

論文 三次元非線形 FEM によるディビエータ部における PC 外ケーブルの接触解析

出水 享^{*1}・松田 浩^{*2}・田口 保男^{*3}・上阪 康雄^{*4}

要旨：PC 外ケーブルの偏向部においては、フレット疲労に対する検討が不可欠である。本論文ではフレット疲労試験を解析的にシミュレーションするための第一ステップとして、三次元非線形 FEM 接触解析により、プレストレス導入時及び荷重載荷時の静的なケーブルの移動や応力・ひずみ状態を解析するとともに、ケーブル本数や配置形状、ケーブル形状の平行とツイストの相違、ツイストケーブルのより間隔などを変化させたパラメトリックな解析を行い、PC 鋼より線の配置本数、配置形状などについて検討を行った。

キーワード：PC 外ケーブル、フレット疲労、三次元 FEM、接触解析

1. はじめに

建設構造物の建設コスト削減と LCC の重要性が要求される中、PC 橋においても、波形鋼板ウェブを有するエクストラドーズド橋のように外ケーブルを用いた新形式複合構造が採用されたり、十分な防食機能が付与された各種の重防食 PC 鋼材が開発されている¹⁾。

PC 橋のアンボンドマルチ外ケーブルの偏向部においては、緊張材の曲げ配置半径が小さくなり、PC 鋼材同士のフレット現象により、応力集中と滑り運動によるフレット磨耗が原因となり、き裂発生から破断に至るというメカニズムを経て、疲労強度が低下する傾向にある(図-1)。

新井ら²⁾は、PC 鋼より線相互の点接触による高支圧かつ相対滑りを伴うフレット疲労試験を実施し、PC 鋼より線の外側素線に破断箇所が集中すること、破断起点にはフレット痕とき裂が確認されること、ケーブルの損傷箇所が不均一で偏在すること、などを確認するとともに、フレット疲労の抑制のためには保護管内にグラウトを充填することが効果的

であること報告している。三浦ら³⁾は内部充填型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線を用いて疲労試験を行い、エポキシ樹脂がストランドを構成する素線同士の微小な相対移動を拘束することにより、フレット現象の防止に効果があること、また、エポキシ塗膜はケーブル偏向部のように鋼より線同士が重なり合って高い腹圧力が生じる位置でも残存することから、鋼材同士の直接接触を回避する緩衝材として機能し、フレットを防止して疲労性能を高めること、などを報告している。筆者ら⁴⁾も高耐久性ポリエステル硬化樹脂で被覆された PC 鋼より線を用いたケーブルの疲労試験を実施し、偏向部における外ケーブルのフレット疲労抵抗特性が大きいことを確認している。

このように、PC 外ケーブルの偏向部のフレット疲労抵抗性能は、主として疲労試験を行うことにより確認されている。しかし、疲労試験は大規模な試験装置と多額の試験コストと膨大な時間を必要とする。そのため偏向部における PC 鋼より線の複雑な内部挙動や応力状態などは明らかにされていないのが現状である。

*1 計測リサーチコンサルタント(株) 工修 (正会員)

*2 長崎大学 工学部構造工学科教授 工博 (正会員)

*3 タイムスエンジニアリング(株) 代表 (非会員)

*4 コサカ設計・アソシエーツ 代表 (正会員)

PC 鋼より線のフレッティング疲労挙動の実験結果を解析的にシミュレートすることができれば、実験を補完することができ、実験にフィードバックできるものと考えられる。しかし、現在のところ、解析的な研究はほとんど例がない。

本論文では、フレッティング疲労現象を解明するための第一ステップとして、三次元非線形 FEM 接触解析により、プレストレス導入時及び荷重載荷時の静的なケーブルの移動や応力・ひずみ状態を解析するとともに、ケーブル本数や配置形状、ケーブル形状の平行とツイスト配置の相違、ツイストケーブルのより間隔などを変化させたパラメトリックな解析を行い、それらの影響について検討を行ったものである。

2. 平行配置における PC 鋼材の三次元

非線形 FEM 接触解析

2.1 解析概要

コンピュータのハードウェアおよび汎用非線形 FEM 解析コードの高性能化、大容量化、低価格化が格段に進行した今日においては、大規模計算力学による複雑な物理現象のシミュレーションも可能となっている⁵⁾⁶⁾。構造物の接触問題などの複雑な現象も例外ではなく、三次元非線形 FEM 解析を用いてシミュレートできるようになってきた。本研究では、PC 鋼材のフレッティングによる接触問題のモデル化を検討することを目的として、spring 要素 (SOFiSTiK) と接触解析 (MARC) の二解析法によりシミュレートを試みた。spring 要素においては、縦・横・回転ばねと GAP を用いて接触状態を考慮する。一方、接触解析においては、MARC の自動接触解析機能⁷⁾を用いた。これによると接触状態を検知し、貫通が生じないように拘束し、接触面における変位の適合性を自動的に処理することができる。

