

委員会報告 コンクリートと補強材の付着定着挙動と構成則の利用研究委員会

島 弘^{*1}・金久保 利之^{*2}・内田 裕市^{*3}・渡辺 健^{*4}

要旨：本研究委員会では、付着定着挙動をミクロ的に捉え、特に FEM における付着構成則の構築とその適用可能性の検討を視野に入れつつ、付着定着挙動に関する情報整理とその利用に関する提案を行うことを目的とした活動を行った。基本 WG [付着問題に関する様々な話題を整理し、紹介するための WG]、WG2：FEM 構成則 WG [$\tau-s$ 関係を与えるための FEM メゾスケール解析を行う WG]、WG3：FEM 部材 WG [$\tau-s$ 関係を取り入れた FEM により、部材実験を解析する WG] での活動報告および研究成果の一部を紹介する。

キーワード：付着構成則、付着基礎式、文献調査、FEM、RBSM、付着割裂、メゾスケール

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材の脆性的な破壊の一つに付着破壊・定着破壊が挙げられるが、ミクロ的な応力の伝達、各材料の構成則、マクロレベルでの連鎖的破壊等、種々の要因が影響し合っており、その説明は非常に難しいものとなっている。近年、有限要素法 (FEM) は鉄筋コンクリート部材の挙動説明における有用なツールの一つとなっているが、付着定着の挙動モデルに多大な影響を受け、特に付着軟化域での設定が解の精度に大きく関与する。本委員会では、付着定着挙動をミクロ的に捉え、特に FEM における付着構成則の構築とその適用可能性の検討を視野に入れつつ、付着定着挙動に関する情報整理とその利用に関する提案を行うことを目的として、研究活動を行ってきた (2009 年度～2010 年度)。本委員会の委員構成を表-1 に示す。

本委員会の活動内容は、大きく分けて2つの段階を経

ている。最初の段階は、各委員の付着や定着に関する問題意識と分野 (土木・建築) の違いによる着目点の相違および付着定着問題に関する最新の研究の情報交換を目的として、委員相互による研究内容の紹介を行った。紹介内容は多岐に渡り、異形鉄筋の節形状まで詳細にモデル化した RBSM による解析結果や、逆対称曲げモーメント下における鉄筋コンクリート部材の付着割裂破壊の様子およびそれらの FEM 解析結果などが紹介された。

情報交換の中で議論され、また、委員の中で概ね了解されたキーワードとして「付着構成則」と「割裂時の付着応力 τ すべり関係」が挙げられる。「付着構成則」という表現はコンクリート工学分野の中でも未だ一般的ではないと思われるが、補強材と周辺コンクリートにおける付着応力 τ (せん断応力) と相対すべり s (せん断変形)、さらに場合によっては補強材の歪などとの関係を表現するものとして、委員会の中では一般的に用いら

表-1 委員構成

委員長	島 弘 (高知工科大学)		
WG1 (基本)	○金久保利之 (筑波大学) ※ ¹ 梶山健二 (芝浦工業大学) 高瀬裕也 (飛鳥建設) 松家武樹 (間組：～2010.12)	飯塚敬一 (東電設計) 近藤吾郎 (千葉大学) 谷村幸裕 (鉄道総合技術研究所) 八十島章 (筑波大学) ※ ¹	角 徹三 (日本福祉大学) 佐藤裕一 (京都大学) ※ ² 野間康隆 (間組：2011.1～)
WG2 (FEM 構成則)	○内田裕市 (岐阜大学) 中村 光 (名古屋大学)		
WG3 (FEM 部材)	○渡辺健 (鉄道総合技術研究所) 齋藤成彦 (山梨大学) 渡辺忠朋 (北武コンサルタント)	柏崎隆志 (千葉大学) 田嶋和樹 (日本大学)	金 裕錫 (東京大学) 牧 剛史 (埼玉大学)

○は WG 主査

※¹：WG4 (庶務) 兼任 ※²：WG3 (FEM 部材) 兼任

*1 高知工科大学 工学部社会システム工学科教授 工博 (正会員)

*2 筑波大学 システム情報工学研究科准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 岐阜大学 総合情報メディアセンター教授 工博 (正会員)

*4 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部副主任研究員 博士 (学術) (正会員)

れるようになった。また、「割裂時の付着応力-すべり関係」は、周辺コンクリートにひび割れが発生し、早期に付着応力が減少に転じる場合の付着構成則であり、周辺コンクリートの応力状態と付着構成則との関連づけが委員会活動の中での一つのキーワードともなった。

次の段階は、委員相互による研究内容の紹介を通して議論された内容をもとに、委員会としての具体的な活動を実施するためのワーキンググループ (WG) の設定である。議論の結果、次の4つのWGが組織された。

- ・ WG1: 基本WG [付着問題に関する様々な話題を整理し、紹介するためのWG]
- ・ WG2: FEM構成則WG [$\tau-s$ 関係を与えるためのFEMメゾスケール解析を行うWG]
- ・ WG3: FEM部材WG [$\tau-s$ 関係を取り入れたFEMにより、部材実験を解析するWG]
- ・ WG4: 庶務WG

本報告の2章から4章は、それぞれWG1からWG3の活動成果のエッセンスを取りまとめたものである。

2. 付着問題の整理と付着に関する文献・被害事例

2.1 付着問題に関する情報の整理と過去の文献

(1) 付着基礎式の歴史

鉄筋コンクリートの付着・定着強度を検証する実験は、遅くとも20世紀初頭の欧米で始められていた。しかしながら、付着すべりと材料変形の適合、および付着応力と断面内力の釣合いを理論的に定式化して計算する試みは容易に進捗しなかった。それは計算の煩雑さ、実験的検証の難しさに加え、研究成果の用途が限られていたことが理由と思われる。

今日、付着挙動を支配する基礎式として、式(1)で表わされる2階の微分方程式が用いられている (以下、付着基礎式と呼ぶ)。

$$\frac{d^2s}{dx^2} = \frac{4}{d_b} \left(\frac{1}{\rho_s E_s} + \frac{1}{E_c} \right) \tau \quad (1)$$

ここで、 E_s =鉄筋弾性係数、 E_c =コンクリート弾性係数、 d_b =鉄筋径、 ρ_s =鉄筋比である。

付着基礎式に関する研究の沿革を表-2にまとめる。その歴史は20世紀初頭まで遡るが、実験結果に基づいて精度と実用性が検証されるようになるのは1950年台以降である。ArnovljevićとBuflerは補強材応力に対して微分方程式を表示し、福田は付着応力に対して方程式を表現していた。これに対しRehmは、(1)式に示した s の2階微分と τ を関連付ける形で方程式を表示した。どの変数について微分方程式を表示しても同じことではあるが、Rehmにより示された $\tau-s$ 関係式の使用が、 $\tau-s$ 関係を擬似的な構成則として扱う流れを強めた可能性はある。

