

### 3章 鉄筋の定着部の引抜き実験

#### 3.1 実験概要

本実験では、高強度鉄筋のコンクリートとの定着部の性能を評価するための基礎資料を得ることを目的として、コンクリートに埋め込まれた鉄筋の引抜きを行った。コンクリート円筒の中心に1本（後述の通り No15 の供試体は2本）の鉄筋を埋め込み、ジャッキにより埋め込んだ鉄筋を片引きし、コンクリート円筒から鉄筋を引き抜いた。埋め込み長、鉄筋径、コンクリート強度、鉄筋強度及びふしの形状を変化させ、SD490 に着目したグループ A と USD685 に着目したグループ B の2回に分けて実験を行った。

#### 3.2 実施方針

引抜き実験を計画するにあたり、実験実施当時の基準における鉄筋の定着部に関する規定を整理する。整理した結果から、本実験におけるパラメータを決定した。

##### 3.2.1 実験実施当時の基準における定着部の考え方

###### (1) 鉄筋とコンクリート間の付着の基本的な考え方

鉄筋とコンクリート間の力の伝達（付着抵抗）は、①鉄筋とセメントペースト間の粘着力、②側圧による鉄筋とコンクリートとの摩擦力等の影響もあるが、異形鉄筋の場合は主に③鉄筋表面の凹凸による機械的な抵抗力によって付着抵抗が発現する。

この付着抵抗は、様々な要因の影響を受けて変化するものであり、既往研究ではコンクリート中の鉄筋の深さ方向のひずみやすべり量に応じて発現する付着力が変化することが示されている<sup>1)2)</sup>。よって付着抵抗を定式化するためには、境界条件や深さ方向の  $\tau-s-\epsilon$ （ $\tau$  は付着応力、 $s$  はすべり量、 $\epsilon$  は鉄筋ひずみ）関係を定義するなど様々な要因を考慮しなくてはならず、非常に複雑である。そのため現行基準類では、平均化されたみかけの付着強度を定義している。

みかけの付着強度は図 3.2.1 のような付着試験によってコンクリート中に埋込まれた鉄筋に引張力を加え、それにより得られた最大の引張抵抗力を鉄筋の周長と埋込み長さで除して平均化した強度である。

$$\text{付着強度 } f_{bo} = P / U \cdot l \quad (\text{式 3.2.1})$$

ここに、 $P$ : 最大引張荷重 [N]

$U$ : 鉄筋の周長 [mm]

$l$ : 鉄筋の埋め込み長

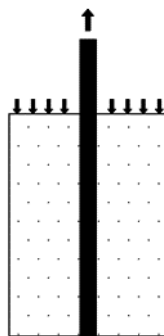


図 3.2.1 片引きの付着試験

## (2) 実験実施当時の基準における定着部の付着の規定

実験実施当時の道路橋示方書の定着長の考え方を以下に記述する。また、土木学会コンクリート標準示方書および鉄道構造物等設計標準の定着長の考え方についても、参考までに示した。

### ① 道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編（H14年3月）

鉄筋を定着するときの付着は、鉄筋の重ね継手長と同等であるとし、重ね継手長を定めている。前項で記したように、みかけの許容付着応力度を使用し、鉄筋の許容引張応力度に断面積を乗じて求まる許容引張力を鉄筋の周長と許容付着応力度で除した値を定着長としている。

引張鉄筋に重ね継手を用いる場合は、式①により算出する重ね継手長  $l_a$  以上、かつ、鉄筋の直径の 20 倍以上重ね合わせる。また、重ね継手部には、継ぐ鉄筋 1 本の 1/3 以上の断面積を持つ横方向鉄筋を配置して補強する。

$$l_a = \frac{\sigma_{sa}}{4\tau_{0a}} \phi \quad \dots \dots \dots \text{式①}$$

ここに、

- $l_a$  : 付着応力度より算出する重ね継手長(mm)
- $\sigma_{sa}$  : 鉄筋の許容引張応力度(N/mm<sup>2</sup>)
- $\tau_{0a}$  : コンクリートの許容付着応力度(N/mm<sup>2</sup>)
- $\phi$  : 鉄筋の直径(mm)

鉄筋とコンクリートの付着により定着する場合の定着長は、式①の重ね継手長に等しい長さ以上とする。

② 土木学会コンクリート標準示方書設計編（2007年制定）

算出式の形式は道路橋示方書と同じだが、強度表示（コンクリートの設計付着強度と鉄筋の引張降伏強度）になっている点異なる。更に、定着長は鉄筋のあきや、補強されている横方向鉄筋の断面積により定まる補正係数 $\alpha$ によって低減できる。

引張鉄筋の基本定着長 $l_d$ は、式②により求めてよい。ただし、 $20\phi$ 以上とする。

$$l_d = \alpha \frac{f_{yd}}{4f_{bod}} \phi \quad \dots \dots \dots \text{式②}$$

ここに、 $\phi$ ：主鉄筋の直径

$f_{yd}$ ：鉄筋の設計引張降伏強度

$f_{bod}$ ：コンクリートの設計付着強度で、コンクリートの材料係数 $\gamma_c$ は1.3として、付着強度 $f_{bok}$ は $f_{bok}=0.28f'ck^{2/3}$ より求めてよい。ただし、 $f'ck$ は、コンクリートの圧縮強度の特性値、 $f_{bod} \leq 3.2\text{N/mm}^2$

- $\alpha=1.0$  ( $kc \leq 1.0$  の場合)
- $=0.9$  ( $1.0 < kc \leq 1.5$  の場合)
- $=0.8$  ( $1.5 < kc \leq 2.0$  の場合)
- $=0.7$  ( $2.0 < kc \leq 2.5$  の場合)
- $=0.6$  ( $2.5 < kc$  の場合)

ここに、 $k_c = \frac{c}{\phi} + \frac{15A_t}{s\phi}$

$c$ ：主鉄筋の下側のかぶりの値と定着する鉄筋のあきの半分の値のうち小さい方

$A_t$ ：仮定される割裂破壊断面に垂直な横方向鉄筋の断面積

$s$ ：横方向鉄筋の中心間隔

③ 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物 (H11年10月)

土木学会コンクリート標準示方書と同形式の定式化がなされている。ただし補正係数 $\alpha_b$ は標準示方書よりも低めの傾向にある。

鉄筋の基本定着長 $l_d$ は、式③による算定値としてよい。ただし、 $20\phi$ 以上とする。

$$l_d = \alpha_b \cdot \frac{f_{syd}}{4f_{bod}} \cdot \phi \geq 20\phi \quad \dots \dots \dots \text{式③}$$

ここに、 $l_d$ ：鉄筋の基本定着長

$f_{syd}$ ：鉄筋の設計引張降伏強度

$f_{bod}$ ：コンクリートの設計付着強度

$\phi$ ：定着する鉄筋の直径

$$\alpha_b = (0.75/K_c) + 0.2$$

ただし、 $0.5 \leq \alpha_b \leq 1.0$

$$K_c = (C_b/\phi) + \{15A_t/(s \cdot \phi)\}$$

$C_b$ ：定着する鉄筋のかぶり、定着する鉄筋のあきの1/2のうち、小さい方の値

$A_t$ ：仮定される割裂破壊断面に垂直な横方向鉄筋の断面積

$s$ ：横方向鉄筋の中心間隔

④ 日本建築学会鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説（H15年11月）

他の基準類と基本形式は同じ。計算で得られた定着長に対し、これを十分に満足する規定値を定めている。

柱・梁の主筋を直線鉄筋で定着する場合：

$$L \geq \sigma t \cdot d / (4K \cdot fb)$$

ここに、 $\sigma t$ ：異形鉄筋の短期許容応力度

(SD345 ; 345N/mm<sup>2</sup> SD390 ; 390N/mm<sup>2</sup>)

$d$ ：定着鉄筋の径 mm

$K$ ：鉄筋のあき・かぶり等に基づく係数

接合部 $\pi$ 内に定着する場合  $K=2.5$

$fb$ ：コンクリートの短期許容付着応力度

$(Fc/60+0.6) \times 1.5$  ただし  $Fc$ はコンクリート強度

実際にはこれを満足する規定値が SD295・SD345・SD390 鉄筋に対して決められている（SD490 は記述無し）。

定着長 /  $d$ （コンクリート強度 24N/mm<sup>2</sup>の場合  $fb=1.50N/mm^2$ ）

	計算値 L	規定値
SD295	19.7	35
SD345	23.0	35
SD390	26.0	40

### (3) 道示規定と他基準規定による定着長の比較

#### ① 許容付着応力度 $\tau_{0a}$ と設計付着応力度 $f_{bod}$ の比較

道示で使用する許容付着応力度  $\tau_{0a}$  とコンクリート標準示方書および鉄道標準で使用する設計付着強度  $f_{bod}$  を比較した（適用性の高い  $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$  以下を対象）。

表 3.2.1  $f_{bod}$  と  $\tau_{0a}$  の比較（単位  $\text{N/mm}^2$ ）

$\sigma_{ck}$ ( $f'_{ck}$ )	24	27	30	40	備考
$f_{bod}$	1.79	1.94	2.08	2.51	材料係数 $\gamma_m=1.3$
$\tau_{0a}$	1.6	1.7	1.8	2.0	
$f_{bod}/\tau_{0a}$	1.12	1.14	1.16	1.26	

設計付着強度  $f_{bod}$  は許容付着応力度  $\tau_{0a}$  の 10~20%増の値となっている。

#### ② 定着長の比較

定着長  $l_a$ （道示）と  $l_d$ （コンクリート標準示方書および鉄道標準）の計算値を比較する。ここでは定着する鉄筋の強度は一般的なフーチングを想定し  $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$  とし、定着する鉄筋の強度は特に定めのないものとした。コンクリート標準示方書および鉄道標準では、補正係数  $\alpha$ （または  $\alpha_b$ ）の算定において鉄筋のあきや横方向鉄筋の配置情報が必要になるので、次の3ケースの配筋パターンを想定した。

表 3.2.2 配筋パターン

	主筋配置	横方向鉄筋	拘束筋有効長
ケース 1	D25-150ctc	D16-150ctc	ctc900（主筋 6 本に 1 本）
ケース 2	D32-150ctc	D19-150ctc	ctc900（主筋 6 本に 1 本）
ケース 3	D51-150ctc	D25-150ctc	ctc900（主筋 6 本に 1 本）

