

論文 摩擦接合された R C ブラケットのすべり性状に関する実験的研究

今井富士夫^{*1}・渡辺宏明^{*2}・山下孝太郎^{*3}・中澤隆雄^{*1}

要旨：既設 R C 橋の外ケーブル補強工法におけるケーブル定着体は鉄筋コンクリートで作製されており，P C 鋼棒やアラミド材などの締付け材によりコンクリート腹板に摩擦接合されている。本研究はこのようなコンクリート腹板に摩擦接合された R C ブラケットのケーブル引張による R C 腹板との接合面のすべり性状を検討するもので，本論文では接合面を無処理とする空目地接合された供試体試験を実施した結果から得られた支圧力に対するすべり限界荷重の関係（摩擦係数）や R C ブラケットの水平荷重による曲げ変形の影響などについて論じている。

キーワード：R C ブラケット，摩擦接合，すべり性状，摩擦係数

1. はじめに

現在供用されている R C 橋には 30 年以上の橋齢となるものが多数活用されており，竣工以来の長期供用による材料的劣化あるいは活荷重の増大化による剛性不足などの理由から，補修・補強工事を必要とするものも多い。このような補強工法の 1 つに外ケーブル工法があり，その実施例も多くみられる¹⁾。外ケーブル工法の設計における重要な因子として，外ケーブルを定着するブラケットと補強される橋梁の母材との接合面すべりの問題がある。

既設 R C 橋の外ケーブルの定着には R C ブラケット（以下，定着体と称す）が採用されており，定着体は R C 桁の腹板に P C 鋼棒やアラミド材などによって摩擦接合されている。

外ケーブルの定着体の設計仕様では，摩擦係数は 0.5～0.8 と幅があり，その適用の詳細には触れていない^{2)～3)}。

コンクリート間の摩擦すべりに関する研究には，支圧材の導入軸力とすべり挙動との関係や摩擦係数について検討したいくつかの実験的な研究^{4)～6)}がみられるが，これらの研究は主として建築分野のはりと柱の結合を対象と

するもので，本研究で対象とするような接合面積が広く，さらに接合面に大きなせん断力が常時作用するような定着体の挙動にこれらの結果を直接適用できるものではないと考えられる。このような定着体そのものに関する研究には鄭らの解析的研究⁷⁾が挙げられるが，この研究は接合面のすべりを無視して，定着体と R C 腹板を一体化したモデルによる応力分布について解析を行ったもので，接合面の非線形すべり特性には触れていない。

著者らは先に非線形すべり特性を考慮した有限要素法による定着体のすべり性状の解析を行ったが，その解析では摩擦係数やせん断ばね特性が明確でないために，摩擦係数は 0.6 の一定値，定着体は剛結とした⁸⁾。

本研究は高張力材などで摩擦接合された定着体のケーブル張力による接合面のすべり性状を明らかにすることを目的としたもので，本論文では基礎的知見を得るために実施した接合面を無処理とした供試体による実験から明らかとなった支圧力とすべり性状，せん断耐力と支圧力の関係，水平力による曲げの影響などについて報告する。

* 1 宮崎大学教授 工学部土木環境工学科 工博 （正会員）

* 2 オリエンタル建設(株) 宮崎営業所副所長

* 3 宮崎大学大学院 工学研究科土木工学専攻

2. 実験概要

本実験で使用した供試体はサイズの異なる2種類で、諸元は表-1と図-1に示すとおりで、写真-1は実験風景である。

底部コンクリートはRC腹板を想定したもので、定着体は図に示すように中央点に関して点対称となるような4点をPC鋼棒で締め付けて摩擦接合した後に、ケーブル張力に相当する水平力を定着体の高さ中央点に油圧ジャッキにて漸増载荷した。ただし、定着体と底部コンクリートの接合面は打設したままの無処理で空目地接合である。

