

せん断面に斜交配置された鉄筋の履歴挙動に関する研究

構造及びコンクリート工学分野 高橋 孝輔

Abstract

RC 部材のせん断面におけるせん断伝達要素のうち、鉄筋ダウエル作用に着目し、特に、交番作用下における、せん断面に斜交配筋した鉄筋のせん断伝達機構の解明とエネルギー吸収能の評価を目的として、Push-Off 試験体への正負交番載荷実験と、鉄筋を簡易的に柱-梁モデルとした非線形増分解析を行った。その結果、斜交配筋することで軸力による抵抗が初期から生じ、曲げ作用のみの直交配筋に比べて良好な初期剛性、最大荷重及びエネルギー吸収能を得た。また、2本の鉄筋を90度で交差させて配筋する場合、傾斜角度によらず、各接合筋1本当たりの荷重-変位関係の累加形式で評価できた。一方、コンクリートに埋め込まれた鉄筋をモデル化し、さらに付着を考慮した抜け出しモデルを用いることで全塑性状態までの包絡線を追跡でき、その妥当性を評価できた。

1. はじめに

斜めひび割れが発生した RC 部材のひび割れ界面、また、柱の基部や PCa 部材接合部のような、せん断面を有する部材を設計する際、界面におけるせん断力の伝達機構の把握とその評価は大変重要となる。このようなせん断面におけるせん断伝達要素には、骨材のかみ合わせ、せん断面を貫通した鉄筋（ダウエル作用）、摩擦効果などの抵抗要素が主として挙げられる。

せん断面での合理的な耐力評価及び設計を行うためには、これら個々のせん断伝達要素について、その伝達機構を解明する必要がある。本研究では、機構が比較的明快な鉄筋ダウエル作用に着目する。

ダウエル作用に関して、Vintzeleou ら¹⁾が行った直交配筋試験体に対して載荷方法が履歴に及ぼす影響の評価、また、岡田ら²⁾による斜交配筋試験体の耐力評価などをはじめ多くの研究が実施されてきたが、耐力や履歴形状の違いのみの評価に留まっているものが多く、そのせん断伝達機構に着目した研究は例が少ない。また、正負履歴特性を把握し、接合部において適切な配筋を行うことにより、鉄筋の繰り返し塑性挙動をエネルギー吸収装置として適用できる可能性もある。

このような背景のもと、本研究では、交番作用下における斜交配筋した鉄筋の履歴特性、すなわち、鉄筋のせん断伝達機構の解明とエネルギー吸収能の評価を目的とし、Push-Off 試験体による正負交番載荷実験を行うとともに、弾性支承上の梁理論及び鉄筋の抜け出しを考慮した柱-梁モデルにより、鉄筋の曲げ挙動ならびに伸縮挙動を導入した非線形増分解析による全断面降伏応力状態までの荷重-変位関係の算出を行った。

2. 正負交番載荷実験

2.1 試験体概要

実験パラメータは、表-1に示すように接合筋の傾斜角度であり、接合筋同士は90度で交差している。表中の試験体名は、載荷方法（単調 M、交番 C）、接合筋角度 α の順で示している。試験体は図-1に示すように、下凹型の側面形状をもつ上部ブロックと、直方体の下部ブロックからなり³⁾、2本あるいは4本の接合筋により両ブロックが接合されている。接合面には、接合筋のせん断伝達のみに着目するため、厚さ 2[mm] のアクリル板を配置してせん断面における摩擦の効果を最小限に抑制している。また、内部には SD295 D10 の接合筋及び補強筋を施した。なお、用いた接合筋及びコンクリートの材料特性を表-2、表-3に示す。

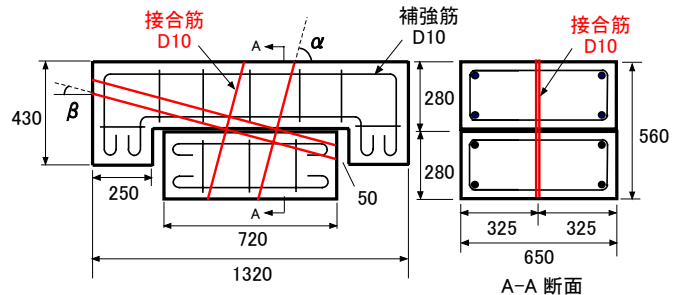


図-1 試験体形状

表-1 実験パラメータ

供試体名	α	β	載荷方法
M-90	90	-	交番
C-90	90	-	
C-75	75	15	
C-60	60	30	
C-45	45	45	

表－2 接合筋材料特性

呼び名	公称直径	降伏強度	引張強度	弾性係数	降伏ひずみ
	d [mm]	σ_{sy} [MPa]	σ_{su} [MPa]	E_s [GPa]	ϵ_{sy} [μ]
D10	9.53	355	500	196	1805

