

論文 繰返し載荷における鉄筋のダボ抵抗機構によるエネルギー吸収能力

稲垣満^{*1}・香取慶一^{*2}・篠原保二^{*3}・林静雄^{*4}

要旨：鉄筋コンクリート梁では，せん断ひび割れ発生時に鉄筋のダボ作用を伴う。本研究は，このダボ抵抗機構をエネルギー吸収及び鉄筋の局部変形の面から検討するため，鉄筋コンクリート梁をモデル化した試験体に鉄筋に一定引張軸力を作用させた状態で，繰返しダボせん断載荷を行った。

キーワード：ダボ抵抗機構，繰返しせん断挙動，局部変形，エネルギー吸収

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物では，せん断ひび割れが生じた後，引張主筋のダボ作用によってもせん断力が伝達される。せん断ひび割れ発生から，終局耐力に至るまでのダボ作用によるせん断伝達機構を検討するためには，ダボ作用によるせん断力と鉄筋の付着挙動に基づいた局部変形を明らかにする必要がある。しかし，せん断力・局部変形及び，それから求められるエネルギーについて研究されている論文は小林¹⁾，前川ら²⁾をはじめ多くあるが，梁部材に注目し，繰返し載荷を行った実験は過去に例がない。

本研究では，このダボ抵抗機構をエネルギー吸収及び，鉄筋の局部変形・付着の面から検討するため，鉄筋に一定引張軸力を作用させた状態で繰返しダボせん断載荷を行った。

2. 実験方法

2.1 試験体

本実験では，梁にせん断ひび割れが生じた後の接合部側の部材の挙動を見ることを目的とし，小林¹⁾の実験を参考にして試験体を計画した(図-1)。

試験体は，普通ポルトランドセメント，水，天然骨材からなる材齢35日のプレーンコンクリート(最大骨材径20mm)とし，スランプ18cmを目標として調査した(表-1)。又，実際の梁部材と同じ条件にするため，コンクリートは試験体を横方向に寝かせた状態で打設した。

試験体は試験区間長を125,250及び500mmの3種類とし，125mmの試験体にはD10(SD345)の鉄筋を，250と500mmの試験体にはD19(SD345)の鉄筋に溝切り加工を行ったものを主筋に用い，かぶり厚さが主筋の5D(D:鉄筋径)及び7.5Dになるよう断面を設計した(図-5)。D19の溝切り加工は付着状況が変化しないよう鉄筋のリブに沿って幅4mm深さ5mmの溝を入れている。断面積は245～253mm²(平均249mm²)となり，公称鉄筋に対する欠損率は13.2%となる(図-4)。また，この溝に沿って試験区間で25mmピッチ，スタブ内で50mmピッチ，想定

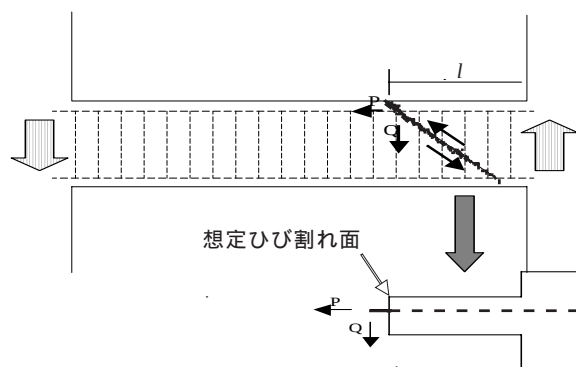


図-1 試験体のモデル化

表-1 調合表

W/C	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)
0.55	194	353	1101	662

粗粒率 粗骨材: 6.69 細骨材: 3.13

*1 東京工業大学大学院 工修 (正会員)

*2 東京工業大学 助手 建築物理研究センター 工博 (正会員)

*3 東京工業大学 助教授 建築物理研究センター 工博 (正会員)

*4 東京工業大学 教授 建築物理研究センター 工博 (正会員)

