Japan Concrete Institute

コンクリート工学年次論文集，Vol. 24，No.2，2002

論文　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

篠崎　裕生[*1]・Thiru Aravinthan[*2]・渡辺　宗樹[*3]・濱田　譲[*4]

要旨：著者らは，大偏心外ケーブルトラス橋の外ケーブル偏向部の簡素化および軽量化を目的として，単鋼管によるストラットと2重鋼管式のサドルを組み合わせた偏向構造を考案した。本偏向構造について200万回の繰返し疲労耐久性試験を行った結果，その安全性が確認された。また，この偏向構造と組み合わせて用いたグラウト不要のプレファブケーブル（アンボンドマルチケーブル）のフレッチング疲労強度特性についても一連の疲労試験の中で検討した結果，ケーブルサイズ7T15.2，曲げ半径3mの条件で，AASHTOの部門C曲線と同等かそれ以上の疲労強度を有することが明らかとなった。

キーワード：大偏心外ケーブル，偏向部，アンボンドマルチケーブル，フレッチング

1.　はじめに

著者らは，PC外ケーブルを桁高さ以上に大きく偏心配置することで，合理的なPC橋梁の構築を可能にする“大偏心外ケーブルトラスPC橋”の研究開発を行ってきた。本構造は北海道において歩道橋に採用された[1)]（**写真－1**）。

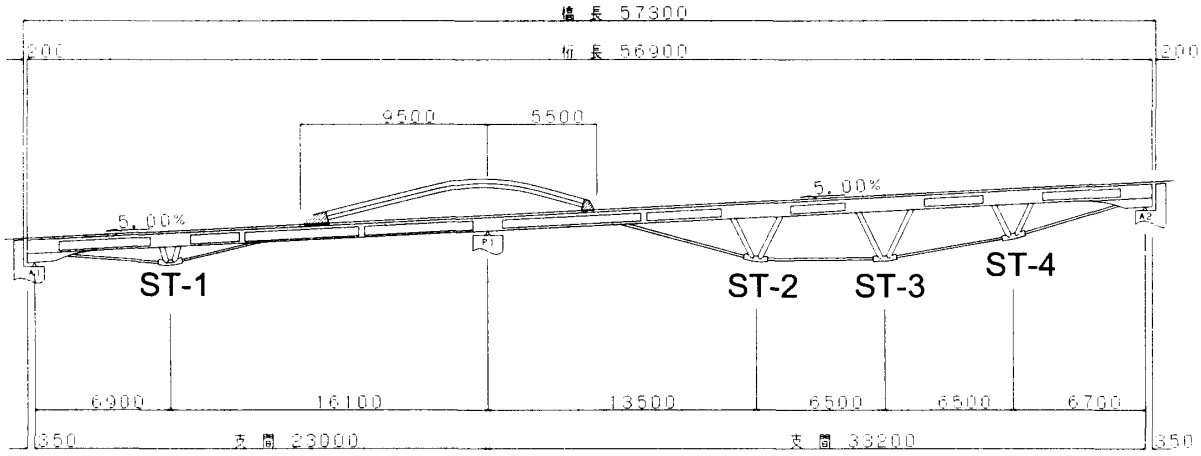
外ケーブルを大偏心配置させるために必要となるストラットおよびサドル（偏向部）の構造については，鋼管を主体とした構造を採用した。ストラットは偏向部1ヶ所につき4本の単鋼管で構成し，先端にサドルを配置した（**写真－2**）。サドルに対しては，所要の剛性の確保に加えてストラットとの接合や景観への配慮，さらには軽量であることなどが要求されることから，**図－2**に示すような2重鋼管＋グラウト方式を採用した。本構造は，適当量のリブによってその間隔が保持された2重鋼管に妻鋼板を溶接し，内部にセメントグラウトを施した合成構造であり，剛性確保を容易にするとともに軽量化を図ったものである。また，ストラットとサドル接合部の隅角部にはリブプレートを配置し，応力集中を緩和している。ストラットおよびサドルの設計に当たっては，3次元のFEM解析を実施して設計荷重に対する照査を行った。