表－3 コンクリート材料特性

圧縮強度	引張強度	弾性係数	ポアソン比
σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	E_c [GPa]	ν_c
25.0	2.30	25.0	0.21

2. 2 計測項目および荷重方法

写真－1に示すように、本実験において計測した項目および荷重方法について以下に示す。

①荷重

…ロードセルにより荷重を測定した。

②変位

…各試験体とも試験体中央付近に変位計を取り付け、両ブロックの相対ずれ変位を測定した。

③接合筋ひずみ

…ひずみゲージを接合筋の中心軸に対して加力側と、その反対側に位置するよう縦リブに貼付し、ずれ変位を伴う接合筋の曲げひずみと軸ひずみの両者を検出できるようにした。計測位置は文献4)を参考に0d, 1.5d, 3.5d, 5d, 10dとした。

荷重は、写真－1で示したオイルジャッキを用いて行う。荷重プログラムは、振幅を0.25mm, 0.5mm, 1.0mm, 2.0mm, 以降1.0mmずつ増加させ、振幅が10mmに到達した時点で荷重を終了させた。なお、各振幅1サイクルのみの荷重としている。

3. 非線形増分解析

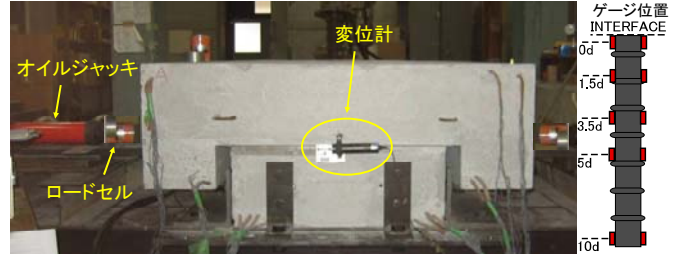
3. 1 解析モデル

接合筋がせん断面に対して傾斜角度 α を有する場合は、作用力を接合筋軸直交方向および軸方向に分解し、それぞれの方向力に対する抵抗モデルとして、弾性支承梁モデルおよび付着を考慮した抜け出しモデルを用いることとする。

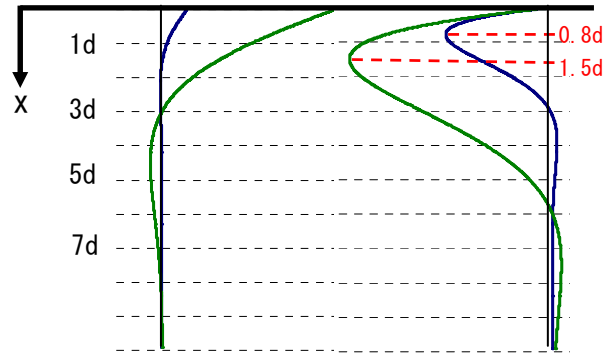
(1)弾性支承梁モデル

コンクリート中に埋め込まれた接合筋は、地盤に埋め込まれた杭が水平力に抵抗するように、弾性支承上の梁とみなすこととする⁵⁾。接合筋の軸方向を x とし、曲げ剛性 EI が全長にわたって一定であり、ずれ変位を δ_M とすると、式(1)が成り立つ。

$$EI \frac{d^4 \delta_M}{dx^4} = -k_h d \delta_M = P_h \quad (1)$$



写真－1 荷重前の試験体



(a)水平変位(式5) (b)曲げモーメント(式6)

図－2 水平変位、曲げモーメントの分布形状

ここに、 d : 接合筋の直径 [mm]
 E : 接合筋の弾性係数 [N/mm^2]
 I : 接合筋の断面2次モーメント [mm^4]
 P_h : コンクリート反力 [N/mm]
 k_h : コンクリート反力係数

ここで、コンクリート反力係数は、文献6)を参考に、式(2)で与えられる。式中 E_0 は、粘土質地盤においては一軸圧縮強度 q_u と $q_u/2$ 時のひずみ ϵ_0 により定められる。本研究では、これを利用して、コンクリートの一軸圧縮強度を用いた式(3)、すなわち、コンクリートの弾性係数 E_c を用いている。

$$k_h = 0.8E_0 d^{-\frac{3}{4}} \quad (2)$$

$$E_0 = \frac{\sigma_B}{2\epsilon_0} = E_c \quad (3)$$

ところで、式(1)は、特性値 β により式(4)となる。

$$\frac{d^4 \delta_M}{dx^4} + 4\beta^4 \delta_M = 0 \quad \text{ここに、} \beta = \sqrt[4]{\frac{k_h d}{4EI}} \quad (4)$$

