

グラウトされた斜材の素線破断に伴う張力低下要因に関する実験的研究

中日本高速道路(株) 正会員 工修 ○小野 聖久
 中日本高速道路(株) 工修 服部 雅史
 中日本高速技術マーケティング(株) 正会員 野島 昭二
 中日本高速道路(株) 正会員 博士(工学) 長田 光司

Abstract : In order to diagnose health of diagonal cables of cable-stayed bridges and extradosed bridges, authors have been studying on the investigate method of measuring tensions. From the result of experimental research, it is shown that the tension of diagonal cable decline due to breakage of wires, even in the case that cables are covered with grout that was filled in the protecting tube. However, since it is not clear about the amount of the decrement of tension accompanying the wire breakage in the real length of the diagonal cables, the additional experiments using the same specimen in the former experiments were conducted. In the experiments, wires had cut at the edge of the cable, induce the wires to have smaller bond length. From the results of strain and tension behavior, it is shown that the decrement of the tension of the cable with grout is consist of two factors. And the factors are “relating to bond anchorage” and “slipping between the wires”.

Key words : stay cable, tension decrease, grout, bonding length, cable end

1. はじめに

近年、構造物のメンテナンスの重要性が認識され、道路橋においても5年に1回の近接目視による点検が行われている¹⁾。一方、斜張橋やエクストラードド橋（以下、斜張橋など）における斜材ケーブルの劣化状況の確認は斜張橋などの全体の安全性を評価する上で重要であるが、斜材ケーブルは保護管で覆われている場合が一般的で、外観の近接目視だけでは内部のPC鋼材の状況を点検することはできない。そのため、斜材ケーブルが破断すると張力が変化することに着目し、高次振動法を用いた張力測定により健全度評価について検討が行われているが²⁾、ケーブル内部がグラウトで充填されているケーブルでは、PC鋼材の素線が腐食し破断した場合でもグラウトを介してほかの素線に張力が伝達するため、グラウトが無い場合と比べ張力低下状況が異なると考えられ³⁾、張力測定による斜材ケーブルの健全度評価に影響をおよぼす可能性もある。このため、筆者らは保護管内部のグラウト充填の有無がケーブルの中央で破断させた時の張力変動におよぼす影響について実験的検討を実施しており、グラウトが充填されているケーブルでは、破断した素線の張力すべてがグラウトに定着された場合でも破断に伴う付着切れ部の存在により張力は低下するが、張力低下の割合はグラウトが充填されていない場合と比べ小さくなることを既往の研究で示している⁴⁾。

本論文では、グラウトで充填されており斜材ケーブルの健全度評価の適用性の確認のため、ケーブル中央部に加えて、短い定着長しか確保できないケーブル端部で素線を破断させた実験結果に基づき、素線破断に伴う張力低下に占める鋼材間のスリップによる低下量について検討したものである。

2. 実験方法

2. 1 試験体

破断実験に使用した試験体は、斜張橋などの斜材のPC鋼材の素線が1本ずつ破断していくことを

想定し、平行線ケーブルφ7×19 (Pu=1183kN, A=731mm²) を定着長約 6.6m のアバット (両端固定条件下) に緊張力 0.4Pu (Pmax=470kN) で定着している。

計測用のひずみゲージの配線のため、保護管の直径を変化させているが、切断位置付近の中央部と端部ではφ76, そのほかの区間ではφ114 と PC 鋼材とグラウトの付着は十分確保できていると考える。また、PC 鋼材切断位置において切断する素線を露出させるため、上側に 100mm 幅の切り欠きを設けて保護管内にグラウトを充填した。

本検討で使用した供試体を図-1 および写真-1 に示す。また、PC 鋼材とグラウトの仕様をそれぞれ表-1, 表-2 に示す。

2. 2 計測方法

ケーブルの張力は、固定側アンカー部に設置したロードセルによって測定した。

試験体には、PC 鋼材とグラウトのひずみを測定するために、PC 鋼材には切断した部分と反対側の素線 (図-2 に示す素線 X) にひずみゲージを設置するとともに、ひずみゲージを 350mm ピッチに設置した緊張をしない鋼線 (φ3mm) を保護管内に 3 箇所配置しグラウトと付着することでケーブル全体のひずみ分布を確認した。

