

# 論文 離散型要素を用いた鉄筋コンクリート部材のダウエル特性に関する 3次元有限要素法解析

日比野 憲太<sup>\*1</sup>・品川 幸二郎<sup>\*2</sup>・高木 宣章<sup>\*3</sup>・児島 孝之<sup>\*3</sup>

要旨：鉄筋コンクリート構造の挙動や破壊性状を解明するにあたっては，異種材料間の界面での応力伝達特性を明らかにする必要がある。特に RC 梁のせん断破壊は，軸方向鉄筋の付着特性が部材の破壊モードに影響を与え，そのダウエル特性が耐荷機構の一要因となるため，鉄筋とコンクリート間の応力伝達特性の解明ならびにその特性の解析的表現方法の開発が重要となる。そこで本研究は，鉄筋コンクリート梁のせん断引張破壊メカニズムの解明を目的として，鉄筋のダウエル作用によるせん断耐荷メカニズムの解析的表現，ならびにその作用に影響を及ぼす要因に関してパラメトリック解析を試みたものである。

キーワード：ダウエル作用，せん断引張破壊，離散型要素，有限要素法解析

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート（以後，RC）構造は，コンクリートと鋼材の 2 つの異種材料から構成される複合構造である。そのため，RC 構造の力学的挙動や破壊性状を解明するにあたっては，異種材料間の界面での応力伝達特性を明らかにし，それらの特性を適切に表現する解析手法を開発することが必要不可欠となる。

RC 梁のせん断破壊挙動を解析的に推定する場合，その耐荷機構に貢献する要因として，圧縮部コンクリートのせん断耐力，斜めひび割れ面での骨材のかみ合わせ作用，ならびにせん断補強筋の負担するせん断力を考慮した要素特性の検討が必要となる。さらに RC 梁のせん断破壊は，軸方向鉄筋の付着特性が部材の破壊モードに影響を与え，そのダウエル特性（斜めひび割れを跨ぐ軸方向鉄筋の曲げ剛性と鉄筋とコンクリート間の付着・支圧抵抗によりせん断力に抵抗する作用）が耐荷機構の一要因となるため，鉄筋とコンクリート間の応力伝達特性の解明やその特性の解析的表現方法の開発が重要となる。

筆者らは既往の研究<sup>1)</sup>において，離散型ひび割れおよび付着要素を用いた 2 次元有限要素法解

析を行い，せん断補強筋を有さない RC 梁の力学的挙動の推定を試みている。この研究成果を用いることにより，各荷重レベルでの部材の変形性状やひび割れ状況，ならびに各構成材料の応力状態や分担せん断耐力の把握が可能となった。また，RC 梁のせん断耐力や破壊モードを適切に推定するためには，軸方向鉄筋のダウエル特性を適切にモデル化し，離散型付着要素の構成則として与えることが必要であることを確認した。

そこで本研究は，RC 梁のせん断引張破壊メカニズムの解明を目的として，鉄筋のダウエル作用によるせん断耐荷メカニズムの解析的表現を，離散型ひび割れおよび付着面要素を用いた 3 次元有限要素法解析により試みたものである。また，本研究で提案した解析モデルを用いて，鉄筋のダウエル特性に影響を及ぼす要因に関してのパラメトリック解析を試みた。

## 2. 離散型要素を用いた RC 梁のダウエル特性に関する 3 次元有限要素法解析

### 2.1 研究概要

鉄筋のダウエル特性に影響を与えるパラメータとして，コンクリートの引張強度や鉄筋に作

\*1 株式会社 国際建設技術研究所 ポストドクトラルフェロー 工博 (正会員)

\*2 立命館大学 大学院 修士課程

\*3 立命館大学 理工学部 土木工学科 教授 工博 (正会員)