(2) 付着基礎式の再整理

本節では、あらためて、付着基礎式の整理を行う。補強コンクリートにおける補強材軸方向の位置を独立変数 x とする。付着問題を考えるときの未知数は、補強筋およびコンクリートに作用する力 ($P_b(x)$, $P_c(x)$)、応力 ($\sigma_b(x)$, $\sigma_c(x)$)、歪 ($\varepsilon_b(x)$, $\varepsilon_c(x)$) および付着応力 ($\tau_b(x)$) とすべり量 ($s(x)$) の8個である。また、定数は、補強筋およびコンクリートの弾性係数 (E_b , E_c , $n = E_b/E_c$)、断面積 (A_b , A_c , $p = A_b/A_c$) および補強筋周長 (ϕ_b) である。未知数の満たすべき条件は次の4つ(7式)である。

i) 材料の構成則

$$\sigma_b(x) = E_b \cdot \varepsilon_b(x), \quad \sigma_c(x) = E_c \cdot \varepsilon_c(x)$$

ii) 応力の定義

$$\sigma_b(x) = P_b(x)/A_b, \quad \sigma_c(x) = P_c(x)/A_c$$

iii) 力の釣合い条件 (平衡方程式)

$$\frac{dP_b(x)}{dx} = \tau_b(x) \cdot \phi_b, \quad \frac{dP_c(x)}{dx} = -\tau_b(x) \cdot \phi_b$$

iv) すべり量の定義 (変形の適合条件式)

$$s(x) = \int_{x_0}^x \varepsilon_b(x) dx - \int_{x_0}^x \varepsilon_c(x) dx + s_0 \quad (2)$$

なお、 s_0 は $x = x_0$ におけるすべり量である。

表-2 付着基礎式の沿革

年	研究者	研究概要
1909	Ivan Arnovljević	溶接またはリベット接合された鉄板について、接合界面のせん断すべりを支配する 2階の微分方程式の導出 。
1933	福田武雄	Arnovljevićの 微分方程式をRCの付着問題に応用 。 線形仮定に基づく試計算。
1958	Hans Bufler	線形仮定に基づく計算。 付着応力実験値と比較 。
1961	Gallus Rehm	線形仮定だが、 $\tau-s$ 関係を平方根式でモデル化。 すべりsに対して微分方程式を表示 。
1967	六車熙・森田司郎	非線形仮定に基づく計算 。
1975	森田司郎・角徹三	繰り返し荷重下における$\tau-s$履歴モデル 。

(2)式を x で微分して、

$$\frac{ds(x)}{dx} = \varepsilon_b(x) - \varepsilon_c(x) \quad (3)$$

さらに(3)式を x で微分して、

$$\begin{aligned} \frac{d^2s(x)}{dx^2} &= \frac{d\varepsilon_b(x)}{dx} - \frac{d\varepsilon_c(x)}{dx} \quad (4) \\ &= \tau_b(x) \cdot \phi_b \cdot \frac{1}{A_b \cdot E_b} + \tau_b(x) \cdot \phi_b \cdot \frac{1}{A_c \cdot E_c} \end{aligned}$$

したがって、次式が成り立つ。

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{1+n \cdot p}{A_b \cdot E_b} \cdot \tau_b(x) \cdot \phi_b \quad (5)$$

8 個目の条件式として、何を与えるかは任意であるが、例えば、

$$\tau_b(x) = f(s(x)) \quad (6)$$

を与えると、(5)式が $s(x)$ の微分方程式になり、都合がよい。ただし、数学的に解くことは難しい。(6)式が、いわゆる付着構成則である。

また、例えば、

$$\tau_b(x) = f(s(x), \varepsilon_b(x)) \quad (7)$$

を与えると、(2)式の関係を用いれば、(6)式に帰着する。ただし、(2)式の境界条件 (x_0 , s_0) が決まらなければ定めることはできない。逆に、(x_0 , s_0) が明瞭な場合 (例えば付着長が十分長い場合の引抜状態) は、 $\varepsilon_b(x)$ により $\tau_b(x)$ を変化させることが可能となる。

(3) 付着挙動および構成則に関する既往の文献調査

付着挙動や付着構成則に関する既発表論文は数多いが、本委員会では特に付着構成則に焦点をあて、次に示す論文集について文献調査を行った。

- i) 土木学会論文集
- ii) 日本建築学会論文集
- iii) 日本コンクリート工学協会年次論文集
- iv) 日本コンクリート工学協会論文集
- v) 海外の文献
- vi) 付着に関する国際会議 (Bond in Concrete)

i)および ii)に関して：

異なる荷重条件や破壊形態下での $\tau-s$ 関係が提案されてきている。表-2 で紹介した文献以降、島らは、付着割裂破壊しない引抜き試験を対象とした $\tau-s$ 関係に関連するパラメータの関数で表現し、この $\tau-s$ 関係で鋼材降伏後の付着特性も評価できることを実証した。金久保らは、付着割裂破壊する際の $\tau-s$ 関係を提案し、付着割裂強度に関して検討を実施している。

iii)に関して：

$\tau-s$ 関係に関する種々の実験的検討が報告されている。文献調査の結果の概要を表-3 に示す。

v)に関して：

19 世紀末から 21 世紀初頭までのアメリカ合衆国およびドイツ語圏において刊行された文献を中心に、付着研究の動向を調査した。調査対象は、表-4 に示すアメリカ、ドイツ、オーストリアの 3 か国から刊行された 7 誌の 328 文献である。文献は、原則として $\tau-s$ 関係を取り扱う論文から選定した。調査結果を列記すると、以下のようである。

- 19 世紀末の RC の発明とほぼ同時に、付着の問題は認知されていた。1904 年の世界最初の RC 設計指針には、既に曲げ部材の付着応力算定法と許容付着応力が記載されている。
- 付着実験も 19 世紀末には実施されていたとされ、1910 年代までには、片引き試験法、両引き試験法、曲げ梁の主筋付着すべり計測法など基本的な付着試験法が確立されていた。
- やや遅れて 1940 年に片持ち梁型試験法が開発されたが、当初は折り曲げ主筋の定着を検証するために用いられた。
- 異形鉄筋の出現、高強度鉄筋の開発、エポキシ塗布鉄筋の利用、FRP の利用など、新種の補強材の出現が、そのつど付着研究を活発化させている。
- 付着の検討対象となる部材は、当初は梁の曲げ主筋や重ね継手のみであったが、1970 年代から平板のテンションスティフニングにも応用され、1980 年代以降は接合部や柱にも応用されている。
- 1970 年代から付着割裂問題が検討され始め、リングテンションによる抵抗機構モデルなどが考案された。
- 微分方程式を用いた付着解析が最初に行われたのは 1933 年であったが、解析的研究が本格化するのは 1961 年の Rehm の研究以降である。
- 1967 年の Ngo らの研究から RC 分野の FEM が始まり、ボンドリック要素による付着のモデル化もこの研究から始まった。