#### ・必要定着長の計算

各基準による必要定着長は下記の通りとなる。

表 3.2.3 定着長の計算結果

配筋パターン	道路橋示方書	コンクリート標準示方書	鉄道標準
ケース 1	0.1563 $\sigma_{sa} \cdot \phi$	0.0838 $f_{yd} \cdot \phi$	0.0698 $f_{yd} \cdot \phi$
ケース 2		0.1117 $f_{yd} \cdot \phi$	0.0806 $f_{yd} \cdot \phi$
ケース 3		0.1257 $f_{yd} \cdot \phi$	0.1198 $f_{yd} \cdot \phi$

これを、横軸に鉄筋強度、たて軸に定着長をとり図示すると図 3.2.2 のようになる。ここで、建築基準は省略したが、鉄道標準式ケース 1 とほぼ同様となる。

各基準の鉄筋定着長の比較 ( $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ の場合)

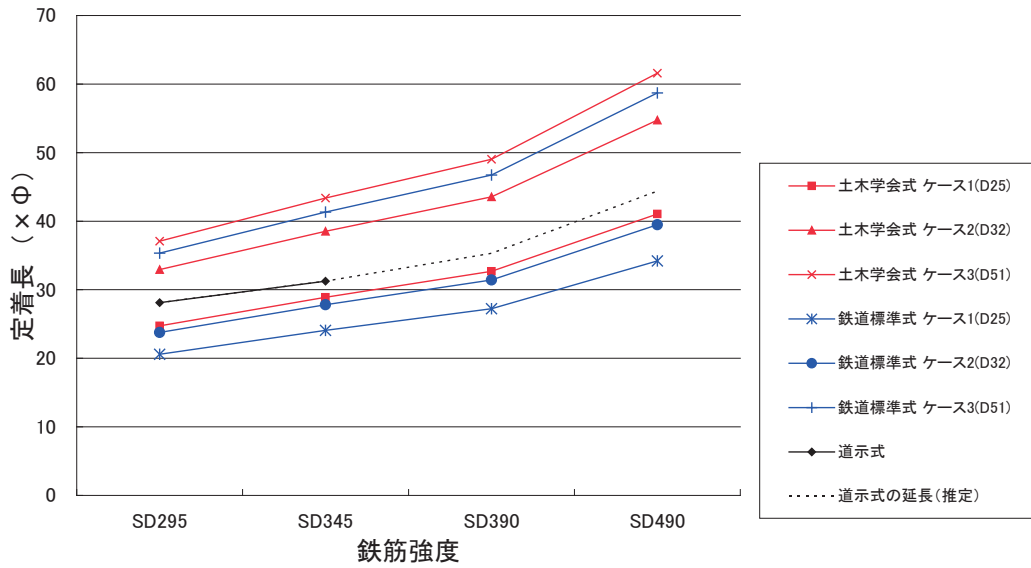


図 3.2.2 各基準の定着長の比較

D32 以下の一般的な径の鉄筋のケースに着目すると、道示式は許容応力度を基本としているが、他の基準に比較して必要定着長が短くなる訳ではない。道示式においては許容応力度の中に鉄筋によるひびわれ分散や割裂破壊面に配置された横方向鉄筋の拘束の効果が見込まれていると考えられる。

また、土木学会基準・鉄道基準では D51 等の太径鉄筋を定着する場合は、径に対してより大きな倍率で定着が必要となる。道示では現在のところこのような考え方はないが、D32 を超える高強度の太径鉄筋を定着するケースにまで算定式を拡張するうえでは、D32 以下の鉄筋と同形式の算定式が適用できるか否か、実験による検証が必要と考えられる。

### 3.3 引抜き実験内容

#### 3.3.1 実験検討方針

##### (1) 検討の基本方針

下記の方針により検討を行うものとする。

- ① D32 以下の鉄筋を対象にした場合：高強度鉄筋の許容引張応力度  $\sigma_{sa}$  を定めることにより、現行道示の定着長算定式をそのまま適用して定着長を算定できるか検証する。
- ② D32 を超える太径鉄筋を対象にした場合：①と同形式の算定式の適用性を検証し、適用が困難な場合には、別途定める補正係数を乗じて定着長を補正する方法を検討する。

##### (2) 組合せケース

組合せケースは、下記の事項に配慮して決定する。

###### グループA

- ① 従来鉄筋 SD345 による引抜き実験を実施し、現行基準による定着性能を確認する。
- ② 高強度鉄筋 SD390・SD490 による引抜き実験を、定着長を変化させて実施し、従来定着と同等の性能を発揮できる定着長を把握する。
- ③ SD490 鉄筋の検討においては鉄筋径を 2 種類設定し、径の違いによる必要定着長の違いを把握する。
- ④ ねじふし鉄筋を基本としつつ、これと横ふし鉄筋の付着性能に有意な違いがあるか否か把握する。
- ⑤ 今後のフーチングコンクリートの高強度化も見据えて、定着部のコンクリート強度 2 種類（従来の  $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$  と高強度  $30\text{N/mm}^2$ ）について検討する。
- ⑥ 隣接鉄筋が定着に与える影響を把握するために、鉄筋を 2 本配置した供試体の引抜きを検討する。

###### グループB

- ① 高強度鉄筋 USD685 による引き抜き実験を定着長を変化させて実施し、定着性能の差異を把握する。
- ② 上記①に対して、鉄筋径を変化させて実施し、定着性能の差異を把握する。
- ③ 上記①に対して、高強度鉄筋 SD490 を用いて引き抜き実験を行い、定着性能の差異を把握する。
- ④ 載荷ブロックがコンクリート供試体を拘束する影響を除くため、ジャッキの載荷方法を変更して、定着性能の差異を検討する。

上記を踏まえて、表 3.3.1、表 3.3.2 に示す検討ケースについて引抜き実験を実施する。



表 3.3.1 引抜き実験検討ケース（グループA）

ケース	鉄筋強度 (ふし形状)	鉄筋径	$\sigma_{ck}$	定着長	鉄筋 本数	供試体数	備考
①	SD345 (ねじふし)	D29 D35	24	25φ 35φ	1	4 (No.1-4)	従来ケース。現行基準による従来強度鉄筋の定着長を確認。定着長が不足する場合の破壊形態やひびわれ状況を把握するため短い定着長についても検討する。
②-a	SD490 (ねじふし)	D29	24	35φ 40φ 45φ	1	3 (No.5-7)	基本ケース。従来ケースに対して鉄筋をSD490に変更。
②-b	SD390 (ねじふし)	D29	24	35φ 40φ※	1	2 (No.8,9)	基本ケースに対して鉄筋強度をSD390に変更。
③	SD490 (ねじふし)	D35	24	35φ 45φ※	1	2 (No.10,11)	基本ケースに対して鉄筋径を太径D35に変更。
④	SD490 (横ふし)	D29	24	45φ※	1	1 (No.12)	基本ケースに対して鉄筋を横ふしに変更。
⑤	SD490 (ねじふし)	D29	30	40φ※	1	2 (No.13,14)	基本ケースに対してコンクリート強度を $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ に変更。
⑥	SD490 (ねじふし)	D29	24	45φ※	2 etc100	1 (No.15)	基本ケースに対して鉄筋本数を2本に変更。隣接鉄筋がある場合の定着性能を確認する。

表 3.3.2 引抜き実験検討ケース（グループB）

ケース	鉄筋強度 (ふし形状)	鉄筋径	$\sigma_{ck}$	定着長	鉄筋本数	供試体数	備考
①	USD685 (ねじふし)	D29	30	35・55φ	1	2 (No.1,2)	基本ケース：USD685 鉄筋 に対して定着長を変化さ せたもの
②	USD685 (ねじふし)	D35	30	35・55φ	1	2 (No.3,4)	基本ケースに対して鉄 筋径を D35 に変更した もの
③	SD490 (ねじふし)	D29	30	35φ	1	1 (No.5)	基本ケースに対して鉄 筋を SD490 に変更した もの
④	SD490 (ねじふし)	D29	30	35φ	1	1 (No.6)	ジャッキの影響を排除 したもの

検討ケース数は上記の 11 ケース（供試体数 21）とする。供試体は一度に全てを製作せずに、実験結果を確認しながら、必要に応じて適宜、検討ケースの定着長等を見直すものとする。現時点における各ケースの定着長等の設定は次の考えによる。

- ・ ケース①：道示式による本ケースの必要定着長は $l_a=31.25\phi$ となる。これを満足し、かつ実務設計で採用されるラウンド値である $35\phi$ について実験する。定着長が不足する場合のひび割れ状況等を確認するため、 $31.25\phi$ よりもやや短い $25\phi$ についても実験する。径の違いを把握するため一般的なD29と太径D35について実験するものとした。
- ・ ケース②-a：前項で示した $\sigma_{sa}$ の外挿から求まるSD490鉄筋の必要定着長の目安値 $40\phi$ および $45\phi$ について実験する。またSD345鉄筋の定着と同等の $35\phi$ についても実験し、定着性能が不足するか否か把握する。
- ・ ケース②-b：SD390の必要定着長の予測値 $35\phi$ 、 $40\phi$ について実験する。
- ・ ケース③：従来鉄筋と同等の $35\phi$ および予測値 $45\phi$ について実験する。
- ・ ケース④：ケース②の実験において所定の機能を確保できるSD490鉄筋の定着長を本ケースにおける定着長とし、仮に $45\phi$ としている。
- ・ ケース⑤：前項で示した $\sigma_{sa}$ の外挿から求まるSD490鉄筋の $\sigma_{sa}$ 予測値と $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ の $\tau_{0a}$ から計算される必要定着長は $l_a=34.72\phi$ となる。これより目安値 $40\phi$ とした。
- ・ ケース⑥：ケース②の検討において所定の機能を確保できるSD490鉄筋の定着長を本ケースにおける定着長とし、現時点では仮に $45\phi$ とした。ピッチは実設計で採用されるピッチのうち最も離隔の小さいctc100（2段配置の際の1段目と2段目の離隔）とした。

### 3.3.2 実験方法

#### (1) 載荷方法

直径500mmの円柱コンクリートの中心に、一定間隔でひずみゲージを貼り付けた鉄筋を埋め込み、センターホールジャッキにより単調載荷で鉄筋を引き抜いた。ひずみゲージより計測されるひずみ値を軸力に換算し、隣接2計測点の軸力差 $\Delta N$ を付着区間面積（鉄筋周長 $L_s \times$ 計測点間距離 $L$ ）で除すことで、その区間に発揮される付着応力度 $\tau$ を算出した。また、鉄筋が降伏し鉄筋とコンクリートのひずみ差が大きくなった時点で鉄筋とコンクリートの付着は切れたと見なせることから、当該区間を付着劣化区間とし、付着発揮範囲の軸力の合計 $\Sigma N$ とその時点で鉄筋に作用している引張荷重 $P$ との差分を付着劣化区間面積（周長 $L_s \times$ 付着劣化区間長 $L'$ ）で除すことで、付着劣化区間における抵抗応力度 $\tau'$ を算出した。