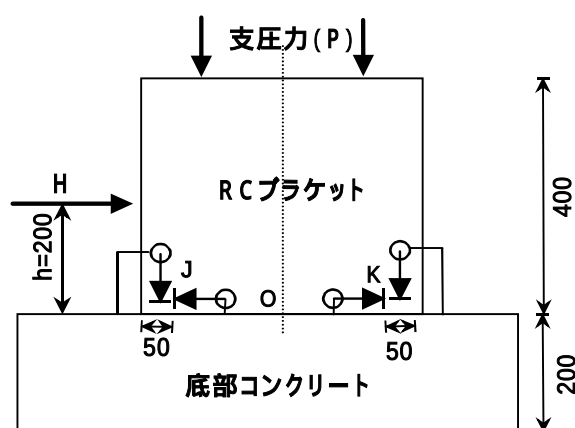
底部コンクリートはアングル鋼（板厚 20mm）と鋼板（板厚 30mm）で組まれた箱に収められ、底部コンクリートの下面と側面には鋼箱と 5cm の隙間を設け、無収縮モルタルを充填した。

载荷過程の接合面の変位は 1/1000mm のデジタル変位計を使用して、図-1(a)に示すように定着体の両端点と中央点を測定した。図での変位計は一部割愛している。変位計は底部コンクリート周囲のアングル鋼に固定したため、底部コンクリートの変形が定着体の変位に含まれることになる。そこで、底部コンクリートの変位も測定し、これらの相対変位を水平荷重による定着体の変位とした。ただし、底部コンクリートの変位計は写真-1の裏面である。

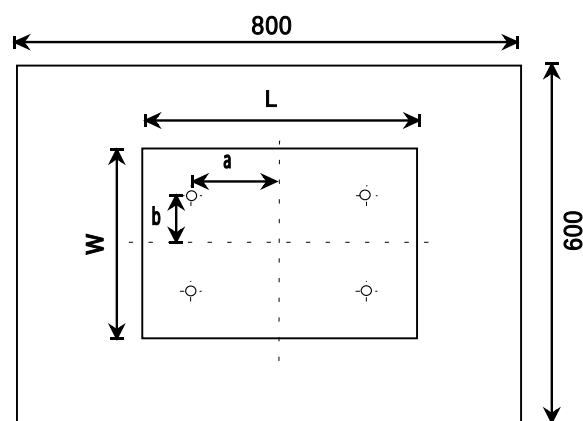
定着体の応力は、水平方向応力については接合面から高さ 1cm の箇所に、鉛直方向応力は

表-1 供試体の諸元と材料値

供試体		CBL	CBS
寸法(mm)	W	400	320
	L	600	440
締付け位置(mm)	a	200	140
	b	100	80
圧縮強度(N/mm ²)		57.4	56.7
弾性係数(N/mm ²)		4.2×10^4	3.0×10^4



(a) 载荷位置および変位計設置位置



(b) 平面図

図-1 供試体

高さ 5cm と中央線の高さ 20cm の位置に水平荷重の作用方向（以下、材軸方向と称す）に 1 列に貼付したゲージにより測定したひずみと表-1の弾性係数を用いて算出した。

PC 鋼棒による材軸方向の締付け位置はいずれの供試体も中央点から材軸方向に 2 / 3 の位置とし、初期締付け力は PC 鋼棒に貼付したひずみゲージにより管理した。

以後の図表や考察で H は水平荷重を、P は全締付け力（以下、支圧力と称す）を表している。



写真-1 実験風景

3. 実験結果および考察

3.1 接合面ずれ性状

定着体の設計では，支圧力に対するケーブルの限界張力ならびにケーブル張力が作用する面（以後，載荷側と称す）の接合面の肌離れを照査するようになっている²⁾。

2つの式を示すと，以下ようになる。

(1) 限界張力に対する照査式

$$\tau_{ave} \leq \mu \sigma_{ave} \quad (1)$$

ここに， $\tau_{ave} = H/A$ は，外ケーブル張力Hによって生じる接合面の平均せん断応力であり， $\sigma_{ave} = P/A$ は支圧力Pによって生じる平均支圧応力で，Aは接合面の面積である。

(2) 肌離れに対する照査式

$$\sigma_M + \sigma_{ave} \leq 0 \quad (2)$$

ここに， σ_M は図 - 1 (a)での点Oを回転中心とするモーメントから生じる曲げ応力である。

表 - 2は式(2)で定義された供試体 CBS の肌離れ荷重と実験による水平終局荷重を示したものである。

表 - 2 肌離れ荷重（計算）と終局荷重（実験）

支圧力	200	400	600
肌離れ荷重	73	147	220
終局荷重	104	233	343

(単位: kN)