また，本橋ではPCケーブル施工の省力化を目的として，グラウト不要のプレファブケーブルであるアンボンドマルチケーブルを採用している。アンボンドマルチケーブルは，**図－9**に示すように各PC鋼より線が1本ずつ防錆グリースとポリエチレンシースで被覆され，さらに外側を高密度ポリエチレンで密着被覆されており，耐食性に優れたケーブルである。

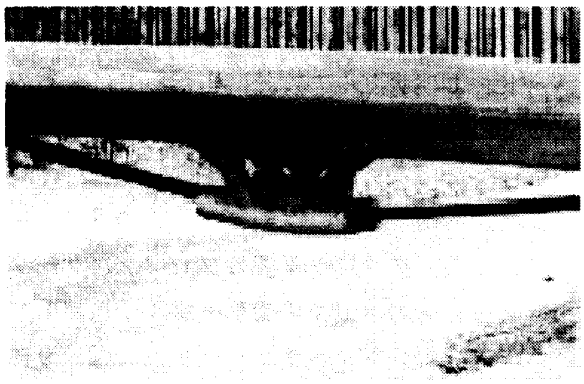
写真－1　望景橋全景

*1　三井建設㈱　技術研究所（正会員）
*2　ドーピー建設工業㈱　技術センター　工博　（正会員）
*3　三井建設㈱　土木本部土木設計部
*4　ドーピー建設工業㈱　技術センター　工修

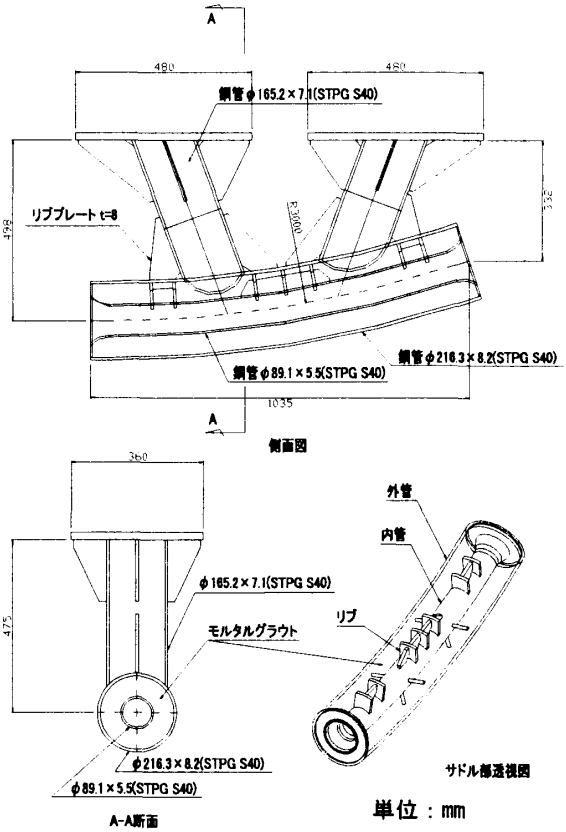
NII-Electronic Library Service



図－１　望景橋一般構造図　　単位：mm



写真－２　偏向部外観



図－２　試験体偏向部構造図

本論では，この新しい偏向構造に対して行った 200 万回の繰返し疲労耐久性試験の結果について報告するとともに，アンボンドマルチケーブルのフレッチング疲労強度特性について検討した。

2.　試験概要

2.1　偏向部疲労耐久性試験

望景橋において，最も偏向角度が大きい ST-1 偏向部（**図－１**，**写真－２**）を対象として桁部まで含めてその 3/5 の大きさのモデル試験体を製作した。なお，実橋では 2 本の外ケーブルが配置されているが，片側 1 本分のみをモデル化した。

