

樹脂被覆 PC 鋼より線の曲げ配置部におけるフレットング疲労特性 及び三次元 FEM 接触解析

Fretting fatigue characteristics and 3D FEM contact analysis in the curved layout of
prestressing strands covering with resin

松田 浩^{*1}・出水 享^{*2}・古賀 掲維^{*3}・千桐 一芳^{*4}・田口 保男^{*5}・上阪 康雄^{*6}

Hiroshi Matsuda, Akira Demizu, Aoi Koga, Kazuyoshi Chikiri, Yasuo Taguchi, Yasuo Kousaka

^{*1}正会員 工博 長崎大学 工学部 構造工学科 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*2}学生会員 長崎大学大学院 生産科学研究科 環境システム工学専攻 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*3}正会員 長崎大学 教育機能開発センター (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*4}非会員 ヒエン電工(株) (〒 620-0853 京都府福地山市長田野町 1-14)

^{*5}非会員 タイムスエンジニアリング(株) (〒 101-0025 東京都千代田区神田佐久間町 3-24)

^{*6}正会員 コサカ設計・アソシエーツ (〒 141-0031 東京都品川区西五反田 2-11-15)

Fretting fatigue test of prestressing strands 19S15.2 covering with resin in the curved layout at external tendons of prestressed concrete bridge was carried out. It was shown from the test result that a cable covering with resin was effective in suppressing fretting fatigue. Furthermore, three dimensional FE analysis were performed when prestressing and load carrying. From the FE results, we show that displacement, contact and stress state of the prestressing strands were simulated.

Key Words : fretting, fatigue test, prestressing strand, 3D FEM, contact analysis

1. はじめに

エクストラドーズド橋などの新形式橋梁や劣化した PC 橋梁の補強工法に、外ケーブルが使用される場合が多い。その外ケーブルは PC 鋼より線を熱硬化性樹脂(エポキシ系など)、あるいは熱可塑性樹脂(ポリエステル系など)で被覆したものが主として用いられている。

熱硬化性樹脂の一つであるエポキシ樹脂で被覆された PC 鋼より線は、樹脂硬度、曲げ剛性は大きい、じん性に欠けるため、衝撃や曲げによる割れが発生しやすい。また、薄膜ではピンホールが発生しやすく、紫外線に弱いという欠点がある。

一方、ポリエステル系硬質樹脂は、じん性に富み、衝撃試験を行っても樹脂にひび割れは発生しない。また、弾力性があるのでコイル巻が容易であり、樹脂被覆時は流動性がよく薄膜でもピンホールは発生せず、紫外線にも強いという特長を有する。

PC 鋼より線をポリエステル硬化樹脂で被覆し、同時に内部空隙を高密度ポリエチレン系特殊樹脂で充填した高耐久性 PC 鋼より線についての機械的特性、定着性能、水密性、樹脂間の接着性、耐食性、コンクリートとの付着性能などは十分に検討され、その高耐久性性能が実証されており、実用化されつつある¹⁾。

外ケーブル偏向部は、長期間に亘り動的な腹圧力を受けるため、相互に接触する PC 鋼より線のフレットング疲労が問題となり、樹脂被覆された PC 鋼より線は耐

久性の観点からフレットング疲労性能が重要となる。

既往の外ケーブルのフレットング疲労強度に関する研究は、PC 鋼より線が保護管で覆われグラウトで充填された PC 鋼より線の場合で行われている例が多く、アンボンドマルチケーブルで行われた例は少ない。新井ら²⁾は、大容量 PC 鋼より線の曲げ配置部におけるフレットング疲労特性を明らかにするために、疲労試験を実施し、裸 PC 鋼より線は硬い鋼線同士の擦れのため疲労の進行が早く、300 万回に達するまでに断線し、一方、エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線は健全であったと報告している。篠崎らは、新しい偏向部構造を開発するとともに、アンボンドマルチケーブルの疲労強度特性について検討しているとともに、偏向部構造の三次元 FEM 解析を実施している³⁾。

本研究では、高耐久ポリエステル硬化樹脂で被覆した PC 鋼より線の表面被覆部の摩耗試験と、これらの被覆 PC 鋼より線を用いたケーブルの 300 万回の繰返し試験を実施し、外ケーブル偏向部の接触損傷を確認するとともに、プレストレス導入時および載荷時における PC ケーブルの移動、接触、応力状態を有限要素解析により解析的にシミュレートを試みたものである。

2. 摩耗試験

試験片の仕様と断面図を表-1、図-1に示す。試験は JIS C3005,3027 摩耗試験に準じ、回転砥石に試験片

の一端を固定し、回転円盤に接触した先端に錘2.5kgを取り付け、60rpmで20分間(1200回)回転させた(図-2)。試験後、樹脂の摩耗程度を目視観察した。図-3、表-2に試験結果を示す。摩耗試験より、高耐久ポリエステル系樹脂は、摩耗に極めて強いことが立証された。

表-1 試験片仕様

記号	PC鋼より線	充填材	被覆材	被覆厚
SB	7本より	ポリエチレン系樹脂		400μm
NB	SWPR7BN	ポリエチレン系樹脂	ポリエステル系樹脂	400μm
NM	φ15.2	ポリエチレン系樹脂	ポリエステル系樹脂	400μm

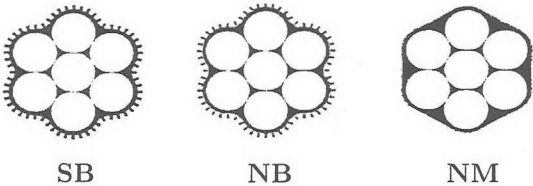


図-1 試験片断面図

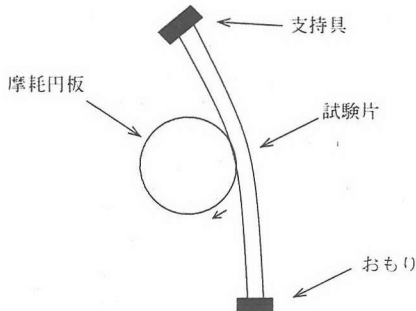


図-2 試験装置

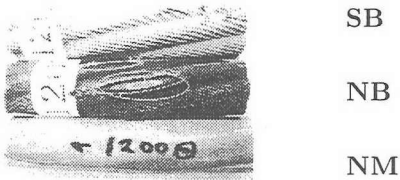


図-3 摩耗試験結果

表-2 試験結果

試験品の種類	摩耗状態
SB	被覆材は全て削られ、ワイヤまで削れている。
NB	リブが削れている(被覆材は削れていない)。
NM	被覆材の一部が少し削れている。

3. フレッシング疲労試験

3.1 試験概要

PC鋼より線をアンボンドマルチケーブルとして使用する場合、外側が比較的柔らかな樹脂で被覆されているため緊張時にデビエータ部における被覆部の損傷が懸念されるとともに、その被覆表面のフレッシング疲労性状が耐久性上重要となる。