図 - 2は水平荷重に対する底部コンクリートと定着体の相対水平変位すなわち，ずれ量を示したもので，図中の水平線は式(2)から得られた各支圧力に対する肌離れ荷重を示したものである（表 - 2）。

図から明らかなように，低荷重時に複雑な挙動を示しているが，これは今回の実験では接合面が無処理であったために，表面凹凸による影響がでたものであり，このことを考慮すると，低荷重時のずれはほとんど生じていないと考えられる。

いずれの場合にも，式(2)から算出された表

- 2の肌離れ荷重近傍でずれが生じ始めるようである。本実験のように，定着体を対称に締め付けた場合には，肌離れ荷重直後からずれが生じることは前報の非線形解析で得られた結果と合致する⁸⁾。終局荷重は支圧力が大きいほど増加し，肌離れ荷重との差異は増大するように思えるが，肌離れ荷重に対する終局荷重の比でみると，それらは 1.4～1.6 倍となっている。

図には載荷側と非載荷側の両端のずれ量を検討するために，支圧力 $P = 400\text{kN}$ の場合について示しており，両者には差異はほとんど見受けられないようである。このことは，接合面を無処理（空目地）とした場合には接合面の水平荷重に対するずれ剛性は小さいことを意味するものである。

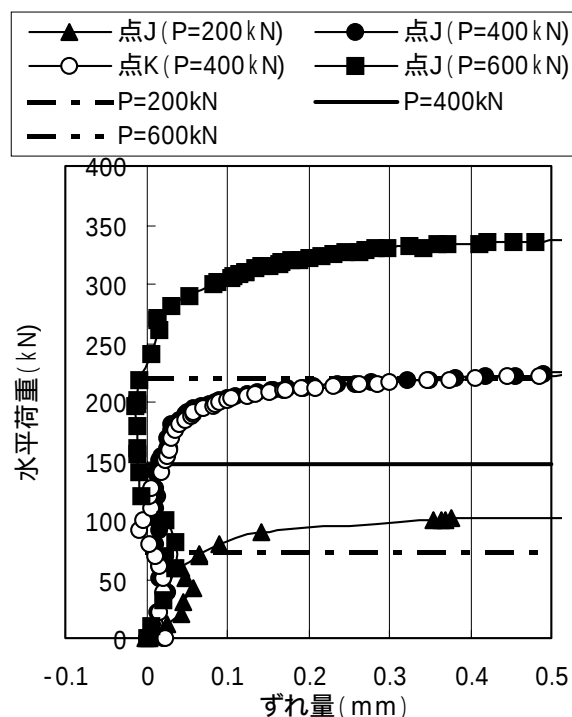


図 - 2 水平荷重とずれ量 (CBS)

3.2 端部肌離れ

図 - 3は定着体の載荷側の水平荷重に対する鉛直変位を示したものである。肌離れも底部コンクリートとの相対変位で表現している。底部コンクリートの浮き上がりを制止するために写真 - 1での左端に箱型鋼材を設置したが，変位が微少であるために十分には抑えられて

いなかったようで、低荷重時で鉛直変位に負値が生じているのは底部コンクリートの変形によるものと考えられる。このことを考慮して、肌離れについてみると、いずれの場合にも約50kNで正の傾きに転じ、その傾きもほぼ等しい。このことから、端部の肌離れ荷重はいずれも約50kNと云えよう。この結果は式(2)から算出された表-2の肌離れ荷重とは合致しない。この理由としては、式(2)は定着体の変形が微小であるとの仮定から算出されたものであることによる。すなわち、この早期の肌離れは定着体の水平荷重による載荷面の局所的な変形によるものと考えられる。

また、高荷重時でも変位の反転が生じており、反転荷重は支圧荷重 $P = 600\text{kN}$ のほうが $P = 400\text{kN}$ よりも小さい。この傾向は供試体 C B L においてもみられるが、本例ほどは顕著ではなかった。