ひび割れ面と試験区間 - スタブ境界面からは 5mm のところにゲージを左右に貼り鉄筋の挙動を検討する。表 - 2 に試験体パラメーター及び材料特性を記す。

2.2 載荷方法

加力装置図を図 - 2 に示す。長い PC 鋼棒を介して軸力を与えることにより、鉄筋が変形を起こしても軸力が鉛直方向に向けられる。軸力は鉄筋に厚さ 19mm の鉄板を溶接し、その鉄板からピン及び球座ナットを介し、2 軸方向に自由度を持たせた。また、せん断力は想定ひび割れ面に厚さの無視できるテフロンシートを敷き、そのテフロンシートの上に厚さ 19mm の鉄板を介して、せん断載荷した。こちらも軸力と同様、ピン及び球座ナットを使用している(図 - 3)。

実験は 1000kN サーボジャッキを使用し、始めに荷重制御により垂直方向に鉄筋降伏荷重の 0%, 50% 及び 75% の引張軸力を与え、次に軸力一定の条件下でせん断荷重を左右の高圧ジャッキ制御システムで作動する 200kN ジャッキを用い、加力サイクルを、コンクリート打設時下側を正方向とし、正負ともに鉄筋のせん断変位(図 - 6) $\delta_{sl}=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0$ 及び 5.0mm で折返し、各サイクル 2 回づつ正負交番繰返し載荷を行った。

2.3 変位の定義

試験体の変位の定義を図 - 6 に記す。試験体上面を想定ひび割れ面とし、試験区間とスタブ境界面を下部ひび割れ面とする。絶対変位は載荷前の位置を基準とした変位である。各変位はコンクリート表面に変位計を当て測定している。