2. 3 切断方法

PC 鋼材の切断順序は、まず保護管が破損した箇所付近の素線が腐食破断し、その後水が端部に回り端部付近で腐食破断することに対応するように、図-2 に示す順序で中央部の素線を 1 本ずつ切断し、その後端部を順番に切断した。図-2 における中央部と端部の同一箇所は連続した素線を示しており、たとえば①と⑫は同一の素線

表-1 PC 鋼材の材料特性

項 目	特 性 値
強度種別	ST1620
呼び径 (mm)	7.00
線径 (mm)	7.00±0.05
引張強さ (N/mm ²)	1619 以上
耐力 (N/mm ²) [0.2%Off-set]	1426 以上
伸び (%)	4.5 以上

表-2 グラウトの材料特性

使用材料	セメント	普通ポルトランドセメント
	混和剤	マスターフロー151
配合	水セメント比	45%
	混和剤セメント比	1.2%
重量	セメント	25kg
	水	11.25kg
	混和剤	300g
圧縮強度	材齢 28 日	43.7MPa



写真-1 試験体の状況

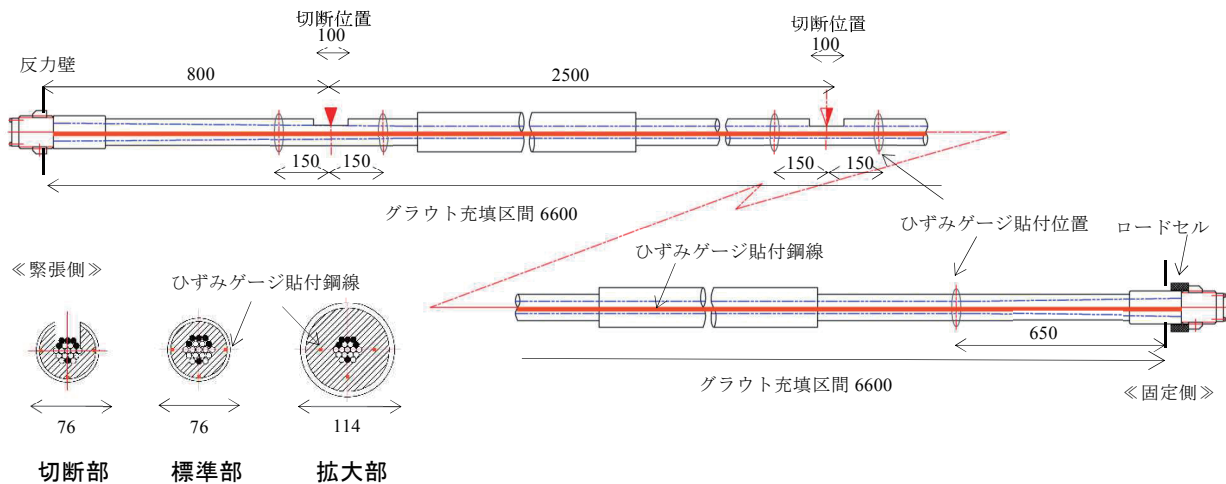
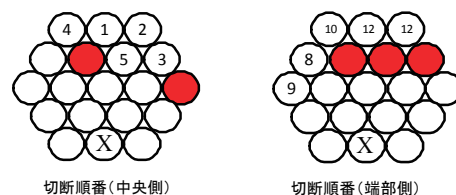


図-1 グラウト有試験体

となっている。

素線の切断には、電動工具を使用した。図-2に示す着色箇所(●)は実験終了後の解体時に破断が確認されたものである。よって、中央部では、5本を切断したつもりで5回計測を実施したのに対し7本切断していたため、図-3および図-6に示すグラフでは、切断本数を7/5本ずつ切断したものとして整理した。同様に端部では⑫の2本切断する際に着色箇所(●)の3本も切断したものとして整理した。



Xは残存素線のひずみ計測位置を示す

図-2 切断順序

3. 素線切断によるひずみおよび張力の変動

3. 1 素線のひずみ

中央部および端部における素線の切断に伴う残存素線（図-2中のXの素線）のひずみ変化を図-3(a)および(b)にそれぞれ示す。比較のためにロードセルで計測した張力変化を残存素線数で除した値から求められるひずみ値を素線ひずみの平均値として図中に示す。