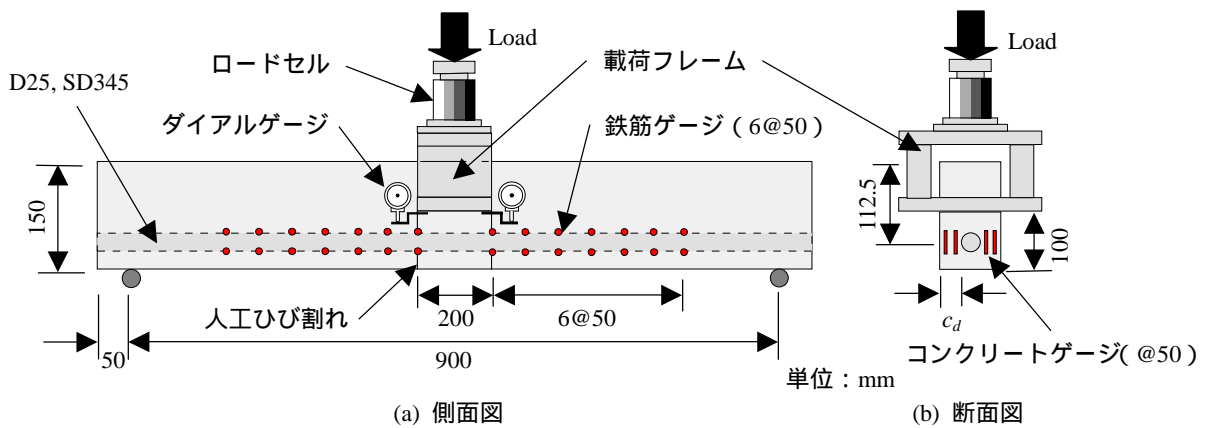


図 - 1 試験体および荷重試験概要図

用する引張力，鉄筋径ならびに鉄筋の側方かぶり厚さなどが挙げられる。本研究では，中でも特に鉄筋の側方かぶり厚さ ( $c_d$ ) の影響に着目した。これは，側方かぶり厚さが大きくなることにより梁内部で生じる，鉄筋のダウエル力に抵抗するコンクリートの引張領域が増加する現象の，解析的表現の是非を確認するためである。実験要因を表 - 1 に示す。

## 2.2 荷重試験方法

本研究で提案する解析モデルの妥当性および問題点に関する検討を行うため，予め側方かぶり厚さがダウエル特性に与える影響の把握を目的とした RC 梁の荷重試験を行った。

荷重試験は，図 - 1 に示す Krefeld らの実験<sup>2)</sup> に準じた供試体を用いた。コンクリートの目標圧縮強度は，普通強度レベルを対象として  $24\text{N/mm}^2$  とした。供試体寸法は  $150 \times 85 (c_d=30)$ ， $105 (c_d=40)$ ， $125 (c_d=50) \times 1,000$  (mm) とし (各 2 体)，軸方向鉄筋として D25 (SD345) を有効高さ 112.5mm の位置に 1 本配置した。また，梁中央部に鉄筋のダウエル作用を生じさせるための人工ひび割れを梁下面から高さ 100mm，間隔 200mm で挿入し，梁部分と中央部分を分離している。荷重試験時 (材齢 7 日) のコンクリートの力学的特性を表 - 2 に，鉄筋の力学的特性を表 - 3 に示す。

荷重試験は支持スパン 900mm とし，梁中央部上面から 50mm の位置に荷重フレームのプレートを挿入し，梁上部を跨ぐ荷重フレームを設置

表 - 1 実験要因

供試体名	供試体数	かぶり厚さ (mm)
RC30	2	30
RC40	2	40
RC50	2	50

表 - 2 コンクリートの力学的特性

$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )
28.4	2.37	27.5

表 - 3 鉄筋の力学的特性 (D25, SD345)

$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	$D$ (mm)
366.2	210	506.4	25.4

して，その上部より荷重を与えた。Krefeld らの実験は，軸方向鉄筋に引張力を作用させた状態でダウエル荷重試験を行うことができることが利点である。しかし，今回は前述した実験要因に関連して，軸方向鉄筋には引張力は作用させていない。