グループAの載荷概要図を図3.3.1、図3.3.2に示す。

グループBの載荷概要図を図3.3.3および図3.3.4に示す。グループA実験からの改良点は下記の通りである。

- ・ ひずみゲージは150mmピッチ（5D程度）を基本ピッチとして密に配置し、鉄筋両面に貼り付け、平均で評価するものとした。
- ・ 巻き取り式変位計を設置し、コンクリート上面における鉄筋伸び出し量を計測する。

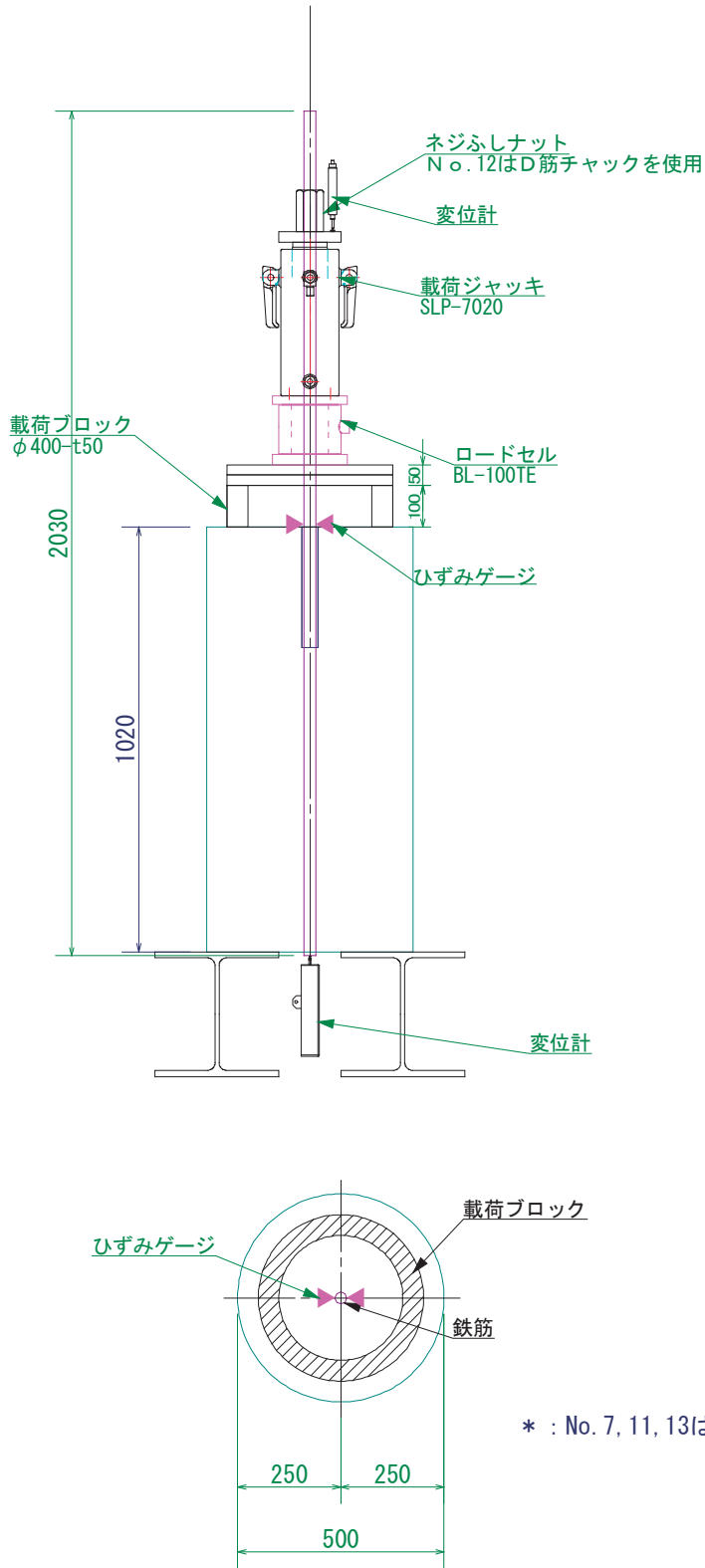


図 3.3.1 引抜き実験载荷概要図（グループA・鉄筋1本のケース、No.1～14）

No. 15 D29 (SD490) 2本 定着長 $\phi 45^{\ast}$

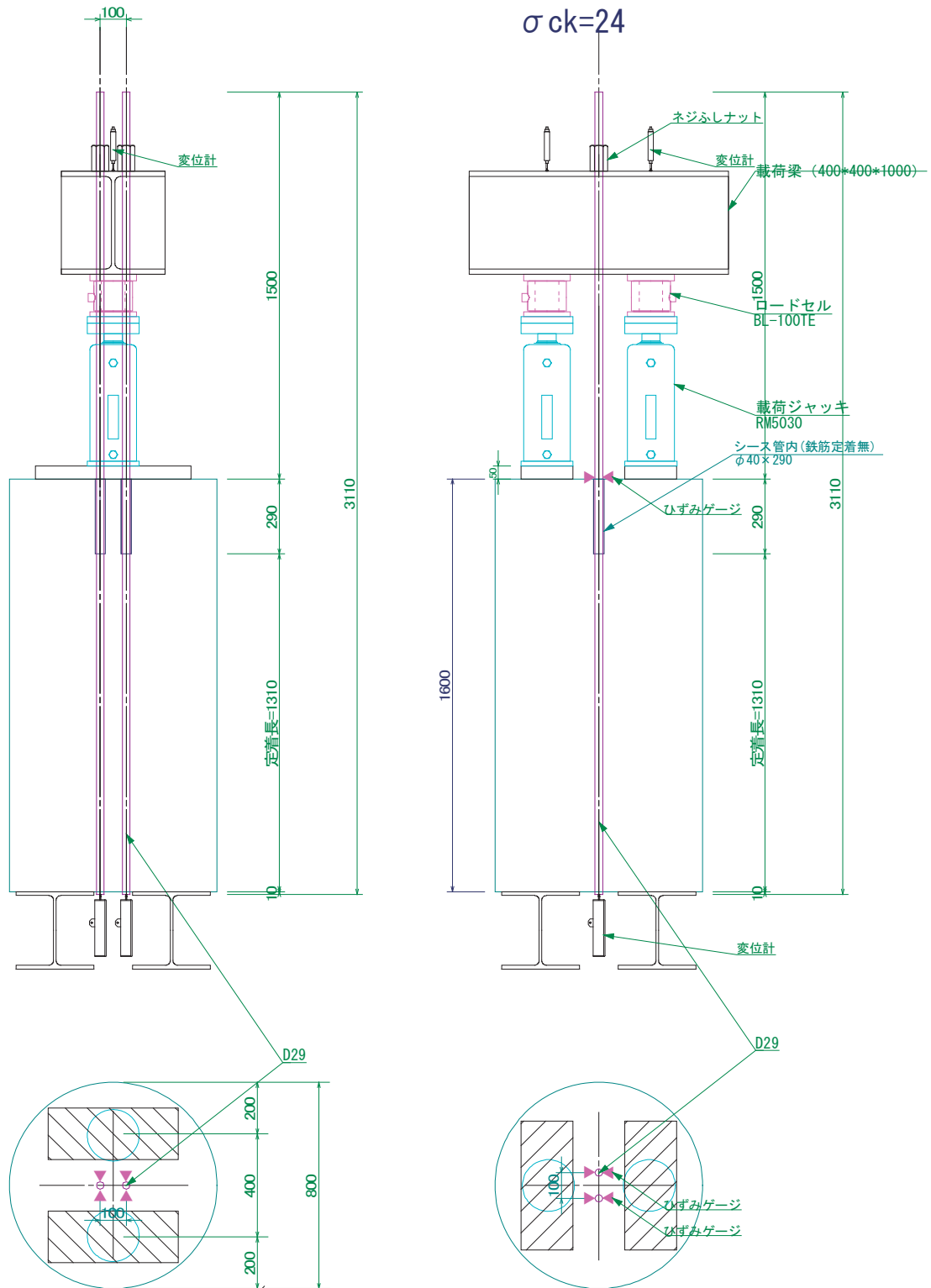


図 3.3.2 引抜き実験載荷概要図 (グループA・鉄筋2本のケース、No. 15)