2.2 付着に関する指針・規基準および関連テキストの整理

本節では、国内外の指針および規基準における付着に関する情報の整理を目的として、以下に示す指針等の調査を行った。着目した点は、 $\tau-s$ 関係の提示または解説があるか、ひび割れや定着の評価において付着性状 (強度) が考慮されているかどうかである。

- 土木学会コンクリート標準示方書 [設計編] (2007)
 - 日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 (2010)
 - CEB-fip Model Code (1990, 2010)
- CEB-fip Model Code (2010) では、従来の $\tau-s$ モデルに鉄筋の引き抜け状態とコンクリートの割裂状態にパ

表-3 日本コンクリート工学協会年次論文集の文献調査

著者	研究の目的	手法	主たる成果
岡村ら (1983)	局部 $\sigma-s$ 関係の把握	定着長, コンクリート強度をパラメータとした片引きの繰返し試験	鉄筋と界面層のコンクリートを構成要素とした解析モデルを提案
森田, 藤井ら (1984)	柱が付着割裂破壊する際の $\sigma-s$ 関係の実測	短柱の正負交番繰返し載荷試験	既往の付着に関する知見が柱部材の場合にも適応
藤井, 角, 長友ら (1999,2001)	サイドスプリット型付着破壊時の付着特性	簡易型の試験体の提案, 鉄筋径や定着長をパラメータとした片引き試験	載荷端から離れるに連れて $\sigma-s$ 曲線が一つの形状に収束
長友ら (2004)	サイドスプリット型付着破壊のシミュレーション	1次元ばねモデルを用いた増分法による数値解析	提案モデルが試験結果と高い適合性
島ら (1991)	鉄筋が腐食した場合の $\sigma-s$ 関係	鉄筋の腐食率, かぶり厚さ, 補強筋の有無をパラメータとした引き抜き試験	腐食の進行によって最大付着応力度が直線的に低下, かぶり厚さが大きいほど低下が顕著
島ら (1991)	鉄筋の代わりに CFCC (Carbon Fiber Composite Cable) を使用	定着長とコンクリート強度をパラメータとした引き抜き試験	コンクリート強度の影響が見られない, 定着長の差が $\sigma-s$ 関係に与える影響は小さい
島ら (1993)	載荷速度が $\sigma-s$ 関係に及ぼす影響	準静的から衝撃荷重まで載荷速度を変化させた引き抜き試験	最大付着応力度が載荷速度の対数と線形関係
金久保ら (1996,1997)	付着割裂破壊する RC 部材における $\sigma-s$ 関係の把握	コンクリート部分にスリットを入れた引き抜き試験	付着割裂強度は主筋中心からスリットまでの距離と主筋径の比およびコンクリート割裂強度で評価
金久保, 八十島ら (2000,2004)	横拘束を受ける主筋の付着性状	横拘束力などをパラメータとした引き抜き試験	最大付着応力が拘束応力度の傾きとコンクリート強度に応じて増大
大野ら (1992,1993)	$\sigma-s$ 関係の経時変化の検討	両引き試験体の持続載荷試験	持続載荷中の $\sigma-s$ 関係モデルの提案, ひずみ度分布および端部すべり量の経時変化を解析的に把握可能
大野ら (2007,2008,2009)	細径の異形鉄筋とコンクリート間の $\sigma-s$ 関係の把握	鉄筋径, 節形状, コンクリート強度, かぶり厚さ, 定着長をパラメータとした片引き試験および両引き試験	$\sigma-s$ 関係をバイリニアに近似, 試験パラメータを因子としたモデル式
市之瀬ら (2000,2001)	寸法効果が付着割裂性状に与える影響	FEM による二次元応力解析および横補強筋を配した引き抜き試験	寸法効果が最大付着応力度に影響
近藤ら (2005)	持続荷重下における局所の $\sigma-s$ 関係	付着区間の短い試験体の持続載荷試験およびその後の引き抜き試験	すべり速度と付着応力速度の関係を定式化
近藤ら (2008)	載荷速度の影響	抜け出し型と付着割裂型ですべり速度を変化させて引き抜き試験	最大付着応力度に与える載荷速度の影響は付着割裂型の方が大きい
斉藤, 檜貝ら (2005)	かぶり厚さが薄い場合の $\sigma-s$ 関係を把握	かぶり厚さと鉄筋径をパラメータとした両引き試験	かぶり厚さが薄い場合にも適用できる $\sigma-s$ モデルの定式化

表-4 文献調査の対象とした海外の文献

略称	誌名	期間	概要	件数
ACI	Journal of American Concrete Institute	1905-1986	アメリカコンクリート学会論文集	101
	Structural Journal of ACI	1987-2010	アメリカコンクリート学会構造工学論文集	
ASCE	Transactions of the American Society of Civil Engineers	1872-1940	アメリカ土木学会誌	104
	Proceedings ASCE, Structural Division	1939-1982	アメリカ土木学会論文報告集の構造工学分冊	
	Journal of Structural Engineering, ASCE	1983-2010	アメリカ土木学会構造工学論文集	
BE	Beton und Eisen	1905-1942	ドイツの RC 工学専門誌。論文, 施工報告, 各種記事からなる。	47
	Beton- und Stahlbetonbau	1943-1945 1950-1982		
BI	Bauingenieur	1920-1996	ドイツの土木工学専門誌。論文, 施工報告, 各種記事からなる。	5
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Eisenbeton	1911-1938	ドイツの RC 工学論文。1 刊につき数十頁~数百頁の論文 1 遍ないし数遍。	39
	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton	1938-2005		
ZAI	Zeitschrift für Architektur und Ingenieurwesen	1901-1906	ドイツの総合工学学術誌。機械, 造船, 電機, 土木, 建築意匠の論文・記事。	3
ZÖ	Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur- und Architekten-Vereins	1859-1910	オーストリア工学建築協会誌。機械, 造船, 電機, 土木, 建築意匠の論文・記事。	20
	その他			9