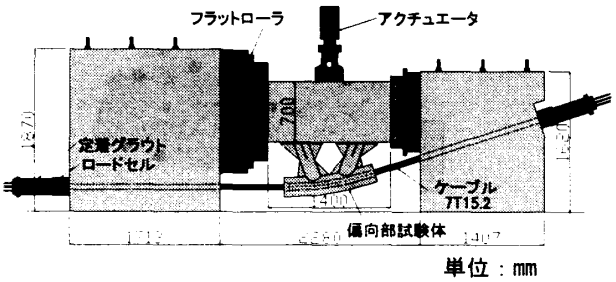
使用した鋼管は圧力配管用炭素鋼鋼管で，降伏強度および破断強度の規格値はそれぞれ 245, 410N/mm^2 以上(STPG410)である。また 2 重鋼管内部のグラウトには無収縮タイプを使用した。試験時の圧縮強度は 40.7N/mm^2，弾性係数は 2.90×10^4N/mm^2 であった。

実構造と試験体の相似比を**表－１**に示す。ストラットおよびサドルの大きさとケーブル曲げ

NII-Electronic Library Service

表－１　実橋と試験体の相似比（単位は mm）

部位	項目	実橋	試験体	比
ストラット	外径	267.4	165.2	0.62
	厚さ	12.7	7.1	0.56
サドル外管	外径	355.6	216.3	0.61
	厚さ	15.1	8.2	0.54
サドル内管	外径	139.8	89.1	0.64
	厚さ	9.5	5.5	0.58
PC 鋼材	規格	19S15.2	7T15.2	－
	断面積	2635.3	970.9	0.37
曲げ半径		5000	3000	0.6
偏向角		18.2	18.2	1.0



図－３　試験装置図

半径は，実構造の 0.6(=3/5)倍に，ケーブルの断面積は 0.36(=0.6^2)倍に近い値となっている。試験装置は図－３に示すように，アクチュエータにより試験体を鉛直方向に加振し，ケーブルに応力振幅を生じさせた。

定着くさびから 300mm の区間はグラウトを施しケーブルの応力変動がくさびに直接作用しないよう配慮した。また，ロードセルをケーブル両端に配置し張力を管理した。アクチュエータは，素線破断時の安全性を考慮し変位で制御した。変位振幅の実測値を表－２に示す。

図－５に示すように，偏向部の鋼管表面にひずみゲージを貼り付け，事前に行った FEM 解析の結果との対比を行った。

実橋の設計緊張力はケーブル破断強度の 52%，活荷重による応力振幅は 32N/mm^2 である。これに対して，試験体では安全側の設定として，初期緊張力(下限荷重)をケーブル破断強度の 60%，応力振幅を 49N/mm^2(5.0kgf/mm^2)とした。なお，今回の実験で用いたケーブルの破断強度規格値(fpu)は 1860N/mm^2 である。

実際の加振では，試験体が非対称であるため，図－３における左右のケーブル応力（ロードセルの値から換算）にばらつきが生じる。そこで，左右ケーブル応力の平均値で加振をコントロールした。

2.2　フレッチング疲労強度試験

既往のフレッチング疲労強度に関する研究は，外ケーブルでは一般的な保護管＋グラウトの場合で行われている例が多く，今回使用したアンボンドマルチケーブルで行われた例はない。そこで，前項で述べた偏向部と試験装置を用いてケーブルの応力振幅を変えた疲労試験を行い，フレッチング疲労強度の検討を行った。

試験ケースを表－２に示す。なお，表中の試験体 C1 は 2.1 で行った偏向部の疲労耐久性試験である。

表－２　試験条件

試験体	ケーブル応力度(N/mm^2)			変位振幅(mm)	振動数(Hz)
	下限	上限	振幅		
C1	1116	1165	49	6.1	2.0
C2	1116	1214	98	13.2	1.5
C3	1116	1263	147	19.0	1.0

