

鉄筋とコンクリートとの付着

2019 年 1 月 岡村 甫 記

はじめに

大学院に進学した当時、「付着と定着」は私の最大の関心事でした。それまでは鉄筋として丸鋼が使われていたのに対し、異形鉄筋が使われ始めたからです。鉄筋コンクリートが成立するためには、鉄筋とコンクリートとが一体として働く必要がありますが、鉄筋との付着が十分でない丸鋼にフックを着けて端部を定着した鉄筋コンクリートが長く使われてきました。疲労強度が低下する異形を鉄筋に設けることのメリットはどの程度のものであるかを解明する必要があったからです。

1962年に最初の論文〈1〉を発表してから1987年に最後の論文〈2〉を発表するまで、付着と定着に関する研究を続け、私なりにこの問題を理解できるようになりました。以下に、私が研究したことを簡単に述べることにします。なお、学生に対する講義内容を1982年に本にまとめた「コンクリート構造の限界状態設計法」〈3〉に、「付着および定着」について1章を設けています。以下の記述には、そこに記されているものと同じ内容を含んでいます。

1. 異形鉄筋の表面形状

コンクリートとその補強材である鋼とが、共同して外力に抵抗するためには、両材料間で応力が伝達される必要がある。鉄筋の応力度に変化をもたらすには、コンクリートと鉄筋との境界面に沿って、せん断応力(付着応力と呼ぶ)が作用する必要がある。異形鉄筋の場合、その付着応力の主体は、鉄筋に設けられた凹凸、すなわち「ふし」である。

異形鉄筋はふしに作用する支圧力が周りのコンクリートに伝達されることによって、その付着力が発揮される。異形鉄筋のふしについては、その高さ、間隔、鉄筋軸とのなす角度等に関して一定の規定が設けられているのは、付着力確保のためである。

A.P.Clark は、1946年に ACI に公表した論文 〈4〉で、ふし間のせん断面積とふしの支圧面積との比が付着性能に重要な影響があることを指摘し、良好な付着性状を示す鉄筋はその比が1以下であると述べている。その他広範な研究の結果、ふしの高さと間隔とを適切に選ぶことが、付着抵抗を高めるために最も重要なことが明らかにされ、ふしの配置を初期のものよりも密にした異形鉄筋が製造されるようになった。また、ふしと鉄筋軸とのなす角度が過少となると付着抵抗が著しく減ずることも示された。それらの成果に基づいて1950年に異形鉄筋のふしに関する ASTM 規定 〈5〉が刊行された。図1に示す JIS G3112鉄筋コンクリート用棒鋼 〈6〉のふしに関する規定は ASTM のこの規定に準じて定められている。