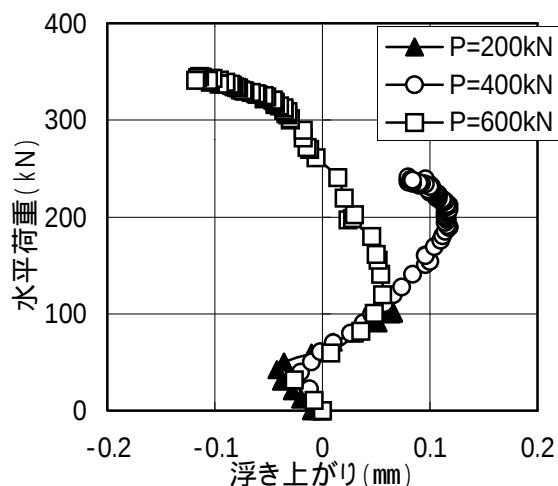
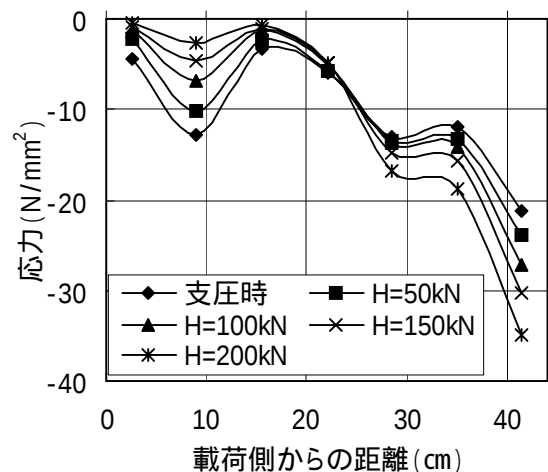


図 - 3 水平荷重-鉛直変位曲線(CBS)

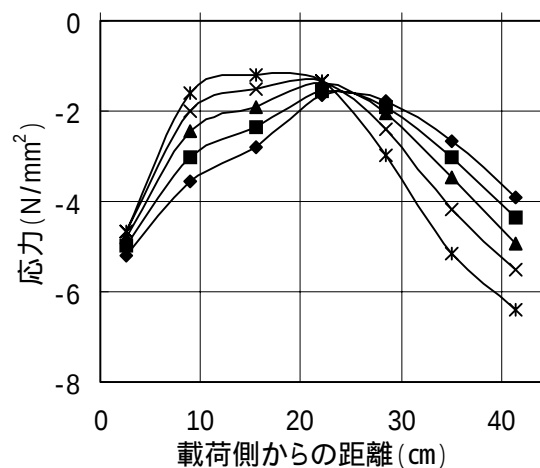
3.3 鉛直方向応力

ここでは、支圧力や水平荷重に対して発生した鉛直方向応力について考察する。図-4は支圧力 $P = 400\text{kN}$ のもので、(a)は高さ5cm、(b)は高さ20cm(高さ中央)での鉛直方向応力の分布を示したものである。

締付けによる応力についてみると、高さ5cmでの応力は締付け力が対称に作用しているにも関わらず、非対称となっている。これは先述



(a) 高さ 5cm



(b) 高さ 20cm

図 - 4 鉛直方向応力
(CBS: $P=400\text{kN}$)

したように、接合面が空目地のための接合面不陸によるもので、その調整は困難であった。一方、接合面での不陸の影響が緩和される高さ20cmの応力においても、対称締め付けにより、分布はほぼ対称となるものの様ではなく、端部が大きくなっている。

水平荷重が作用すると、いずれの場合においても曲げモーメントの作用により、載荷側の応力は低減し、非載荷側が増大する傾向にあるが、載荷側に最も近い点の応力だけはほとんど変化していない。これは節3.1および節3.2で述べたように、載荷側端部は低荷重時から肌離れが生じているためである。

次に接合面の水平荷重によるモーメントの影響について考察するために、図-4(a)に示す接合面から5cmの高さの鉛直応力から、支圧

力によって生じた鉛直応力を差し引いた結果を図 - 5 に示す。図から明らかなように、水平荷重の偏心によって接合面に生じる曲げモーメントにより、材軸方向のほぼ中央線上を 0 とする曲げ応力の発生が確認できる。しかしながら、低荷重時から荷重側端部の接合面に肌離れがあるため、水平荷重が増大しても荷重側端部の応力はほとんど増加することはない、荷重側端部から内側の締め付け位置に正值の応力ピークが生じる結果となっている。肌離れによって、両端が最大となる通常の曲げ応力分布とは異なるものとなるが、水平荷重の増加による中立軸位置に変化はない。このことから、肌離れ後の曲げに対する断面 2 次モーメントの計算では、図心軸は全接合面の中央とするが、有効断面は肌離れ域を除く、荷重側締め付け位置から非荷重側端部までの接合面とすべきであると考えられる。この考え方の妥当性については今後の実験や解析で説明していく予定である。