本章では PC ケーブルは平行配置を対象とする。平行配置の場合は、模式図⁸⁾ (図-2) に示すように、荷重の負荷とともに鋼材が不規則に移動している。また、実験結果でも図-3 に示すように、サドル部直下の被覆材の損

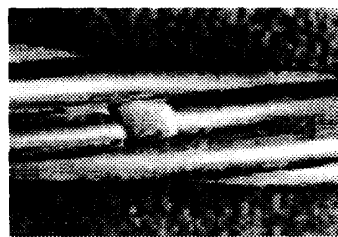


図-1 破断状況

傷状況が偏在していることが確認されている⁴⁾。

しかし、spring 要素を用いてシミュレート解析を行った結果、PC 鋼材には不規則な移動がみられず、図-4 に示すように初期形状をほぼ維持した状態であった⁹⁾。そこで、実験結果をより正確にシミュレートするために、MARC の接触解析機能を用いて解析を行った。

2.2 解析モデル (接触解析)

三次元非線形 FEM 解析を行うために、PC 鋼材、PE 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、試験体および荷重条件が左右対称であるため、解析対象を 1/2 モデルとした。なお、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 0.6Pu (約 2900kN) のプレストレスを導入した後、PC 鋼材に偏向部から 8.8mm (疲労試験⁴⁾での載荷変位振幅) の変位荷重を静的に載荷した。

鋼材同士の接触に関しては自動接触機能を使用した。自動接触解析機能アルゴリズムには直接拘束法が組み込まれており、接触判定にはボックス法が組み込まれている⁷⁾。なお、ここでの解析では、PC 鋼材同士や PE 管と PC 鋼材同士に関しては摩擦を考慮していない。摩擦を考慮した場合は 3 章で述べる。

材料特性については、鋼製偏向部の弾性係数は $2.0 \times 10^5 \text{MPa}$ 、PE 管は 3000MPa、PC 鋼材の弾性係数は材料試験から得られた $1.98 \times 10^5 \text{MPa}$ (19S15.2) とした。図-5 に解析対象とした PC 鋼材の断面図とそのモデル化を示し、図-6 および 7 に全体の解析モデルのメッシュ分割および寸法を示す。なお、PC 鋼材を取り囲んでいる被覆材のモデル化も可能であるが、本論文では、