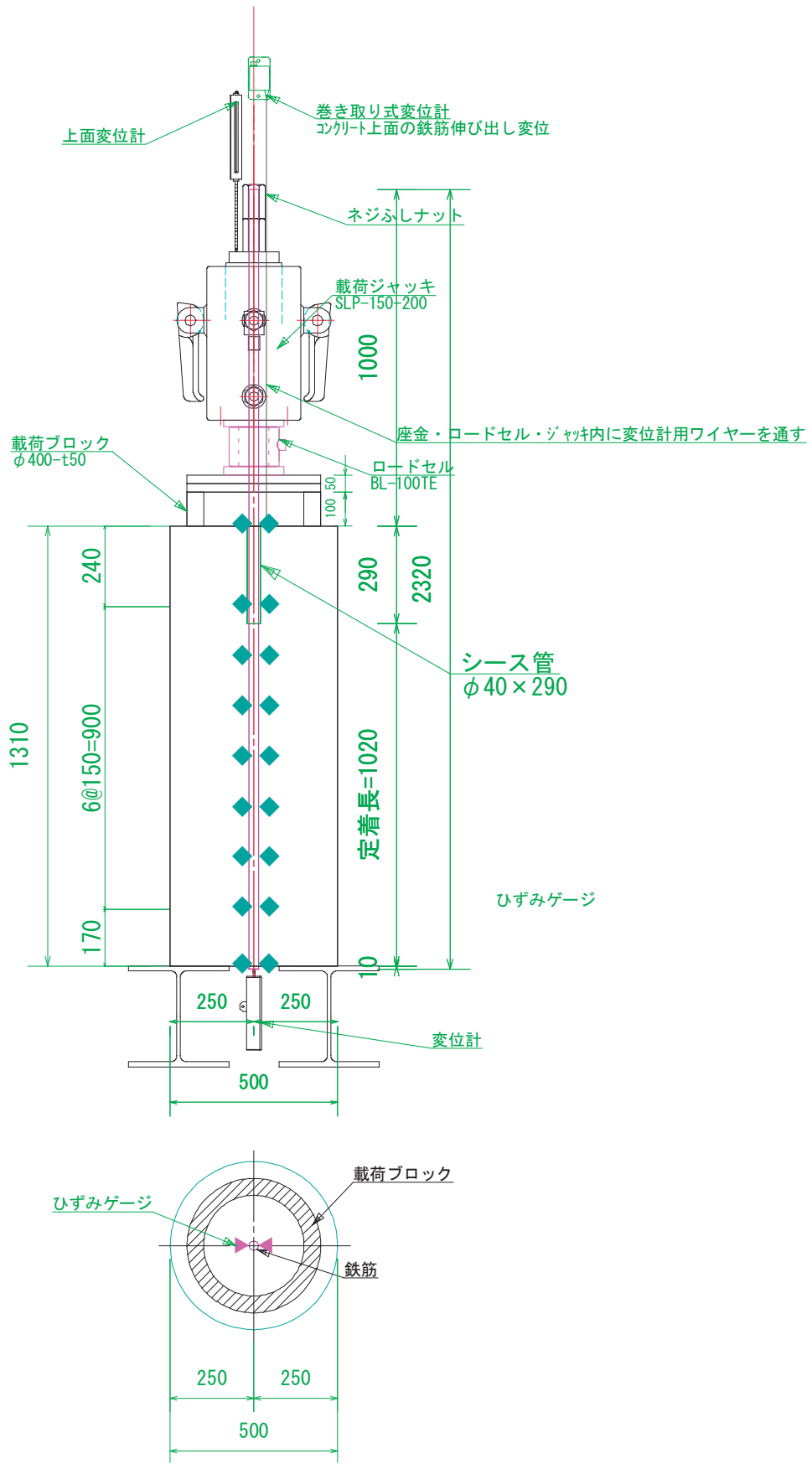


図 3.3.3 引抜き実験供試体 No. 1~5 の荷重概要図 (グループB、No. 1~5)

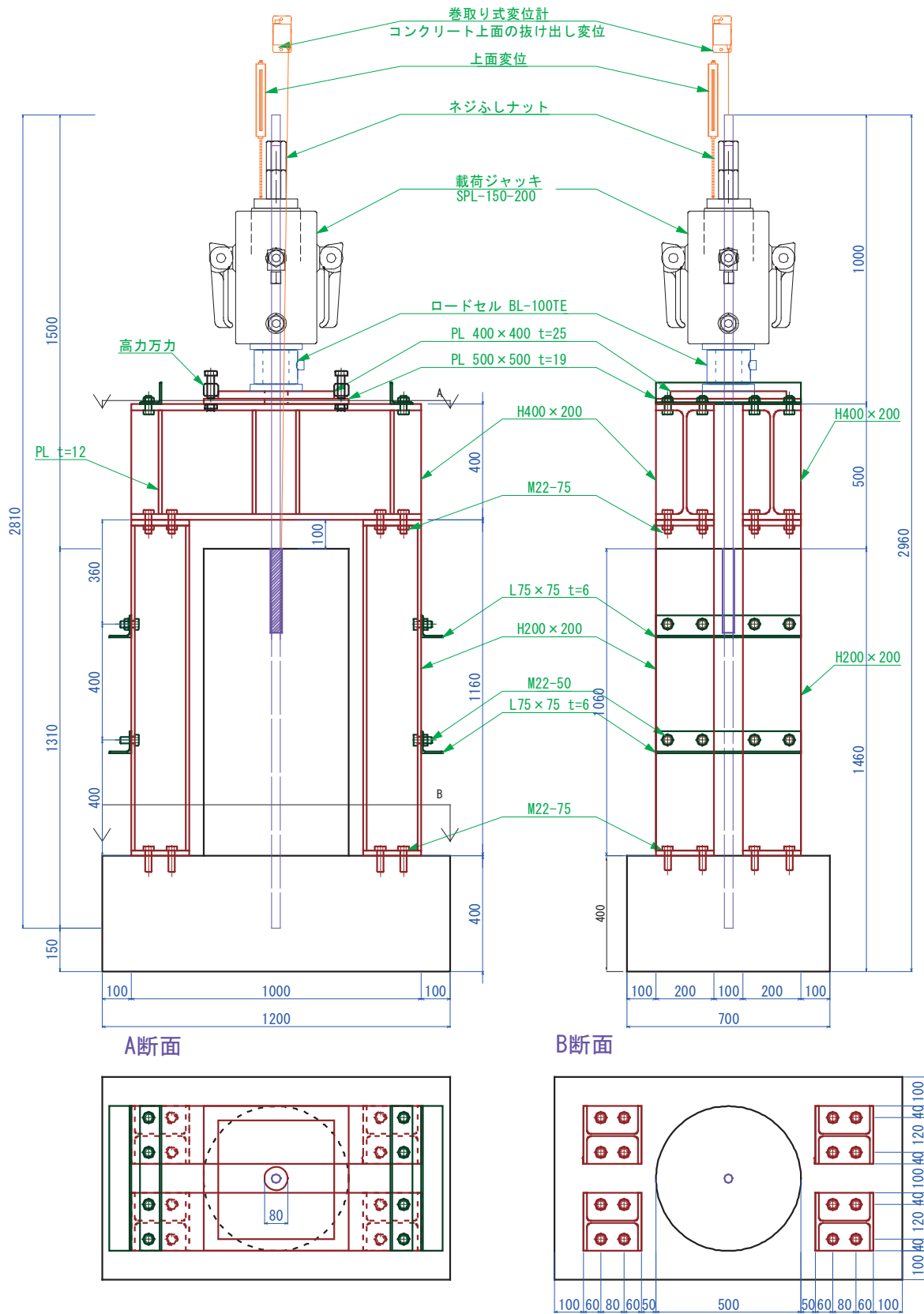


図 3.3.4 引抜き実験供試体 No. 6 の载荷概要図 (グループ B)

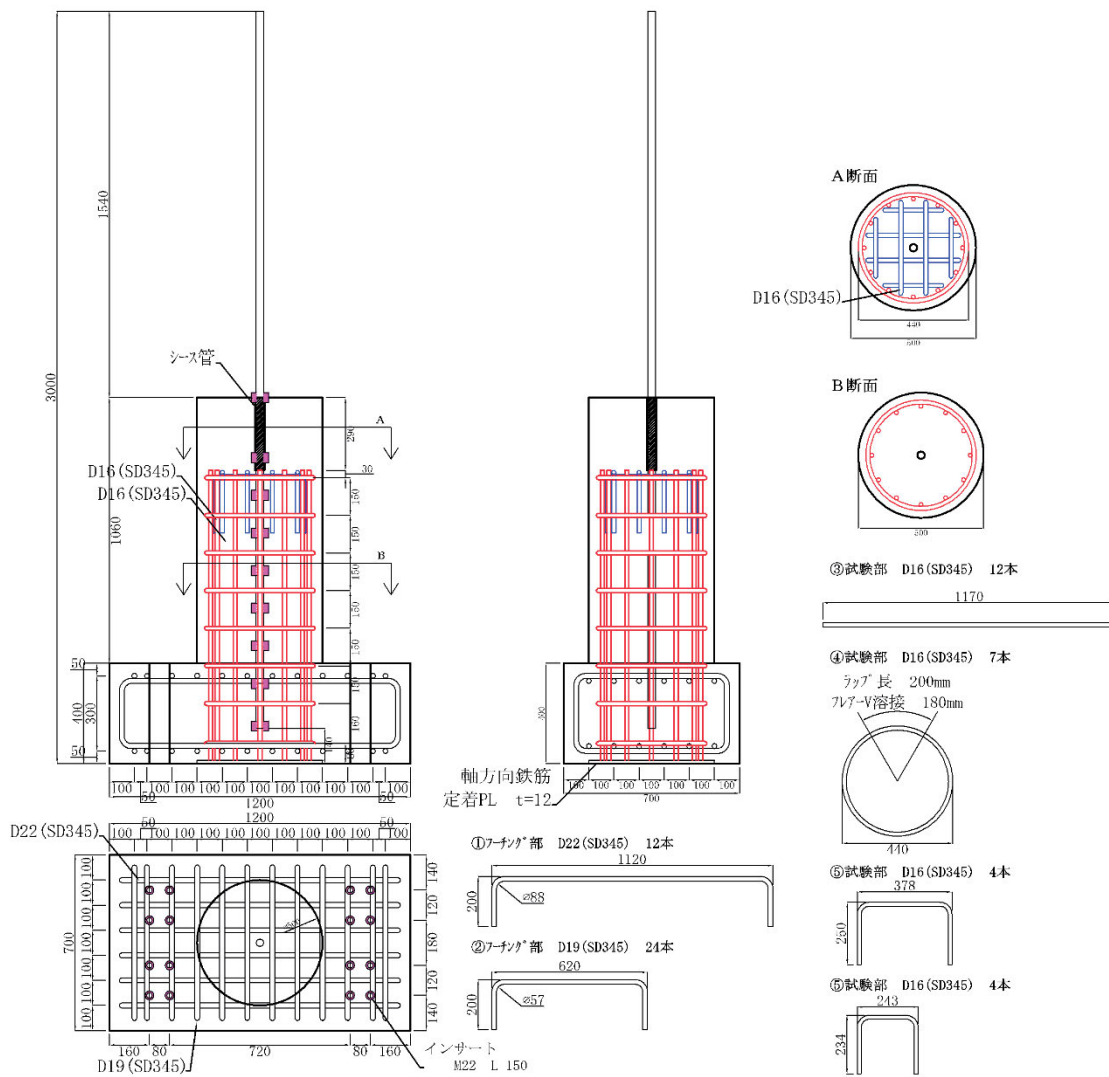


図 3.3.5 供試体 No. 6 の配筋図 (グループB)



## (2) 計測項目と計測機器類の設定

計測項目及びセンサー数量を以下に示す。

- ・ 載荷荷重（鉛直荷重） : 1 点（ロードセル出力による。）
- ・ 鉄筋抜け出し変位 : 2[4]点（上下端の鉄筋抜け出し変位）
- ・ 鉄筋ひずみ<sup>注1</sup> : 2[4]点（ブロック上部位置 1 断面）
- ・ 鉄筋ひずみ<sup>注2</sup> : 14 点（フーチング内部位置 7 断面 No.7,11,13 のみ）