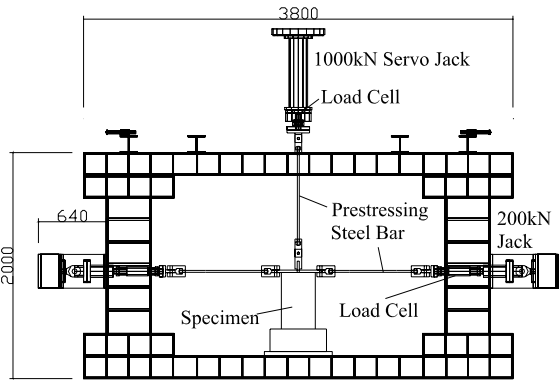


図 - 2 加力装置図

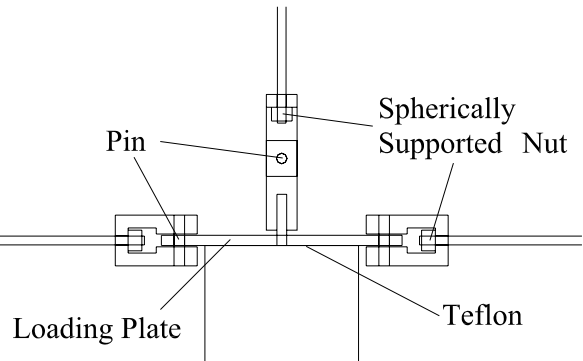


図 - 3 加力装置詳細図

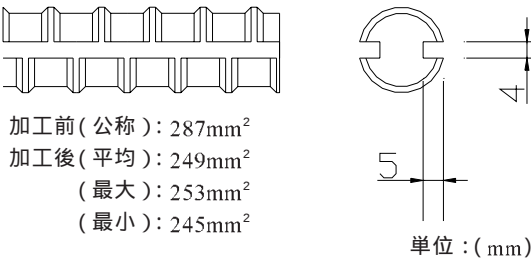


図 - 4 溝切り鉄筋加工図

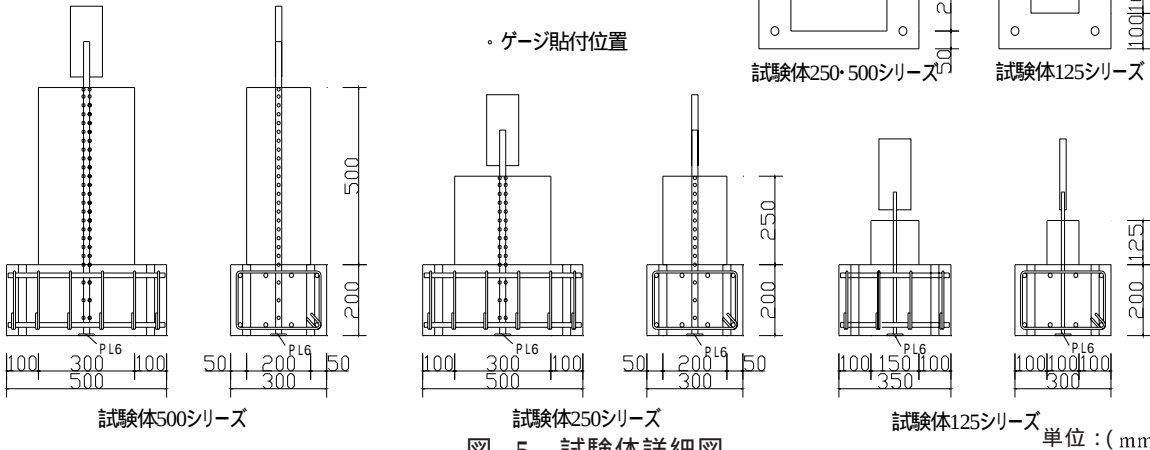


図 - 5 試験体詳細図

表 - 2 パラメータおよび材料特性一覧

試験体	l (mm)	主筋	軸力 (kN)	F_c (N/mm ²)	E_c (GPa)
125-00	125	D10	0	21.0	19.1
125-50	125	D10	13.8	24.4	21.7
125-75	125	D10	20.6	20.9	23.0
250-00	250	D19	0	27.5	24.0
250-50	250	D19	45.5	21.0	19.1
250-75	250	D19	68.2	20.9	23.0
500-00	500	D19	0	31.5	25.1
500-50	500	D19	45.5	23.8	22.1
500-75	500	D19	68.2	27.3	26.4

試験体名 例: 250-00 l p

l : 試験区間長

p : 軸力比 (鉄筋降伏強度に対する比率 %)

F_c : シリンダー圧縮試験強度 (3本の平均値)

E_c : ヤング係数 ($2/3 F_c$ と原点から算出した割線剛性)

鉄筋種類	断面積 (mm ²)	降伏荷重 (kN)	降伏応力度 (MPa)	最大応力度 (MPa)	降伏歪 (μ)	ヤング係数 (GPa)	伸び率 (%)