中央部の素線Xのひずみは、図中の6本目切断時まで中央部で切断した素線の張力を同じ断面内の残存素線が引き継ぐかたちで、ほぼ平均値と一致したひずみで増加（引張）している。図中の7本目切断時に平均値との差が広がり、 400μ 程度小さなひずみとなった。その後、端部の切断に伴い図中の15本目切断まで平均値との差を維持した状態でほぼ同じ減少量を示した。

端部の素線Xのひずみは、中央部切断時はほぼ平均値と一致したひずみで低下（圧縮）を示した。その後端部で切断した素線の張力を残存する素線が引き継ぐかたちで素線Xのひずみは増加（引張）したが、その増加の割合は10本目までは平均値の4倍程度であった。

3. 2 素線ひずみの計測結果に関する考察

素線の付着条件はケーブル内の素線の配置状況により異なる。切断の初期段階ではグラウトとの接触面積が比較的大きい外側に配置された中央部の素線を切断している。この段階では素線間でほぼ均等に張力を負担していたと考えられる。その後、グラウトとの接触面積の小さい内側に配置された素線を含む図中の7本目の切断に伴い、素線間の負担割合のバランスが崩れ、ひずみの大きい素線が存在するようになり、結果的に中央部の素線Xのひずみ変化は平均値を下回ったと考えられる。

端部の素線Xのひずみ変化が8本目切断以降平均値を大きく上回るひずみレベルとなった理由は、ほかの素線のひずみ増加が小さかったためと考えられる。端部切断時にはすでに中央部で切断済みの素線も切断時の残存素線として、端部で切断した素線の張力を引き継いでいる。仮に付着定着には限界があり、付着定着による応力伝達ではすべての張力を負担できないとすれば、端部切断時にすでに

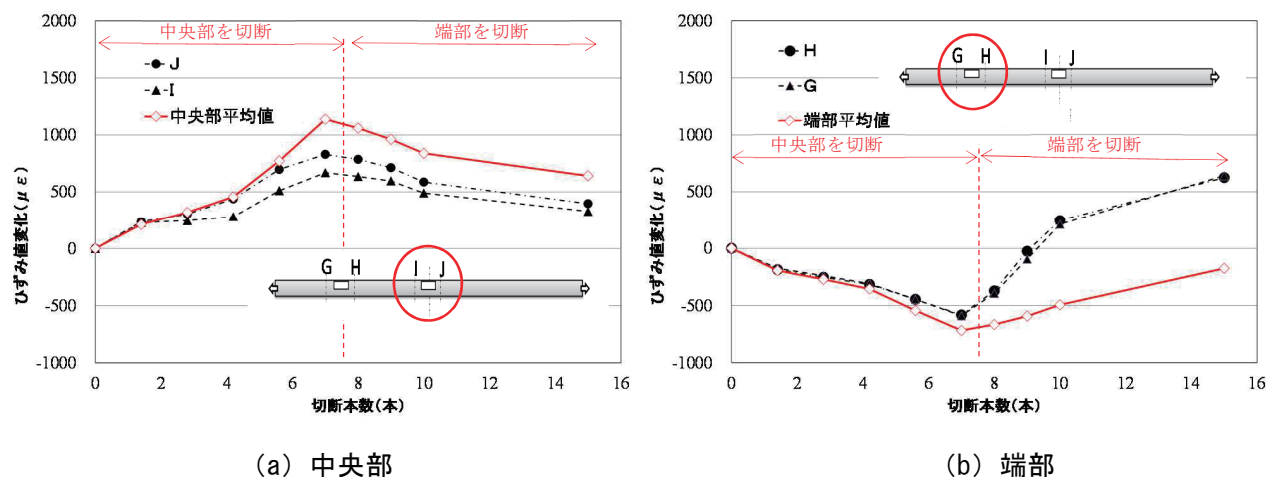


図-3 素線ひずみの変化

中央部で切断済みの残存素線の端部断面内でのひずみ増加は小さくなり、結果的に全長にわたり切断していない素線 X のひずみ増加が大きくなることと辻褃が合う。端部の素線 X の 11～15 本目切断の間のひずみ増加は 8～10 本目のひずみ増加量の半分以上程度に減少している。11～15 本目に切断した素線は中央部で切断していた素線であり、これらの素線が端部で負担していた張力の一部が中央部切断時に付着定着されずに抜けていて、ほかの素線よりも小さいひずみとなっていたとすれば、11～15 本目切断の間のひずみ増加量は 8～10 本目切断時と比べて小さくなる。