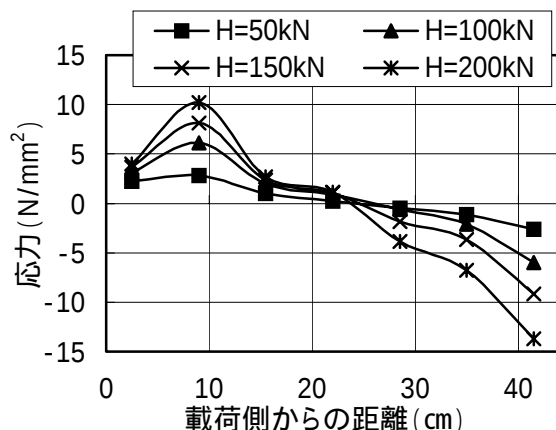


図 - 5 水平荷重による鉛直応力 (CBS:P=400kN)

3.4 材軸方向応力

図 - 6 は水平荷重が作用する方向の水平応力分布を示したもので、接合面から 1cm の高さのものである。材軸方向応力は、支圧時にはおよそ中央点に正負対称に分布するが、水平荷重の増加に伴って非荷重側に圧縮応力が增大している。これは水平荷重による接合面のずれによって生じるものであるが、測定点が少ないために、材軸方向応力からずれ応力を換算しても

あまり意味がない。しかしながら、各点の応力の差についてみると、水平荷重 $H = 100\text{kN}$ までは応力の傾斜は荷重側の半分が大きく、終局時には非荷重側も大きくなっている。このことは水平荷重による接合面のずれ抵抗が低荷重時には荷重側で、終局時近傍では全域に亘ることを示すものである。

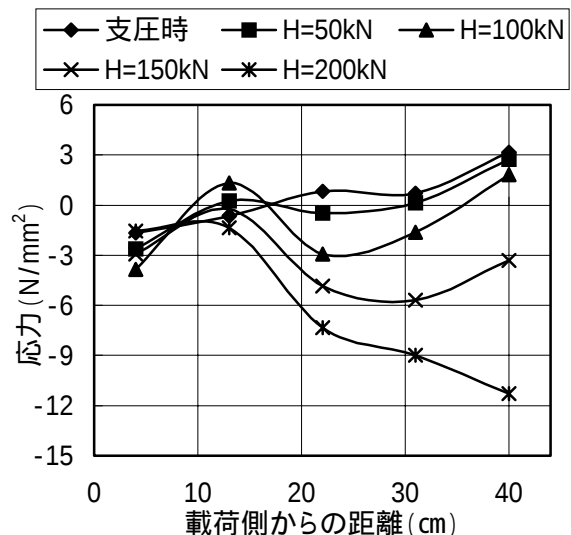


図 - 6 材軸方向の応力分布 (CBS:P=400kN)