荷重試験時には，ロードセルによる荷重，ダイヤルゲージ式変位計による梁部と中央部の相対変位 (図 - 1 参照)，ならびに人工ひび割れ面から 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300mm の位置の鉄筋上下面に貼付したひずみゲージにより鉄筋の曲率を計測した。また，人工ひび割れ面にひずみゲージを貼付し，鉄筋周辺のコンクリートひずみを計測した。

## 2.3 解析方法

### (1) 要素特性

コンクリートおよび鉄筋は等方性・弾性材料として扱い，2 次のアソパラメトリック 6 面体

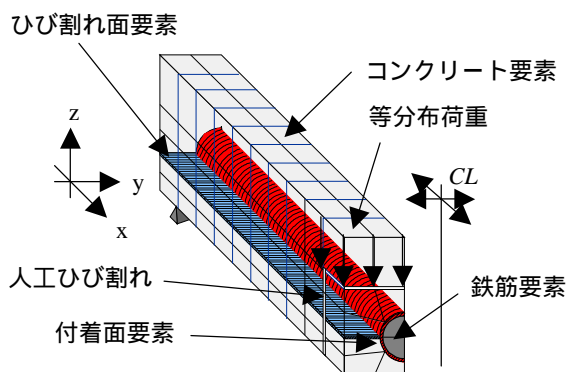


図 - 2 要素分割図

要素を用いて表現した。特に、鉄筋を弾性材料として表現したのは、実験から得られた鉄筋ひずみのデータが、部材の終局時まで弾性域で挙動していたことを確認したためである。

コンクリートに発生するひび割れおよび鉄筋とコンクリート間の付着および支圧特性は、2次アイソパラメトリック接合面要素を用いて表現した。また、各接合面要素の界面での相対変位および伝達応力を、面接線方向に作用する変位 ( $\delta_s, \delta_t$ )、応力 ( $\tau_s, \tau_t$ )、および面法線方向に作用する変位 ( $\delta_n$ )、応力 ( $\sigma_n$ ) として扱った。

ひび割れ面要素の  $\sigma_n$  は、既報の研究成果<sup>1), 3)</sup>を参考として引張軟化特性 ( $\sigma_n - \delta_n$ ) を用いた。また、 $\tau_s, \tau_t$  は、ひび割れ開口幅 ( $\delta_n$ ) の増加による軟化を考慮したせん断応力 - 変位関係 ( $\tau_s - \delta_s, \tau_t - \delta_t$ ) ならびに最大せん断応力 - ひび割れ開口幅関係 ( $\tau_{max} - \delta_n$ )<sup>1), 3)</sup>を仮定して適用した。

付着面要素の  $\tau_s, \tau_t$  は、既報の研究成果<sup>1)</sup>を参考として付着応力 - すべり関係 ( $\tau_s - \delta_s, \tau_t - \delta_t$ ) を用いた。また、 $\sigma_n$  は  $\delta_n$  の値が負の場合 (支圧状態) は弾性挙動、正の場合 (剥離状態) は剛性を有さないものとして扱った。

本章で用いる各種要素特性の決定は、本実験結果から得られた各構成材料の諸強度試験結果を用いている。

## (2) 解析モデル

図 - 2 に、本解析で用いた要素分割を示す。要素数を少なくするため、対称性を考慮して供試体の 1/4 モデルとして解析を行った。鉄筋とコンクリート要素間の境界には、これらの材料間で生じる付着および支圧特性を表現するための

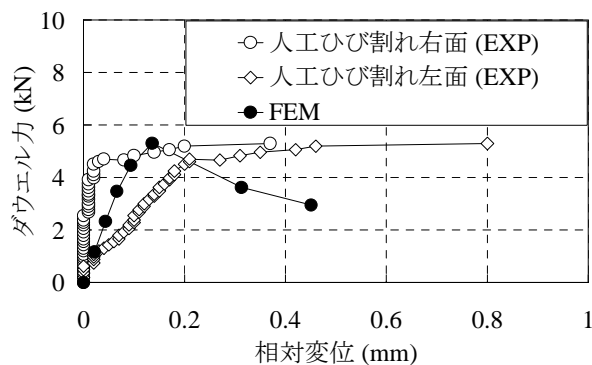


図 - 3 ダウエル力 - 相対変位関係 (RC30, EXP, FEM)