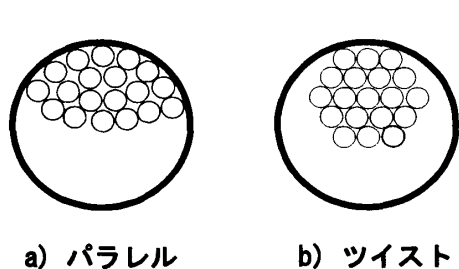


図-2 ケーブル断面模式図⁸⁾

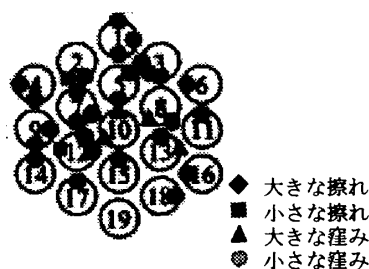


図-3 被覆材損傷状況図⁴⁾



図-4 変形・応力状況図

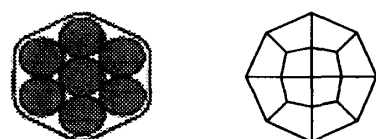


図-5 PC鋼より線断面とモデル化

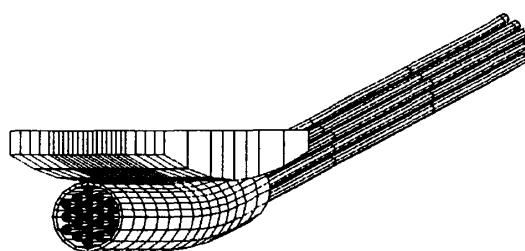


図-6 メッシュ分割図

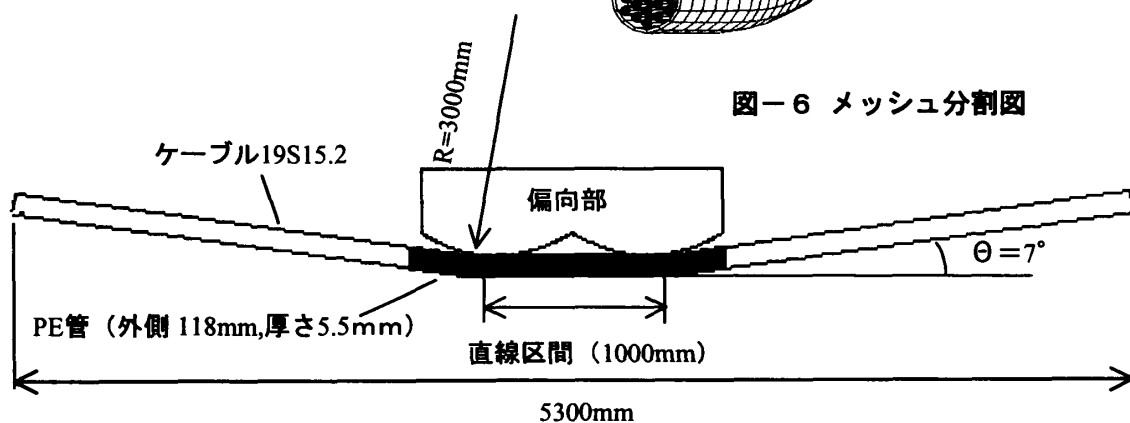


図-7 解析モデルの寸法図

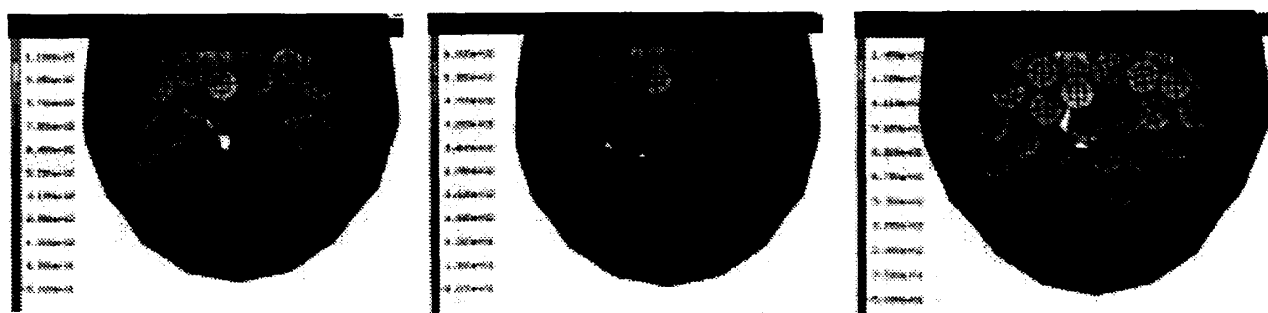
一本の鋼としてモデル化した。鋼の実断面形状とモデル化の形状が多少異なっているが、計算時間と接触解析の安定性を加味して、試行錯誤の上決定した。

2.3 解析結果

図-8の(a)～(c)にプレストレス 0.25Pu, 0.5Pu 導入時, 8.8mm 載荷時の中央部における鋼

材の移動, 接触, 応力状態を示す。

外ケーブルや斜材の多本数長尺に対する設計・施工の合理化を想定して, 大直径の鋼材を用い本数を減らした場合の解析も行った。いずれの場合もプレストレスを導入し荷重載荷が進行するにつれて, PE 管内部の鋼材の移動, 接触, 応力状態が偏在していることが確認できた。



(a) プレストレス 0.25Pu 導入時

(b) プレストレス 0.5Pu 導入時

(c) 8.8mm 載荷時

図-8 解析結果

3. パラメトリック解析

3.1 解析モデル

ここでは、PC 鋼材、PE 管、偏向部は、前章と同様、ソリッド要素でモデル化を行った。荷重載荷は、PC 鋼材の両端を完全固定し、偏向部から PC 鋼材へ 100mm の変位荷重を静的に載荷させた。接触に関しても前章と同様に、自動接触解析機能を使用した。解析では、一般的に使用されている、19 本、7 本、3 本の 3 種類の PC 鋼材を解析対象とし、本数、配置形状、パラレルとツイスト、より間隔、摩擦の影響についてパラメトリックな解析を行った。