ラメータが設定されており, より応用化されている。

また, 鉄筋コンクリート構造に関する教科書を調査し, それぞれの教科書における付着の取り扱いを整理した。

各教科書で付着応力の説明や付着に影響を及ぼす因子の解説があるが, おおむね, 小阪・森田博士の「鉄筋コンクリート構造」に帰着すると思われる。

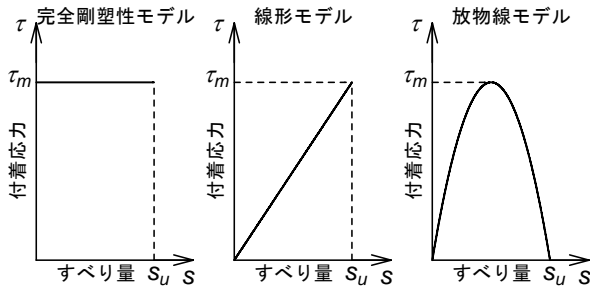


図-1 理論導出 $\tau-s$ モデル

2.3 理論解による感度解析

現時点で、(5)式を完全に数学的に解くことのできる $\tau-s$ 関係は、図-1に示す完全剛塑性モデル、線形モデルおよび放物線モデルである。これらのモデルについて、両引き試験体、片引き試験体について理論解の導出および各パラメータの感度解析を行った。その一例を図-2に示す。両引き試験体では、線形モデルと放物線モデルの付着応力分布および引張力分布は近似している。また、局所付着強度、付着剛性、終局すべりが変動すると、いずれのモデルも付着応力の発生領域が顕著に変動することを示し、試験体の断面積およびコンクリートの弾性係数は各分布性状に影響を与えないことを確認した。

2.4 実構造物の被害事例

兵庫県南部地震における構造物の被災事例の中から、付着破壊、定着破壊による事例を調査した。その結果、梁や柱の主筋に沿った付着割裂破壊の事例、丸鋼を使用した柱でのかぶりコンクリートの剥落、せん断破壊にもなった付着ひび割れの発生等が見られた。

3. 微細なモデルによる付着挙動の解析

異形鉄筋とコンクリートの付着の本質である鉄筋の節とコンクリートの機械的な噛み合わせを直接的にモデル化した解析により、付着挙動を解明しようとする研究が1980年代からすでに行われている^{1),2),3)}。これらの解析では $\tau-s$ 関係を構成則として入力するのではなく、節先端から発生する内部ひび割れや節前面のコンクリートの塑性化など、鉄筋周囲のコンクリートの破壊の進展の結果として付着現象が再現される。したがって、これらの解析結果からマクロな付着モデルを導くことが期待されている。

鉄筋の節サイズまでモデル化した供試体あるいは部材の解析では、問題が大規模になるため高い計算機能力を必要とするが、最近では数万自由度の問題であっても実用レベルで計算が可能となっており、この種の解析も幾つか報告されている。以下では、RBSMとFEMによる解析の一例を紹介する。

3.1 RBSMによる解析例

RBSMは、開口とずれというひび割れの現象を直接的

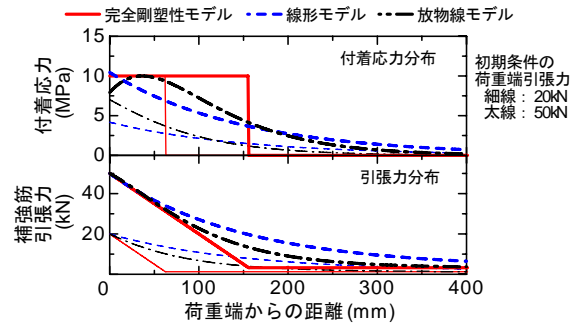
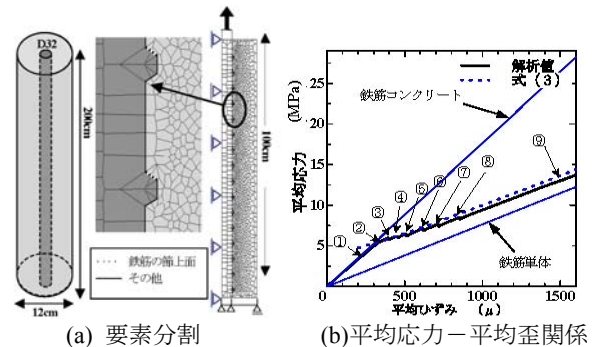
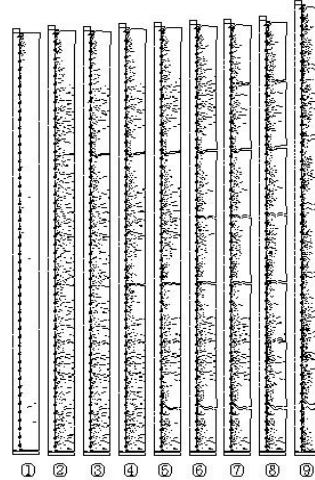


図-2 感度解析結果の例

に表すことができるモデルであり、ひび割れの進展にもなる破壊現象の解析に適した解析手法である。武藤ら⁴⁾は、図-3(a)に示すような円形断面を有する両引き供試体を鉄筋の節サイズまでモデル化して解析を行っている。図-3(b)は部材全体の平均応力-平均ひずみ関係であり、解析結果は既往の経験式による値とよく一致している。また、図-3(c)はひび割れ進展の解析結果であり、最終的なひび割れ間隔(断面を貫通する巨視ひび割れ)も既往の経験式による値と一致している。このように、鉄筋の節サイズまでモデル化することにより、マクロな異形鉄筋の付着挙動をほぼ再現できていることから、付着のメカニズムを解析的に評価できる可能性を示していると考えられる。



(a) 要素分割 (b) 平均応力-平均歪関係



(c) ひび割れの進展

図-3 RBSMによる両引き供試体の解析⁴⁾

3.2 FEM による解析例

図-4(a)は鉄筋径が D19 で断面が 200×250mm の両引き供試体の有限要素モデルである。図-4(b)は鉄筋歪分布から求められた荷端からの位置ごとの $\sigma-s$ 関係である。同図より、 $\sigma-s$ 関係は、鉄筋の位置によって異なり、荷端に近いほど最大付着応力が小さくなることわかる。この現象は、既往の実験、解析結果¹⁾と定性的には一致した結果となっている。