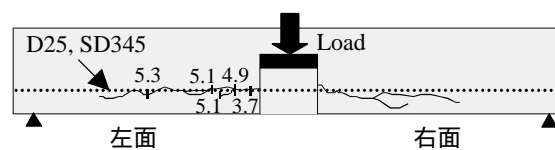


図 - 4 ひび割れ状況図 (RC30, EXP)

離散型の付着面要素を挿入している。また、ダウエル作用により発生するひび割れは、あらかじめ鉄筋の側方にひび割れ面要素を解析モデル全長に渡って配置することにより表現した。

境界条件として、コンクリートおよび鉄筋の対称面 (図 - 2 中の CL) を x, y 軸方向、支点を z 軸方向に固定した。また、荷重は載荷プレートを通じて等分布荷重として作用しているため、梁中央部の人工ひび割れ上面に仮想仕事の原理を用いて算出した等価節点力を与えた。

## 2.4 結果および考察

### (1) ダウエル力 - 変位関係

載荷試験および解析から得られた RC30 に関するダウエル力 - 相対変位関係を図 - 3 に示す。また、同様の供試体に関する実験から得られたひび割れ状況図を図 - 4 に示す。

実験から得られたダウエル力 - 相対変位関係は、供試体の形状上、載荷フレームの左右に 2 つの試験区間を有するため、安定した相対変位を得るのは困難な結果となった。図 - 4 に示すひび割れ状況図においても、左右の試験区間のどちらか一方の破壊が先に卓越した後に、他方の試験区間でも破壊が生じる結果となっている。

載荷試験では、供試体の側方がぶり表面にダウエルひび割れが発生した後に、剛性の急激な低下が生じた。また、最大ダウエル力到達後は、

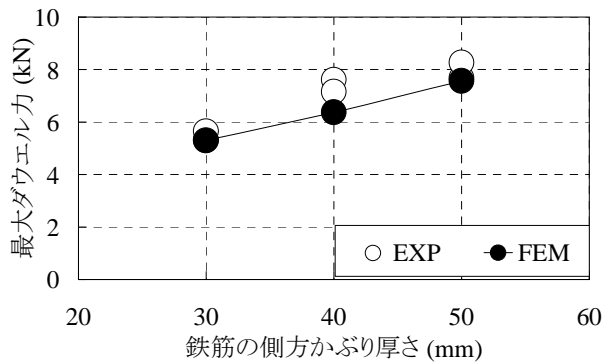


図 - 5 側方かぶり厚さ - 最大ダウエル力関係

その耐力を維持しながら変形が増大した。この最大ダウエル力到達以降の変形の増加は、鉄筋に作用するダウエル力により生じる鉄筋の伸び変形であると報告されている<sup>4)</sup>。一方、解析では、鉄筋の左右に配置したひび割れ要素が鉄筋に近い部分、また、人工ひび割れ面に近い部分から徐々に開口して引張力を失い、最大ダウエル力に達している。しかし、最大ダウエル力到達以降は、実験で生じた変形の増加は生じず、急激に部材耐力を失う結果となった。これは、鉄筋周囲に配置した付着面要素の $\sigma_n$ - $\delta_n$  関係が剥離状態に至った結果であり、今後、要素試験による詳細な鉄筋とコンクリート間の剥離 - 支圧関係を検討する必要があると考えられる。

#### (2) 側方かぶり厚さと最大ダウエル力の関係

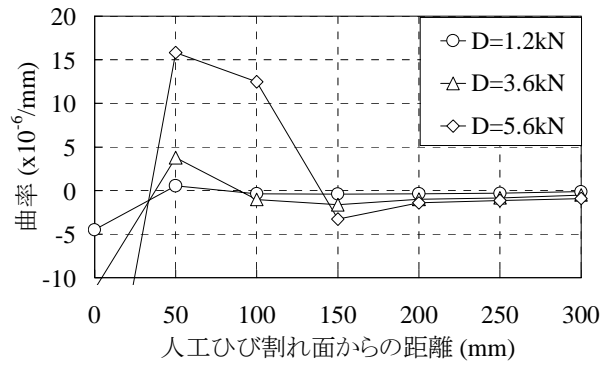
実験および解析結果から得られた側方かぶり厚さと最大ダウエル力の関係を図 - 5 に示す。