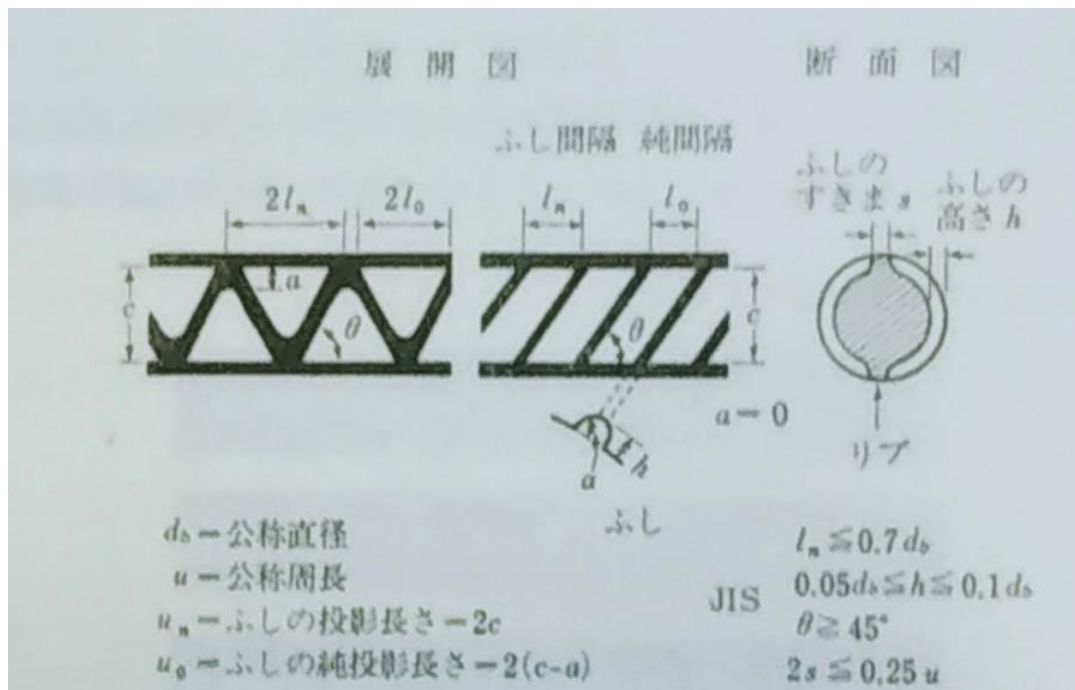


図1 異形鉄筋の表面形状を構成している各要素と JIS 規定<6>

支圧面積係数

異形鉄筋の付着能力を評価する指標として、支圧面積係数(BA)とせん断面積係数(SA)の二つの無次元量を1973年に公表した〈7〉。

$$\text{支圧面積係数(BA)} = (h_e / \ell_n) * (u_0 / u) \quad (1)$$

h_e : ふしの有効高さ、ふしの高さ(h)と $0.2\ell_n$ の小さいほうの値

ℓ_n : ふしの間隔

u_0 : ふしの投影長さ

u : 公称周長

支圧面積係数は、式(1)に示すように、ふしの有効高さと間隔およびふしと鉄筋軸との角度の関数である。ふしの間隔に比べて、ふしの高さが高すぎると、ふしが有効に働かなくなることを考慮して、ふしの有効高さを定義している。

ふしの間隔が狭いほど、ふしの高さが高いほど、支圧面積係数は大きくなり、コンクリートとの付着性能は良くなるのであるが、ふしの高さに比してその間隔があまりにも小さくなると、ふしの根元とコンクリート(モルタル)はふしから支圧応力を受けても、これを周りのコンクリートに伝達することが困難となり、ふしの高さ全部を有効に生かせなくなる。そこで、ふしの高さがその純間隔の20%以上となる場合には、支圧面積係数の計算に当たって、ふしの有効高さとしてふしの純間隔の20%としたのである。

異形鉄筋の付着はふしの支圧力が大部分を負担しているので、支圧面積係数によって、その付着性能を評価できる。したがって、異形鉄筋の付着性能を一定水準以上に保つための規定としては、ふしの高さ、間隔、すきま等に関して個々の制限を設けるほかに、支圧面積係数にも制限を設けるのが望ましい。市販されている異形鉄筋の支圧面積係数はおおよそ 0.06 である。一方1987年当時開発された直径51mmの鉄筋の付着面積係数は 0.15 を超えており、著しく付着性能が改善されたものである〈8〉。当時の実験結果を適用する場合には、このことを考慮する必要がある。

