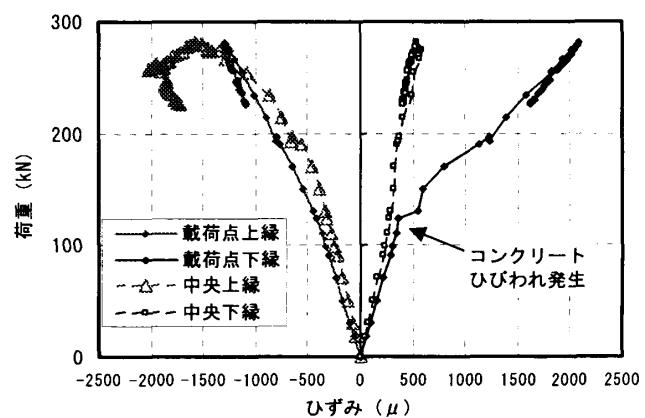


図-5 RPCのひずみ

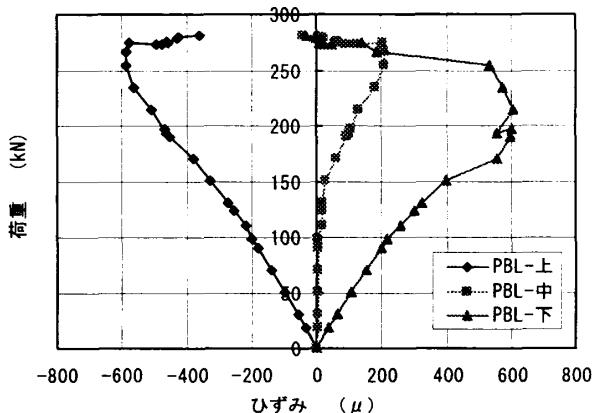


図-6 PBLのひずみ

4.2 RPC のひずみとひび割れ

桁の中央部付近（センターから左右に 75mm の位置）および載荷点それぞれの上縁、下縁における RPC のひずみと荷重の関係を図-5 に示す。圧縮ひずみ(+)は荷重 150kN 付近まで線形である。一方、載荷点の下縁の引張ひずみは 120kN

付近において不連続にひずみが増加しており、この時点で載荷点の下端におけるRPCに知覚できる初期ひび割れが発生した。その後の下縁のひずみ勾配は低下して軟化していることが分かる。しかし、中央下縁のひずみは荷重と共に増加するが比較的線形に近い挙動であった。これは、接合部のPBLの剛性が寄与しているものと考えられる。

4.3 接合部の挙動

接合PBLの中央の上端、中央、下端におけるひずみと荷重の関係を図-6に示す。上端の圧縮側のひずみは線形的に増加するが下端の引張ひずみは荷重100kNまでは直線増加であるが150kNまでに増加率が低減する。荷重150kN以降はさらに増加率が低下し、荷重180kN付近(ひずみで600 μ)からひずみの増加がなくなる。この状態はPBLの孔に抵抗しているRPCの一面せん断が大きくずれはじめているための現象である。この現象を詳細に調べるには別途PBLの基礎実験を行う必要がある。

図-7は、接合部下端のセットした目開き変位計(長さ80mm)の計測記録から、接合部下端の平均引張ひずみによる変形を除去して接合面における見開きとして求めたものである。荷重120kN付近までは、ほぼゼロの目開きであり、一旦この荷重付近で減少する。これは、RPC桁の載荷点下端において初期ひび割れが発生した荷重であり、荷重の再配分により接合部の変形が一度減少したことによる。その後の荷重で線形的に目開きが増加し、荷重220kN付近で接合面のクラック幅が0.1mmとなる。使用状態の荷重に対する耐力としては、荷重150kN(目開きで0.01mm)程度と考えても良い。

接合部の破壊状態は、PBLの孔にあるRPCの一面せん断破壊である。構造体としての評価で、PBLの一面せん断耐力とせん断剛性が設計的に重要なポイントである。PBLのせん断耐力が孔内のRPCで決まる場合には、RPCのせん断強度と孔径、PBLの鋼材のせん断破壊で決まる場合には孔間隔と鋼材の厚さが決める要因となる。