表-3にPC鋼より線の引張試験結果、図-4、5にPC鋼より線断面図、ケーブル断面図を示す。ケーブルの規格破断荷重は261×19=4959kNである。また、試験装置の概略図を図-6に示す。偏向部は鋳鋼鉄製(高

さ250×幅330×長さ2020mm)、ケーブル保護管は高密度PE管(外径118mm、厚さ5.5mm)、偏向角度(左右7°計14°)、曲げ半径3000mmである。定着体システムは、緊張端・固定端ともにフレシネー外ケーブルシステムを用いた。ケーブルの緊張は偏向配線の状態で行った。緊張荷重はセットロスによる荷重減少を考慮して0.6P_uとした。

フレッシング疲労試験では、硬質NM型PC鋼より線(図-4)を用いた19S15.2ケーブル(図-5)の300万回繰返し载荷試験を行い、偏向部の被覆樹脂の接触損傷状況やPC鋼より線が破断した場合には破断部の状況を確認するのを目的とした。試験条件を表-3に示す。また疲労試験後、被覆材の損傷箇所から錆の発生を確認するために、1000時間の塩水噴霧試験を行った。

3.2 試験結果および考察

試験結果を表-5に示す。PC鋼材19本の被覆部外傷の有無について目視で確認した。被覆性能には影響のないと判断される若干数の樹脂表面の微小な擦れと大きな窪み、ならびに被覆性能には全く影響のない小さな窪みが観察されたものの、最も厳しい条件の東・西のサドル部直下のデビエータ部との接触部を含めて、PC鋼材に達する傷、剥がれ、及び大きな擦れは生じなかった(図-7)。また、素線破断は認められず、PC鋼材は19本とも健全であった。PC鋼より線の内、定着部、デビエータ部および中間部からサンプルを2本ずつ取り出し、引張試験を行ったが、降伏強度、引張強度ともに試験前後でほぼ同じであった。さらに、定着部は、外層被膜を除去しクサビはPC鋼材に直接食い込む方法を採用したが、両端固定のフレシネ定着具は300万回疲労試験においても素線およびPC鋼より線の切断はなかった。

1. はじめに述べたように、裸PC鋼より線は硬い鋼線同士の擦れのため疲労の進行が早く、繰返し载荷回数の300万回の载荷条件に達するまでに断線(約120万回)し、一方、エポキシ樹脂被覆PC鋼より線は健全であったと報告されている²⁾が、本試験でもフレッシング疲労に対して被覆材の効果があることが窺える。本試験で使用した硬質型樹脂は、鋼材に比べれば柔らかく、フレッシング疲労には樹脂が鋼線間の緩衝材として有効に作用したものと考えられる。さらに、形状が円形のため、接触圧が均等に分散しやすく、また内層が比較的柔らかな高密度ポリエチレン系特殊樹脂、外層が比較的硬い耐久性ポリエステル系硬質樹脂を使用した2層構造となっているので、フレッシングに対して、内層が緩衝材の役割を果たしたものと考えられる。

被覆材表面の損傷部分から錆の発生を確認するため、1000時間塩水噴霧試験を引き続き実施したが錆の発生は見られず、窪み部分から塩水が金属表面にまで達していないことも確認された。緩衝材だけでなく被覆材としても有効であることが確認された。

表-3 PC鋼より線の引張試験結果

記号	標準径	降伏荷重 (kN)	引張荷重 (kN)	伸び (%)
NM	φ15.2	222	261	3.5

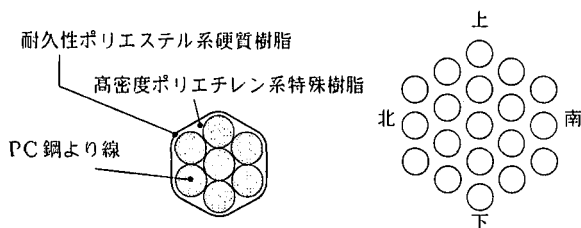


図-4 PC鋼材断面図

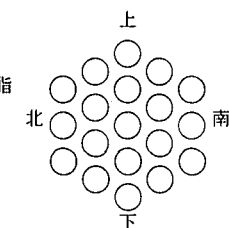
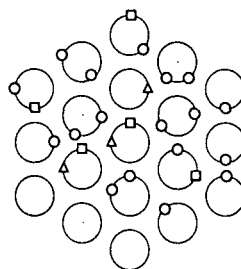


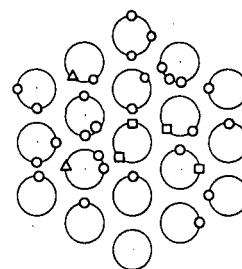
図-5 ケーブル断面図

表-5 試験結果

上限変位	下限変位	最終繰返し数	破断状況
0.06 ~ -0.03	-8.75 ~ -8.81 mm	3002400 回	破断なし



(a) 東側



(b) 西側

× : 大きな擦れ □ : 小さな擦れ
△ : 大きな窪み ○ : 大きな窪み

図-7 サドル部直下の被覆損傷状況

表-4 試験条件

項目	荷重	応力
上限荷重	3105 kN	1178 N/mm ²
下限荷重	2975.4kN (0.6P _u)	1129 N/mm ²
振幅荷重	129.2 kN	49 N/mm ²
繰返し周波数	1.5 Hz	-
偏向部鉛直変位量	8.8 mm	-