ロードセルの荷重と，ケーブルに貼り付けたひずみゲージの値の変化から，素線の破断を確認した。そして，2～3 本の素線が破断したことが確認できた時点で試験を終了した。

3.　試験結果

3.1　偏向部疲労耐久性試験

図－４に偏向部の FEM 解析結果（圧縮主応力図）を示す。解析モデルでは，鋼材はシェル要素で，グラウト部分はソリッド要素で対称軸から半分をモデル化した。外管と内管の間のリブはモデル化していない。また，鋼材とグラウトは一体として挙動するものとした。

外ケーブルによる荷重は，内鋼管への支圧力として入力した。このとき，外ケーブルの接地幅は外ケーブル外径（被覆を含めて 65mm）の

NII-Electronic Library Service

3/4 と仮定した[2]。また，解析上，外ケーブルと鋼管の摩擦の影響は無視した。

解析結果から，支圧力がグラウトと外管を介してストラットとリブプレートに伝達され，この部分で圧縮力が卓越していることが分かる。また，サドル張出し部およびストラット間での曲げの影響がリブプレートによってストラット中央付近に伝達されている様子が分かる。

図－6に緊張時（0.6fpu 時）の偏向部の実測ひずみ値と FEM 解析値との比較を示す。また，**図－7**に疲労試験時のひずみ値の変化を示す。ストラット，サドルともに鋼管軸方向のひずみを比較した。

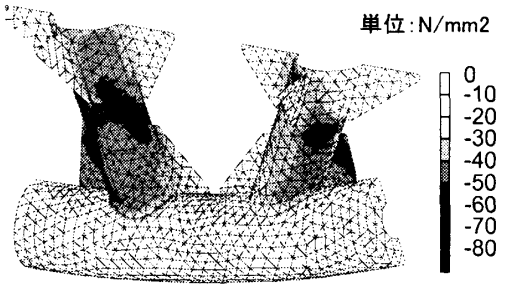
ストラット鋼管の測点 1～4 では，外ケーブル支圧力による圧縮力が卓越しており，モデル化の影響によりばらつきはあるものの，実測値と解析値は概ねよく一致した。サドル鋼管の上側測点 5～7 および下側の測点 8～12 においても，実測値と鋼管とグラウトの一体化を仮定した解析値はよく一致しており，2 重鋼管とグラウトが一体となって支圧力に抵抗していることが分かった。

図－7から，繰返し載荷時における偏向部鋼管のひずみ値の変化はほとんどなく，2 重鋼管とグラウトを用いた偏向構造の安全性が実証された。また，使用したアンボンドマルチケーブルについても，200 万回繰返し載荷の影響は見られなかった。また，試験後にケーブルを解体して観察した結果でも，各ストランドを被覆しているポリエチレンシースに素線がめり込むような跡が見られたものの，素線の破断，損傷などは見られなかった。

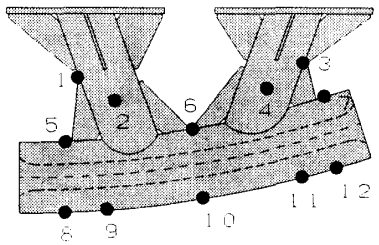
3.2 アンボンドマルチケーブルの疲労強度

図－8に，C1～C3 のそれぞれのケースにおける繰返し載荷回数と外ケーブル応力の関係を示す。ケーブル応力はケーブル両端のロードセルの値から換算し，下限応力度および上限応力度はそれぞれ両端の平均値とした。

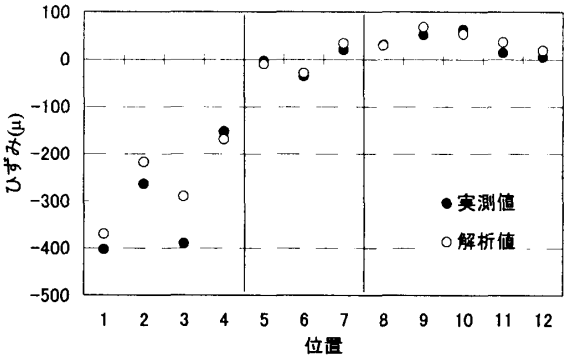
試験ケース C1 は，3.1 で述べたとおり 200 万回繰返し載荷でもケーブルに異常は見られず，所定の応力振幅を維持している。C2 では，69，123，154 万回においてケーブル応力の急減が見