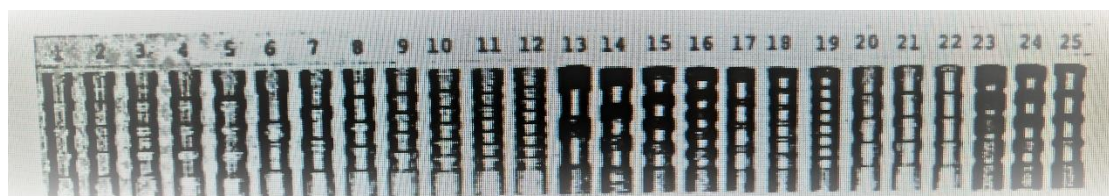


図2 丸棒を切削して、ふしの高さと間隔を変えた異形棒鋼

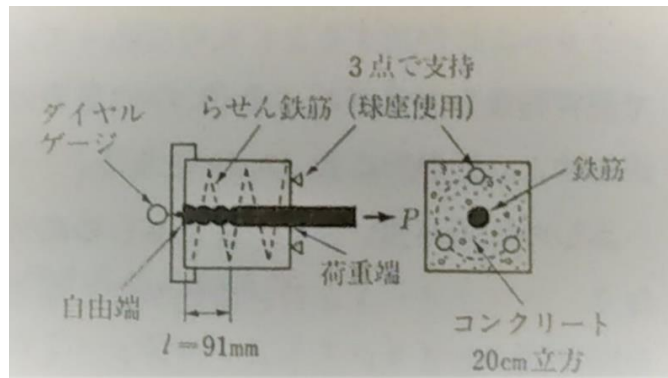


図3 供試体および試験方法

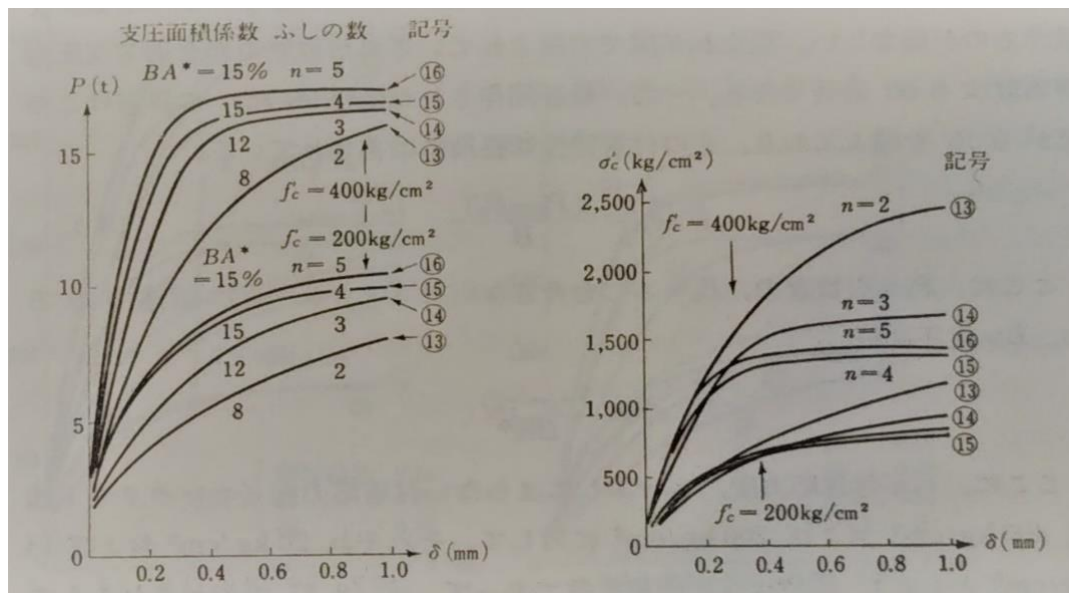


図4 引き抜き力と相対変位との関係

図5 支圧応力度と相対変位との関係

これらのことを確認するために、丸棒を切削して、ふしの高さの間隔を変えた異形棒鋼（図2）を作成し、引き抜き試験（図3）を行った。

引き抜き力と自由端における相対変位との関係を図示した一例が図4である。この図はふしの高さを一定とし、ふしの数すなわちふしの間隔を4種に変えた場合の結果である。ふしの数が少なく、間隔が大きいほど、ふしに作用する支圧応力度が大きくなるために、相対変位が大きくなるのである。

この結果を、支圧応力度 σ'_c と相対変位 δ との関係に描きなおすと図5が得られる。支圧応力度の定義は式(3)である。

引き抜き力の一部は、粘着力や摩擦力によって伝達されるので、これを考慮して、全引き抜き力からある一定の値を差し引いたものが支圧力としてコンクリートに作用している。式(3)は支圧面積係数を用いると、式(4)となる。

$$\sigma'_b = (P_b - P_0) / B \quad (3)$$

ここに、

P_b : 引き抜き力

P_0 : ふしを介さないでコンクリートに伝達される力

B : 支圧面積

$$\sigma'_b = (\tau_b - \tau_0) / BA \quad (4)$$

ここに、

τ_b : 付着応力度

τ_0 : ふしを介さない付着応力度

(コンクリート圧縮強度20および40MPaに対して、1.4および2.0 MPa)