解析モデルの要素分割数を表-1 に示す。また、一例として図-9 にツイストのメッシュ分割図を示し、図-10 に解析モデル寸法を示す。ツイストの解析を行った場合、1/2 対称性モデルでは、中央部で PC 鋼材がばらけるような実現象とは異なる挙動を示すので、全体モデルを用いて解析を行った。なお、PC ケーブルは、前章と異なりディビエータの曲げ配置部は設けておらず、直線とした。パラレル及びツイスト配置の詳細の解析モデルを表-2 および 3 に示す。

3.2 解析結果

図-12 にそれぞれツイスト、パラレルの偏向部を 100mm 載荷させたときのディビエータ部のサドル直下のケーブル断面形状を示し、結果を比較検討しやすいように、PC 鋼材の応力分布を -150MPa ～100MPa の間で 10 分割したコンター図を載せている。

(1) 本数の影響

19 本、7 本、3 本の 3 種類における PC 鋼材の総断面積を全て同じとし、鋼材本数が与える影響について検討した。図-11 の(a), (b), (d) より、19 本と 7 本は、鋼材が不規則に移動しているが、3 本は、安定した形状をたもったまま変形している。

(2) 配置形状の影響

ケーブルの初期配置を変化させることによって、断面形状がどのように異なるかを検証するため、P7-1 の配置を 15° および 30° 回転させた

場合の影響について検討した。図-11 に初期配置を示す。図-12 の(d), (e), (f) より、P7-1 と P7-3 の中間の配置にある P7-2 は、P7-3 に近い変形性状となった。これは PC ケーブルの移動は初期配置状態から PC 鋼材が最も安定な状態となる方向に移動していくためであると考えられる。本例では P7-3 が P7-1 より安定となる。

表-1 要素分割数

種類	要素数
偏向部	240要素
PE管	720要素
PC鋼材	3本 (φ38.2) 480×3=1140要素
	7本 (φ25) 480×7=3360要素
	19本 (φ15.2) 480×19=9120要素

表-2 パラレルの解析条件

種類	詳細
P7-1	PC鋼材7本
P7-2	P7-1の配置を15度回転
P7-3	P7-1の配置を30度回転
P3	PC鋼材3本
P19	PC鋼材19本

表-3 ツイストの解析条件

種類	詳細
T7-1	PC鋼材7本ピッチ10.4m
T7-2	PC鋼材7本ピッチ5.2m
T7-3	PC鋼材7本ピッチ3.9m
T7-4	PC鋼材7本ピッチ2.6m

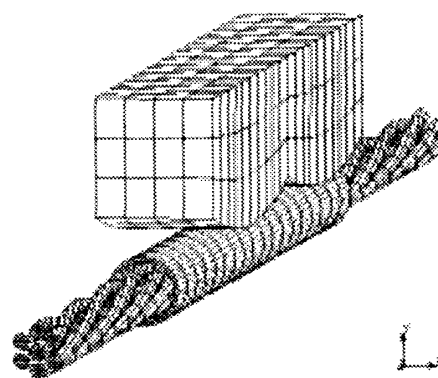


図-9 メッシュ分割

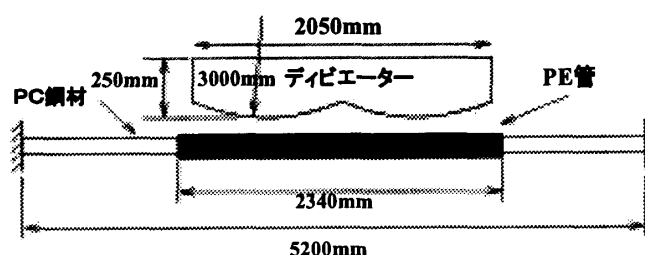


図-10 解析モデル寸法

(3) パラレルとツイストの影響

パラレルとツイストについて検討した。図-2の模式図ではパラレルの場合は不規則な形状となるのに対して、ツイストの場合はほぼ初期形状を保っている。図-12の(d)と(g)、(h)を比較すると、解析でも同様に、ツイストはばらけることなく安定な断面形状を保持したまま変形していることがわかる。これはお互い鋼材同士が拘束しあうためであると考えられる。

(4) より間隔の影響

より間隔を 10.4m(T7-1)から 5.2m(T7-2)にすると剛性が高くなる結果が得られた。そのため、より間隔を変化させた場合の影響について検討した。図-13により間隔を変化させた場合の荷重-変位曲線を示す。また、より間隔と 100mm 変位時の荷重値の関係を図-14に示す。