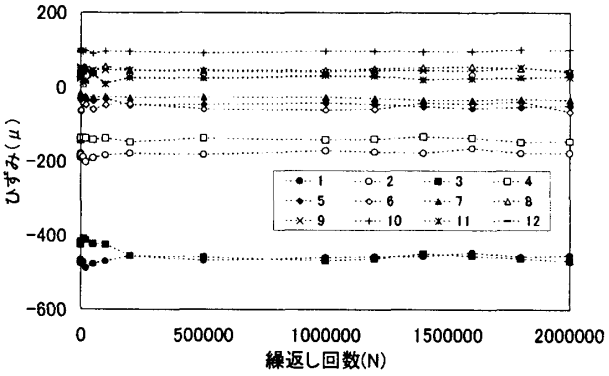
図－4　FEM 解析結果



図－5　ひずみ計測位置図



図－6　緊張時ひずみの比較



図－7　疲労試験時のひずみの変化

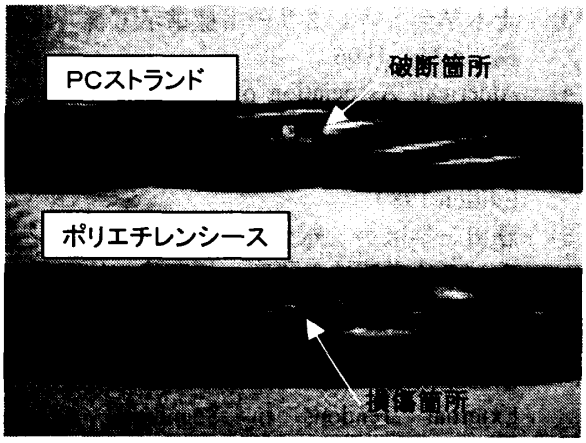
NII-Electronic Library Service

られた。PC 鋼材に貼付したひずみゲージの値と，試験後のケーブル解体調査の結果から，69，154 万回において，サドル内で素線がそれぞれ 1 本ずつフレッチング破断していた。また，123 万回では，サドル外で 1 本破断していた。これについては，現在，原因を特定中である。

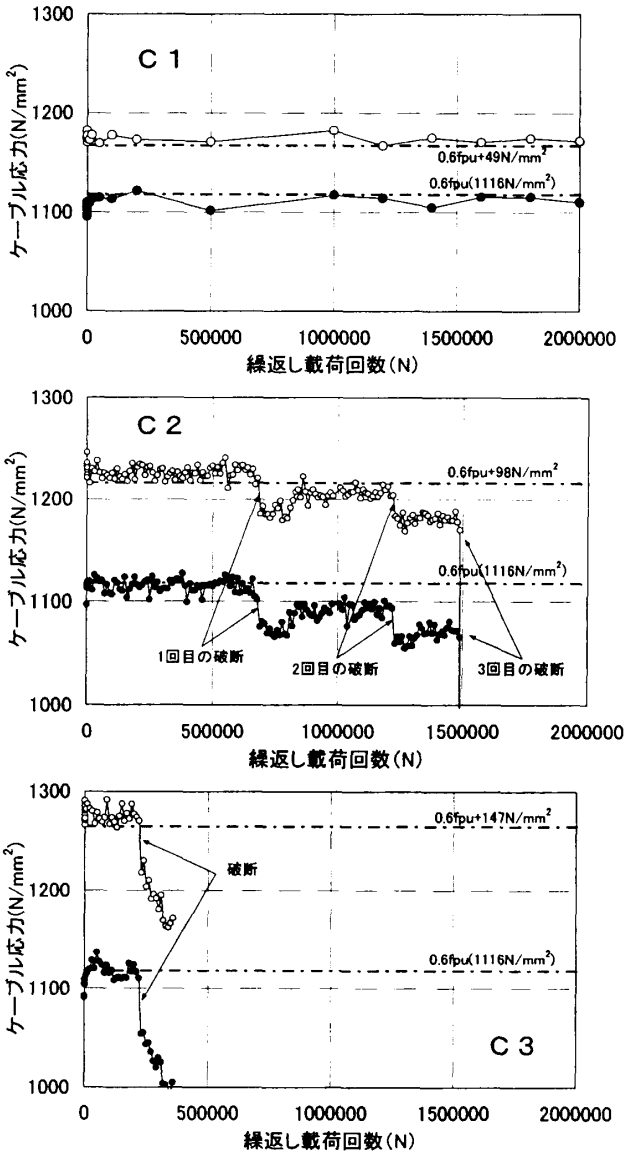
C3 は，23 万回においてケーブル応力が大きく低下し，その後も応力低下が続いたため試験を終了した。ケーブルを解体した結果，合計 4 本の素線がフレッチング破断したことが分かった。