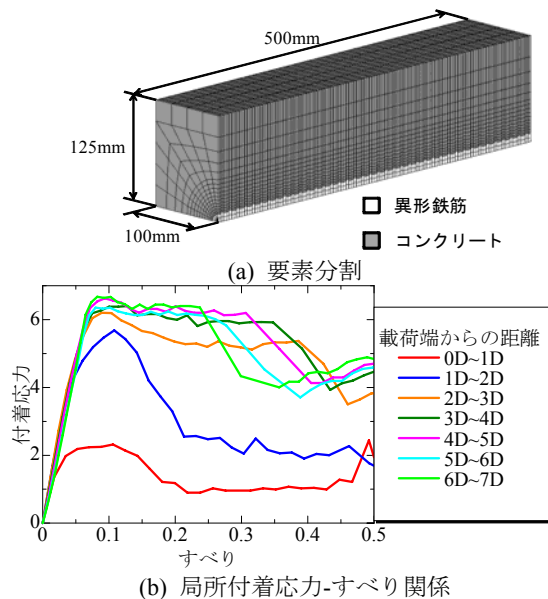


図-4 FEM による両引き供試体の解析

3.3 微細なモデルによる解析の課題

微細なモデルによる解析は付着のメカニズムの解明において有用であると考えられるが、現状では以下のような課題がある。

①微視レベルでの材料特性

供試体のマクロ的な挙動から得られる材料特性を数ミリメートルオーダーの要素の特性として適用することの妥当性。鉄筋表面近傍の脆弱層の存在とその影響⁵⁾が不明。

②解析結果の検証

供試体内部での破壊現象であるため、解析結果の検証方法ならび検証のための実験データが不足。

③Pre-Post プロセッサと計算機パワー

複雑な形状であるため高機能な Pre-Post プロセッサと 3次元の問題で自由度が非常に大きくなるため高い計算機能力が必要。

4. RC 部材の FEM 解析における付着の取扱い

4.1 はじめに

本委員会の目標の 1 つは、付着割裂破壊が生じる RC 部材の荷重-変形関係を応力伝達機構に基づいて解く

ことである。付着モデルの役割を確認するために、各委員がそれぞれの解析ツールを使用してベンチマーク試験体に対する試解析を実施した。ここでは、歴史的経緯と併せて RC 部材に対する試解析の結果を紹介する。

4.2 付着作用のモデル化に関する歴史的経緯

(1) ボンドリンクモデル

RC 構造物に対して FEM 解析を適用する場合、ひび割れならびに付着作用のモデル化が最も重要である。事実、RC に初めて FEM 解析を適用したことで知られる Ngo and Scordelis⁶⁾の論文では、まさしくこれらのモデル化に取り組んでいる。そして、この論文で提案されている付着作用のモデル化がボンドリンクモデルである。図-5 にボンドリンクモデルの概念図を示す。

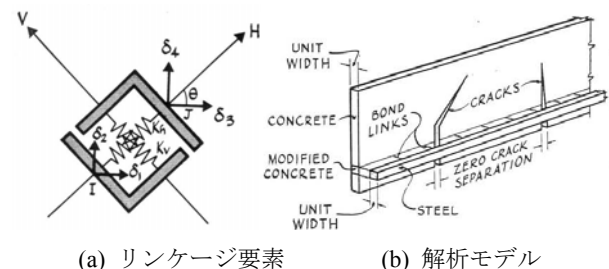


図-5 Ngo and Scordelis のボンドリンクモデル

ボンドリンクモデルが提案された後、付着すべり挙動を表現する水平バネ (H 軸) ならびに鉛直バネ (V 軸) に付与する特性について研究が進められた。六車・森田⁷⁾は、線形バネとしてモデル化する場合において、鉄筋の各種パラメータに基づく剛性算定式を提案している。また、Nilson⁸⁾は既往の両引き付着試験の結果より非線形の $\sigma-s$ 関係を水平バネに付与しており、さらにひび割れからの位置によって付与する特性を変えている。

Nilson の研究により、ボンドリンクモデルに非線形の $\sigma-s$ 関係が適用されて以降、ボンドリンクを用いた付着作用のモデル化に関する研究の動向は以下の 2 つのテーマに集約される。

①現象を表現可能な $\sigma-s$ 関係モデルの提案

②ボンドリンクモデルの検証

前者①に関しては、森田式⁷⁾や Nilson 式⁸⁾のほか CEB-fip モデルコード⁹⁾が有名である。また、履歴モデルとしては森田・角モデル¹⁰⁾や Tassio らのモデル¹¹⁾が提案されている。

一方、後者②に関しては、黒正ら¹²⁾が鉄筋の引抜試験を対象としたボンドリンクモデルを用いた FEM 解析を通じて、鉄筋表面から鉄筋径の 2 倍以内の範囲においては歪状態を過小評価することを指摘している。また、Labib ら¹³⁾は、リンケージ要素の鉛直バネの特性について検討し、異形鉄筋の付着現象を表現するためには鉛直

バネの特性が重要であることを指摘している。藤井ら¹⁴⁾は、「ボンドリンクモデルに適用される $\tau-s$ 関係は実験から得られる $\tau-s$ 関係とは本来無縁である」と指摘しており、その根拠としてすべり量の定義の違いを挙げている。

(2) 様々な付着作用のモデル化の事例

FEM 解析における付着作用のモデル化は、ボンドリンクモデルを用いる以外にも様々な手法が提案されている。例えば、Reinhardt ら³⁾は鉄筋周辺に Slip Layer を設け(図-6)、周辺コンクリートの応力状態やひび割れ発生状況を模擬している。その他、破壊力学に立脚したアプローチやバネモデルの組み合わせによりコンクリート-鉄筋間の応力伝達を表現する手法、さらには異形鉄筋のふし形状まで忠実に要素分割して解析を行う事例など様々である。近年では、市ノ瀬ら¹⁵⁾が異形鉄筋による付着割裂破壊のシミュレーションを行っている(図-7)。また、鉄筋とコンクリートを区別せずに一体的に取扱う、テンションステイフニングモデルにより表現する手法も利用されている。

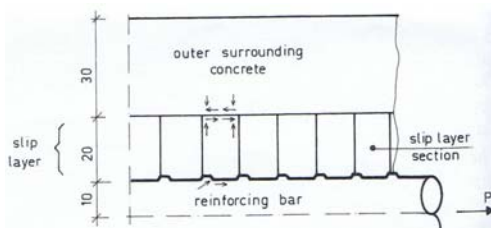


図-6 Reinhardt らの Slip Layer モデル

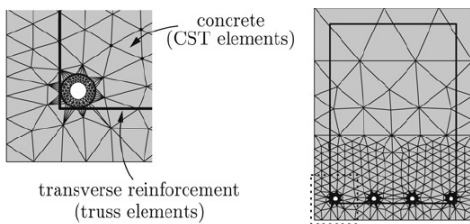


図-7 梁断面の要素分割

4.3 RC 部材の一軸引張試験の解析

RC 部材の一軸引張試験は、鉄筋とコンクリート間の付着特性を検討する上で基本的な実験方法である。ここでは、非線形数値解析法による一軸引張試験の解析を通して、付着のモデル化が解析結果に及ぼす影響について検討を行った。