実験および解析結果ともに、側方かぶり厚さの増加に比例して、最大ダウエル力は増加した。また、この関係は、本実験の範囲内では、比較的線形的な相関関係を示している。この最大ダウエル力の増加は、鉄筋から伝達されるダウエル力に抵抗するコンクリートの引張抵抗領域が増加するためであり、実現象と同様の耐荷メカニズムが解析上でも表現されていることが確認できる。

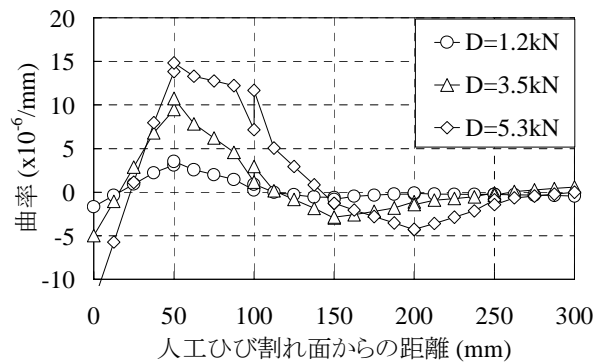
#### (3) 鉄筋の曲率分布

RC30 に関する実験および解析結果から得られた、各ダウエル力段階(D)における鉄筋の曲率分布を図 - 6 に示す。

実験から得られた曲率分布は、ダウエル力が



(a) 実験結果 (RC30, EXP)



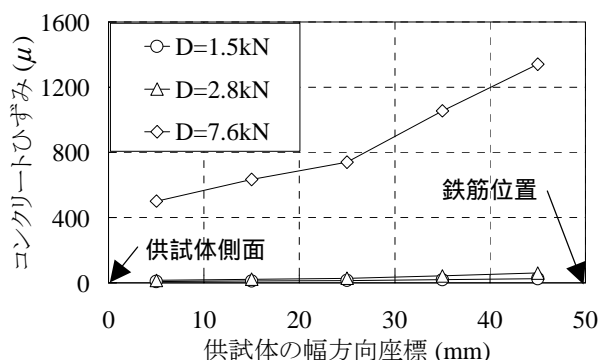
(b) 解析結果 (RC30, FEM)

図 - 6 鉄筋の曲率分布

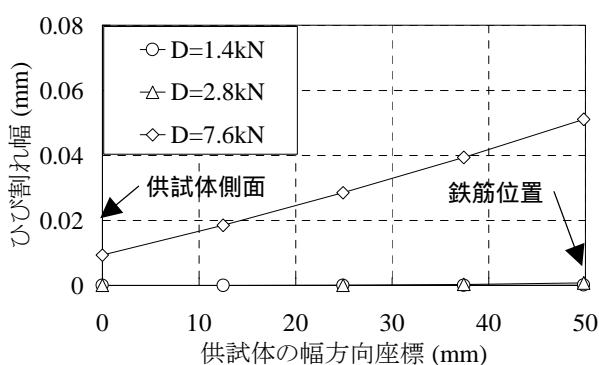
小さい段階では最大曲率の発生位置はほぼ一定であり、曲率の大きさがダウエル力にほぼ比例し、弾性的な挙動を示している。しかし、ダウエル力がある程度大きくなると、曲率とダウエル力間の線形関係はなくなり、曲率が著しく増加する。そして、さらにダウエル力が大きくなると、過大な曲率の発生位置が人工ひび割れ面から徐々に支点方向に広がって行く傾向が確認できる。また、実験結果に近い現象は解析結果からも確認でき、本解析モデルがダウエル力作用時の鉄筋の挙動をシミュレートしていることが確認できる。