相対変位が小さく0.3mm以下の範囲では、ふしの数nに関わらず、相対変位は支圧応力度と一義的な関係がある。このことは、異形鉄筋の付着性能は、支圧面積係数によって評価できることを意味しているのである。

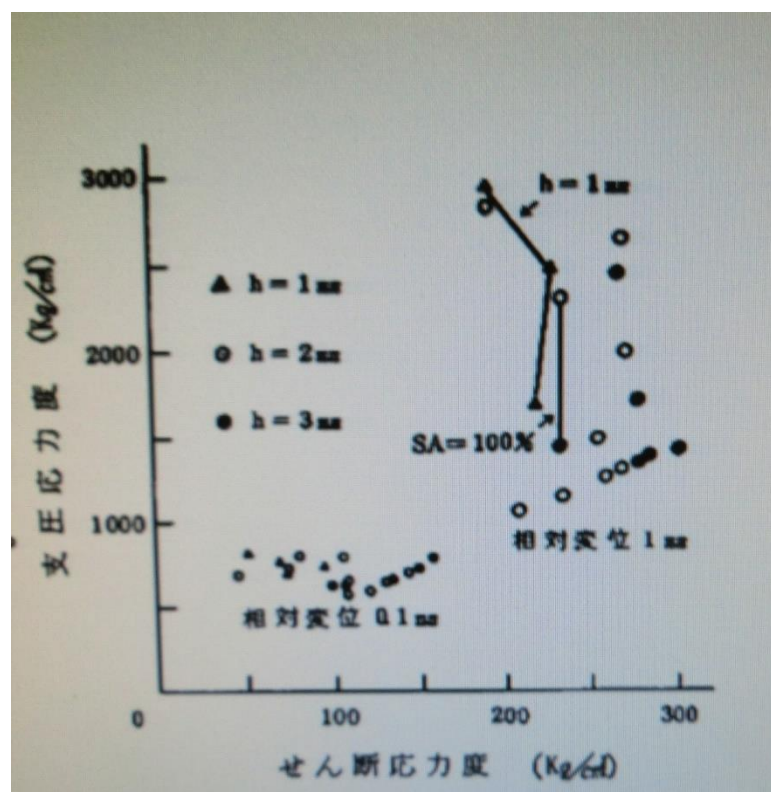


図6 支圧応力度・せん断応力度と相対変位との関係($f_c' = 40\text{MPa}$)

相対変位が大きくなると、支圧応力度よりもむしろせん断応力に依存することが、図6に示されている。ふしとふしの間にあるコンクリートに作用する局所的なせん断応力度がある限度を越えると、相対変位が急激に増加するためである。

せん断応力度は、式(4)において、支圧面積係数の代わりに、式(5)の**せん断面積係数**を用いて求めたものである。せん断面積係数は、極端にふしの間隔を小さくする、ふしとリブとを離すなど、特殊な表面形状としない限り、通常の異形鉄筋の範囲では大差のない値であり、実用的にはあまり注意を払わなくともよい。

$$\text{せん断面積係数}(SA) = (\ell_o / \ell_n) * (u_o / u) \quad (5)$$

ℓ_o : ふしの純間隔

なお、ふし側面の傾斜角およびふしと鉄筋軸とのなす角が付着特性に及ぼす影響は、いずれも45度以上であれば無視できる程度であることも、この一連の実験によって確認できた。

2. 付着によるコンクリートの割裂

ふしの支圧による力は、鉄筋の周りのコンクリートに、リング状の引張応力をもたらす成分を持っている。そのため、異形鉄筋の付着・定着破壊は、ほとんどの場合、この引張力に抵抗の弱い断面でコンクリートが鉄筋軸に沿って引張破壊することによって起こる。

鉄筋周辺のコンクリートに作用する応力状態についてのエポックは、1965年に発表した後藤幸正等の論文＜9＞である。鉄筋コンクリート供試体の両引き試験を行い、赤インクを注入し、鉄筋周辺に発生した微小ひびわれを写真に撮ったのである。1968年の日米セミナーの席上での後藤博士の発表に注目した Ferguson 教授は、ACI 上に公表する労をとり、この研究成果がいわゆる「GOTOs CLACK」として、世界中に広まったのである＜10＞。