(1) 分散ひび割れモデル (FEM) による解析¹⁶⁾

解析対象は、図-8 に示される部材長 2700mm、断面寸法 200mm×150mm の角柱断面で、断面中心位置に異形鉄筋 D19 が 1 本配置されている¹⁷⁾。解析は 2 次元解析とし、分散ひび割れ-分散鉄筋モデル(使用コード: WCOMD)、および分散ひび割れ-離散鉄筋モデル(使用

コード: DIANA) の 2 種類のモデルにより検討を行った。分散ひび割れ-分散鉄筋モデルでは、鉄筋とコンクリート間の付着は直接モデル化されず、引張応力下のコンクリートに適用される引張軟化特性の付着パラメータ C ¹⁸⁾ と、鉄筋の平均応力-平均歪関係に付着の影響が考慮される。一方、分散ひび割れ-離散鉄筋モデルでは、鉄筋は梁要素で離散化され、鉄筋とコンクリート間の界面接合要素に付着応力-すべりモデル¹⁹⁾が考慮される。

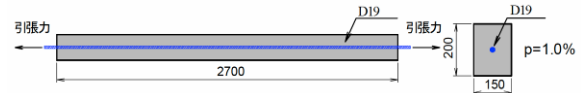


図-8 一軸引張試験体

図-9 は、分散ひび割れ-分散鉄筋モデルの解析で、付着パラメータ C (標準は $C=0.4$) を変化させた場合の荷重-変位関係を示している。付着パラメータ C は、付着によるコンクリートの負担応力の大小を表すことになり、解析結果に大きな影響を及ぼしていることがわかる。

図-10 は、分散ひび割れモデル-離散鉄筋モデルの解析結果を示している。鉄筋を離散化し、 $\tau-s$ 関係を導入した解析を行う場合は、引張応力下のコンクリートの特性に tension softening を用いるべきだが、解析結果は実験結果を過小評価している。一方、tension stiffening を用

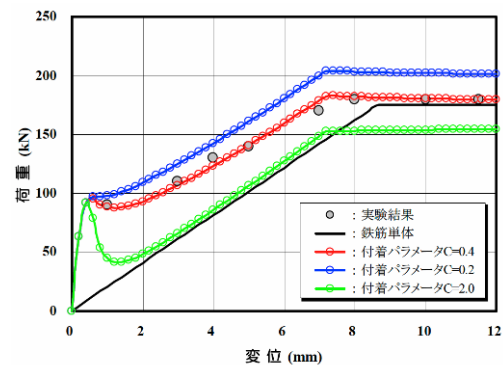


図-9 荷重-変位関係
(分散ひび割れモデル-分散鉄筋モデル)

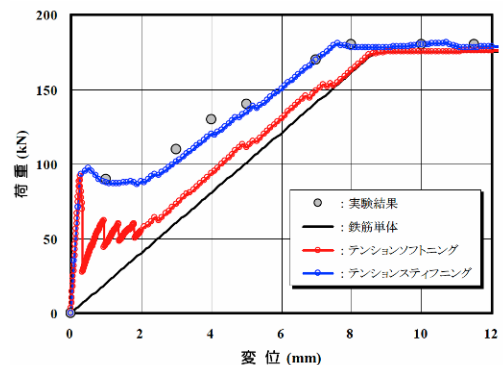


図-10 荷重-変位関係
(分散ひび割れモデル-離散鉄筋モデル)

いた解析結果は、実験結果と比較的よい対応を示している。これは、コンクリート要素に分散ひび割れモデルを用いた場合、ひび割れが局所化せず分散する傾向にあることから、付着モデルが有効に機能しなかったことが考えられる。

非線形有限要素法により、付着の影響が無視できない対象を解析する場合には、材料の力学モデルの組み合わせに注意し、付着の効果を適切に考慮できることを確認する必要がある。

(2) 離散型解析モデル (RBSM) による解析

RC 部材の一軸引張試験を、離散型の解析手法である剛体-バネモデル²⁰⁾ (RBSM) により解析を行った。図-11 に解析モデルを示す。鉄筋は梁要素により離散化され、鉄筋要素とコンクリート要素間にリンク要素を配置し、 $\sigma-s$ 関係を導入した。

解析より得られた荷重-伸び関係を図-12 に、ひび割れ性状を図-13 に示す。荷重当初に部材は鉄筋コンクリートの剛性を示した後、ひび割れの発生に伴い剛性が除所に低下し、最終的に鉄筋単体の挙動に漸近していくことが確認できる。本解析では、コンクリートを任意多角形によるランダムな形状の要素に分割しているため、わずかながら応力のばらつきが生じ、ひび割れが順次発生する結果となった。

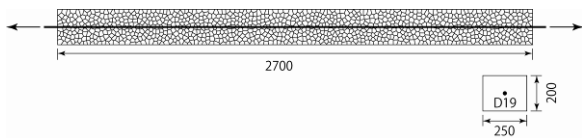


図-11 解析モデル

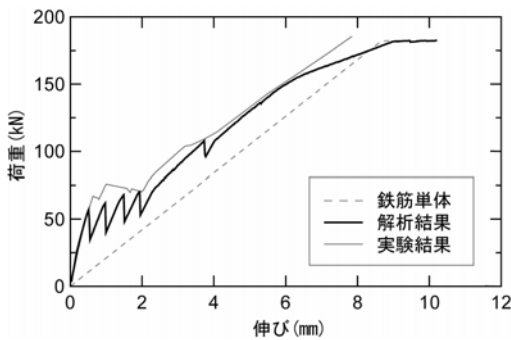


図-12 荷重-伸び関係

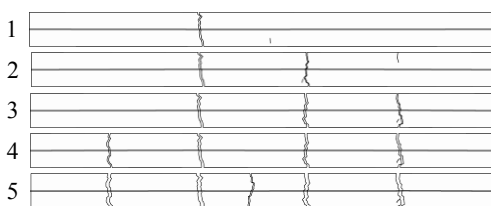


図-13 ひび割れ性状

一般的な有限要素法により解析を行う場合には、部材

内が一様応力場になるため、部材全域に渡ってひび割れが発生してしまうことが知られている。この場合、ひび割れの逐次進展を再現するためには、引張強度にばらつきを与えるなど、解析モデルに不均一性を表現する必要がある。