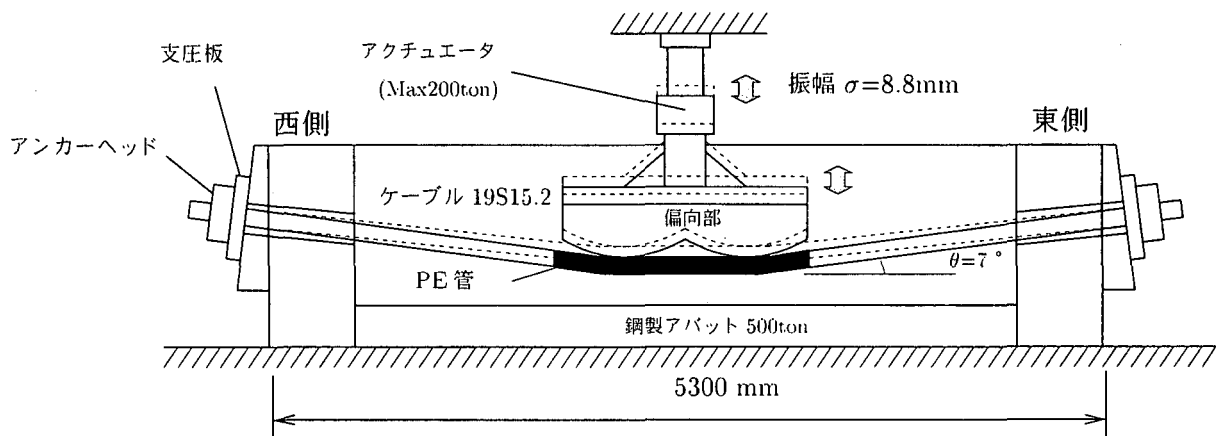


図-6 試験装置概略図

4. 三次元 FEM 解析

4.1 解析概要

PC鋼より線のフレットング疲労耐久性性能についての研究は専ら疲労試験によって行われている。疲労試験は大がかりな試験となり、多額の試験費用がかかるとともに、試験期間も長期にわたるため、多くのパラメータによる試験は困難である。

一方、コンピュータハードウェアの高性能化・大容量化と解析ソフトウェアの汎用非線形 FEM 解析プログラムの低価格化が格段に進行した今日においては、大規模計算力学⁴⁾による物理現象のみならず社会システムのシミュレーション⁵⁾も行われるようになってきた。三次元 FEM 解析も例外でなく、要素間の接触を考慮した三次元非線形解析も可能となってきた。

新井ら²⁾による研究によると、PC鋼より線相互の点接触による高支圧環境と、応力振幅に伴う微小な相対滑りの生じる環境が相まったフレットングによる疲労

損傷が生じ、それが主原因となって PC鋼より線の素線が破断に至り、その素線の破断起点は PC鋼より線相互のフレットングによって発生したものがほとんどであったと報告されている。また、保護管内の PC鋼より線の配置がデビエータ側に偏在するとともに、PC鋼より線相互の接触部も場所的に不均一な状態となることが示されている。

さらに、フレットングを伴った場合の疲労強度は、フレットングの発生を無視される環境の疲労強度より低く、保護管内にグラウトを充填した場合やエポキシ樹脂塗装 PC鋼より線は、裸 PC鋼線に比較して耐フレットング疲労特性が優れることが言及されている。本試験でもデビエータ直下の被覆面は、不均一な損傷状況となっていることが確認された。

以上に鑑み、本研究では本試験での PCケーブルのプレストレス導入及び荷重載荷に伴う、PC鋼より線の移動や PC鋼より線同士の接触、応力状況などを調べることを目的として三次元 FEM 解析を試みた。

4.2 解析モデル

三次元非線形 FEM 解析を行うために、PC 鋼材、PE 保護管、偏向部を 8 節点ソリッド要素でモデル化した。本解析では、試験機及び試験体が左右対称より解析対称を 1/2 モデルとした。なお、要素の分割においては、要素のアスペクト比が大きくなる要素については、assumed strain method を使用し、shear locking の発生を防ぐようにした。

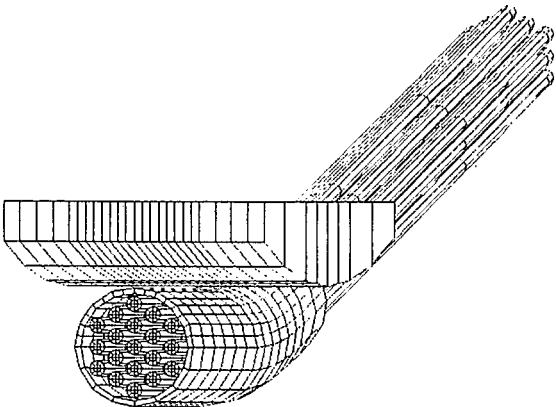
荷重載荷は、変位制御型の単調増分を用いて、PC 鋼材に $0.6P_u$ (約 2900kN) のプレストレスを導入したのち、PC 鋼材に偏向部から 8.8mm の変位荷重を載荷した。接触に関しては自動接触機能を使用した。自動接触解析機能については次節で説明する。

はじめに鋼材同士、鋼材と PE 管、偏向部と PE 管の摩擦を無視して解析を行った。材料特性については、偏向部の弾性係数は、十分剛なものとし $20 \times 10^5 \text{MPa}$ PE 管は、3000MPa、PC 鋼材の弾性係数は、引張試験から得られたもの $1.98 \times 10^5 \text{MPa}$ (19S15.2)、 $1.96 \times 10^5 \text{MPa}$ (3S28.6) とした。図-8、9、表-6 に PC 鋼より線と全体の解析モデルのメッシュ分割図、メッシュ分割詳細を示す。図-4 と図-8(a) の形状が多少異なるのは、計算コストを減少させるため安定したメッシュ分割を行ったためである。3S28.6 の鋼材の断面図は、5 節に載せているため省略する。