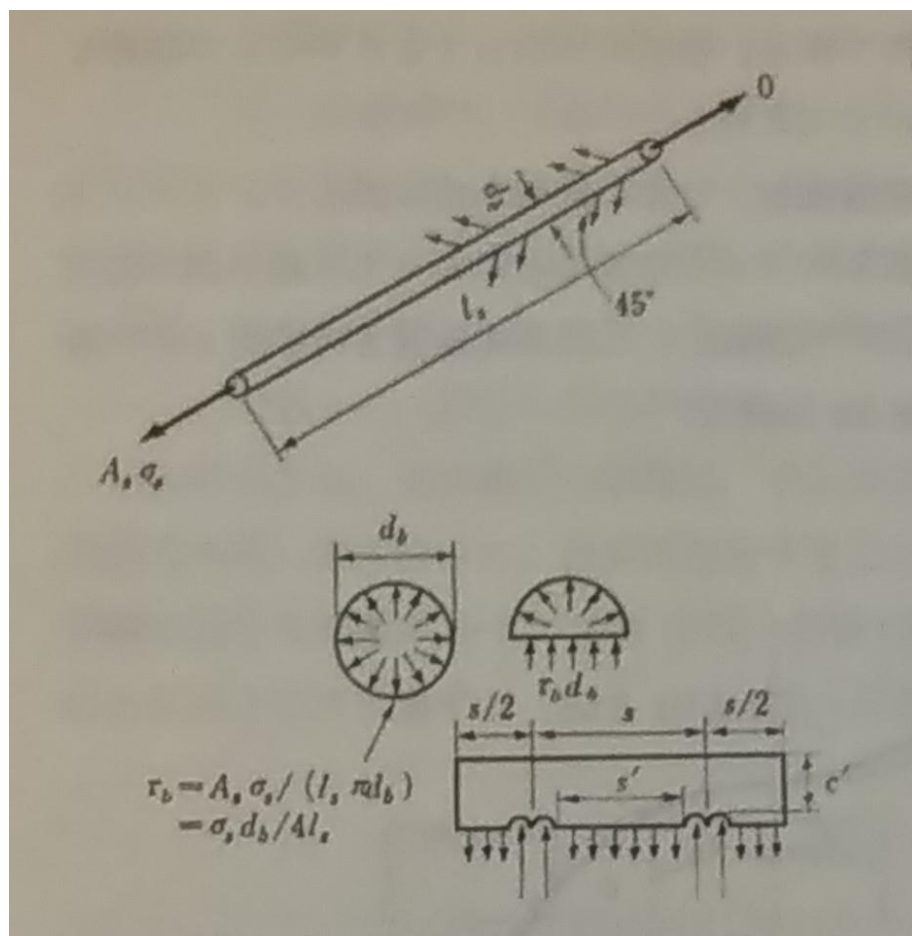


図7 異形鉄筋が周辺のコンクリートに及ぼす力

Ferguson 教授は、自らの著者＜11＞に以下のように引用している。「鉄筋周辺に発生する微小ひびわれは、主引張応力によるものであって、その角度は主応力の方向を示している。したがって、この結果によって、支圧応力の方向並びに大きさが予測できる。この微小ひびわれの鉄筋軸とのなす角度は予想以上に大きく45度以上にもなっている。

このことは、円周方向に割裂をもたらす成分が、支圧力の軸方向成分以上であることを示している。後藤教授の業績は、それがはりの鉄筋や重ね接手にも拡張されると、異形鉄筋による割裂力を計算する可能性が開け、鉄筋の付着についてのより合理的な設計法が確立される端緒となるものである。」Fergusonはこの結果に基づき、支圧力が鉄筋軸と45度の角度をなすと仮定して、重ね接手における割裂破壊を論じている（図7）。