4.4 RC 部材の耐荷試験の解析

逆対称曲げを受けるせん断スパン有効高さ比(a/d)の小さい鉄筋コンクリートはりの試験体²¹⁾について、有限要素による数値解析的検討を実施した。

(1) 分散ひび割れによる解析

解析では、市販の FEM ソフト DIANA を用いて、分散ひび割れ-離散鉄筋モデルを使用した。コンクリートには、荷重実験との整合性を考慮したせん断応力-せん断歪関係を設定した固定ひび割れモデルを使用した。コンクリートの非線形構成則には、破壊エネルギーを考慮した Thorenfeldt モデル、Hordijk モデルを使用した。また、コンクリートと軸方向鉄筋の相互作用を表現するために、付着特性を完全付着としたもの、島らおよび菅ら²²⁾が提案した $\sigma-s$ 曲線を用いて試解析を実施した。

図-14 に解析結果の例を示す。DB408 に対する解析では、 V_{sh} において支間中央で斜めひび割れが多数発生した。ピーク時にせん断補強鉄筋の降伏が確認できたことから、解析により実験と同様の破壊性状を追跡することができたと考える。一方、DB608 および DB808 では、 V_{1st} 、 V_{2nd} において曲げせん断ひび割れおよび軸方向鉄筋に沿ったひび割れが発生した。しかし、 V_{sh} では支間中央に複数の斜めひび割れが確認でき、実験とは異なるひび割れ性状を示した。

(2) FEM コード (FINAL) による解析

本節はベンチマーク試験体について、4 節点ボンドリリンク要素に森田・藤井の $\sigma-s$ モデルを適用し、かつ付着割裂ひび割れを強制発生させた FEM 解析の結果を示す。森田・藤井モデル²³⁾は割裂をともなう付着挙動を表現した多点折れ線 $\sigma-s$ 曲線であり、多数の実験に基づいて付着強度と割裂発生時のすべり量を定量化している点が特徴である。半面、付着強度到達までは 0.01N/mm^2 の直線勾配を取っており、FEM 向けの $\sigma-s$ 曲線としてはやや粗い仮定となっている。

FEM において付着劣化を表現するには、線材鉄筋要素とコンクリート要素の間にボンドリリンク要素を組み込むのが最も簡便な方法であり、研究から実務設計まで幅広く用いられている。この方法の問題として、本来は鉄筋周辺にある程度の広がりを持って進展する付着劣化現象を、無次元の接合要素に集約してモデル化している点が挙げられる。実際、現在の市販 FEM は、かぶりコンクリートの損傷や割裂ひび割れの進展を明確に再現できない。そこで本節は、接合要素に適用した森田・藤