D10	71	27.5	387	536	2217	184	15.4
D19(溝切り加工)	249	90.9	368	577	2107	203	20.1

3. 実験結果

3.1 破壊性状と履歴ループの検討

図-8 にせん断変位 δ_{s1} -せん断荷重 Q 関係を示す。全試験体中7体は、変位 δ_{s1} が進むにつれ、試験区間-スタブ境界面に水平にひび割れが入り、そのひび割れ幅が広がっていった。これに対し試験体 125-00 及び 250-75 はこれら試験体とは異なり、鉄筋に沿って付着割裂が発生し、その後ひび割れが左右に広がっていった(図-7)。前者の試験体が下部ひび割れ面にひび割れが生じた後、一度は耐力が低下するが、その後再び耐力が大きくなるとともに履歴ループ面積も増加したのに対し後者の試験体では、ひび割れ発生以降、耐力があまり上昇せず最大耐力以降はほぼ一定のループを繰り返している。

軸力を導入した試験体 250-50 は 250-00 に比べひび割れ発生時にすべりを生じている。また δ_{s1} が上昇すると共に軸力を導入していない試験体 250-00 は試験体 250-50 に比べ残留変形が大きくなった。これは軸力を導入していないためひび割れ幅が大きくなり、コンクリートの摩擦によって変形が妨げられたためだと考えられる。また、破壊性状の異なった試験体 250-75 は他の2体に比べ最大耐力は上昇しなかった。初期剛性は試験体 250-00 (27.26kN/mm) に対して試験体 250-50 は 89% (24.37kN/mm)、試験体 250-75 では 73% (19.91kN/mm) となった。