3. 局部付着・局部すべりの関係

鉄筋の応力度が鉄筋軸方向に変化するためには、鉄筋とコンクリートとの間に、付着応力が作用する必要がある。一定断面の部材に引張力 T が作用する場合、 Δx だけ離れた2点の間で、引張力が ΔT だけ変化していると、鉄筋の引張応力度 $\Delta \sigma_s$ は $\Delta T/A_s$ だけ変化する。ここに、 A_s は鉄筋断面積である。鉄筋引張力の変化 ($A_s \Delta \sigma_s$) は鉄筋周長 u と Δx を乗じた鉄筋表面積 $u \Delta x$ に作用する付着力と釣り合うので、作用すべき付着応力は式(6)で表される。

$$\tau_b = (\Delta T / \Delta x) / u \quad (6)$$

$$\tau_b = (dT/dx) / u \quad (7)$$

鉄筋コンクリート構造の解析において、この局部付着応力をその位置における鉄筋とコンクリートとの相対変位 S (局部すべりと呼ぶ) との関数で表すことが流行していた。有限要素法を最初に鉄筋コンクリート部材に適用した Ngo & Scordelis <12> は、両者の関係を線形と仮定し、続いて、A.H. Nilson <13> は非線形の関係を用いた。両者の関係が鉄筋軸方向に、一定であると仮定すれば、解析的な方法にとって極めて有用であるので、多くの研究者によって各種の定式化が行われた<14>。

しかし、それらは、付着長の極端に短い実験から導かれたものであり、一般的な適用に疑問を感じていた。そこで、1985年に東京で行われた日米セミナー(写真1)の席上で、通常の異形鉄筋とそれと全く同じ表面形状のアルミニウムで作った異形棒鋼とを用いて引抜け試験を行うと、付着―すべり関係は異なるかどうかを出席者に質問した。その時、ある専門家は同じであると答え、別の専門家は非常に興味があると答えた。

実験は、弾性係数が小さいアルミニウム棒の場合、同じ付着応力度に対するすべり量 S (D は棒の直径) に対する付着応力 Bond stress が、鋼棒の場合とは異なり、明らかに小さい値を示した(図8)。補強材の弾性係数が付着応力とすべり量との関係に影響を及ぼすということは、ひずみの値によって、この関係が異なることを意味している。

島 弘 は、後に、ひずみ ε の影響を採り入れて、付着―すべり関係を表す式(8)を提案した<15>。この式による計算値は、図8に実線で示すように、この現象をも上手く表現できているだけでなく、鉄筋降伏後にも適用できるものである<2>。

$$\tau_b / f'_c = 0.73 (\ln(1 + 5s)) / (1 + \varepsilon \times 10^5) \quad (8)$$

ここに、 $s=1,000 S/D$

f'_c : コンクリートの圧縮強度、

D : 鉄筋直径



写真2: 日米セミナー参加者(1985.5)