#### (4) コンクリートのひずみ分布

RC50 に関する各ダウエル力段階(D)における人工ひび割れ面でのコンクリートのひずみ分布の実験値を図 - 7 (a)に、解析から得られた同様の位置におけるひび割れ要素のひび割れ幅(相対変位 $\delta_n$ )分布を図 - 7 (b)に示す。これらは、ダウエルひび割れ(鉄筋に沿って発生する破壊の原因となるひび割れ)が人工ひび割れ面に直行して発生するまでの、ダウエルひび割れ



(a) コンクリートのひずみ分布 (RC50, EXP)



(b) ひび割れ面要素のひび割れ幅分布 (RC50, FEM)

図 - 7 コンクリートのひずみ分布と  
ひび割れ面要素のひび割れ幅分布

の起点部コンクリートのひずみ（ひび割れ幅）の変化の考察を目的としている。

実験結果から、鉄筋近傍のコンクリートには早い段階から引張ひずみが生じていることが確認できる。ダウエル力が増加するにつれて、引張ひずみは鉄筋近傍から供試体側面の方に進展して行き、ダウエル力に抵抗するコンクリートの引張領域が徐々に断面全域に広がっていく過程が確認できる。また、解析結果においても、荷重初期段階には鉄筋近傍のひび割れが開口し、ダウエル力が増大するにつれ、徐々にその開口変位の増大が供試体の側面の方に進展していく傾向が確認でき、本解析モデルがダウエル力作用時の RC 梁内部のコンクリートひずみ分布をシミュレートしていることが確認できる。

### 3. 本解析手法を用いたパラメータ解析

#### 3.1 研究概要とその要因

2章において、離散型要素を用いた RC 梁のダウエル特性に関する 3次元有限要素法解析の妥

表 - 4 解析要因

供試体名	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋径	かぶり厚さ (mm)
3-D25-30	3	D25	30
3-D25-40			40
3-D25-50			50
3-D19-40		D19	40
3-D32-40		D32	
2-D25-40	2	D25	40
4-D25-40	4		40

表 - 5 各種材料の力学的特性

コンクリート		鉄筋
$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> )
30	30	210

当性および問題点に関する検討を行った。本章では、この解析モデルを用いて RC 梁のダウエル特性に影響を及ぼす各種要因に関してのパラメータ解析を試み、それらのパラメータとダウエル特性の関連に関しての検討を行う。本検討で用いた解析要因を表 - 4 に示す。

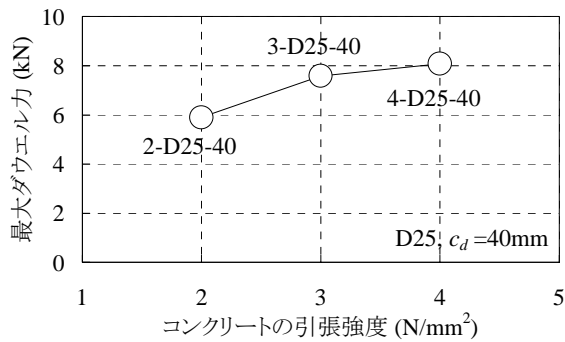
本章のパラメータ解析に用いる各種要素特性の決定には、表 - 5 に示すコンクリートおよび鉄筋の力学的特性の仮定値を用いている。

#### 3.2 結果および考察

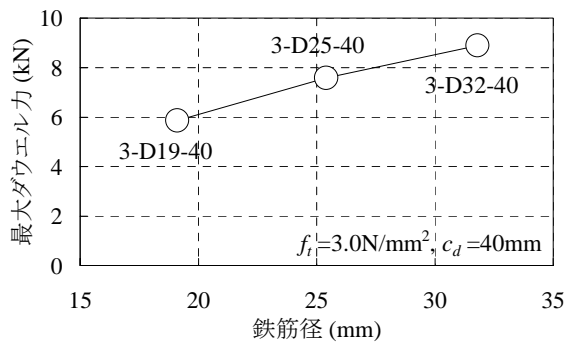
パラメータ解析結果から得られた各種要因と最大ダウエル力の関係を図 - 8 に示す。