[ ]は No.15 のみ

注 1 : ブロック上部の鉄筋ひずみは載荷中の鉄筋の急激な破断による危険防止を目的として、鉄筋の伸びを把握するために取り付ける。

注 2 : ブロック内における鉄筋の伸びひずみ分布を把握するために取り付ける。ひずみゲージ取り付けによりコンクリートと鉄筋の付着が減少する懸念があるので、定着が十分に確保されていると予想される 3 供試体にひずみゲージを取り付けるものとした。

## (3) 載荷及び計測

載荷および計測の手順は下記の通りである。

- ・ 引抜き載荷開始 : 載荷は電動ポンプを使用して静的単調載荷で行う。計測時は電動ポンプを一旦止めてクラック観察を適時行い載荷する。
- ・ 載荷時の計測 : 実験は 10kN ピッチで計測し鉄筋の降伏後もしくは変位の進み具合で適時判断して計測する。
- ・ 実験終了 : 鉄筋の抜け出し量が 80mm（変位計のストロークより）・鉄筋の降伏後最大荷重を過ぎて荷重が下がり始めた時点で載荷を終了する。
- ・ 除荷 : 実験の除荷は 50kN ピッチで行う。
- ・ 実験完了後 : 実験完了後、変位計やリード線を撤去して、クラックスケッチの確認を行ない全体的な写真撮影を行なう。

載荷は、静的単調載荷とし、載荷終了まで除荷しないで実施する。

### 3.4 実験結果

#### (1) 実験ケース

グループ A、B での実験ケースを表 3.4.1、表 3.4.2 に示す。

表 3.4.1 実験ケース (グループ A)

供試体 番号	鉄筋			定着長		ふし 形状	コンクリート	
	材質	径 (mm)	本数	φ	(mm)		直径 (mm)	$\sigma_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )
No. 1	SD345	29	1	25	730	ねじふし	500	24
No. 2	SD345	29	1	35	1020	ねじふし	500	24
No. 3	SD345	35	1	25	880	ねじふし	600	24
No. 4	SD345	35	1	35	1230	ねじふし	600	24
No. 5	SD490	29	1	35	1020	ねじふし	500	24
No. 6	SD490	29	1	40	1160	ねじふし	500	24
No. 7	SD490	29	1	45	1310	ねじふし	500	24
No. 8	SD390	29	1	35	1020	ねじふし	500	24
No. 9	SD390	29	1	40	1160	ねじふし	500	24
No. 10	SD490	35	1	35	1230	ねじふし	600	24
No. 11	SD490	35	1	45	1580	ねじふし	600	24
No. 12	SD490	29	1	45	1310	横ふし	500	24
No. 13	SD490	29	1	40	1160	ねじふし	500	30
No. 14	SD490	35	1	40	1400	ねじふし	600	30
No. 15	SD490	29	2	45	1310	ねじふし	800	24

表 3.4.2 実験ケース (グループ B)

供試体 番号	鉄筋			定着長		ふし 形状	コンクリート	
	材質	径 (mm)	本数	φ	(mm)		直径 (mm)	$\sigma_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )
No. 1	USD685	29	1	35	1020	ねじふし	500	30
No. 2	USD685	29	1	55	1600	ねじふし	500	30
No. 3	USD685	35	1	35	1230	ねじふし	600	30
No. 4	USD685	35	1	55	1930	ねじふし	600	30
No. 5	SD490	29	1	35	1020	ねじふし	500	30
No. 6	SD490	29	1	35	1020	ねじふし	500	30

## (2) 実験結果一覧

実験結果一覧表を表 3.4.3、表 3.4.4 に示す。一覧表には、実験に先立ち実施した鉄筋の引張強度試験結果及びコンクリートの圧縮強度試験結果も合わせて表記した。なお、表 3.4.3、表 3.4.4 に示した伸びとは、実験前後における鉄筋全長（ナット取付位置より下端まで）の比であり、絞りとは実験前後における鉄筋断面積比である。

引抜き荷重を連続的に増加させた場合の付着応力度分布の推移について、代表例を図 3.4.1(a) 及び(b) に示す。

(a) 載荷端である付着上端側にいく程、発揮される付着応力度  $\tau$  は大きくなった。付着発揮範囲は、引抜き荷重が増加するに従い分布傾向の傾きをほぼ一定に保ったまま深さ方向へ進展していった。また発揮される付着応力度はある一定値で頭打ちとなり、鉄筋が弾性域内にある間はほぼその一定値を保持したまま推移した。

(b) 付着上端側から鉄筋が降伏し付着劣化が発生すると、その区間で発揮される付着応力度は急激に減少し、代わりに付着劣化区間の抵抗応力度  $\tau'$  が発揮された。付着劣化区間の付着上端からの距離が増加するに従い、付着発揮範囲は加速度的に深さ方向へ進展し、最下端の付着応力度が各深さで見られた付着応力度の最大値とほぼ同じ値に達した後、鉄筋は引き抜けた。

表 3.4.3 実験結果一覧表（グループ A）

ケース	コンクリート		使用鉄筋					試験結果									
	直径 (mm)	強度 $\sigma_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	太さ D	本数 (本)	材質 SD	定着長		ふし 形状	鉄筋降伏 荷重 (kN)	鉄筋抜け 出し荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最大荷重 時の変位 (mm)	下面鉄筋 の抜け出し 変位 (mm)	鉄筋 破断	伸び (%)	絞り (%)	
						$\phi$	(mm)									全体平均	破断部
No. 1	500	24	D29	1	SD345	25	730	ネジふし	264.6	324.9	344.6	94.18	74.77	無	5.5	8.5	
No. 2	500	24	D29	1	SD345	35	1020	ネジふし	260.9	347.4	354.8	151.37	42.37	無	6.6	7.5	
No. 3	600	24	D35	1	SD345	25	880	ネジふし	370.4	486.8	497.9	111.80	47.39	無	5.0	4.0	
No. 4	600	24	D35	1	SD345	35	1230	ネジふし	375.9	492.4	510.3	153.32	40.00	無	6.1	6.4	
No. 5	500	24	D29	1	SD490	35	1020	ネジふし	336.4	410.9	424.3	99.90	49.93	無	4.4	3.7	
No. 6	500	24	D29	1	SD490	40	1160	ネジふし	341.0	419.7	431.7	127.59	49.52	無	5.1	5.8	
No. 7	500	24	D29	1	SD490	45	1310	ネジふし	336.8	432.5 (1.3mm)	441.3	161.98	3.33	破断	7.5	8.2	42.8
No. 8	500	24	D29	1	SD390	35	1020	ネジふし	281.1	365.3	375.5	134.84	50.00	無	5.9	8.4	
No. 9	500	24	D29	1	SD390	40	1160	ネジふし	285.7	373.6	376.4	151.89	48.85	無	6.1	9.1	
No. 10	600	24	D35	1	SD490	35	1230	ネジふし	503.9	633.6	649.8	108.94	47.15	無	4.1	6.6	
No. 11	600	24	D35	1	SD490	45	1580	ネジふし	498.8	656.2	670.9	148.26	30.98	無	5.7	10.0	
No. 12	500	24	D29	1	SD490	45	1310	横ふし	342.3	447.7 (0.03mm)	448.6	181.45	2.15	破断	8.0	13.7	38.4
No. 13	500	30	D29	1	SD490	40	1160	ネジふし	341.0	440.8	446.3	202.73	48.18	無	8.9	100.0	
No. 14	600	30	D35	1	SD490	40	1400	ネジふし	502.5	628.6	670.5	133.08	50.19	無	4.7	100.0	
No. 15	800	24	D29	2	SD490	45	1310	ネジふし	699.6 (合計)	897.2 (合計)	904 (合計)	187.86	48.73	無	7.0	5.7	

表 3.4.4 実験結果一覧表（グループ B）

ケース	コンクリート		使用鉄筋					試験結果									
	直径 (mm)	強度 $\sigma_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	太さ D	本数 (本)	材質 USD	定着長		ふし 形状	鉄筋降伏 荷重 (kN)	鉄筋抜け 出し荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最大荷重 時の変位 ジャッキ 位置 (mm)	最大荷重 時の変位 コンクリート 上面位置 (mm)	下面鉄筋 の抜け出し 変位 (mm)	鉄筋 破断	伸び (%)	絞り (%)
						$\phi$	(mm)										
No. 1	500	30	D29	1	USD685	35	1020	ネジふし	484.0	553.8	587.7	89.01	43.90	82.30	無	3.4	4.0
No. 2	500	30	D29	1	USD685	55	1600	ネジふし	480.8	597.1	603.2	140.48	77.60	42.96	無	4.3	2.7
No. 3	600	30	D35	1	USD685	35	1230	ネジふし	684.4	*1	812.6	67.13	23.70	0.00	無	5.5	2.5
No. 4	600	30	D35	1	USD685	55	1930	ネジふし	670.6	848.5	852.6	138.27	95.30	38.90	無	4.5	4.8
No. 5	500	30	D29	1	SD490	35	1020	ネジふし	360.4	436.7	447.3	120.19	61.30	237.94	無	5.0	4.7
No. 6	500	30	D29	1	SD490	35	1020	ネジふし	356.0		454.2	185.35	70.90		無		7.9