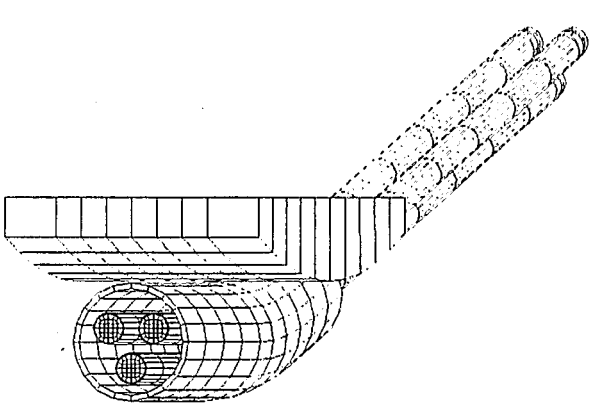
なお、3S28.6 については、外ケーブル、斜材など多本数長尺の場合、もつれ・整線など線材数が減少すれば、設計・施工の合理化が可能となるので、より線の直径を大きくし、PC 鋼より線の本数を減らした場合を想定したもので、3S28.6 の場合について同様の解析を行った。

表-6 メッシュ分割詳細

種類	19S15.2	3S28.6
偏向部	192 要素	80 要素
PE 保護管	336 要素	200 要素
PC 鋼材	$132 \times 19 = 2508$ 要素	$928 \times 3 = 2784$ 要素



(a) 19S15.2



(b) 3S28.6

図-9 メッシュ分割 (1/2 モデル)

4.3 解析結果および考察

図-11、12 の (a),(b) は、19S15.2、3S28.6 モデルの全体図、中央部を表しており、(c) は、PE 管内部の PC 鋼材の応力状態を確認するため、PE 管、偏向部を取り除いて表示したものである。図からプレストレスを導入し荷重載荷が進行するにつれて (a) ~ (c) とともに PE 管内部の鋼材の移動、接触、応力状態が表示されている。なお解析結果のコンター図は、Equivalent Von Mises Stress を表しており、解析結果を比較、検討しやすくするために両モデルとも応力の範囲を 0 ~ 1300 MPa を 20 分割した色で表した。

図-10 は、文献 6) にある緊張時のケーブル断面状況模式図を示しており、本解析の挙動も同様の断面状況になっておりよくシミュレートされているのが分かる。

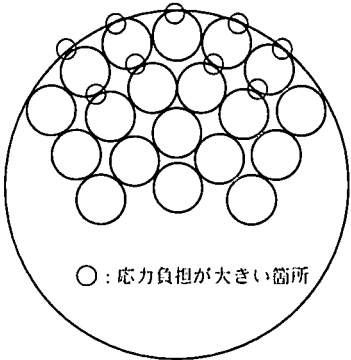
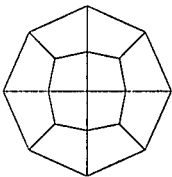
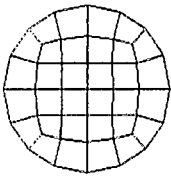


図-10 模式図⁶⁾

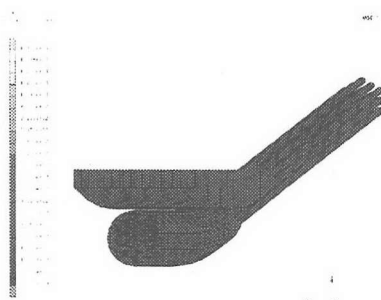


(a) 15.2 mm

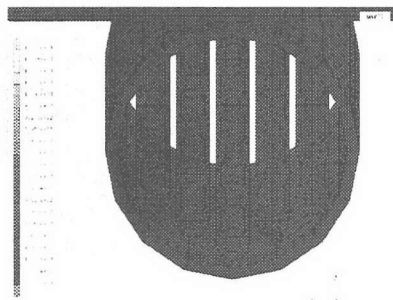


(b) 28.6 mm

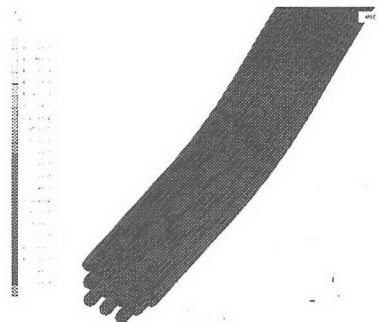
図-8 PC 鋼材のメッシュ分割 (断面)