一方で、改めて中央部の 8 本目以降切断時の素線 X のひずみと平均値との関係に着目すると、端部で切断している素線には中央部で切断していない素線⑧、⑨を一部含んでいるが、それにもかかわらず両者の差は一定の関係で減少している。つまり、中央部の素線間で負担していた張力は減少傾向の範囲では、その素線の一部を端部で切断しても負担バランスが変化していないことを示している。この結果は素線のグラウトへの定着長として、中央部切断箇所周辺と端部切断箇所周辺とがそれぞれ独立して存在していることを示していると考えられる。また、張力が増加しない範囲では、一度グラウトに定着された各素線の付着定着は、安定して維持されることを示している。

既往の研究では、素線切断時にすべての張力がグラウトにより付着定着されたとしても、付着定着に伴う付着切れ範囲の存在により、ケーブルの張力が低下することを示した³⁾。しかしながら、この様にすでにほかの部分で一部の素線が切断されているケーブルにおいて、別の箇所の素線が切断する時に生じる素線間のひずみ増加量の違いや切断する素線の違いによる残存素線のひずみ増加量の違いが存在することは、グラウトされているケーブルが素線の切断に伴う張力のすべてがグラウトへ付着定着されるのではなく、一部がスリップして張力が抜けている可能性があることを示していると考えられる。

4. グラウトを有する斜材の端部における張力低下の考察

4. 1 既往の研究結果について

既往の研究⁴⁾では、グラウトが充填されている PC 鋼材の素線切断に伴う張力低下について、図-4 に示すように切断に伴う付着切れ範囲を完全付着切れ範囲として切断箇所から $x/2$ 離れた位置で定着具のように完全定着された両端固定されたモデルを用いて考察している。その結果、付着切れ範囲では残存素線が切断素線の張力を引き継ぐ事により、ひずみが増加して PC 鋼材が伸びるが、付着切れ範囲の両端では PC 鋼材が両端固定であるため、付着切れ範囲での伸び分だけ圧縮する関係にあることを用いて式(1)を導いている。この式は素線切断時にすべての張力がグラウトにより完全に定着されたとしても、切断に伴う付着切れ範囲 x とケーブル長 l の比 x/l に応じて張力が減少することを示している。

$$\frac{T_n}{T_0} = \frac{1}{1 + (A_0/A_n - 1)x/l} \quad (1)$$

T_0 : 切断前の張力, T_n : 素線 n 本切断した時の張力,

A_0 : 切断前の断面積, A_n : 素線 n 本切断した時の断面積,

l : 鋼材を固定している反力壁の定着端距離, x : 切断による付着切れ長さ

既往の研究⁴⁾では、素線切断時の張力の一部が付着定着されず、スリップして張力が抜ける可能性に

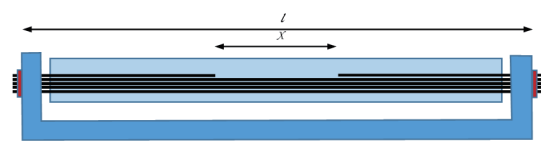


図-4 切断部のモデル

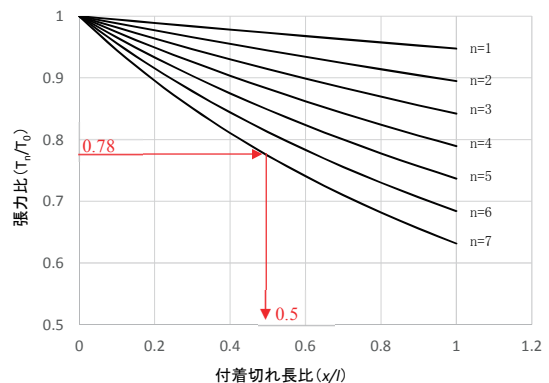


図-5 付着切れ長と張力低下の関係

ついて述べているが、高次振動法による張力測定での素線破断検出の可否の考察に対して、より厳しい評価となる様に、完全に定着されている場合の付着切れ長を示している。この結果、仮に中央部 7 本の素線の切断に伴い式(1)に従ってグラウトに完全に定着しているとすると、 T_7/T_0 は 0.78 (T_0 :470kN, T_7 :356kN) となり、この値から逆算される x/l は図-5 に示す通り 0.5 となるため、付着切れ長は $(0.5 \times 6.6)=3.3\text{m}$ となるとしている。