\*1: No. 3の供試体は鉄筋の曲がりが大きくなり圧金が割れてしまったので実験を終了。

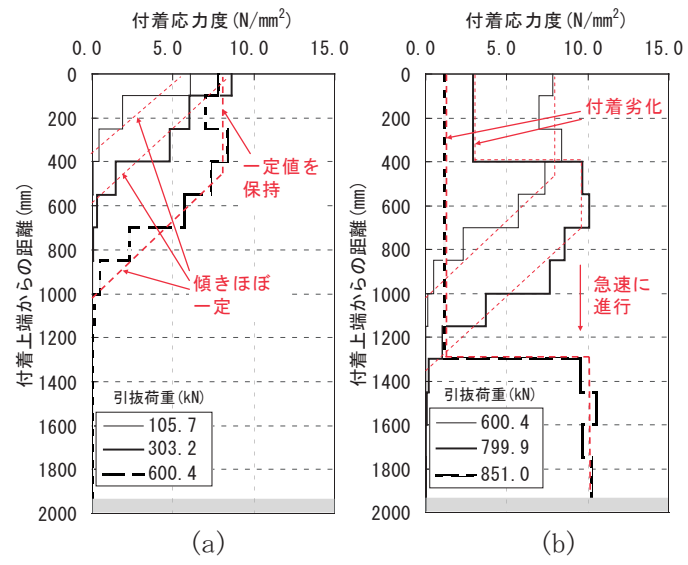


図 3.4.1 付着応力度分布の推移

### 3.5 実験の考察

#### (1) 鉄筋強度の影響

鉄筋強度 SD345, 390, 490 の違いによる荷重－変位関係を図 3.5.1 及び図 3.5.2 に示す。

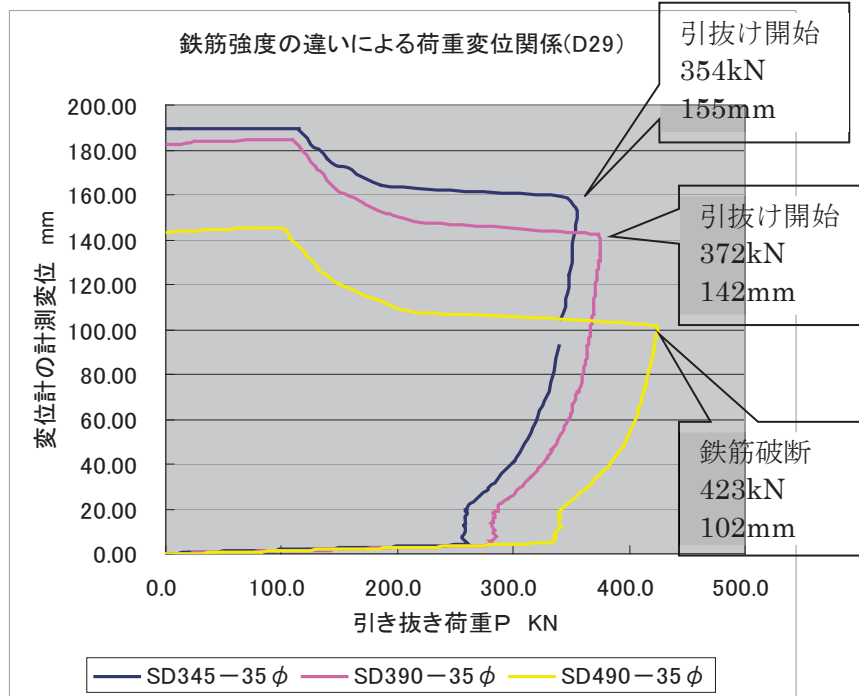


図 3.5.1 鉄筋強度の違いによる荷重－変位関係の違い (A グループ)

荷重－変位曲線図－強度違いの比較  
 No. 1 D29 USD685 & No. 5 D29 SD490  
 定着長 φ 35 (1020mm)  
 $\sigma_{ck} = 3.0$  ネジふし

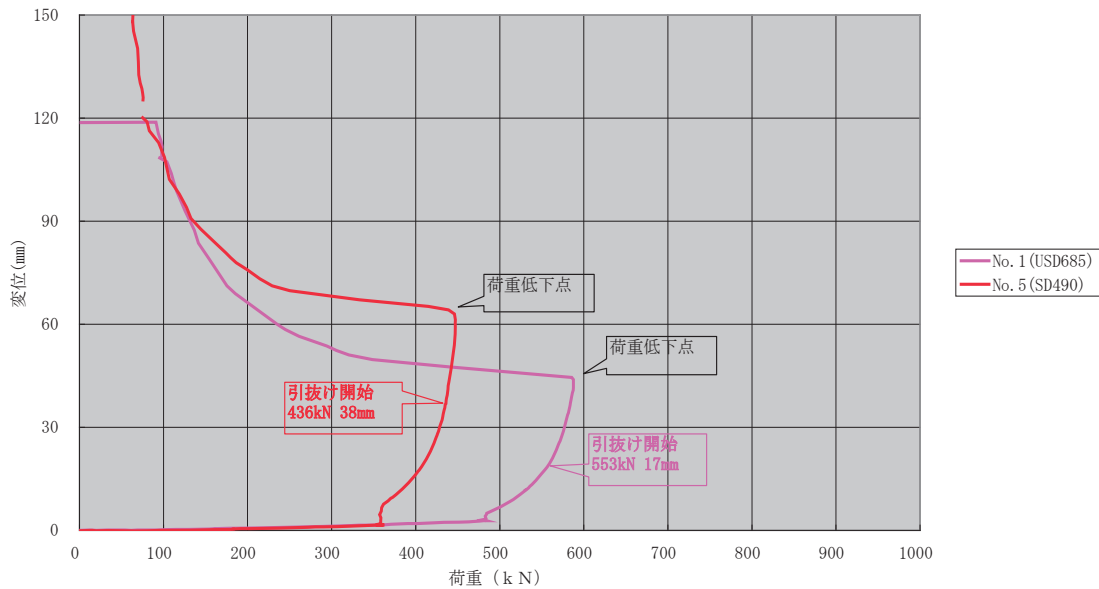


図 3.5.2 変位－荷重関係 (B グループ No. 1 と No. 5 供試体)

同径・同定着長の場合、鉄筋強度が高い程、引抜き抵抗が大きく、また伸び出し変位が小さく抑えられた。

## (2) 鉄筋径の影響

鉄筋径 D29 および D35 の違いによる応力度－変位関係を図 3.5.3 及び図 3.5.4 に示す。鉄筋径が異なるので、横軸は荷重ではなく引張応力度とした。

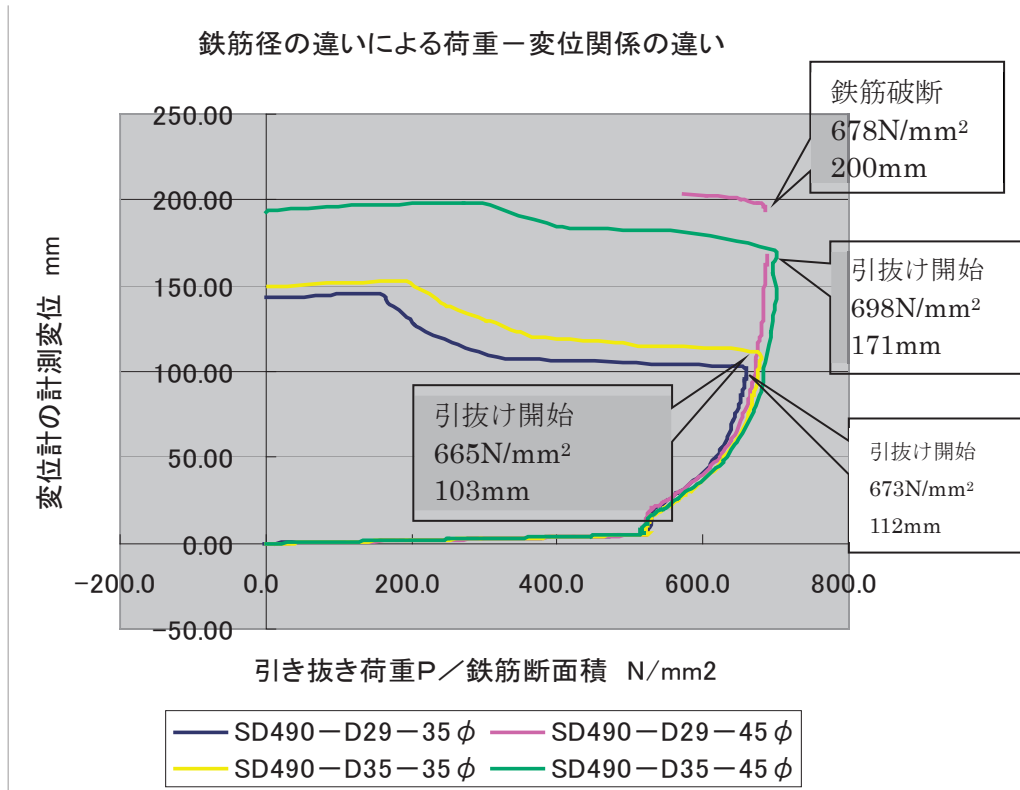


図 3.5.3 鉄筋径の違いによる荷重－変位関係の違い

図 3.5.3 の結果から以下が確認された。

- 定着長 35φ の場合：太径 D35 の方が引抜き抵抗が大きくなった。引抜きが開始する変位も大きくなった。
- 定着長 45φ の場合：太径 D35 の方が引抜き抵抗が大きくなった。引抜きが開始する変位は D35 の方が小さい。
- D29-45φ は最終的に破断。よって破断前の急激な伸びが変位に含まれている。

鉄筋径の違いによる荷重－変位関係の違い

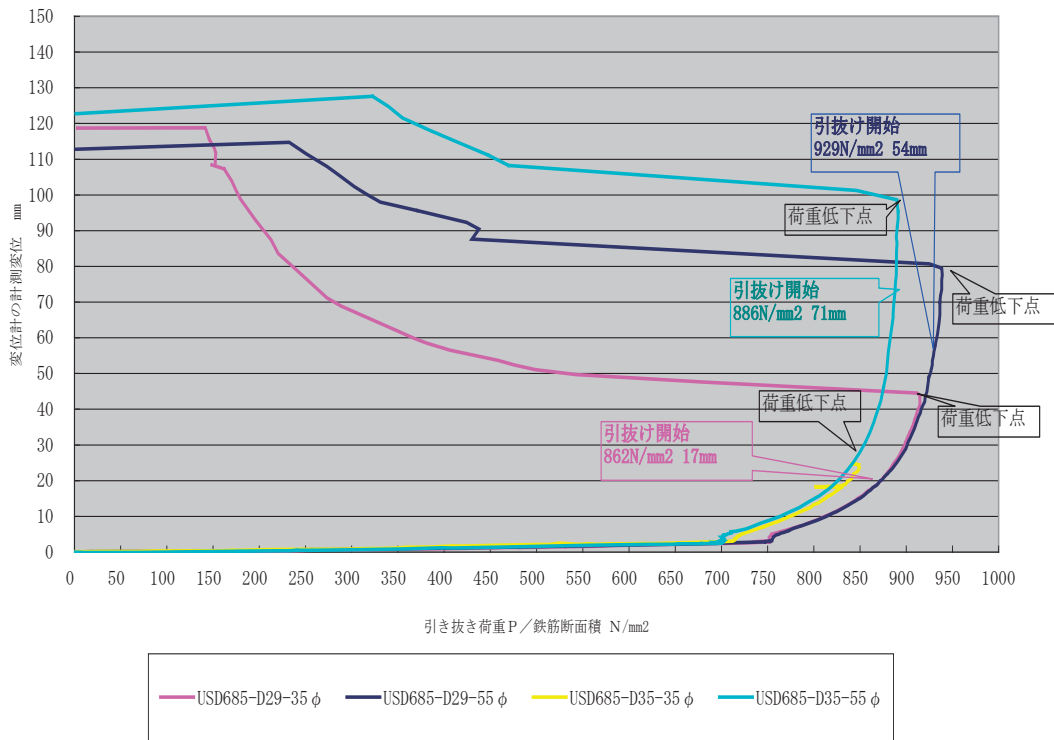


図 3.5.4 鉄筋径の違いによる荷重－変位関係の違い (USD685 データ)