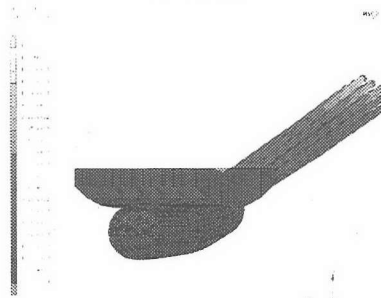
初期状態



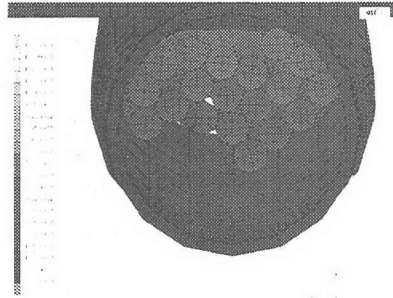
初期状態



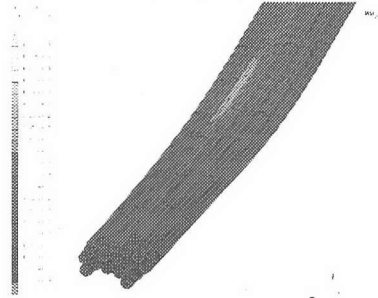
初期状態



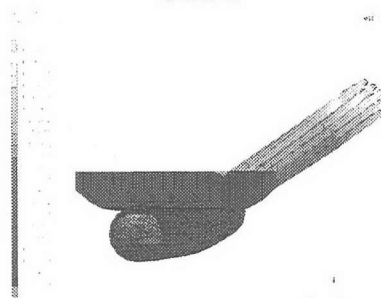
0.3Pu



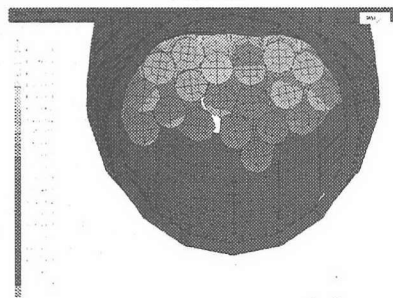
0.3Pu



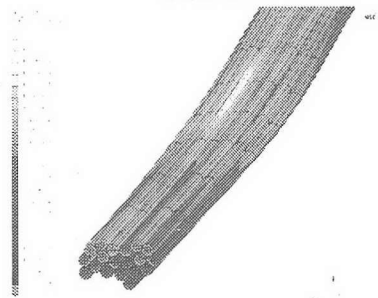
0.3Pu



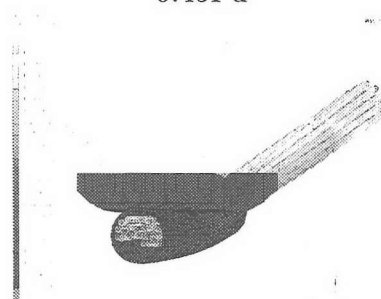
0.45Pu



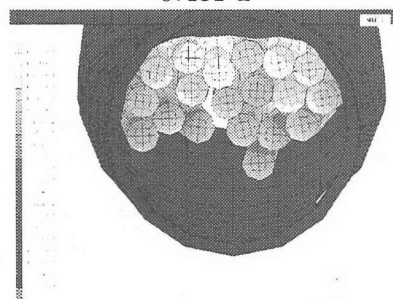
0.45Pu



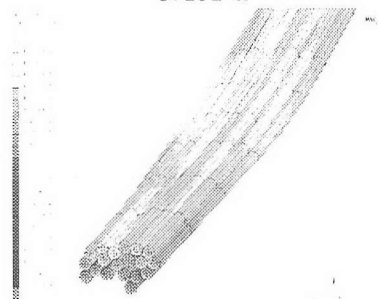
0.45Pu



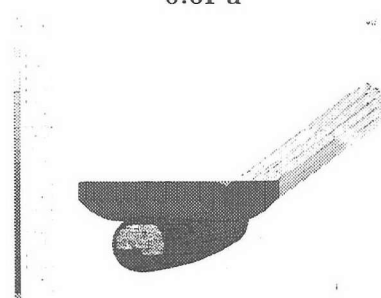
0.6Pu



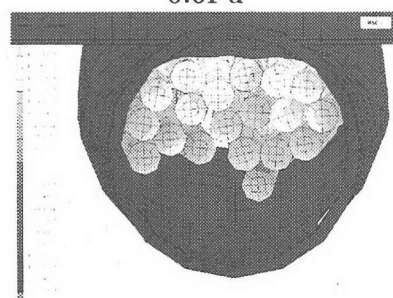
0.6Pu



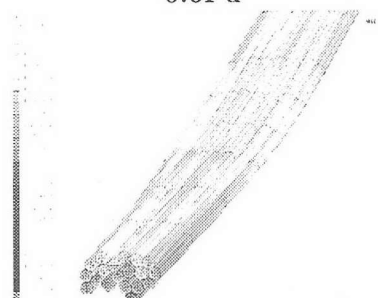
0.6Pu



8.8mm 載荷



8.8mm 載荷



8.8mm 載荷

(a) 全体図

(b) 中央部

(c) 鋼材のみ

図-11 19S15.2(応力)

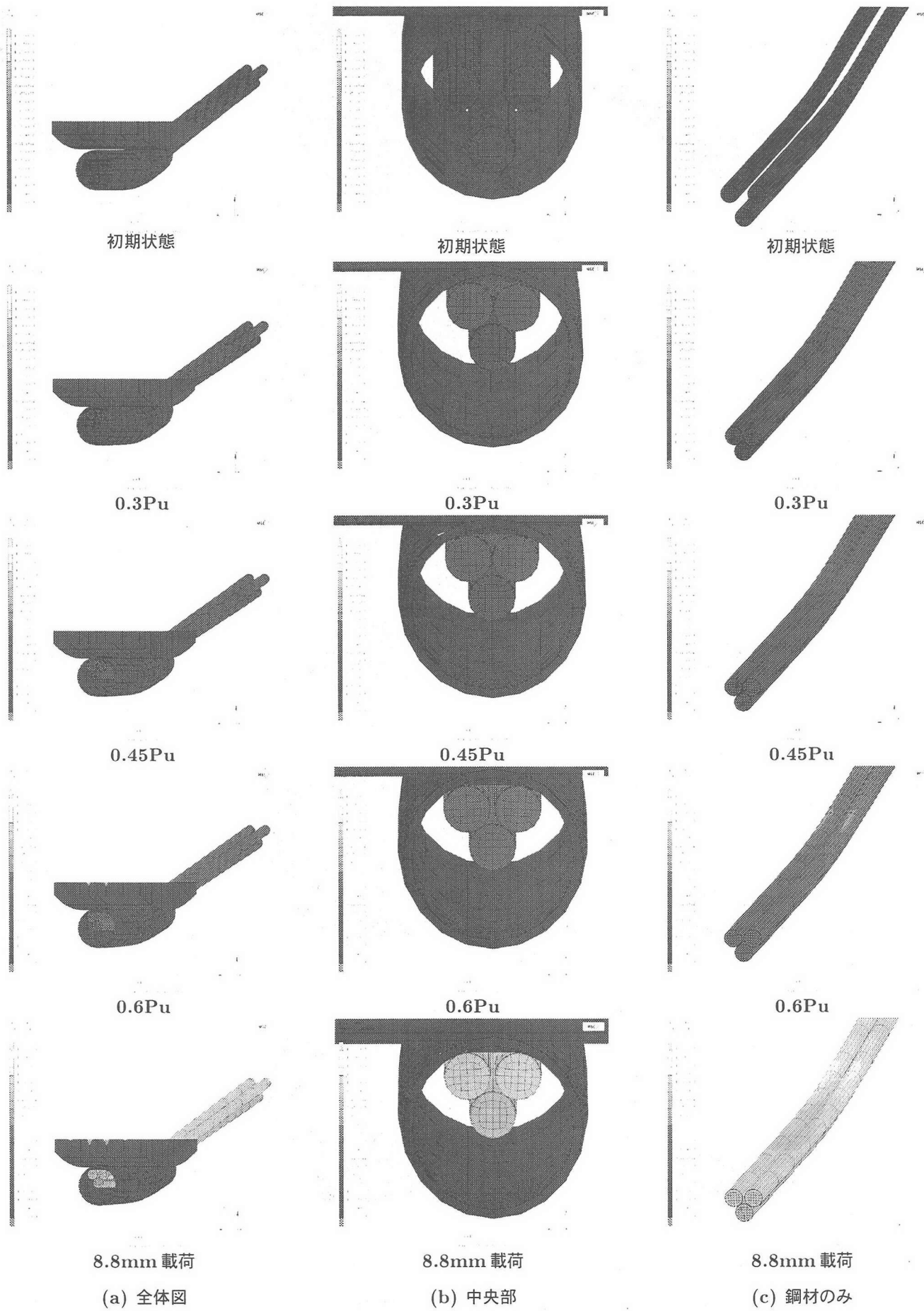


図 -12 3S28.6(応力)