4. 2 端部切断時の張力低下について

中央部での切断に引き続き端部で素線を切断した時のケーブル全体の張力の変化を図-6 に示す。端部素線を 3 本切断した 8~10 本目切断時までの張力低下量は、中央部素線を切断した 1~7 本目切断時までの張力低下量とほぼ同じで、直線的に低下している。この結果から、端部素線切断時でも中央部素線切断時と同じく必要な付着長が確保できており、付着

定着長は端部切断箇所からグラウト端部までの距離より短い、つまり完全定着を前提として算出された $x=3.3\text{m}$ よりも小さくなると共に、素線切断時の張力の一部がスリップして張力が抜けている可能性が示された。そこで、想定されるモデルに合わせて付着定着長を変化させて、それに対応する付着切れ長 x に対し、算出される張力低下量をグラウトへの付着定着に伴って生じる付着切れに起因する張力低下量（以下、付着切れに起因する低下とする）として算出することとした。次に式(2)に示すように、この付着切れに起因する低下量と実際の張力低下量との差を PC 鋼材のスリップによる張力低下と仮定して、素線破断時に付着定着されずに PC 鋼材のスリップにより低下した張力量（以下、スリップに起因する低下とする）を試算し、その結果を表-3 に示す。

$$T_0 - T_n = \Delta T_{un} + \Delta T_{sn} \quad (2)$$

T_0 : 切断前の張力, T_n : 素線 n 本切断した時の張力, ΔT_{un} : 素線 n 本切断した時の張力低下のうち付着切れに起因する低下, ΔT_{sn} : 素線 n 本切断した時の張力低下のうちスリップに起因する低下

なお、式(1)の x は定着具で定着されている様な完全定着モデルを想定しており、付着定着の場合は定着端からの長さに応じてひずみが減少する。この結果、図-5 に示された付着切れ部の伸び量は付着定着部におけるひずみ減少量の積分値となる。PC 鋼より線の付着定着は、道路橋示方書に示されているように二次放物線に従いコンクリートにプレストレス力が導入されるとされている⁵⁾。また、既往の研究^{たとえ6)}ではコンクリートに埋め込まれた鋼材の付着応力、すべり、ひずみ関係が示されているが、本検討で用いた付着が不完全な平行線ケーブルの素線のひずみの低下状況はこれらとは異なると考えられる。そこで、簡便のため直線でひずみが低下するとみなして、考察を行うこととした。直線でひずみが低下する場合の付着定着部範囲の素線の伸び量は、付着定着長の半分の位置で完全定着されている場合の付着切れ部の伸び量と等価となる。付着定着は素線切断部の両側で行われており、式(1)の x にあたる見かけの付着切れ長との関係は、切断部周辺で切断に伴い完全に付着切れが生じた長さ（本実験では図-1 に示すグラウト切欠き部）に付着定着長を加えた長さとなる。

表-3 には、付着切れ範囲として素線径の 65 倍とした場合、ケーブル束径の 65 倍とした場合およ

表-3 付着定着長と ΔT_{un} および ΔT_{sn} の関係

想定する付着定着長	x	ΔT_{un}	ΔT_{sn}
(a)素線径の 65 倍+切欠長	555m	5.6kN	22.0kN
(b)端部距離+切欠長	850mm	8.6kN	19.0kN
(c)ケーブル束径の 65 倍+切欠長	2083mm	20.5kN	7.1kN
(d)張力から逆算	3300mm	27.6kN	0kN