式(4)に、境界条件を考慮して、水平変位およびモーメントを求めると式(5)、(6)で与えられ、その分布形状を描くと図－2青線のようになる。

$$\delta_M = \frac{P}{2EI\beta^3} e^{-\beta x} \cos \beta x \quad (5)$$

$$M = -\frac{P}{\beta} e^{-\beta x} \sin \beta x \quad (6)$$

ここで、曲げモーメント分布に着目すると、最大点は接合筋軸方向 $x=0.8d$ の位置に存在しており、文献4)および本実験の結果である $x=1.5d$ と異なっている。よって、本解析では実験データに基づくものとして、曲げモーメントの最大点を $x=1.5d$ の位置にシフトさせる。シフトの手段としては、周期を支配している特性値 β 、あるいは、座標値自身の x を変化させることが考えられるが、ここでは、コンクリートの見かけ上の弾性係数を低減させることが有効であるという既往研究⁵⁾に基づき、 β をシフトさせた。これに伴い、水平変位の分布および大きさも変化し、シフト後の分布を描くと図-2 緑線のようになる。

(2) 抜け出しに対するモデル

接合筋軸方向については、鉄筋の引抜き試験結果⁷⁾に基づきモデル化する。具体的には、ひずみ分布を直線で近似、すなわち、軸方向にわたって一定の付着応力分布を仮定し、図-3 に示すように軸力分布を三角形分布とする。よって、深さ x 位置における軸力 N の大きさは、式(7)で求められる。また、軸方向の変位 δ_N は、軸方向ひずみを積分し、式(8)で算出する。

$$N = P_N \left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad (7)$$

$$\delta_N = \int_0^L \varepsilon_N dx = \int_0^L \frac{P_N}{EA} \left(1 - \frac{x}{L}\right) dx = \frac{P}{EA} \times \frac{L}{2} \quad (8)$$

ここに、 L : 付着長さ [mm]

(3) 解析上設定した仮定

- ① 接合筋周りのコンクリートの支圧破壊を考慮しない
コンクリートの見かけ上の弾性係数を低減させることにより対処することとし、破壊に伴うモーメント最大点の推移等は考慮しない。
- ② 接合筋の引張挙動と圧縮挙動は等しい
周囲のコンクリートの支持により、接合筋は圧縮軸力による座屈を生じないため、同挙動とする。
- ③ 変形による軸力の増加は考慮しない
本解析では、モデルを微小変形問題として扱うこととし、変形に伴う軸力の付加は考慮していない。

3. 2 解析手法

解析における増分計算過程について図-4 に示す。本解析では、3.1 で示したように、作用力を各方向に分解し、それぞれの挙動を重ね合わせるにより全体挙動としている。弾性域では、変形の適合条件を満足するよう定めた曲げおよび軸剛性の比により作用力を分解し、断面縁の応力が降伏応力に到達するまで弾性計算を行って荷重値を増大させる。その後、塑性域