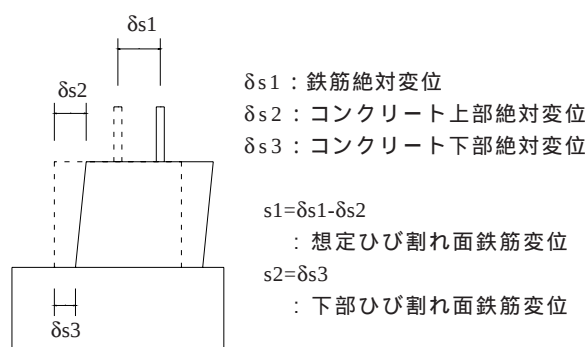


図 - 6 変位定義詳細図

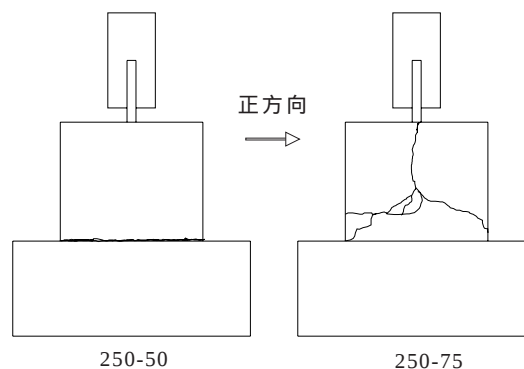


図 - 7 最終破壊状況

3.2 歪分布の検討

図-9 に試験体 250-00, 250-50 及び 500-50 の $\delta_{s1} = 1\text{mm}, 3\text{mm}, 5\text{mm}$ 、下部ひび割れ及び発生時の歪分布を示す。グラフは全て正側のサイクル時のものである。

$\delta_{s1} = 1\text{mm}$ の時点ではどの試験体もひび割れは発生していないため、上部想定ひび割れ面に近い場所で典型的なダボ作用時の歪分布となっている。しかし、ひび割れ発生以降の挙動は大き