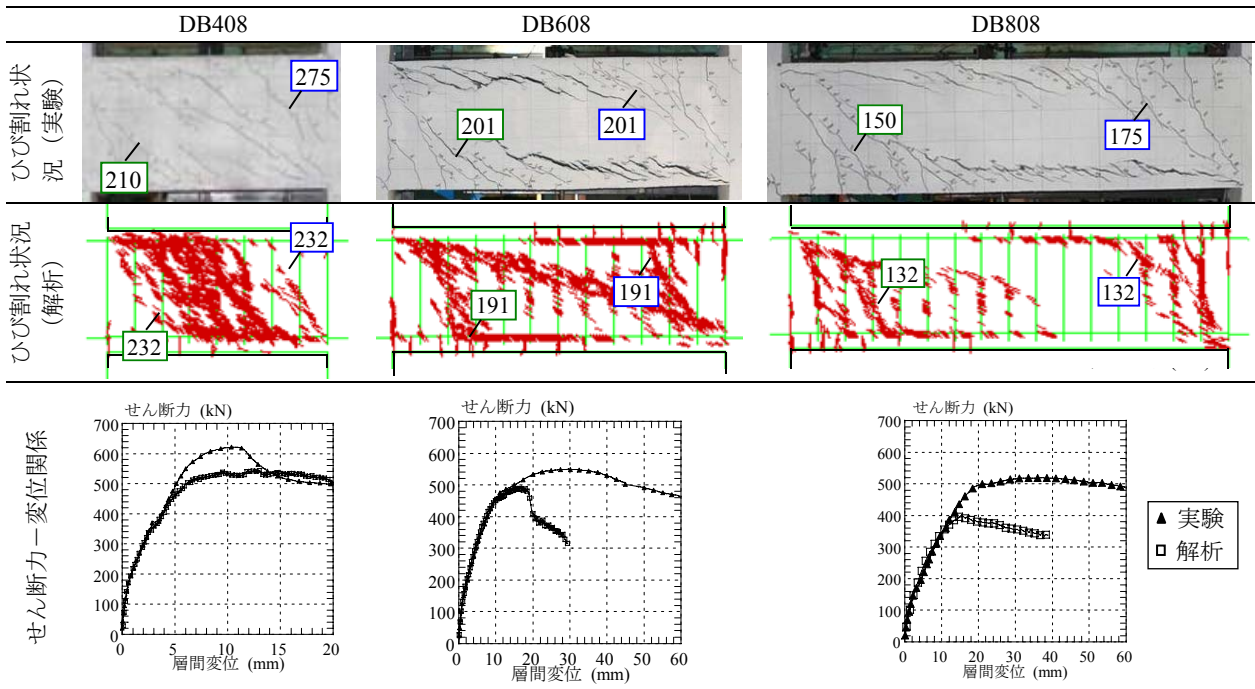


図-14 分散ひび割れ-離散鉄筋モデルによる解析結果の例

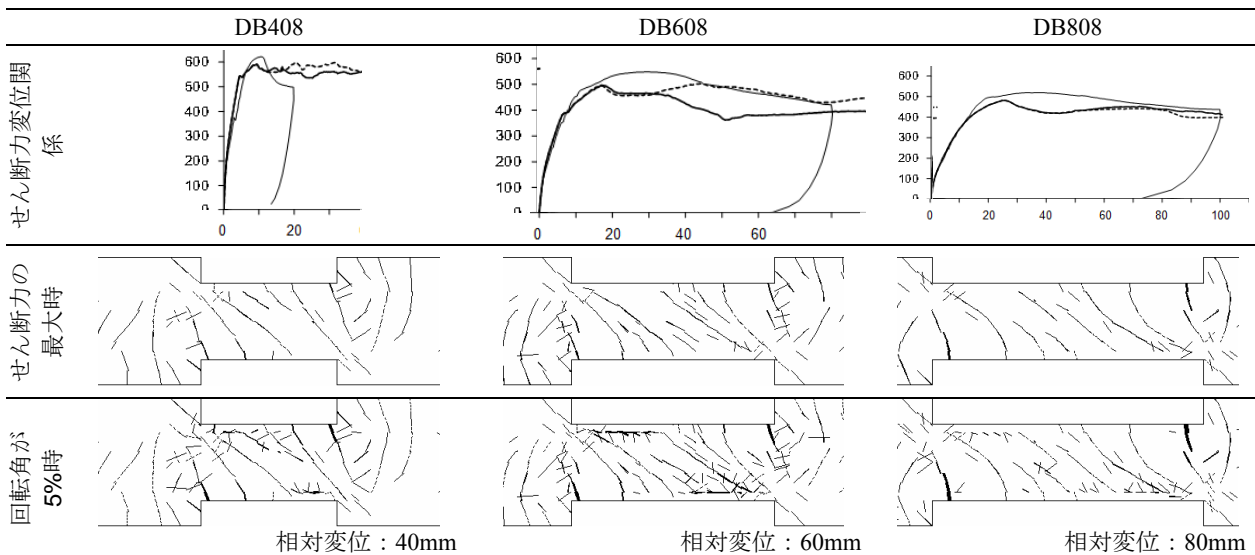


図-15 FEMコード (FINAL) による解析結果の例

井の σ - s 曲線に連動させて、隣接するコンクリートに強制的にひび割れを発生させるユーザーサブルーチンを作成し、これを市販 FEM ソフトである FINAL に適用した。

図-15 に、せん断力-変位関係 (細線が実験値、実線が割裂ひび割れなしの解析、鎖線が割裂ひび割れありの解析) およびひび割れ状況を示す。割裂ひび割れは最大荷重到達後に生じるため、最大荷重到達以前の挙動は一致し、ピーク以後に差異が生じている。ただし、せん断力-変位関係上の差異はそれほど顕著ではない。最大耐力時のひび割れに関して、実験においてはスパン中央付近にひび割れの無い領域が観察されたが、解析において

はスパン全域にひび割れが生じている。せん断補強筋ひずみが過大評価されたのは、本来は無ひび割れのスパン中央域において、解析上ひび割れが生じてしまったことが直接の原因である。

実験においてはスパン全域にせん断ひび割れが成長する前に、主筋に沿った割裂ひび割れが発生し、無ひび割れ領域が残ったと考えられる。本解析において割裂ひび割れの強制導入を試みたのは、このような現象の再現を意図したためである。しかしながら図に示すように、最大荷重到達時点で既に多数のせん断ひび割れが生じてしまっており、割裂ひび割れの強制導入によるせん断ひび割れ抑制の効果は見られなかった。

5. まとめ

本委員会での3つのWGの活動成果のエッセンスを紹介した。詳細には、ぜひ、委員会報告書をご参照頂けたら幸甚である。

参考文献

- 1) 黒正清司, 林静雄, 吉田弘之: 異形鉄筋とコンクリートの付着に関する基礎的研究, AIJ 梗概集, pp.1513-1514, 1981
- 2) Ingarffea, A.R. et.al.: Fracture Mechanic of Bond in Reinforced Concrete, ASCE Structural Division, Vol.110, No.4, pp.871-890, 1984
- 3) Reinhardt, H.W. et.al.: Prediction of Bond between Steel and Concrete by Numerical Analysis, Material and Structures, Vol.17, No.100, pp.311-320, 1984
- 4) 武藤信太郎, 中村光, 田辺忠顕, スリソロ・ワラボン, 李相勲: メゾスケール解析によるコンクリートと異形鉄筋の付着解析, 応用力学論文集, Vol.7, pp.767-774, 2004
- 5) Salem, H.M. and K. Maekawa: Pre- and Post yield Finite Element Method Simulation of Bond of Ribbed Reinforcing Bars, ASCE, J. Struct. Eng., Vol.130, pp.671-680, 2004
- 6) Ngo, D. and Scordelis, A.C.: Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams, ACI Journal, No.64, pp.152-163, 1967.3
- 7) 六車 熙, 森田司郎, 富田幸次郎: 曲げひび割れを生じた鉄筋コンクリートはり材の応力状態と変形に関する研究, AIJ 論文報告集, No.200, pp.27-34, 1972.10
- 8) Nilson, A. H.: Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method, ACI Journal, No.65, pp.757-766, 1968.9
- 9) CEB-fip Model Code, July, 1991
- 10) 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, AIJ 論文報告集, No.229, pp.15-24, 1975.3
- 11) Tassios, T.P. and Yannopoulos, P.J.: Analytical Studies on Reinforced Concrete Members Under Cyclic Loading Based on Bond Stress-Slip Relationships, ACI Journal, May-June, pp.206-216, 1981
- 12) 黒正清司, 滝口克己, 林 静雄, 山中久幸: 異形鉄筋とコンクリートの付着に関する基礎的研究, AIJ 梗概集, pp.1155-1156, 1974.10
- 13) Labib, F. and Edwards, A.D.: An Analytical Investigation of Cracking in Concrete and Eccentric Reinforced Concrete Tension Members, Proc. Institute of Civil Engineers, Part2, Vol.65, pp.53-70, 1978.3
- 14) 森田司郎, 藤井 栄: 有限要素法解析における付着モデルの現状と今後の課題, RC 構造物の有限要素解析に関するコロキウム論文集, JCI, pp.35-42, 1984.12
- 15) Ogura, N., et.al.: Analysis of Bond Splitting Failure of Deformed Bars within Structural Concrete, Engineering Structures, Vol.30, pp.428-435, 2008
- 16) 関下裕太, 川口和広, 小林竜太, 宮本真一: 分散ひび割れ型FEMによるRC部材の一軸引張挙動解析における各種モデル化の影響, JSCE 年次学術講演会, pp.1143-1144, 2010.9
- 17) 玉井真一, 島弘, 出雲淳一, 岡村甫: 一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力-平均ひずみ関係, JSCE 論文集, No.378/V-6, pp.239-248, 1987.2
- 18) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技法堂出版, 1990
- 19) 島弘, 周礼良, 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?ズベリ-ひずみ関係, JSCE 論文集, No.378/V-6, pp.165-174, 1987.2
- 20) Saito, S. and Hikosaka, H.: Numerical Analyses of Reinforced Concrete Structures using Spring Networks with Random Geometry, JSCE 論文集, No.627/V-44, pp.289-303, 1999.8
- 21) 渡辺健, 田所敏弥, 谷村幸裕, 黒川浩嗣: 逆対称曲げが作用したディーブビームの破壊性状に関するせん断スパン比の影響, JCI 年次論文集, Vol.29, No.3, pp.691-696, 2007.7
- 22) 菅満宣, 中村光, 檜貝勇, 斉藤成彦: RC はりの力学的挙動に及ぼす付着特性の影響, JCI 年次論文集, Vol.23, No.3, pp.295-300, 2001
- 23) 後藤定己, 森田司郎, 藤井栄, 得能正隆, 福井健二: 割り裂き付着破壊モードに与える横補強筋の影響, AIJ 近畿支部研究報告集, Vol. 21, pp.197-200, 1981