コンクリートの引張強度、鉄筋径ならびに側方かぶり厚さともに、これらのパラメータが増加するにつれ、解析結果から得られる最大ダウエル力は大きくなる傾向が確認できた。また、コンクリートの引張強度は 4.0N/mm<sup>2</sup>程度で最大ダウエル耐力が頭打ちになっているのに対して、鉄筋径や側方かぶり厚さの影響は、本解析の範囲内では直線的に増加する結果となった。

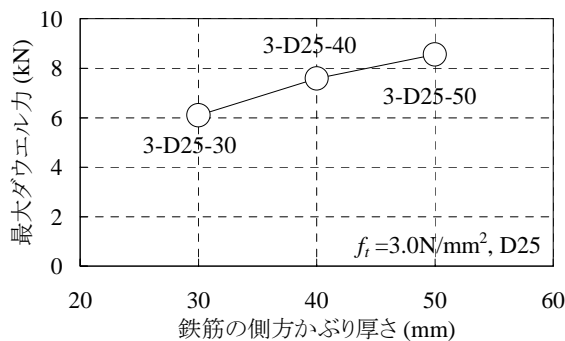
RC 梁のせん断破壊時には、軸方向鉄筋に過大な引張力が作用し、せん断補強筋が配筋されている場合が多い。このため、鉄筋の付着特性とダウエル作用の相関関係、コンクリートの応力状態とダウエルひび割れの発生条件や進展方向の関係、ならびにせん断補強筋の影響を考慮した検討が必要であると考えられる。また、これらの要因の相関関係を考慮したパラメータ解析



(a) コンクリートの引張強度の影響



(b) 鉄筋径の影響



(c) 鉄筋の側方かぶり厚さの影響

図 - 8 各種要因と最大ダウエル力の関係 (FEM)

を試み、鉄筋とコンクリート間のダウエル特性を表現可能な付着要素の構成則を検討することが必要である。

#### 4. 結論

本研究は、RC 梁のせん断引張破壊機構の解明を目的として、鉄筋のダウエル作用によるせん断耐荷メカニズムの解析的表現、ならびにその作用に影響を及ぼす要因に関して実験および解析的な検討を試みた。本研究結果から以下の結論が得られた。

- (1) コンクリートに発生するひび割れおよび鉄筋とコンクリート間の応力伝達特性を考慮した離散型のひび割れおよび付着面モデルを、鉄筋のダウエル特性に関する 3 次元有限要素法解析に適用することにより、鉄筋のダウエル耐力や各種要因がダウエル耐力に及ぼす影響を、ある程度、推定することが可能となった。
- (2) 鉄筋のダウエル作用を離散型の付着面要素を用いて解析的にモデル化する場合、ダウエルひび割れの特性のみならず、鉄筋界面に発生したダウエルひび割れによって生じる付着劣化、ならびに支圧および剥離特性に関する検討が必要である。
- (3) RC 梁のせん断破壊時には軸方向鉄筋に過大な引張力が作用しているため、鉄筋の付着特性とダウエル作用の相関関係、ならびにコンクリートの応力状態とダウエルひび割れの発生条件および進展方向の関係を考慮した解析的検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) 日比野憲太, 高木宣章, 児島孝之: 離散型要素を用いたせん断補強鉄筋を有さない鉄筋コンクリート梁の有限要素法解析, 土木学会論文集, No.739/V-60, pp.31-48, 2003.8.
- 2) Krefeld, W. J. and Thurston, C.W.: Contribution of Longitudinal Steel to Shear Resistance of Reinforced Concrete Beam, *ACI Journal*, Vol.63, No.3, pp. 325-344, 1966.
- 3) 岡田次郎, 日比野憲太, 高木宣章, 児島孝之: 離散型要素を用いたねじりを受ける鉄筋コンクリート梁の有限要素法解析, 平成 15 年度土木学会関西支部年次学術講演会, V-13-1-2, 大阪, 2003.5.
- 4) 鈴木基行, 中村泰介, 堀内信, 尾坂芳夫: 軸方向鉄筋のダウエル作用に及ぼす引張力の影響に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.426/V-14, pp. 159-166, 1991.2.