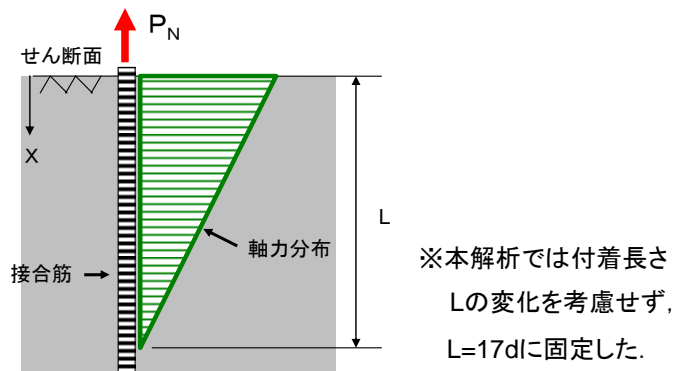


図-3 抜け出しに対するモデル

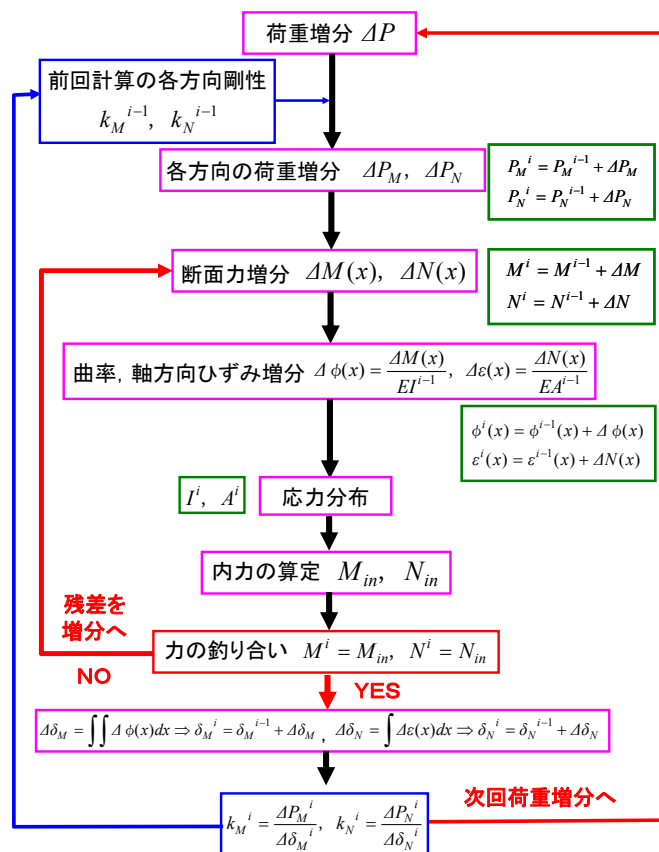


図-4 増分解析手法

において、接合筋 1 本に対し、0.5[kN] を作用させて増分計算を行う。この時、荷重増分に伴って断面力が増加するが、断面縁降伏以降も曲げモーメントおよび軸力は、弾性域における曲げモーメントおよび軸力分布と相似形で増加するとしている。また、応力分布算定時に、断面内の応力が σ_y に達した場合、応力-ひずみ関係を完全弾塑性としているため、弾性係数を零とみなし、作用力に対して抵抗できる断面を低減させた時の断面 2 次モーメント、断面積を有効であるとして次回算定に用いる。また、釣合条件の判定においては、外力に対する残差が 10[%] 以下の範囲を許容値と設定して収束判定を行っており、範囲外の場合はその残差を断面力増分として作用させることにより反復計算を行っている。なお、接合筋は逆対称応力を受けている

ため、ずれ変位は 2δ となることに留意する。

4. 実験結果および解析結果

4. 1 荷重－変位関係

実験および解析により得られた荷重－変位関係を図－5に示す。なお、解析値は、各傾斜角度1本ごとに算出しているため、非対称配筋であるC-75については、同ずれ変位における荷重値の累加としている。また、初期剛性、降伏荷重値および最大荷重値の実験値と解析値の比較を表－4に示す。

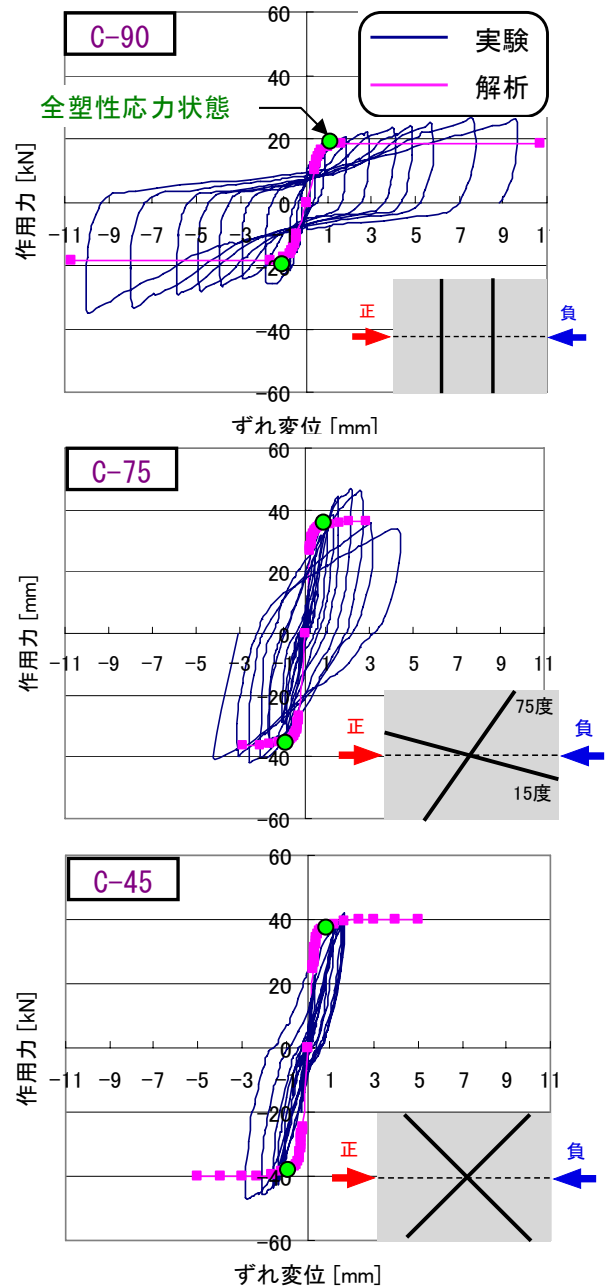
まず、図－5より、一般にダウエル作用と呼ばれる配筋であるC-90と比較すると、接合筋が傾斜角度を有する試験体は、初期剛性、最大荷重値の増加が明らかであり、軸力負担による効果が現れている。また、履歴形状は、C-90が顕著なスリップ型を示しているのに対し、C-75は紡錘型、C-45は、荷重零点付近でややスリップ型の挙動を示すが、全体としては膨らみのある履歴形状を示し、斜交配筋することによる大きな差異が認められる。これは、C-90では曲げ変形が主となり、変形に伴うコンクリートの支圧破壊が生じているのに対して、軸抵抗が主となる場合はこのような局所的な破壊が生じていないためと考えられる。