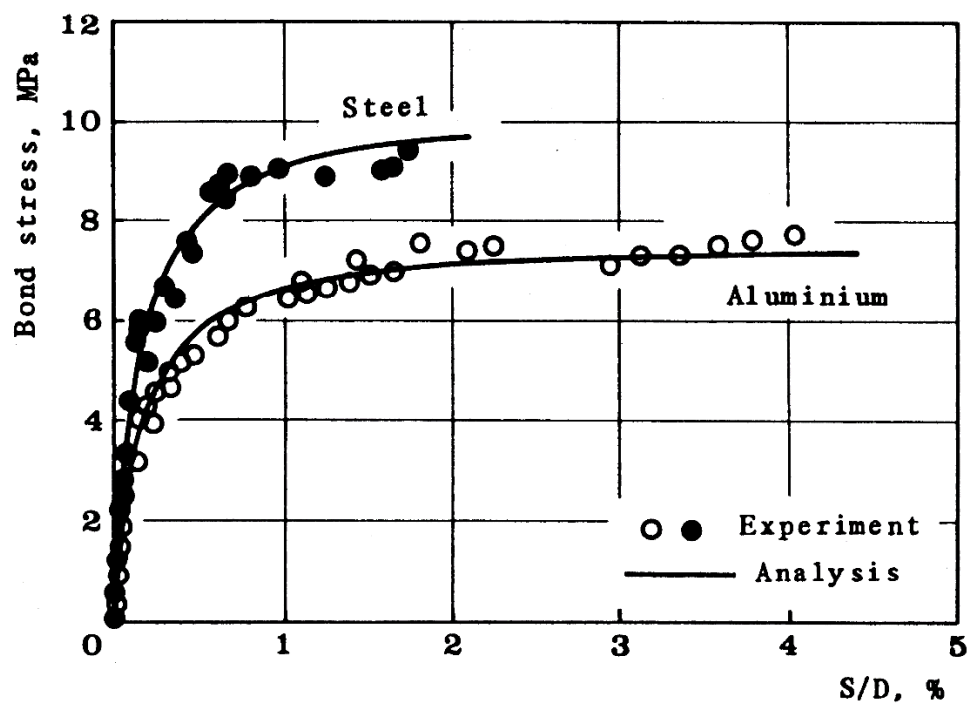


図8 アルミニウム棒(弾性係数72MPa)と鋼棒(190MPa)との比較

付着—すべり関係が、鉄筋軸のいかなる位置においても、一定の関係にある場合も存在する。それは、定着長が十分に長く、ひずみが0である位置におけるすべりがない場合である。この場合には、すべり量とひずみとが一義的な関係にあり、付着応力をすべり量のみによって表すことができる。図9および図10は、その実験結果を示したものである。

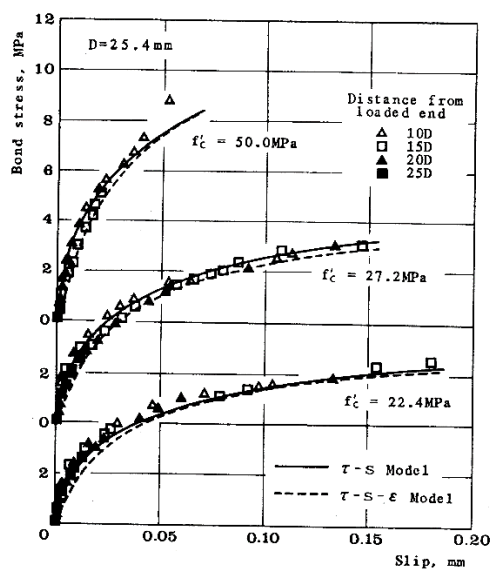


図9 付着すべり関係が一義的に定まる場合(コンクリート強度を変えた実験)

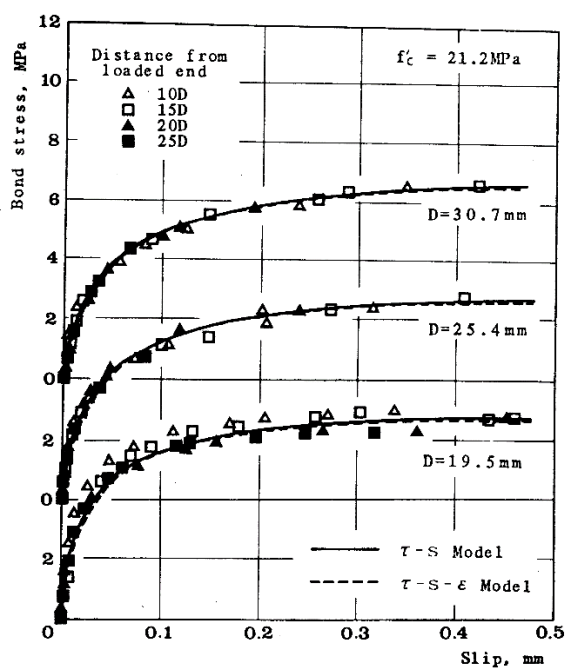
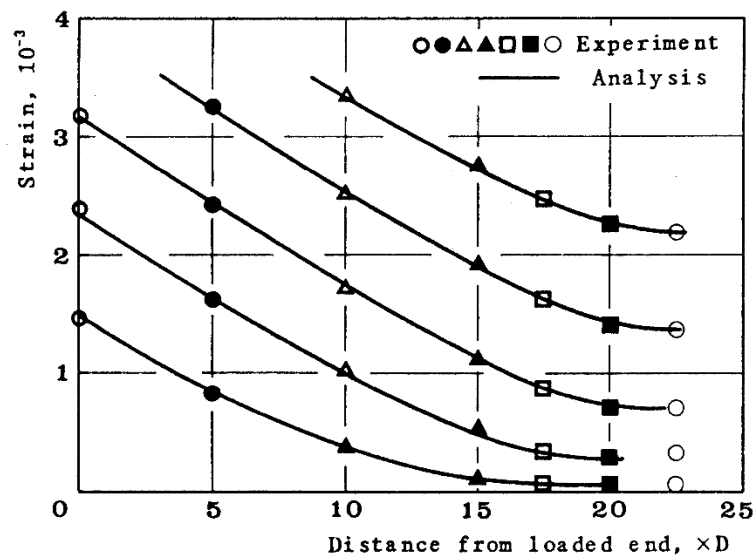