その結果、T7-2で最大となり、より間隔を短

くすると小さくなる傾向が得られ、最適なより間隔が存在することが示唆される。

(5) 摩擦の影響

摩擦の有無の影響について検討した。図-12の(b)と(c)、および(f)と(i)により、摩擦を考慮した解析では、摩擦なしと比べると、摩擦の影響により滑りが少なく、ほぼ初期形状を保ったまま変形する結果となった。なお摩擦を考慮した解析では、PE管とPC鋼材、PC鋼材同士の摩擦係数を 0.5 とした。

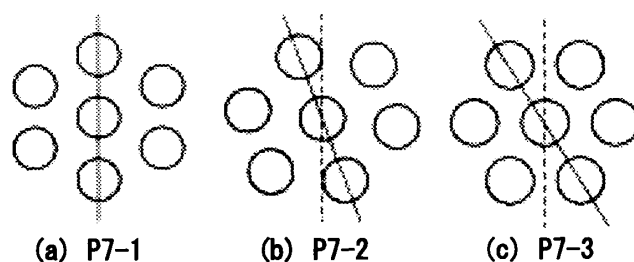


図-11 断面配置 (パラレル)

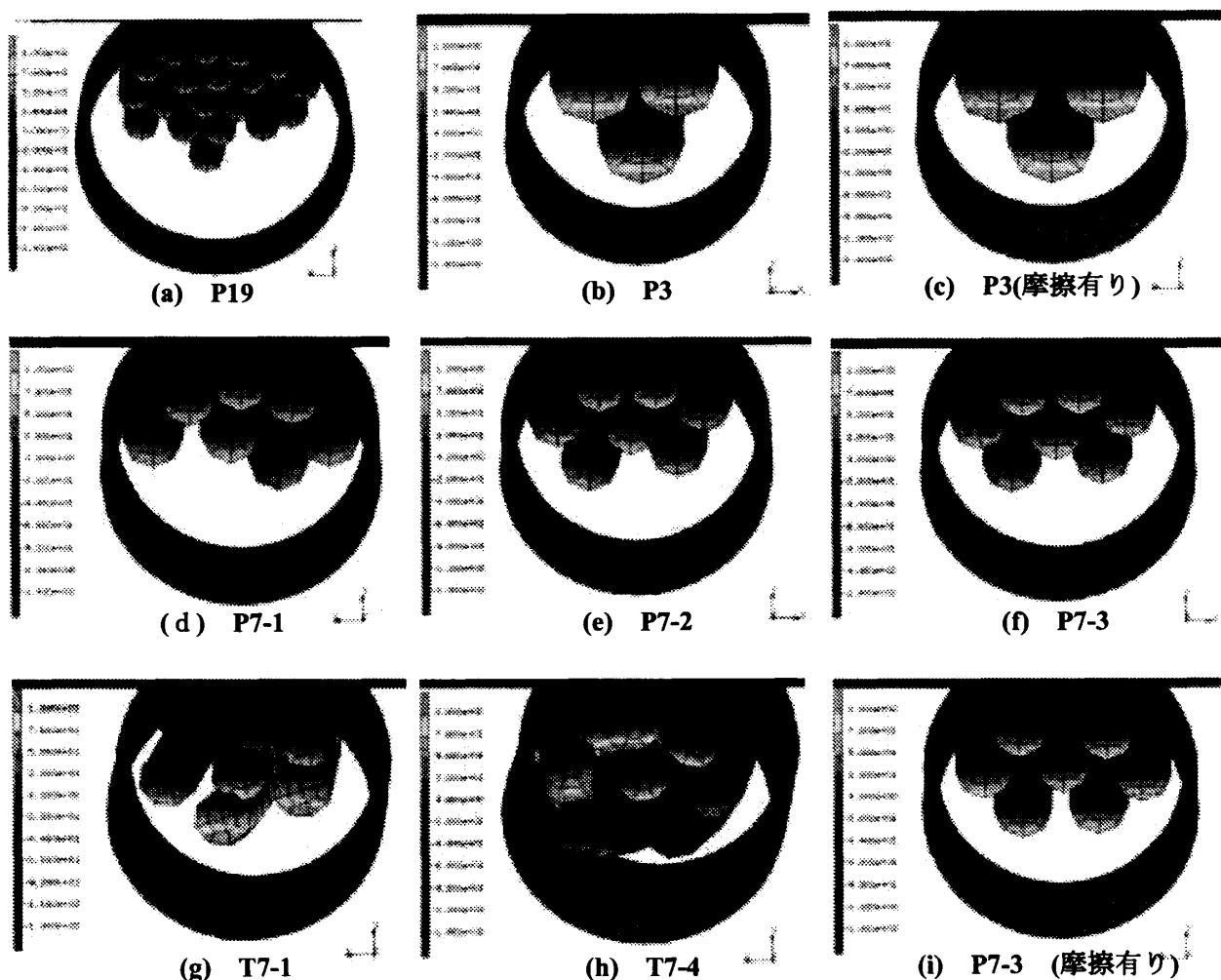
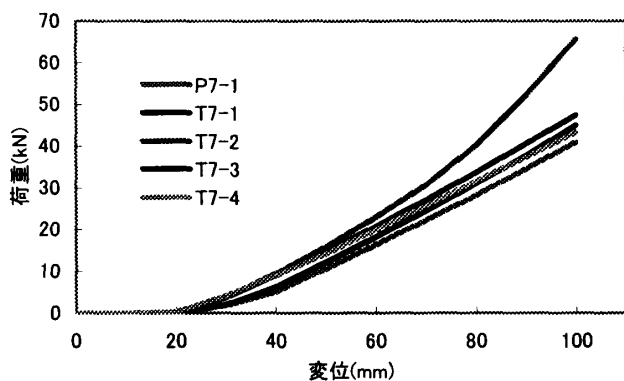
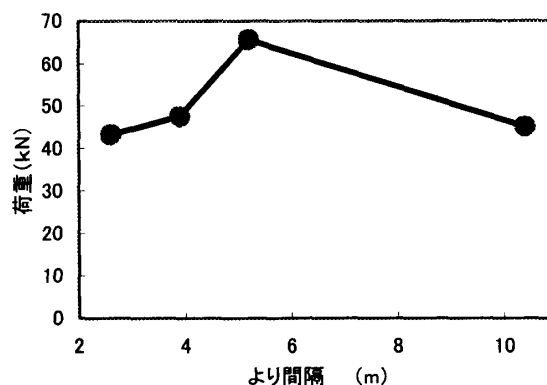