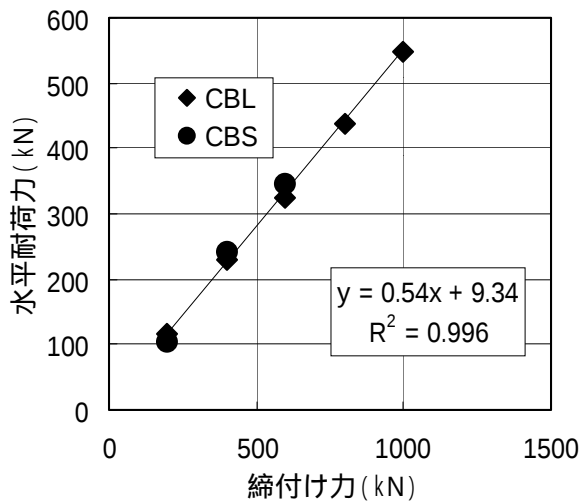
3.5 摩擦係数

図 - 7 は支圧力に対する終局水平荷重および摩擦係数について整理したものである。

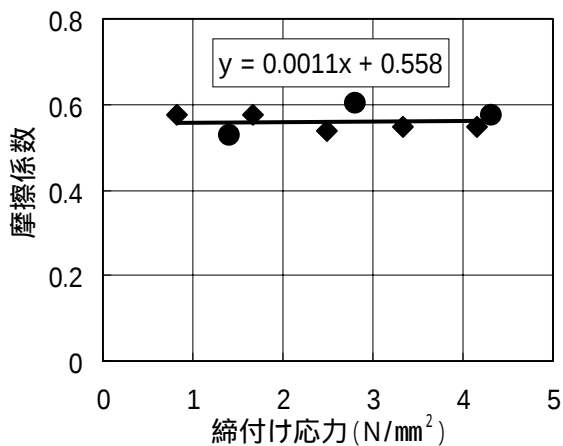
図 - 7 (a) は今回実験を行った全供試体について示したもので、図中の実線は線形回帰した結果である。

実験結果についてみると、いずれの供試体も支圧力に対する水平耐力はほぼ同じで供試体のサイズや締め付け幅による差異はみられず、支圧力に対する水平耐力の変化はほぼ直線となっていることが判る。そこで、図にあるような線形回帰を行ったところ、相関の高い近似式を得ることができた。回帰式から、付着力は 9.34kN で小さい値となることが判る。この値を接合面の面積で除した応力に換算すると、 $0.04 \sim 0.07\text{N/mm}^2$ となる。ここでの供試体は空目地であったため、付着力はほとんど期待できない。

図 - 7 (b) は、設計での照査式である式(1)に示されるような付着力を表現しない式での摩



(a) $H_u = c + \beta P$



(b) $\tau_u = \mu \sigma_{ave}$

図-7 摩擦係数

摩擦係数 μ に整理し直したものである。図から明らかなように、図-7(a)の傾きとは若干の差異はあるが、付着力が微小なことから、摩擦係数はほぼ一定の 0.56 程度となることが判る。すなわち、空目地の場合でも設計仕様での 0.5 は満足する。

4. あとがき

本論文は、既設 RC 橋の補強工法の 1 つである外ケーブル方式の定着体のすべり挙動を検討する目的で、基礎的な実験として RC ブラケットと RC 腹板を無処理とした供試体による実験を実施した。ここで得られた結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 定着体の接合面を無処理とした場合、摩擦係数は約 0.56 となり、設計仕様の最低値は満足するが、付着力は期待できない。

- (2) 支圧力が作用する定着体の載荷側肌離れについての照査は特に必要はない。
- (3) 肌離れが生じて、水平荷重の偏心によって生じる接合面の曲げ応力の中立軸位置は変化しない。

参考文献

- 1) 例えば、永井淳一ほか：曽根高架橋ほか 2 橋の橋梁補強工事，プレストレストコンクリート，Vol.37，No.6，pp.42 - 51，1995.11
- 2) プレストレストコンクリート建設業協会：外ケーブル方式によるコンクリート橋の補強マニュアル，1998
- 3) プレストレストコンクリート建設業協会：PC 橋の落橋防止構造設計資料(案)，p.4，1996
- 4) 関口富夫：中空 PC 鋼棒を用いた外ケーブル定着体の耐力確認実験，プレストレストコンクリート技術協会第 5 回シンポジウム論文集，pp.373 - 376，1995.10
- 5) 大西昭徳ほか：プレキャスト鉄筋コンクリート部材接合面におけるせん断伝達機構に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.2，pp.1151 - 1156，1996.6
- 6) 小山内裕ほか：プレキャスト部材圧着接合部せん断滑り挙動に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.1191 - 1196，1997.6
- 7) 鄭慶玉ほか：外ケーブル定着体の有限要素法解析による設計法考察，プレストレストコンクリート技術協会第 7 回シンポジウム論文集，pp.387 - 392，1997.10
- 8) 枝元宏彰ほか：コンクリート腹板に摩擦接合された外ケーブル用コンクリートアンカーブロックのすべり挙動について，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.1，pp.541 - 546，2000.6
- 9) 高速道路調査会：仮設 PC 鋼材設計・施工マニュアル，pp.30 - 35，1997.7