図10 付着すべり関係が一義的に定まる場合(鉄筋径を変えた実験)

ひずみが0の位置においてすべりが存在する埋め込み長さが短い場合には、鉄筋位置に沿って、付着—すべり関係は一義的には定まらない。また、コンクリートに埋め込まれた鉄筋を両側から引張ると供試体中央では鉄筋とコンクリートとにずれは生じない。すなわち、すべりは0である。しかし、その位置でのひずみは、必ずしも0ではなく、供試体が短い場合には引張力の増加に伴い増加する(図11)。この場合にも、鉄筋軸方向の位置によって、付着—ひずみの関係は一定ではない。いずれの場合においても、式(8)によって実験結果を説明できるのである。



これらの要約を1986年9月に南京で開催された国際シンポジウムで発表した時のことは忘れられない。私の講演の前に、当時ヨーロッパコンクリート委員会の会長で、付着についての造詣が深い T.P.Tassios 教授が講演された。私の講演に対して、「あなたは私(Tassios)の講演が間違っているというのか？」と質問された。私は、「Yes」と答え、彼が納得したと思った。

このシンポジウムは、コンクリートに関連する国際シンポジウムが中国で開催された最初である。南京工科大学の丁大鈞教授が中国の国際化を図るために、多大な努力を払って開催にこぎつけたものであった。丁大鈞教授を見ていると、恩師國分正胤先生が日本の国際的地位を引き上げるためにあらゆる努力をされていたことを思い出す。



写真3 発表の様子



写真4 丁大鈞教授と



写真5 開会式にて(中央に丁大鈞教授、その隣に Tassios 教授)

参考文献

1. 國分正胤・後藤幸正・岡村 甫:異形鉄筋とコンクリートの付着に関する研究、コンクリート・ライブラリー第2号、1961.12, pp.1-13
2. 島 弘・周 禮良・岡村 甫:異形鉄筋の鉄筋降伏後における付着特性、土木学会論文集、第 378 号、V-6、 1987.2, pp.213-220
3. 岡村 甫:コンクリート構造の限界状態設計法、コンクリート・セミナー4、共立出版、1978.11
4. Clark,A.P.:Comparative Bond Efficiency of Deformed Concrete Reinforcing Bars, Journal of ACI, Vol.18, No.4, 1946.12, pp.
5. Tentative Specification for Minimum Requirements for the Deformation of Deformed Bars for Concrete Reinforcements, ASTM Designation A 305.
6. 鉄筋コンクリート用棒鋼, JIS G 3112, 1975
7. 國分正胤、岡村 甫:コンクリートと補強材との結合機構に及ぼす補強材の表面形状の影響、日科技連、第6回複合材料シンポジウム、1973.7

8. 國分正胤、岡村 甫：太径鉄筋の使用に関する研究、土木学会論文報告集、第202号、1972.6
9. 後藤幸正、植田紳治、満木泰郎：鉄筋コンクリート部材引張部のひびわれに関する研究、土木学会コンクリート・ライブラリー、第14号、1965.12
10. Goto,Y : Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars, Journal of ACI, Vol. 68, No. 4, 1971.4
11. Ferguson, P.M : Reinforced Concrete Fundamentals, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1973
12. Ngo,D. and Scordelis, A.C : Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams, Journal of ACI, pp.152-163, 1967.3
13. Nilson, A.H. : Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method, Journal of ACI, pp757 - 766, 1968.9
14. 森田司郎・角 徹三：繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究、日本建築学会論文報告集、第229号、pp.15 - 24, 1975.3
15. 島 弘・周禮良・岡村 甫：マッシブ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 第378号/V—6、pp165-174, 1987.2