5. 摩擦を考慮した解析 (3S28.6)

5.1 解析概要

PC 鋼材の表面は被覆材で覆われ、被覆材同士に摩擦が生じている。よって、より厳密な移動、応力、接触状態を解明するために被覆材のモデル化や被覆材同士の摩擦を考慮して解析を行った。ただし今回は、3S28.6モデルを使用して被覆材、摩擦の有無がどのように影響するかを解析的に検討した。

前節と同様に PC 鋼材、PE 保護管、偏向部、被覆材を 8 節点ソリッド要素でモデル化した。接触に関しては自動接触解析機能を使用した。摩擦についてはクーロン摩擦を用い、被覆材同士の摩擦係数は、道路橋示方書⁷⁾に記載されている値 0.3 を使用した。材料特性については、PC 鋼材、PE 保護管、偏向部は前節と同様の弾性係数を使用し、被覆材については、一般のエポキシ樹脂の弾性係数 2500MPa を使用した。図 -13 に使用した 3S28.6 の PC 鋼材の断面図と被覆材をモデル化したメッシュ分割図(断面)を示す。ただし、PE 保護管・偏向部のメッシュ分割は、図 -9 と同様のため省略する。表 -7 にメッシュ分割詳細を示す。

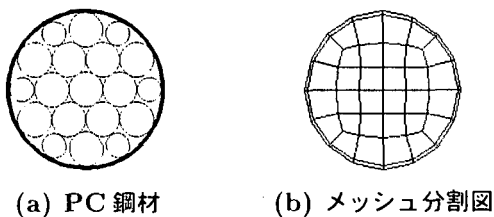


図 -13 28.6mm(断面)

表 -7 メッシュ分割詳細

種類	3S28.6
偏向部	80 要素
PE 保護管	200 要素
被覆材	288 × 3 = 864 要素
PC 鋼材	928 × 3 = 2784 要素

5.2 接触解析

多くの物理問題のシミュレーションで接触現象のモデル化が必要になる場合が多い。たとえば、嵌め合い、ゴムシール、タイヤ、衝突、また種々の製造プロセスなどの解析がある。接触挙動の解析は、複数の形状物体が動いて接触し、接触した後、これらの物体が相互作用によって動作する過程を正確に追跡する必要があるため、きわめて複雑になる。さらに、接触面間の摩擦の扱いも含まれ、またボディ間の熱伝導も連成して扱う場合が多い。接触問題における数値計算は、ボディの動作を判定し、貫通しないように拘束を与え、適切な境界条件を与えて、摩擦挙動や、熱伝導問題をシミュレートすること

である。これらの問題を解析するために、ラグランジェの未定係数法、ペナルティ法、直接拘束法などを用いる解析手法が開発されている。

(1) 自動接触解析機能

自動接触解析機能⁸⁾により接触同士間に生じる接触問題を自動的に解くことができる。接触点に特別な要素を設ける必要はなく、この接触のアルゴリズムは接触状態の検知、貫通が生じないような適切な拘束および接触面における変位の適合性の維持を自動的に処理してくれる。接触の拘束方法として、本解析では、片面接触検知機能を使用している。変形体の節点が、別の変形体に接触するとき、多点拘束(タイイング)が自動設定される。相手の変形体外表面が分っているから、これで拘束方程式が、形成される。拘束方程式は、現在の摩擦条件式の下で、接触節点相手のセグメント上に必ず乗るようにできる。自動接触解析機能のアルゴリズムには、直接拘束法が組み込まれており、ラグランジェの未定係数法ほどの厳密性はないが、接触条件の設定の容易性、接触方向の変化に対する柔軟性を持っている。解析プログラムではボディ間に発生する摩擦は、境界面に分布荷重を与えることによりモデル化している。今回接触の際に使用したクーロン摩擦では、摩擦力が法線方向反力に依存し、式 (1) のように定義されている。

$$F_t < -\mu F_n t \quad (t = V_r / |V_r|) \tag{1}$$

F_t : 摩擦力、 F_n : 法線方向反力、 μ : 摩擦係数、 t : 接線方向単位ベクトル (滑り方向)、 V_r : 相対滑り速度

(2) 接触判定距離

接触判定は、節点と他のボディの外表面を構成する物体との距離に基づいて行われるがその距離は、丸め誤差を含んだ計算値であるのでなんらかのしきい値が必要となる。そのしきい値を接触判定距離と呼ぶ。このしきい値は、ユーザーの指定値、またはプログラムが FEM から計算した値が用いられる。プログラムの計算方法は、連続体要素の場合は、最小要素の 1/20 となる。本解析のしきい値は、この値を使用している。一般にこのしきい値は、解析するモデルに比べて十分に小さくすることが望ましい。実際には、変形体のセグメントをはさんで両サイドに接触判定距離ゾーンに節点が存在するときその節点は接触しているとみなされる。従って、変形体内部の接触判定の距離分だけは食いこみが許されることになる (図 -14 参照)。

本解析の接触判定のアルゴリズムには、ボックス法が、組みこまれており、そのアルゴリズムを使用することにより、節点が、相手のセグメントにどこまで近接しているかを迅速に判定することができる。接触判定過程では、数値計算における丸め誤差もあるから、節点とボディ表面がちょうど接触した瞬間を厳密に判定することは、困難である。そこで、各ボディ表面に対して、接触判定許容値を設定して接触の判定を行う。