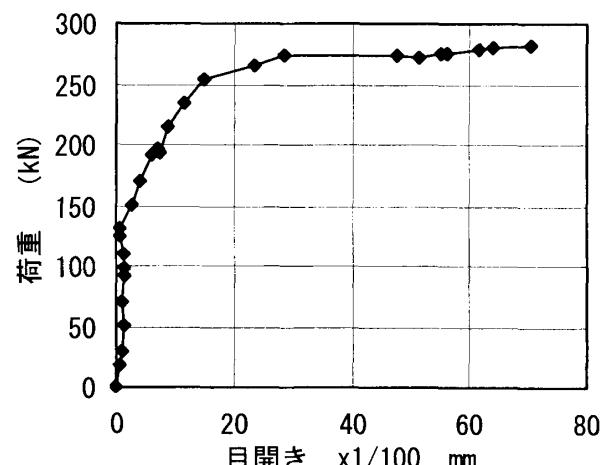


図-7 接合部の目開き

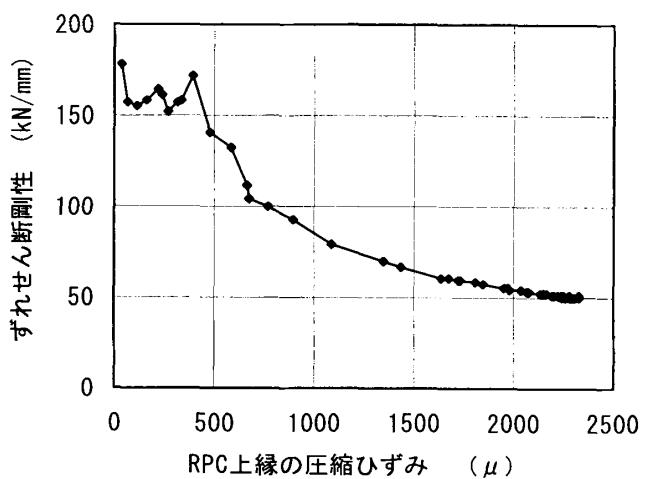


図-8 PBLのせん断剛性

今回の場合は孔内のRPCのせん断強度で支配された。一方、せん断剛性はRPC梁への補強効果を左右する。図-8は、PBLのせん断剛性をPBL近傍におけるRPCの圧縮ひずみとの関係で求めたものである。実験では、接合部のPBL上縁とRPC上縁の圧縮ひずみを測定している。荷重が増加するとPBLとRPCの間にずれ変形が発生することは、図-6から分かる。つまり、RPCとPBLの圧縮ひずみ差はせん断ずれに起因しているので、ひずみデータからずれ変位量を求める。それぞれの材料に働く圧縮力は考えている区間(長さ300mm)における棒部材と考えてひずみから求める。せん断剛性は圧縮力をそれぞれの材料間のずれ変形量で除して求められる。この結果によれば、圧縮ひずみ400 μ までは高いせん

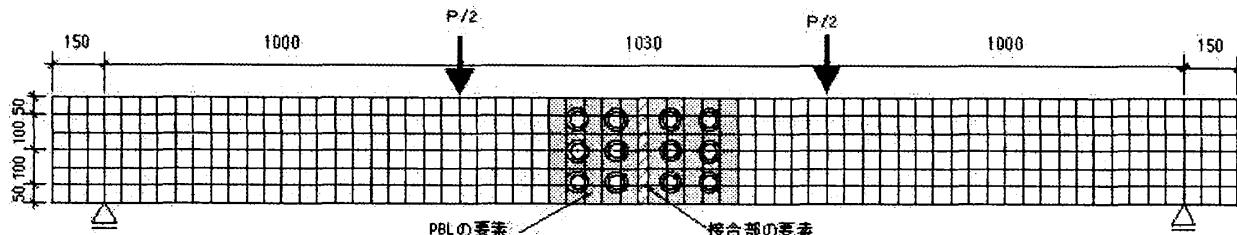


図-9 解析モデル

表-3 解析のモデル化

解析モデル	stage-1	stage-2
ケース1：接合部にPBL	PCの導入，接合部あり	PBL付加，載荷荷重
ケース2：接合部なしの桁	PCの導入，接合部なし	載荷荷重
ケース3：接合部に補強なし	PCの導入，接合部あり	載荷荷重

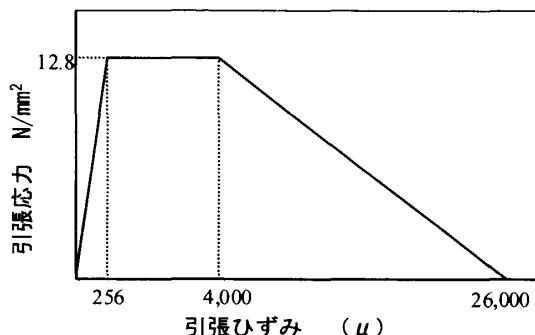


図-10 R P C の構成則

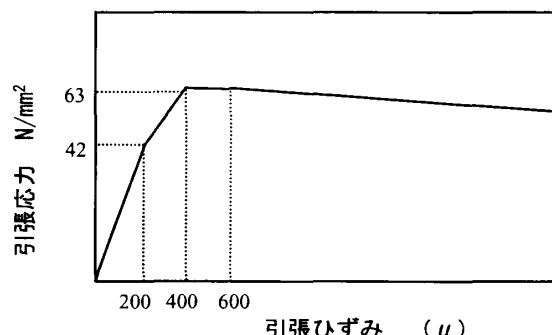


図-11 P B L の等価構成則

断剛性を示し、PBL と RPC が一体として働いている。しかし、1000 μ 以降ではせん断剛性が初期の半分程度に低下する。せん断剛性については、さらに基礎的な要素実験を行う必要がある。