ここで、表－4の各値を見ると、傾斜角度を設けた試験体において、差がほとんど生じていないことがわかり、本研究で対象とした接合筋同士を90度交差させた場合、このような特徴が現れることを示している。なお、詳細については次節で述べる。

次に、実験値と解析値の対応について、図－5、表－4を参照すると、包絡線は初期から、図中●で示した全塑性応力状態に至るまで比較的一致しており、値についても初期剛性、降伏荷重において一致していることがわかる。よって、全塑性応力状態までは本解析で用いたモデルにより比較的精度良く評価でき、また、非対称配筋した場合は各接合筋の荷重－変位関係の累加で評価できるものと考えられる。

しかし、最大荷重値について見ると、解析において全塑性応力状態となった後も、実験値が上昇している。これについては、ひずみ硬化、変形に伴う軸力成分の増加（前述仮定③に対応）などが挙げられるが、定量的な評価には至っていない。

一方、終局強度を示す建築学会式(9)、および、全塑性応力状態時の荷重を示す篠田らの提案式(10)との比較を行うと、いずれの試験体においても概ね一致していることがわかる。よって、これらの式を良く評価できていると言え、さらに、傾斜角度を有する場合、傾斜による接合面積の増大を考慮することで、これらの式が適用できる可能性があることを示した。



図－5 荷重－変位関係

表－4 実験値と解析値の比較

(a) 初期剛性

試験体名	実験値	解析値
	[kN/mm]	[kN/mm]
C-90	37	26.4
C-75	97.5	99.4
C-45	122.5	99.4

(b) 降伏荷重

試験体名	接合筋角度	実験値	解析値
		[kN]	[kN]
C-90	90	13.1	10.3
C-75	75	28.3	29.8
	15	24	26.8
C-45	45	31.4	24.7

(c) 最大荷重

試験体名	実験値	解析値	建築学会 ⁸⁾	篠田ら ⁴⁾
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
C-90	35.1	18.3	35.5	23.4
C-75	45.9	36.3	—	—
C-45	46.6	39.9	50.1	33.1

◆建築学会式⁸⁾ : $\tau = 0.7\sigma_y \cdot p$ (9)

◆篠田らの提案式⁴⁾ : $\tau = 1.72 \cdot p \cdot \sqrt{\sigma_y \cdot \sigma_c}$ (10)

τ : 降伏せん断強度 [N/mm^2]

p : 水平接合部に対する接合筋断面積比

(斜交配筋の場合, $\frac{A_s}{\sin\theta}$ として断面積を増加)

σ_y : 接合筋の降伏応力 [N/mm^2]

σ_c : コンクリートの圧縮強度 [N/mm^2]

4. 2 伝達機構

傾斜角度による伝達機構の違いについて実験結果および解析結果を踏まえて述べる。なお、伝達機構の推移を調べるため、M-N 相関曲線を描き、断面力 M, N の履歴を追うことで伝達機構を捉える。

ここでは、曲げの最大点が存在した $x=1.5d$ に着目する。まず、ひずみ測定値について、弾性計算を行って得られた断面力の履歴をまとめたものを図-6 に、解析により得られた履歴を図-7 に示す。なお、縦軸、横軸はそれぞれ一軸降伏軸力、全塑性モーメントで正規化しており、図中の直線は降伏曲線を表す。また、図-7 の表記について、試験体に対して、ある一方向からせん断力が作用した場合、一方の接合筋には軸引張力が、もう一方の接合筋には圧縮軸力が生じるものと考えられるが、3. 1 (3) で示したように、接合筋の圧縮挙動と引張挙動を同様と仮定しているため、M-N 相関曲線上では絶対値により表示している。