C2 および C3 における素線の破断位置は，ケーブル軸方向位置はサドルの曲げ上げ定着部側に集中していた（**図－９**）。これは，サドルが非対称であるために，曲げ上げ定着側のケーブル応力振幅の方が水平定着側よりも大きくなることが原因と考えられる。**図－１０**に C2 の曲げ上げ定着側と水平定着側のケーブルの応力振幅（ロードセルの値から換算）を比較したものを示す。C2 の場合，設定応力振幅 98N/mm^2 に対して，曲げ上げ定着側で平均 137.3N/mm^2，水平定着側で 81.5N/mm^2 と大きな差が見られた。ケーブル断面では，C2，C3 ともに**図－９**下の位置の素線が破断していた。破断箇所では鋼材被覆であるポリエチレンシースが破れて防錆グリース漏れ出していた。破断の状況を**写真－３**に示す。

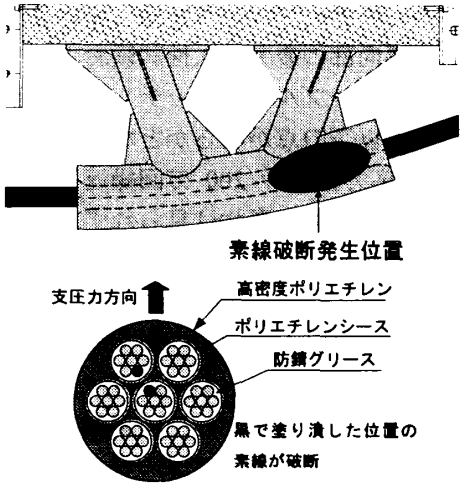
試験結果を S-N 線図にプロットしたものを



写真－３　素線破断と被覆損傷状況



図－８　ケーブル応力の変化



図－９　素線破断位置

NII-Electronic Library Service

図－１１に示す。図には，AASHTO の指針に示される部門 C の許容疲労応力[4]および藤田らの実験[5]で提案された曲線を合わせて表示した。藤田らの実験は，通常のグラウトタイプのケーブルを用いたもので，ケーブルサイズや曲げ半径（19S15.2，R=3000）が異なり本実験よりも厳しい条件となっている。

本実験結果をプロットするに当たっては，フレッチングにより 1 本目の素線が破断した時（全素線の 2%）の繰り返し回数とした。また，ケーブルの応力振幅については，図－１０に示したように，ケーブル両端での差が大きい点と，フレッチング破断が振幅の大きい曲げ上げ定着側で発生している点を考慮し，平均振幅と最大振幅の両方を表示した。