5. 非線形 FEM 解析

5.1 解析モデル

今回の実験を接合部の設計的な観点から検証するために、実験のシミュレーション解析を実施した。解析は二次元 FEM モデルを採用した。解析に用いたメッシュ図を図-9 に示す。解析ケースは今回の実験（ケース1）の他に接合部がない場合の一体とした桁（ケース2）、また従来の接合構造であった PC のみ導入したもの（ケース3）を実施した。解析は PC 導入のプロセスがあるのでステージ解析とし、PC 鋼材の先行し

たひずみ、RPCへの圧縮応力を考慮した。（表-3 参照）ケース2とケース3については、接合部RPC（幅30mm）要素が圧縮にのみ抵抗するように引張側の構成則を考慮した。RPCの圧縮側構成則は圧縮強度 190N/mm^2 まで線形の弾塑性とし、引張側は図-10に示す構成則と用いた。これは曲げ載荷試験から求めた曲げ応力—ひび割れ幅の関係から逆解析で引張応力—ひび割れ幅の関係に変換、等価検長によりひずみに変換したものである。

一方、ケース1の解析を行うために、PBL のずれ変形を考慮したモデルが必要である。詳細にせん断伝達している孔のモデル化は複雑であるので、PBL のマクロ的なせん断剛性低下を PBL 部材としての引張剛性低下として考えた。つまり PBL の引張構成則として図-11に示すよ

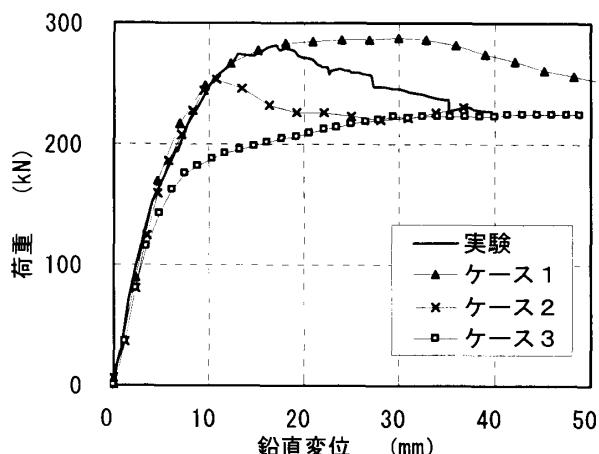


図-12 解析結果

うな塑性特性をもつ鋼板が RPC 中で完全付着するとしてモデル化した。剛性が変化するひずみポイントは、図-6に示す PBL 下縁のひずみの変化点を参考にして決めた。

解析の結果を図-12 に示す。ケース 1 の結果は、実験結果をよくシミュレートしている。解析と目開きのデータから使用限界状態の荷重は 150kN と判断できる。ケース 2 の接合部のない桁は最大荷重 220kN 付近までは実験値とよく合致していて今回の実験桁は一体桁と同等剛性を示していることが分かる。この桁はプレストレス導入応力 9.6 N/mm^2 を考慮し、設計的な使用限界状態の荷重が 102kN である。ケース 3 の従来の接合の場合は、プレストレス応力がなくなった後は接合面に目開きがおこり、荷重 100kN 付近

では他の二ケースに比較して剛性が低下する。この場合の使用限界状態の荷重は 58kN となる。

6. 結論

- (1) 従来のウェットジョイントに PBL を適用した接合方法は、従来の方法に比較して使用限界状態の設計荷重を向上することができる。
- (2) 同時に終局時の耐力も向上することができ、緊張材料や緊張端部のコスト縮減ができる。
- (3) 充填材料として RPC を適用した PBL は従来のコンクリートとの組み合わせに比較して、貫通鉄筋を挿入する必要無く、コンパクトに設計でき合理的な接合方法である。

今後は、U 断面桁や I 断面桁による接合実験による検証と PBL と RPC の基礎実験による設計手法の確立が必要である。

参考文献

- 1) 田中良弘・武者浩透・下山善秀・小林忠司 : PC 橋梁に用いた超高強度繊維補強コンクリートの用途開発, コンクリート工学, Vol.41, No.3, pp.26-32, 2003.3
- 2) Leonhardt, F. et al. : Neues vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund - Trabwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton - und Stahlbetonbau, Heft Dec. 1987