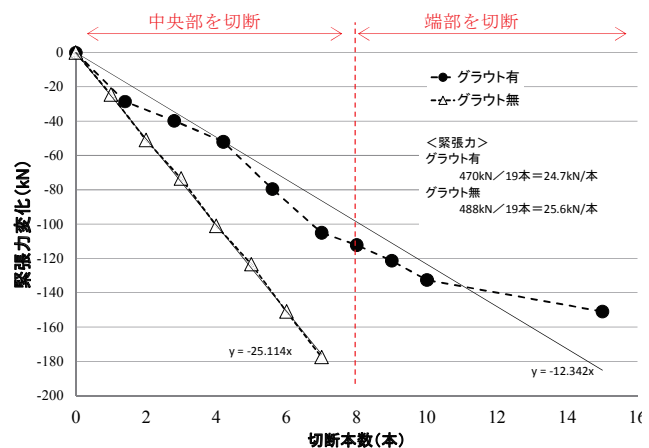


図-6 緊張力の推移

び、端部切断時の端部までの距離とした場合について、式(2)を基に ΔT_{um} を算出した結果を示している。今回の検討結果だけでは素線の付着定着長は明らかにされていないため、素線破断に伴う張力低下をグラウトとの付着切れに起因する低下と内部素線のスリップに起因する低下との明確な分離は困難であるが、ひずみの計測結果ならびに張力低下状況から推測し、付着定着長は端部切断箇所から鋼材端部までの距離より短いと考えると、表-3 中(b)に示した通り、70%程度の張力が鋼材間のスリップに起因して張力低下していると考えられる。

実際の橋梁の斜材は今回の試験体に比べ長さ l が長い。既往の研究³⁾では、鋼材間のスリップがまったくなければ、5%の張力変動を検出可能な場合、100m のケーブル長に対しては、72%の素線が破断した段階で検出可能としていた。しかしながら本検討により、鋼材間のスリップによる張力低下 ΔT_{sn} が支配的である可能性が示された。ケーブル長に関係なく鋼材間のスリップによる張力低下が支配的であれば、より少ない素線破断の検出が可能であると考えられる。以上を踏まえて今後、16m 程度のケーブル長の供試体についても同様の検討の実施を予定している。

5. 結論

グラウトが充填された斜材を模した試験体について、中央部に加えて短い定着長しか確保できないケーブル端部で破断させた時の張力および鋼材のひずみの変動について検討を行い、以下の知見が得ることができた。

- 1) グラウトとの接触面積の小さい内側に配置された素線の切断時やすでにほかの部分で一部の素線が切断されているケーブルの別の箇所の素線を切断した時、十分な付着定着が得られない素線が存在することにより、素線間の負担割合のバランスが崩れ、ひずみの大きい素線が生じる場合がある。
- 2) ひずみの計測結果ならびに張力低下状況から推測すると付着定着長は端部切断箇所から鋼材端部までの距離より短いと考えられる。
- 3) 素線切断に伴う張力低下量をグラウトとの付着切れに起因する低下量と内部鋼線のスリップに起因する低下量の合計と仮定し、付着定着長から逆算して内部鋼線のスリップに起因する低下量を推定する方法を提案した。この方法によるとグラウトが充填された斜材ケーブルの素線切断に伴う張力低下のうち 70%程度の張力が鋼材間のスリップに起因して張力低下していると考えられる。

筆者らは今後も継続してグラウトが充填された斜材について、素線の破断に伴う付着切れやスリップなどの現象の検討を行う予定である。

本研究は、中日本高速道路㈱で実施した「斜張橋等の維持管理に関する検討会（座長：藤野陽三名 名誉教授）から貴重なご意見をいただいた。ここに記して感謝いたします。

〔参考文献〕

- 1) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，平成 26 年 6 月
- 2) 若林 大，服部 雅史，野島 昭二，立松 秀之：斜張橋斜ケーブルの張力測定による健全性の評価，第 27 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.613-616，2018 年 11 月
- 3) 前田 友章，徳永 光宏，田所 敏弥，谷村 之裕：鋼材破断時の付着特性に着目した P C 梁の曲げ特性に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.529-534，2010 年
- 4) 小野 聖久，服部 雅史，長田 光司，野島 昭二：斜材ケーブル破断時の張力変動に及ぼすグラウト充填の影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.2，pp.517-522，2019 年
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋・コンクリート部材編，平成 29 年 11 月
- 6) 島 弘，周 礼良，岡村 甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力 - すべり - ひずみ関係，土木学会論文集，No.378.V-6，1987 年 2 月