- ・ 図 3.5.4 の結果から、鉄筋径によらず、各試験体は変位-応力関係が線形である間は引抜けは確認されておらず、荷重低下点に至る途中で引抜けが確認されたことから鉄筋径の差異による定着性能の違いは変位-応力関係が線形的である間はないと考えられる。

### (3) ふし形状の影響

ねじふし鉄筋と横ふし鉄筋の比較を図 3.5.5 に示す。いずれも SD490-D29-45φ 定着である。

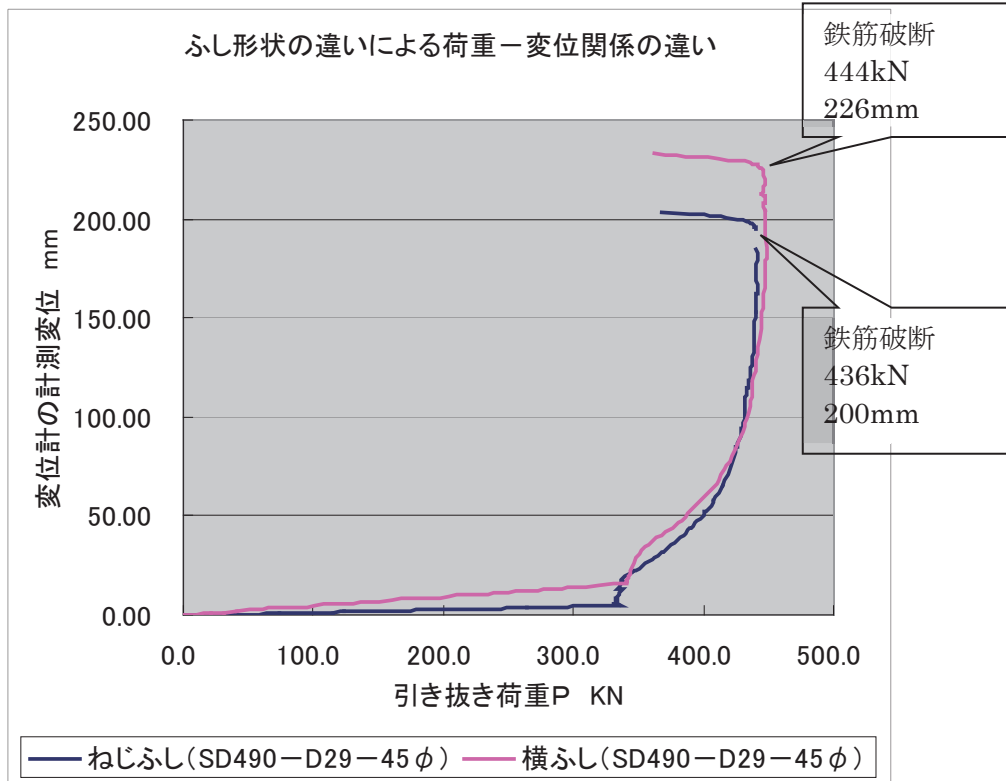


図 3.5.5 ふし形状の違いによる荷重－変位関係の違い

両ケースとも鉄筋破断により実験を終了した。最大荷重の違いは2～3%であり、ふし形状の違いによる差異はほとんどない。しかし、ねじふしの方が伸び出し変位を小さく抑えるが傾向あり、ふし形状の差異に起因するものであると考えられるが、鉄筋頭部の固定方法の差異が実験結果に影響を与えている可能性も考えられる。

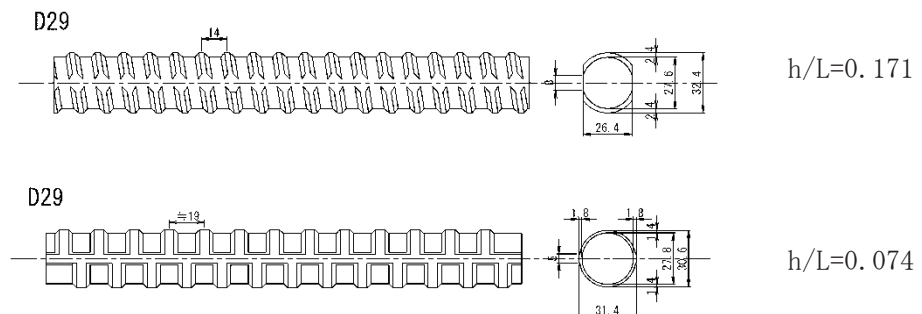


図 3.5.6 横ふしとねじふし形状



#### (4) 隣接鉄筋の影響

鉄筋1本と2本（離隔10cm）の荷重－変位関係の比較を図3.5.7に示す。

両ケースは変位計の位置（鉄筋の長さ）が異なるので、変位は鉄筋の伸びる範囲が同等になるように補正している。

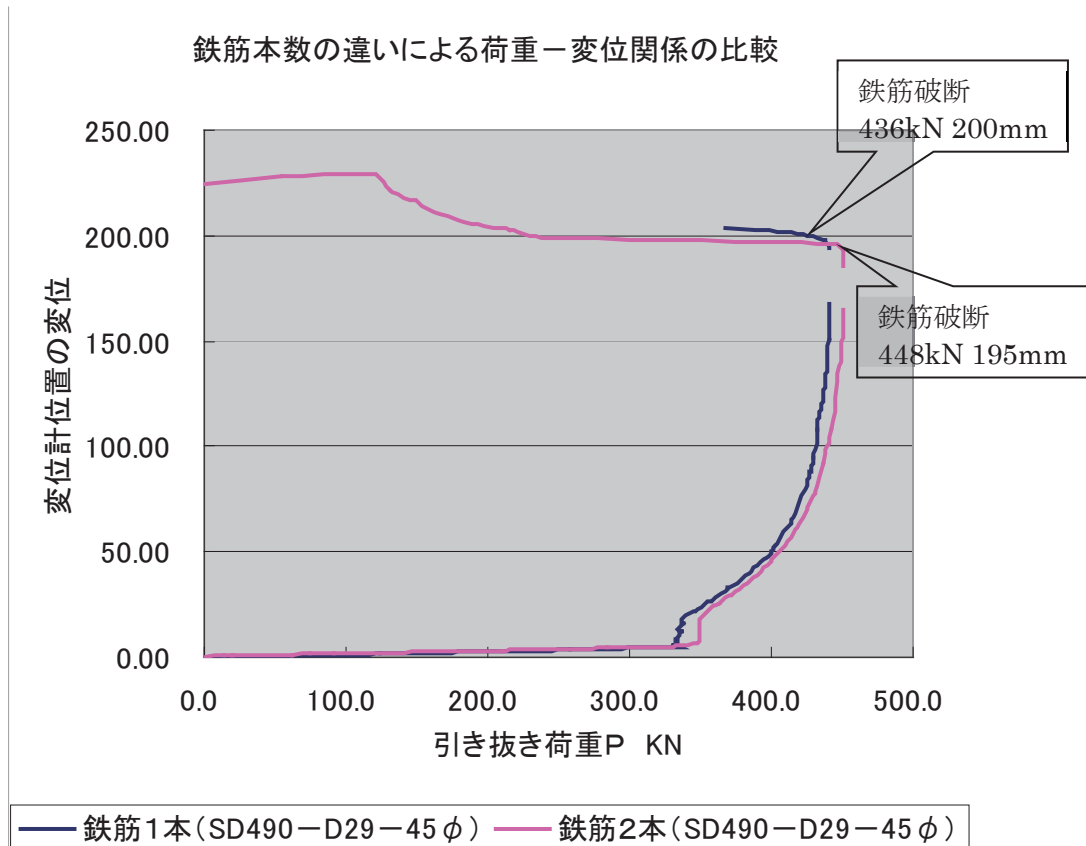


図 3.5.7 鉄筋本数の違いによる荷重－変位関係の比較

- ・ 抜き荷重は両者で大差なかった。
- ・ 鉄筋近傍をコア抜きした結果では、鉄筋周辺にひびわれは確認できなかった。

#### <変位の補正方法>

両ケースの変位計の位置は、定着部境界（コンクリート上面から  $10\phi$  下がった、シースにより付着を切った範囲の下端）から 1105 mm (No.7), 1505 mm (No.15) と異なっている。そこで、このままでは、変位を比較できないので、次のようにNo.15 供試体の変位を補正した。

初期荷重レベルの変位：初期荷重レベルでは、コンクリート内部からの鉄筋の伸び出し変位は小さく、鉄筋の伸び量はコンクリートから突出した鉄筋の伸びに支配される。そこで変位量を突出部分の長さ比 ( $1105/1505 \approx 75\%$ ) で補正する。

最終変位：No.15 供試体の最終段階における突出部の伸び（実験前後における突出部の鉄筋の伸び率）は7%（計測値）である。両供試体の突出長の差分(1505-1105=400 mm)に伸び率 7%を乗じた 28 mmを全体変位から差し引くとNo.7 と同一条件の変位になる。これは突側の最終変位の約 90%に相当する。

全体の変位は、「初期荷重レベルにおいて 75%」から「最終変位において 90%」まで漸増させるものとし、荷重—変位関係図を補正した。

(5) 荷重方法の影響 (B グループ)