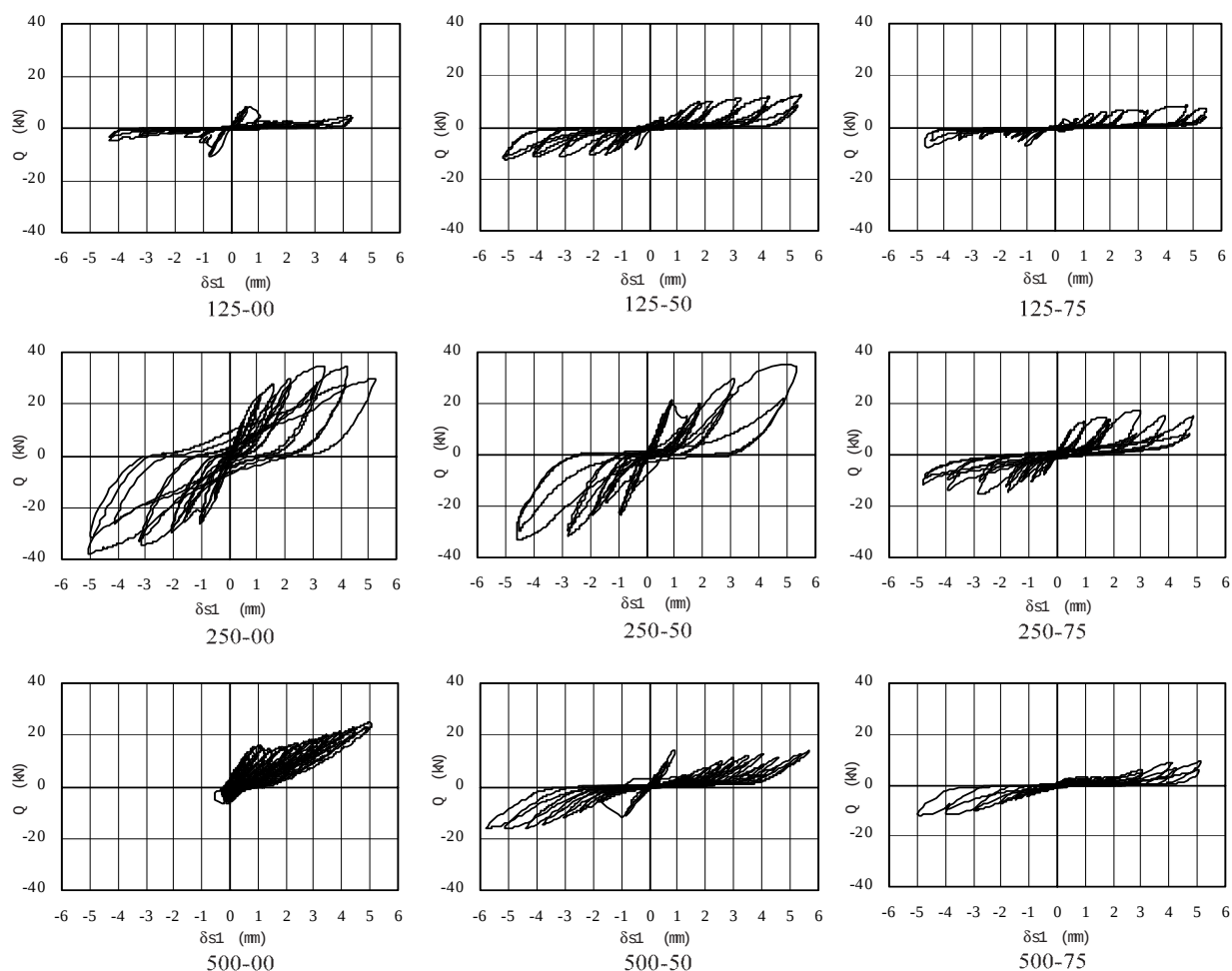


図-8 セン断変位 δs_1 - セン断荷重 Q 関係

く異なり、250-00 ではひび割れ発生以降も下部ひび割れ発生面での歪が増加せず、想定ひび割れ面での鉄筋変形が大きい。これは、軸力がないため、下部ひび割れ面におけるひび割れ幅の増加が少なくコンクリートの摩擦の影響を大きく受け、鉄筋の変形が妨げられたためと考えられる。それに対し、軸力の入った他の2体では下部ひび割れ面で鉄筋でひずみの変化が見られた。試験体 250-50 では $\delta s_1=3\text{mm}$ の地点ではまだ上部の鉄筋変形の方が大きく下部の鉄筋変形は少ない。それに対し、試験体 500-50 では $\delta s_1=3\text{mm}$ で、すでに上部と同程度の変形をしている。この2つの違いは試験区間長さのためと考えられ、ひび割れ発生時 250-50 も 500-50 も両引きの状態になるが、250-50 は、コンクリートと鉄筋の付着が少ないため、内部の歪も上昇している。それに対し試験体 500-50 では上部想定ひび割れ面から 30cm 程度のところで歪が最小とな

り、ほとんど値が変動していないことから、この点の上部と下部での鉄筋挙動はお互いの影響が少ないと考えられる。

3.3 変形性能の比較

鉄筋変形図を図-10に、また250シリーズを比較するため、試験体 250-00 及び 250-00 の s_1 - Q 関係及び s_2 - Q 関係を図-11・12に示す。

250シリーズにおいては s_2 はサイクルが増えてもほとんど変化しておらず、 $\delta s_1=5\text{mm}$ のとき、両者共 $s_2=1\text{mm}$ 程度の変形にとどまっている。それに対し、 s_1 は2～4mmと比較的な値になり、 δs_1 の変形のほとんどを上部鉄筋の変形が受け持っていることがわかる。試験区間の短い250-00や250-50ではひび割れ発生以前に上部で鉄筋降伏が生じたため、コンクリートの負担する付着が少ない250シリーズでは、下部ひび割れ発生面にひび割れが生じた後も上部の鉄筋塑性部分で変形を受け持ち、下部鉄筋の変