これらの結果より、傾斜角度を設けることで、履歴の横軸に対する傾きが大きくなり、軸力による負担が生じていることがわかる。特に、45 度より傾斜角度が小さくなると、解析では終局時に一軸降伏強度の 80[%]以上の値を示しており、軸力負担が主となっていることがわかる。一方、45 度より大きな角度でも変形が進むにつれ軸力による負担が増加する履歴を示しており、伝達機構の変化が認められる。よって、実験時に C-75 と C-45 の初期剛性と最大荷重値が C-90 に比べて大きくなったのは、このような伝達機構の違いによるものと考えられる。ところが、C-75, C-45 間で実験値を比較すると、さほど大きな差は生じていない(表-4 参照)。これは、図-7 で示した 15, 75 度筋の力の合力ベクトルを調べると、45 度に類似しているため、履歴に差がなかったと考えられる。さらに、実験を実

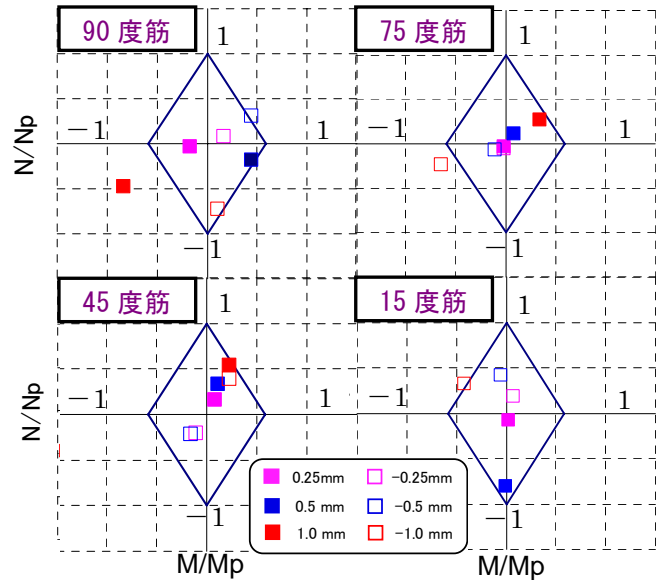


図-6 断面力の履歴 (実験結果, 弾性計算)

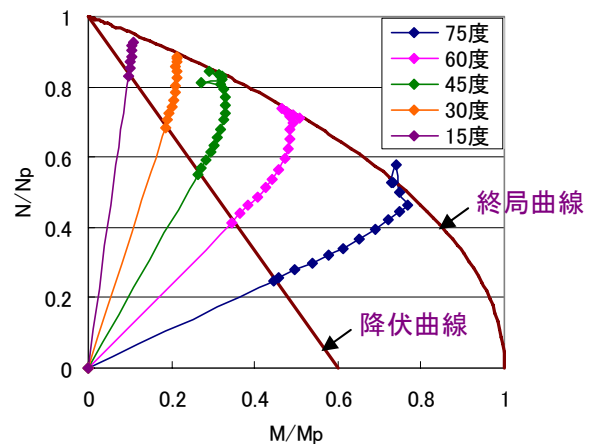


図-7 断面力の履歴 (解析結果)

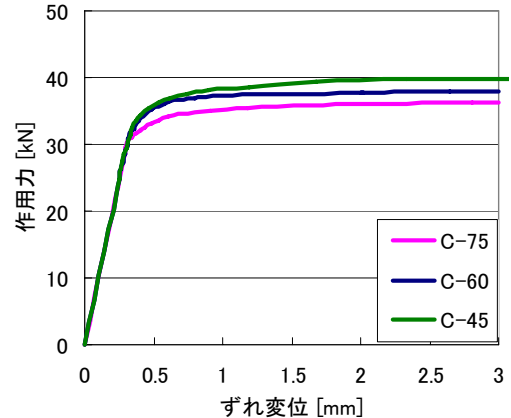


図-8 荷重-変位関係の比較 (解析結果)

施することができなかった C-60 について、30, 60 度の組合せで見ると、こちらも 45 度に類似しており、C-75, C-45 と同様の挙動を示すことが推測される。さらに、図-8 に示す解析結果においても、C-75, C-45, C-60 の 3 試験体に大きな差が生じていないことから、その機構が説明できる。