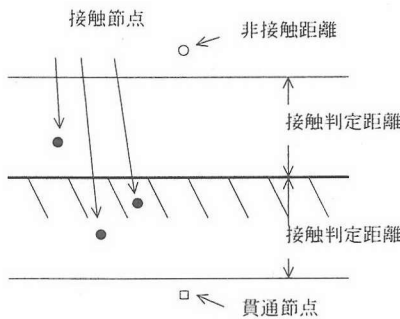


図-14 接触判定

(3) バイアス係数

接触判定許容値の大きさは、計算コストと解の精度に直接響いてくる。接触判定許容値をあまり小さくすると、接触の判定が計算上むずかしくなり、それだけ計算コストも増大する結果になる。また同じ許容値に対して、多くの節点が同時に貫通していると判定される場合も考えられ、その対策としてインクリメントの再分割を行うことにより、さらに計算コストが増大する。

反対に、接触判定許容値が大きすぎると、節点位置は、すぐその範囲に入り、以降その接触状態が、ずっと維持されることになり、計算精度の低下を招く。さらに、節点が表面から深く貫通していることもある。

これらの両端面に対する実用的な妥協策として、判定許容値を、接触表面の外側に小さく、内側に大きくなるように振り分ける。(図-15 参照) この振り分けは、バイアス係数を指定して行う。バイアス係数は、0.0 から1.0 の間で選定する。この振り分けによって、精度を向上させつつ、妥当な計算コストに抑えることが可能になる。接触判定を伴う解析では、接触節点側にバイアスさせれば、収束が容易になる。本解析では、バイアス係数を0.95としている。

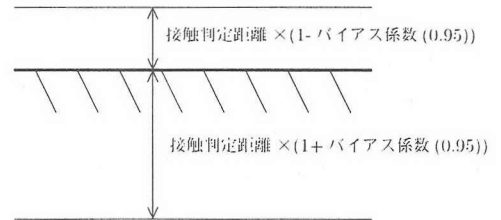


図-15 バイアス係数

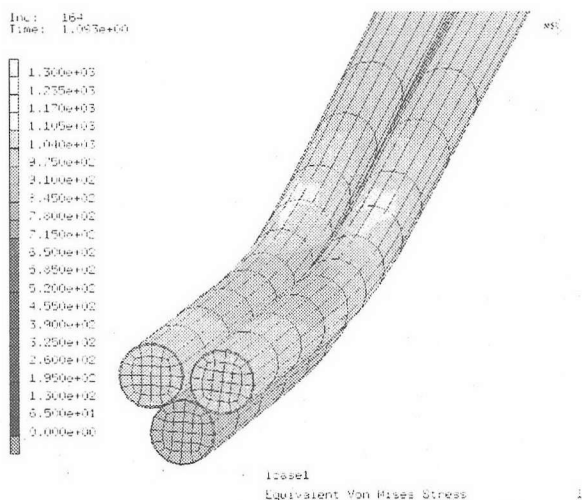
5.3 解析結果および考察

図-16, 17, 18 に被覆材と摩擦の有無についての解析結果を示したものである。図-18 は、サドル部直下の断面図を示している。

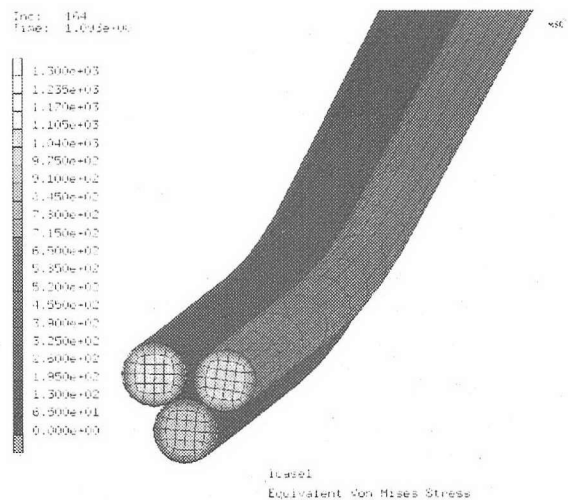
図は、PE 管内部の PC 鋼材の応力状態を確認するために PE 保護管と偏向部を取り除いて表示したものである。図-16 に関しては、被覆材内部の鋼材の応力を検討するため、右上の鋼材のみは、被覆材を取り除いて表示させている。なお解析結果のコンター図は、図-11, 12 と同様に、Equivalent Von Mises Stress を表しており、解析結果を比較、検討しやすくするために応力の範囲を0～1500MPa, 700～1600Mpaを20分割した色で表した。

図から、被覆材のモデル化により、被覆材が緩衝材の働きをし、応力が緩和され PC 鋼材が保護されているのが分る。これは、文献2)の試験からも実証されていることより本解析の妥当性が示されると考えている。

図-17 より断面の平均の応力は、摩擦無し、有りのサドル部直下の応力がそれぞれ約1200Mpa, 約1600Mpaとなり、摩擦を考慮することにより、応力が増大したことが分る。また、本実験表-4の値に近いため、本解析の妥当性が示せたと考えている。

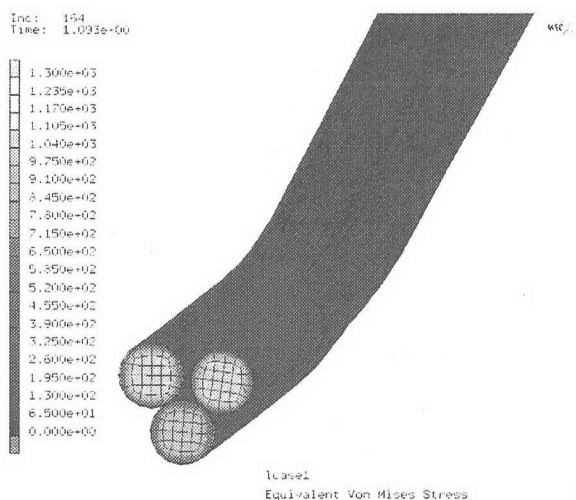


(a) 被覆材無し (8.8mm 载荷状態)