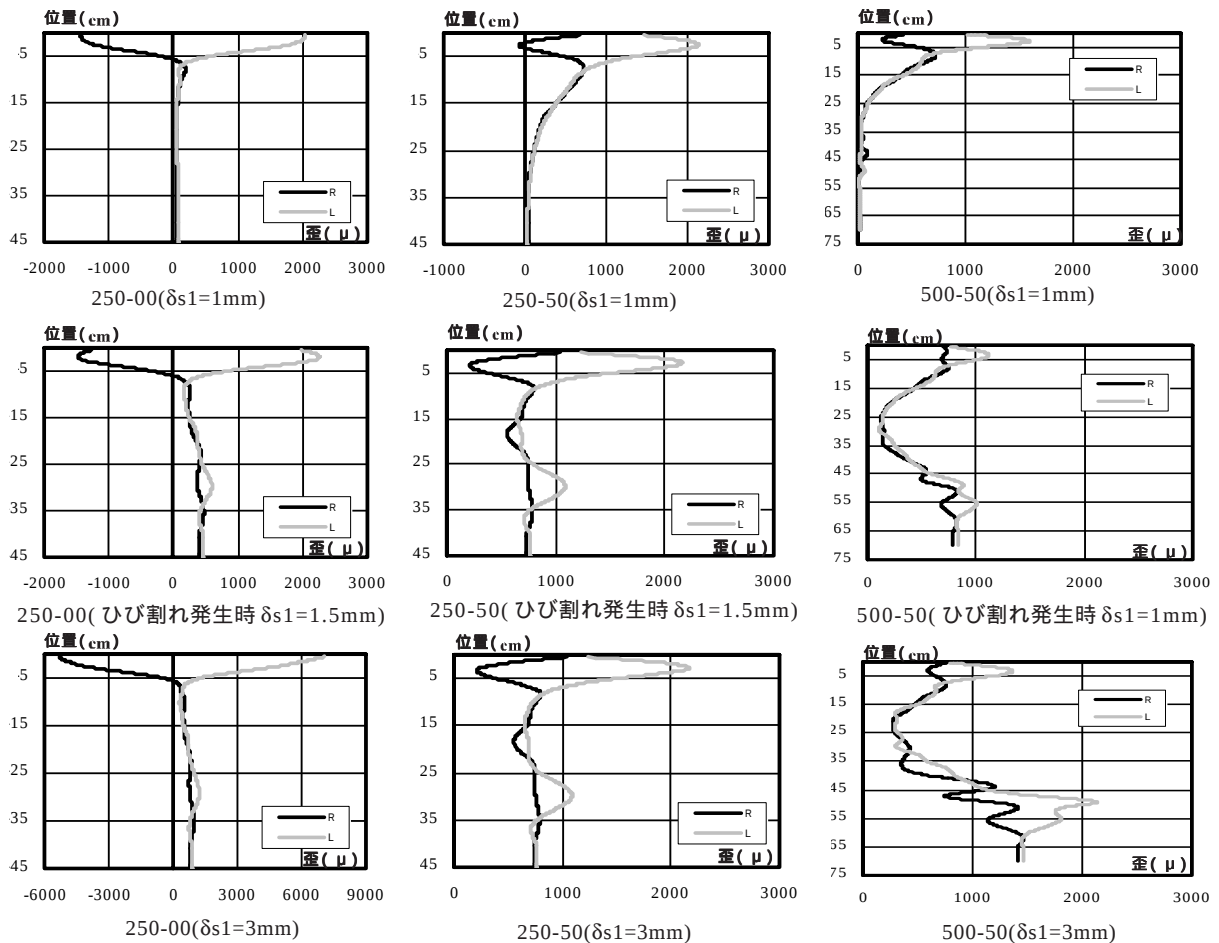


図 - 9 歪分布図

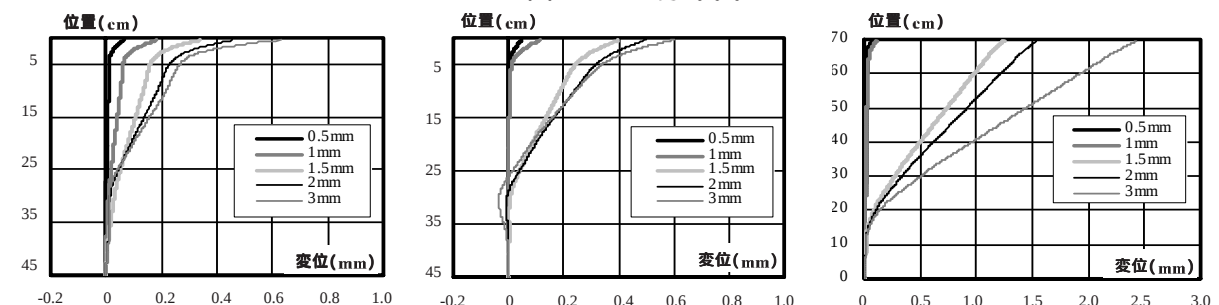


図 - 10 鉄筋変形図

形は微小になり， s_1 が大きくなり s_2 があまり変動しなかったと考えることが出来る。

また，破壊性状の異なった250-75は試験区間 - スタブ境界面にひび割れが入らなかったのどのサイクルにおいても s_2 はほぼ0となっている。ここには記していないが，試験体250-75ではひび割れの進展と共に鉄筋変形位置が上部から下部へ進展する現象が見られた。

3.4 エネルギー吸収の比較

250-00と250-50を部分的な吸収エネルギーで比較するため，上部想定ひび割れ面で鉄筋の変

形及びコンクリート劣化で生じるエネルギー(s_1 -Qの履歴ループ面積)を図-13，下部ひび割れ面で鉄筋の変形及びコンクリートの劣化や摩擦で生じるエネルギー(s_2 -Qの履歴ループ面積)を図-14に示す。

想定ひび割れ面でのエネルギー(図-13)は250-00では1回目と2回目のループでほぼ同量の吸収量を得ているのに対し，250-50では1回目に対し2回目が増加している。