4. 3 エネルギー吸収能

履歴曲線から得られた等価粘性減衰定数およびエネ

ルギー吸収量とずれ変位の関係について、図-9に示す。図中、黒塗りの点は実験において接合筋の対面に貼付したゲージの一方が降伏ひずみに達した時点を示している。なお、ここでは、負載荷側の減衰定数を代表させており、算出方法は図-10、式(11)による。

いずれの試験体においても、接合筋降伏後、減衰定数及びエネルギー吸収量とも増加する傾向がある。しかし、C-90は、ずれ変位の増加に伴って減衰定数が減少し、さらに、エネルギー吸収量の増加率も他と比べて小さいことがわかる。これは、4.1で述べたように、履歴形状がスリップ型に変化しているためであり、このことから、接合筋の塑性変形能を活かすためには、その周囲のコンクリート反力の有無が重要になり、さらに、ひび割れ進展を防ぐために、接合筋の塑性化まで耐え得るコンクリートかぶりの厚さも重要な要素になると考えられる。一方、C-75、C-45はずれ変位の増加に伴い両値とも増加しており、膨らみのある履歴形状の特徴が現れている。また、変位3[mm]時には減衰定数が25[%]程度以上に達しており、減衰効果を十分に期待できる値を示している。軸力負担が大きくなる斜交配筋は、周囲のコンクリートの支圧破壊が起こりにくく、エネルギー吸収能に対して良好な結果を示す。

5. 結論

- 1) 斜交配筋により、載荷初期から曲げに加えて軸力による抵抗が生じ、特に45度より小さい傾斜角度で軸力抵抗が顕著になった。また、この伝達機構は、初期剛性、最大荷重の向上および履歴形状に対して良好な結果をもたらした。さらに、接合筋の塑性変形能はエネルギー吸収に期待でき、特に、斜交配筋した場合はその有効性が増す。
- 2) 90度交差配筋する場合、各接合筋1本当たりを累加することで評価でき、いずれの傾斜角度の場合でも、その荷重-変位関係に大きな差は生じない。
- 3) 本研究で対象とした、接合面におけるせん断伝達に関する評価は、軸直交方向には特性値を修正した弾性支承梁モデル、軸方向には付着を考慮した抜け出しモデルを用いることにより全塑性応力状態まで評価可能となる。

6. 参考文献

- 1) E.N.Vintzeleou et al : ACI Structural Journal, pp.18-30, January-February, 1987
- 2) 岡田 他: コンクリート工学年次論文集, pp.649-654, 2001

- 3) 古屋 他: 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.1645-1646, 1976
- 4) 篠田 他: 土木学会論文集, No.571, pp.57-67, 1997
- 5) 五十嵐 他: コンクリート工学論文集, 24(2), pp.691-696, 2002
- 6) 上野嘉久: 実務から見た基礎構造設計, 学芸出版社, pp.148-149, 2006
- 7) 高橋 他: コンクリート工学論文報告集, 31(2), pp.643-648, 2009
- 8) 日本建築学会: プレキャスト鉄筋コンクリート構造の設計と施工, 1986

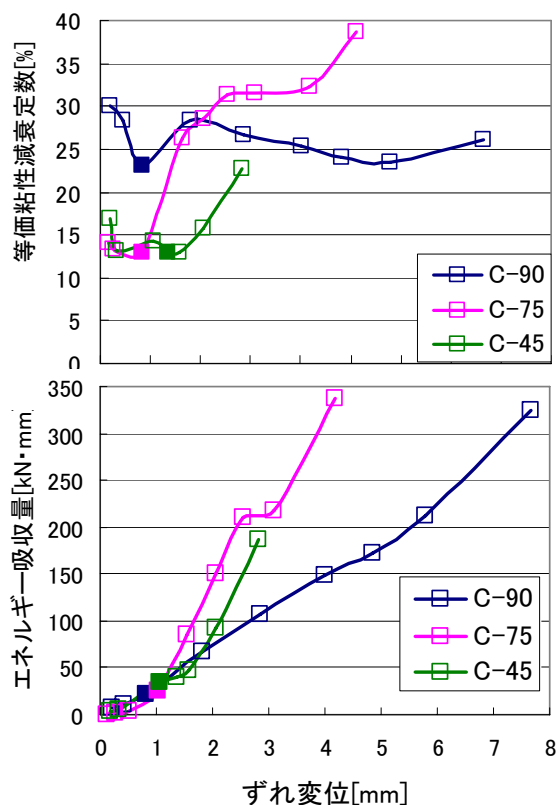


図-9 減衰定数および吸収量の変化

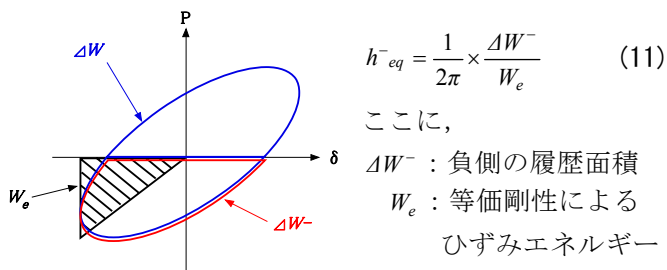


図-10 等価粘性減衰定数の算出方法

討 議 等

◆ 討議 [谷口与史也 教授]