図-12 解析結果



図—13 荷重—変位曲線



図—14 より間隔と100mm変位時の荷重値の関係

4. まとめ

本研究成果は以下のようにまとめられる。

- (1) PC 外ケーブル偏向部のフレッティング現象は、主に疲労試験により研究が行われており、解析においては過去の文献をみてもほとんど例がなく、ケーブルの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の可能性が示され、PC外ケーブル偏向部のフレッティング現象に関する解析的な研究の第1ステップとなったものと思われる。
- (2) パラメトリック解析より、ケーブル本数に移動状態が異なり3本の場合は初期形状を保持したまま変形すること、初期配置形状により安定な状態へ移動すること、ツイストでは初期形状を保持したまま変形するが、より間隔に最適間隔があること、摩擦の影響を考慮することによりほぼ初期形状を保持したままの状態に変形すること、などが明らかになった。

今後、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ものと考えられる。

5. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、九州共立大学の渡辺明学長には、数多くのご助言とご指導を賜りました。また、疲労試験ではヒエン電工(株)の千桐一芳氏に、解析とデータ整理には長崎大

学工学部構造工学科中島朋史君にご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 上坂康雄：補強材の防食について，コンクリート工学，Vol.40，No.5，pp.47-52，2002.5
- 2) 新井英雄ほか：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.205-222，1999.8
- 3) 三浦尚，角昌隆：内部充填エポキシ樹脂被覆PC鋼より線技術の現状，プレストレストコンクリート，Vol.45，No.2，pp.100-111，2003.5
- 4) スープロ協会編：完全防食・超耐久性PC鋼より線の硬質型(N型)・スープロストランド，技術資料，2002.10
- 5) 堀宗朗ほか：[特集]応用力学の深淵，土木学会誌，Vol.85，No.8，pp.5-63，2000.8
- 6) 牛島省ほか：[特集]計算力学の最前線，土木学会誌，Vol.88，No.8，pp.5-40，2003.8
- 7) 日本マーク株式会社：トピック別セミナー，CONTACT，pp.1-55
- 8) (財)高速道路技術センター監修：PC橋耐久向上に関する設計・施工マニュアル，4-5，日本道路公団，2001.10
- 9) 楠原絵美ほか：外ケーブルおよび偏向部に着目した鋼コンクリート複合橋の三次元FEM解析，第5回複合構造の活用に関するシンポジウム，pp.341-348，2003.11