下部ひび割れ面(図-14)では，250-50はエネルギー量が増加しているのに対し，250-00は変位

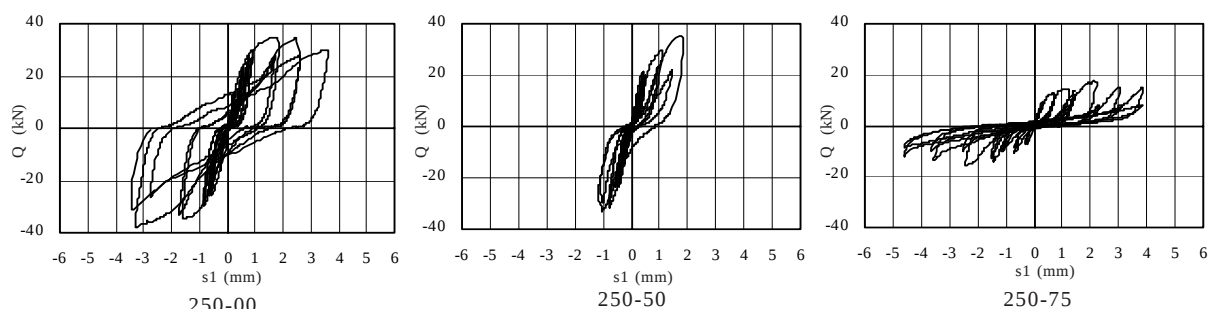


図 - 11 せん断変位 s_1 -せん断荷重 Q 関係

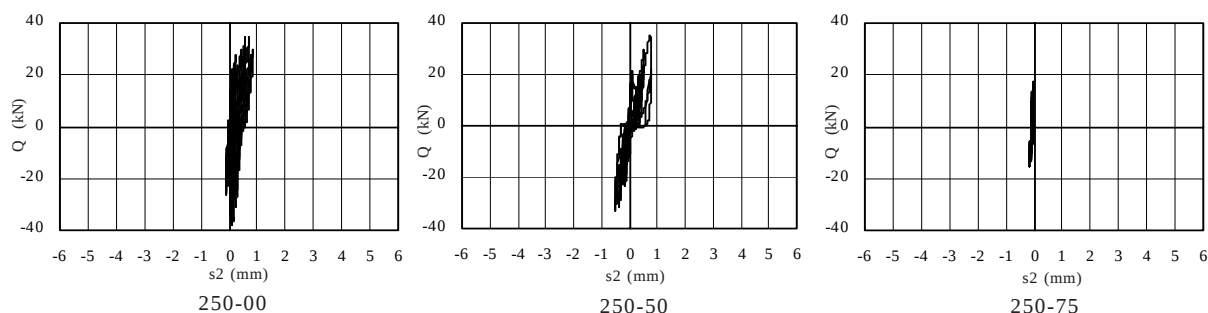


図 - 12 せん断変位 s_2 -せん断荷重 Q 関係

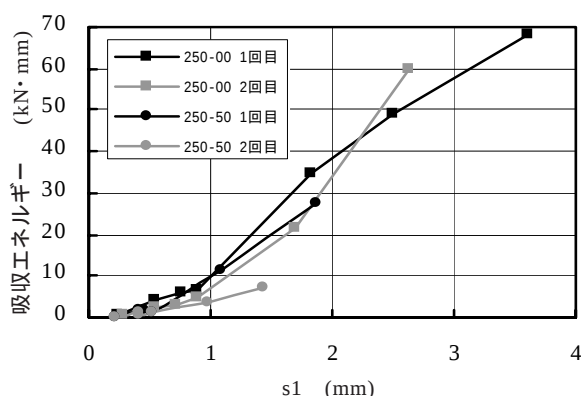


図 - 13 せん断変位 s_1 -吸収エネルギー関係

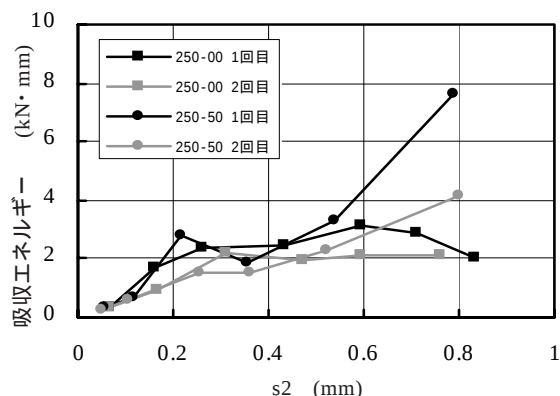


図 - 14 せん断変位 s_2 -吸収エネルギー関係

$s_2=0.2\text{mm}$ で以降ほぼ一定の値を示している。
250-00 は軸力がなく、下部ひび割れ面で鉄筋の歪がほとんど変化しなかったことに深く関係があると考えられるがこの先検証が必要である。

4. まとめ

- 1) ひび割れ発生時の上部鉄筋の状態によりひび割れ発生後のひび割れ面での鉄筋の挙動が異なることが分かった。
- 2) 試験区間が長いと、付着長さが長くなり、付着力が大きくなるため、試験区間内であまり歪が変化しない点が発生する。このため、その点の上部と下部での鉄筋挙動の影響が互いに少なくなることがわかった。

参考文献

- 1) 小林克巳ほか：RC 部材における主筋のダボ作用を考慮した付着特性に関する基礎実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.3，pp.179-182，1988.6
- 2) Qureshi, J. and Maekawa, K.: Computational Model for Steel Bar Embedded in Concrete under, Combined Axial Pullout and Transverse Shear Displacement, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol15, No.2, pp.1249-1254, Jun.1993

【謝辞】この論文を作成する際、大阪大学の中塚侑先に多くのご指導をいただきここに感謝の意を表します。また、試験体製作の際ご協力下さった高周波熱練の方々にも感謝いたします。
本研究は東京工業大学建築物理研究センター共同利用研究の一貫として行われたものである。