どのような部位への適用を考えているか。また、解析においては摩擦を考慮しているか。部位によって荷重条件が変わるため、摩擦は考慮すべきではないか。

◇ 回答

本研究では、斜めひび割れを有する鉄筋コンクリート部材のひび割れ界面、また、柱基部やプレキャスト部材接合部、新旧コンクリートの打ち継ぎ部など、せん断面（ずれ界面）を有する部材を対象としております。

また、摩擦の考慮について、本研究では接合面における摩擦を実験・解析とも考慮しておりませんが、確かに、本実験のような大型の試験体の場合や、実構造物において対象とする部位によっては、摩擦の影響が大きく寄与するものと考えられます。本研究においては、潤滑油を塗布したアクリル板を配置することにより、摩擦の効果を最小限に留めるよう工夫しておりますので、本研究結果は比較的妥当なものであると考えておりますが、摩擦効果は多少なりとも必ず存在するものと考えられますので、摩擦に関する評価は今後考慮すべき大きな課題であると考えております。

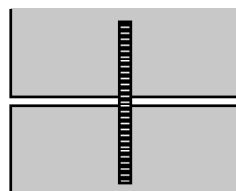
◆ 討議 [山口隆司 教授]

「90度交差させた場合」は累加でき、「斜交配筋させた場合」は累加できないという結論で良いか。また、斜交する場合、傾斜角度は何度にした方が良いというのはあるのか。

◇ 回答

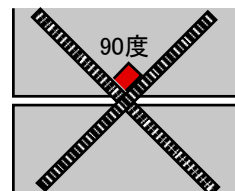
本発表における表記が適切でなかったため、誤解を与えてしまいました。参考図を右上図に示します。まず、「斜交配筋」というワードについて、これはせん断面に対して接合筋の傾斜角度 α を設定した試験体を総称したものであります。すなわち、図に示す直交配筋でない場合、すべて斜交配筋と定義しています。また、斜交配筋させた場合、本研究では2つの接合筋が交差するような配筋を施しており、この2つの接合筋同士が交差する角度を「90度」と設定しております。すなわち、本研究において「斜交配筋」させた場合、内部の2つの接合筋は「90度」で交差しているため、討議における、「90度交差させた場合」と「斜交配筋させた場合」は同様のことを意味しています。

本研究では、このように2つの接合筋の交差角度を90度となるよう斜交配筋させた場合、2つの接合筋の荷重-変位関係の累加により評価できるとしてあります。



せん断面に対して「90度」

これは「直交配筋」と呼ぶ



せん断面に対して「斜交配筋」

接合筋同士が「90度」で交差

また、接合筋の傾斜角度を何度に設定するのが効果的かについて、本実験および解析結果からは、初期剛性、最大荷重値、エネルギー吸収能の観点から、軸力による抵抗が支配的となることが有効と認められますので、本梗概の図-7に示すように、軸力が支配的となる45度より小さな角度を設けることが有効と考えられます。ただし、終局時の応力状態の違い、また、組み合わせる鉄筋の角度などによって全体の挙動は変わってくるものと考えられますので、効果的な角度を言及するには多くのシミュレーションが必要であると考えております。

◆ 討議 [谷池義人 教授]

実験時において斜交筋の施工はどのように行ったか。

◇ 回答

コンクリート打設後に鉄筋を挿入するのではなく、あらかじめ型枠およびアクリル板に、設定した傾斜角度となるよう鉄筋を通しておき、その後コンクリートを打設しております。なお、打設前の試験体の内部は、下の写真のようになります。



◆ 討議 [吉中進 講師]

現場施工のことを考えると直交配筋が基本であり、斜交配筋は困難と思われるが、どのように考えているか。

◇ 回答

本研究では、まず、斜交配筋した場合のせん断伝達機構の解明およびエネルギー吸収能の評価を行うことを第一に考えておりましたので、このような施工性の

問題については追究していませんでした。しかし、討議にあった通り、現在の施工法においては直交配筋するのが一般的であり、斜交配筋は施工性において劣るものと考えられます。よって、施工性を考慮した配筋方法などについては、実用するにあたり、今後必ず検討していかなければならない課題であると考えております。