図より，アンボンドマルチケーブルのフレッチング疲労強度は平均応力振幅で評価すると AASHTO の指針とほぼ同程度となることが分かった。AASHTO の指針はもともと鋼製橋梁部材設計用に提案されたものであるが，フレッチングを考慮した PC 鋼材の疲労強度との整合性が良いことが確認されている[6]。今回の実験の範囲で，アンボンドマルチケーブルのフレッチング疲労強度特性は，通常の PC 鋼線と同等以上であることが分かった。

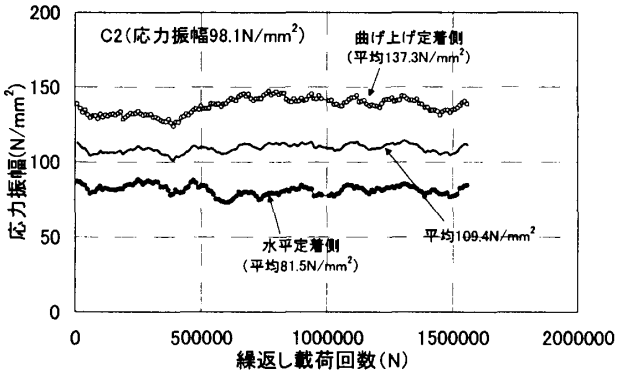
4. まとめ

大偏心外ケーブルトラス橋で用いた 2 重鋼管方式の偏向部の疲労耐久性試験およびアンボンドマルチケーブルのフレッチング疲労強度試験を行い，以下の点が明らかとなった。

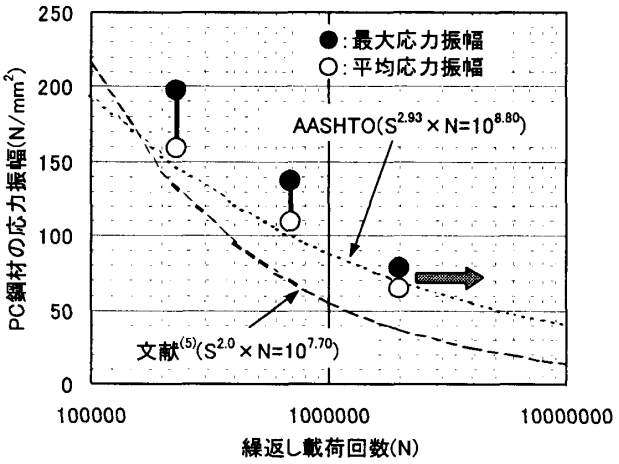
(1) 設計応力振幅の 200 万回繰返し載荷でも 2 重鋼管偏向部に変状は見られず，本構造の安全性が確認された。

(2) アンボンドマルチケーブルのフレッチング疲労強度は AASHTO の部門 C 曲線と同等かそれ以上であることが分かった。

本実験を行うにあたり，極東鋼弦コンクリート振興（株），神鋼鋼線工業（株）に資機材の提供およびご助言をいただきました。ここに，感謝の意を表します。



図－１０　C2 のケーブル応力振幅



図－１１　S-N 線図

参考文献

1) 釜澤　弘ほか：鳥崎川公園橋（大偏心外ケーブルトラス PC 橋）の設計・施工，プレストレストコンクリート技術協会第 11 回シンポジウム論文集，pp.315-320，2001.11

2) プレストレストコンクリート技術協会：外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工規準(案)，p.68，1996.3

3) 土木学会：コンクリート標準示方書　設計編，p.35，1996

4) American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc: Standard Specifications for Highway Bridge, Fourteen Edition.1989

5) 藤田　学ほか：外ケーブル偏向部のフレッチング疲労特性の研究，住友建設技術研究所所報，pp.9-18，1996

6) Karen Ryals, Gregor P. Wollmann,John E. Breen, Michael E. Kreger: Fretting Fatigue of External Tendons in Segmental Bridge Deviators, Workshop - Behavior of External Prestressing in Structures, AFPC June. 1993

NII-Electronic Library Service