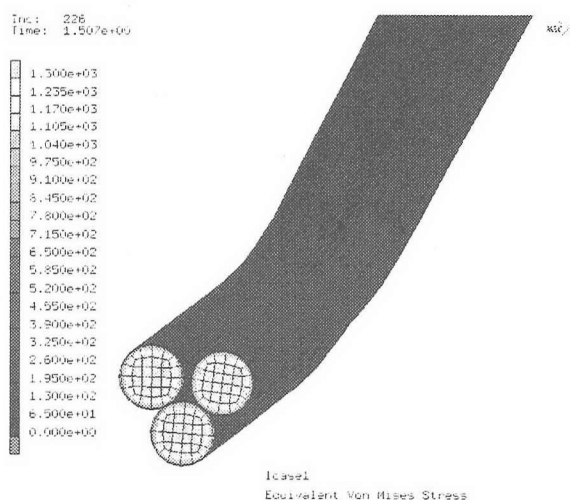


(b) 被覆材有り (8.8mm 载荷状態)

図-16 被覆材の有無

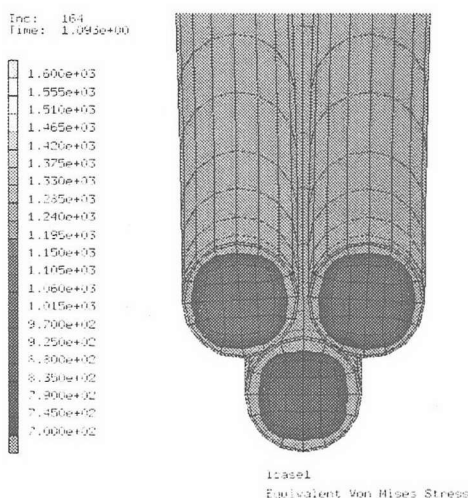


(a) 摩擦無し (8.8mm 載荷状態)

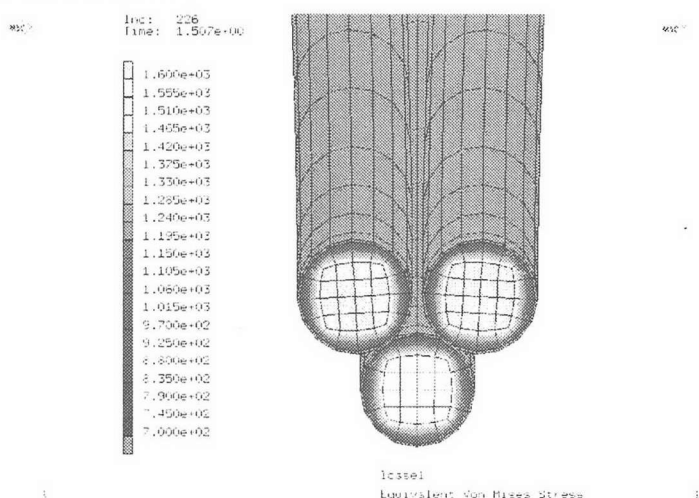


(b) 摩擦有り (8.8mm 載荷状態)

図-17 摩擦の有無



(a) 摩擦無し (8.8mm 載荷状態)



(b) 摩擦有り (8.8mm 載荷状態)

図-18 摩擦の有無 (サドル部直下)

6. まとめ

300 万回のフレットング疲労試験に対し、19 本束ねた PC 鋼より線のデビエータ部の樹脂は健全であり、外ケーブルとして極めて優れた製品である。このことは後に行われた塩水噴霧試験において発錆が見られなかった事からも証明されたと言える。

PC 鋼より線は、硬い鋼線同士の擦過による疲労の進行の為、300 万回に達するまでに破断する懸念があるが、一方樹脂被膜 PC 鋼より線は有効であると充分に予想される。硬質樹脂でも鋼材に比べれば十分軟らかいので、樹脂が鋼線間の緩衝材として有効に作用しフレットング疲労には有効であると考えられる。更に、今回の試験での局部荷重が無かった事からも、スープロ硬質丸味型は形状が円形のため接触圧が均等に分散し易い事が予想出来、また、スープロ硬質型は内層が比較的軟らかい低密度ポリエチレン特殊樹脂、外層が比較的硬い高

耐久ポリエステル硬質樹脂を使用した二層構造になっており、フレットングに対して内層が緩衝材の役割を果たし、動荷重の受け皿として荷重分散、衝撃分散など二層被覆樹脂鋼材の特徴が発揮された。

今回のような PC 外ケーブル偏向部のフレットング現象に関する研究は、試験を行うこととて明らかになっているが、解析においては、過去の文献をみてもほとんど例がなく、複雑な内部挙動や応力状態などが明らかにされていないのが現状である。本研究によりプレストレス導入時、荷重載荷時の PC 鋼材の移動、接触、応力状態のシミュレート解析への第 1 ステップとなったものと思う。PC 鋼材の材料、疲労特性を解析に取り入れることによって破断の予測も可能となる。本研究では、三次元接触 FEM 解析を行ったため計算コストが増大、メッシュ分割による解の収束が変化するという問題点が上げられる。

7. あとがき

九州共立大学の渡辺明先生には、本研究を遂行をするにあたり多くの助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。

なお、本試験で用いた熱可塑性樹脂で被覆したPC鋼より線は現在特許出願中である。(特許出願公開番号P2002-339279A, 出願人: 株式会社タイムスエンジニアリング)

参考文献

- 1) 上阪康雄: 補強材の防食について, コンクリート工学, Vol.40, No.5, pp.47-52, 2002
- 2) 新井英雄, 藤田学, 梅津健司, 鮎子多浩一, 上田多門: 大容量PC鋼より線の曲げ配置部におけるフレッティング疲労特性, 土木学会論文集, No.627/V-44, pp.205-222, 1999
- 3) 篠崎裕生, T.Aravinthan, 渡辺宗樹, 濱田譲: 大偏心外ケーブルトラス橋の偏向部材の疲労耐久性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.595-600, 2002
- 4) 矢川元基, 秋葉博: 大規模計算力学の現状と今後, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.1-15, 2000
- 5) 堀宗朗(主査): 応用力学の深淵, 土木学会誌, Vol.85, No.8, pp.5-63, 2000
- 6) 日本道路公団 監修(財) 高速道路技術センター: PC橋耐久向上に関する設計・施工マニュアル, 4-2P, 平成13年10月
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 共通編・コンクリート橋編, pp.27
- 8) 日本マーク株式会社: トピック別セミナー, CONTACT, pp.1-55

(2003年4月18日受付)