ジャッキの拘束影響のある No. 5 と拘束影響を除去した No. 6 の荷重—変位関係を図 3.5.8 に示す。

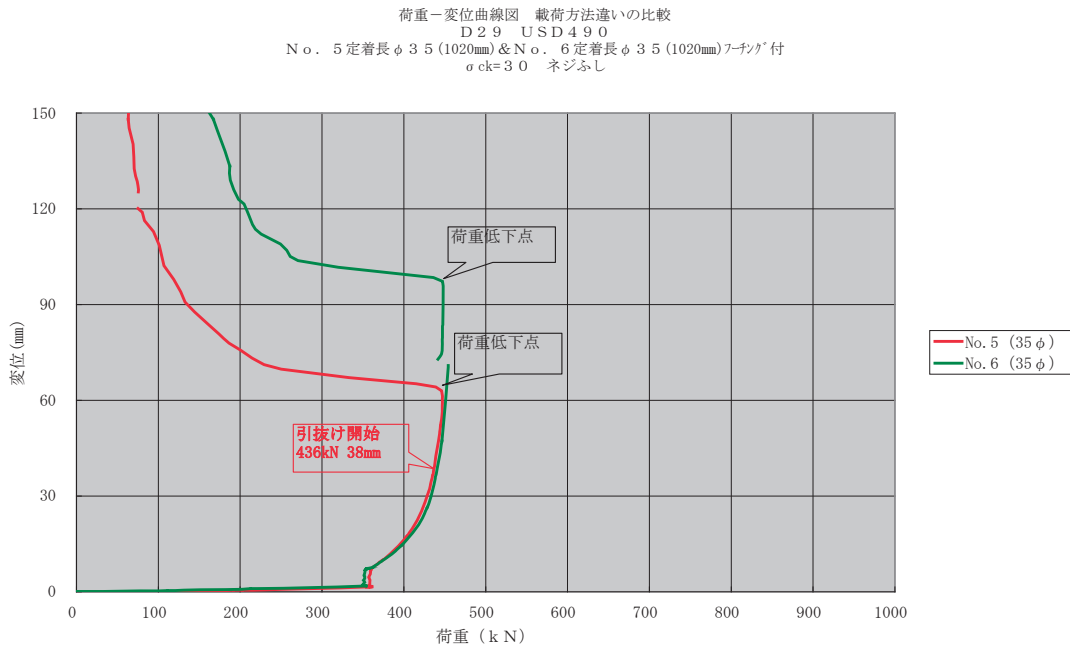
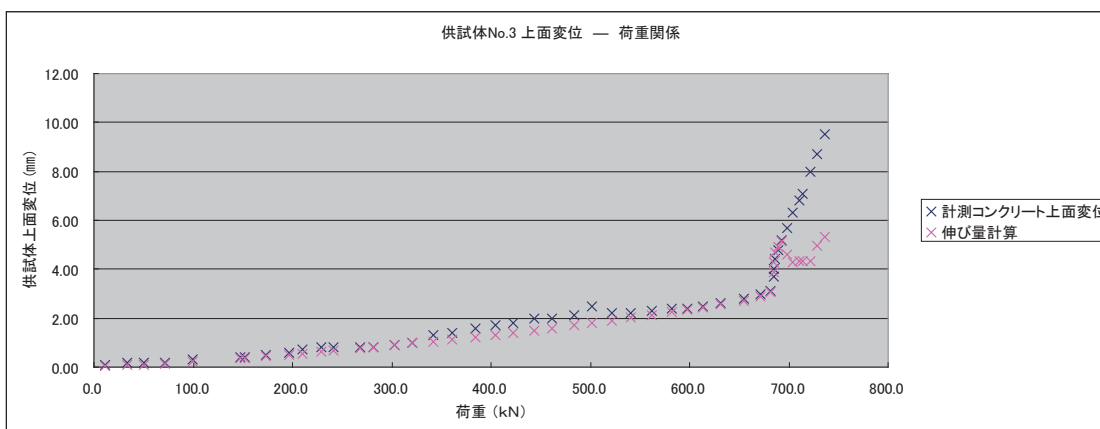
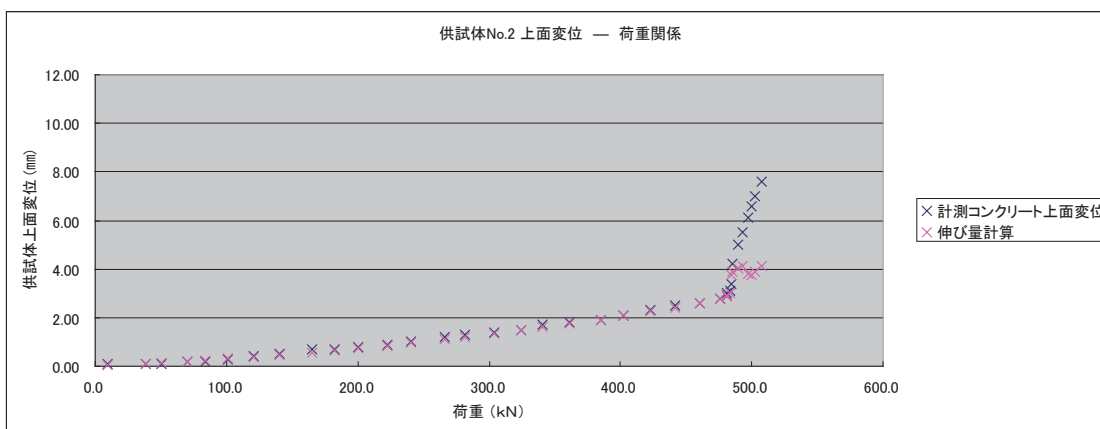
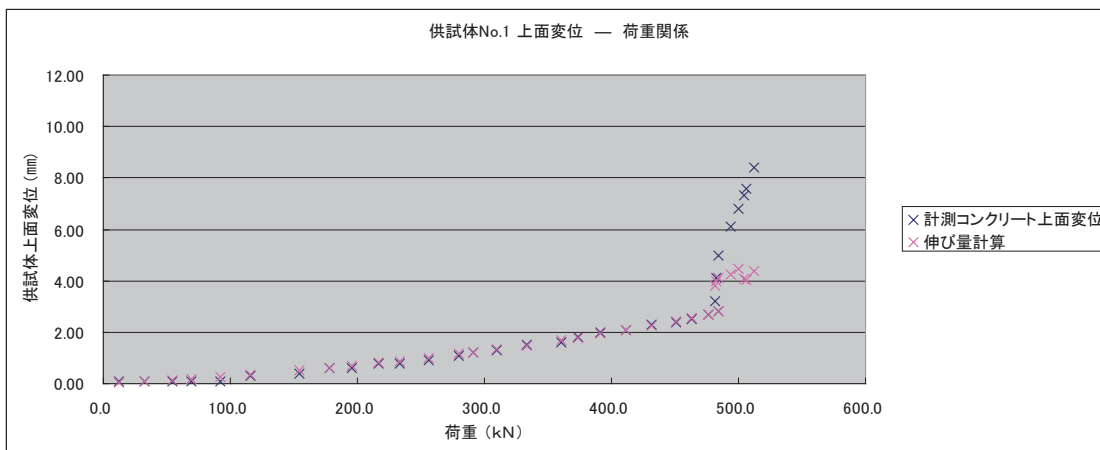


図 3.5.8 変位—荷重関係 (No. 5 と No. 6 供試体)

両者は同様の軌跡をたどるが、ジャッキの拘束影響のある No. 5 の方が荷重低下点の変位が小さくなった。

### (6) 異なる計測方法による伸び出し変位の計測値の比較

コンクリート上面の変位計によって計測した伸び出し変位（実測変位）と、鉄筋のひずみデータから計算したコンクリート上面の伸び出し変位（計算変位）の比較を図 3.5.9 に示す。



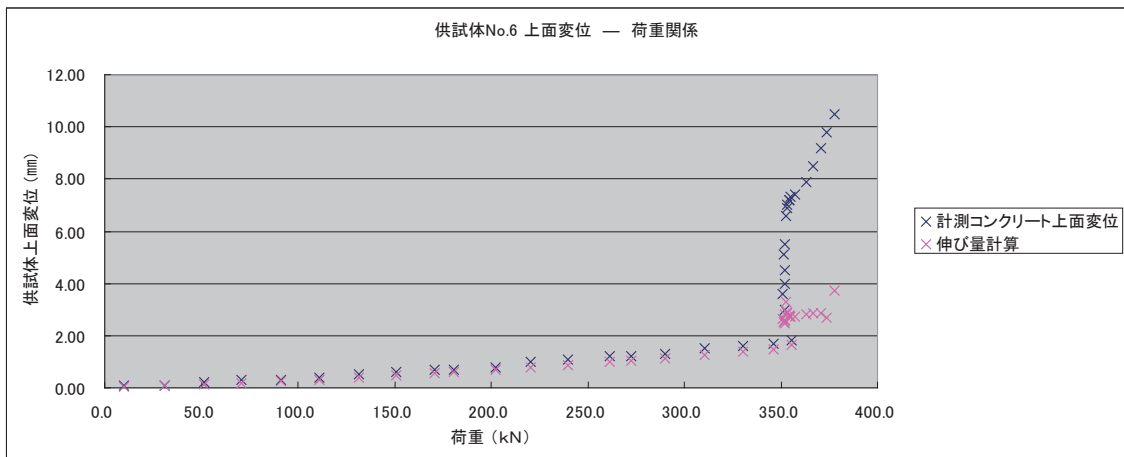
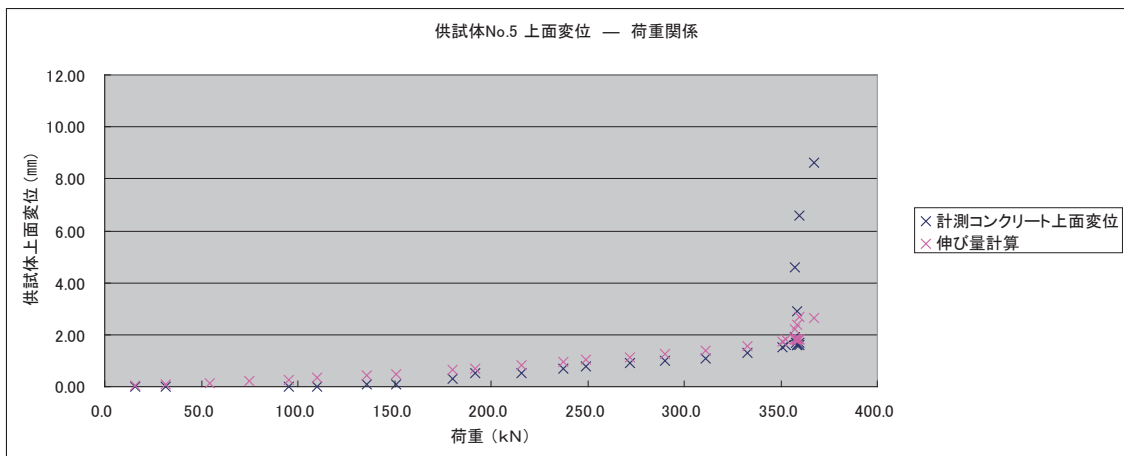
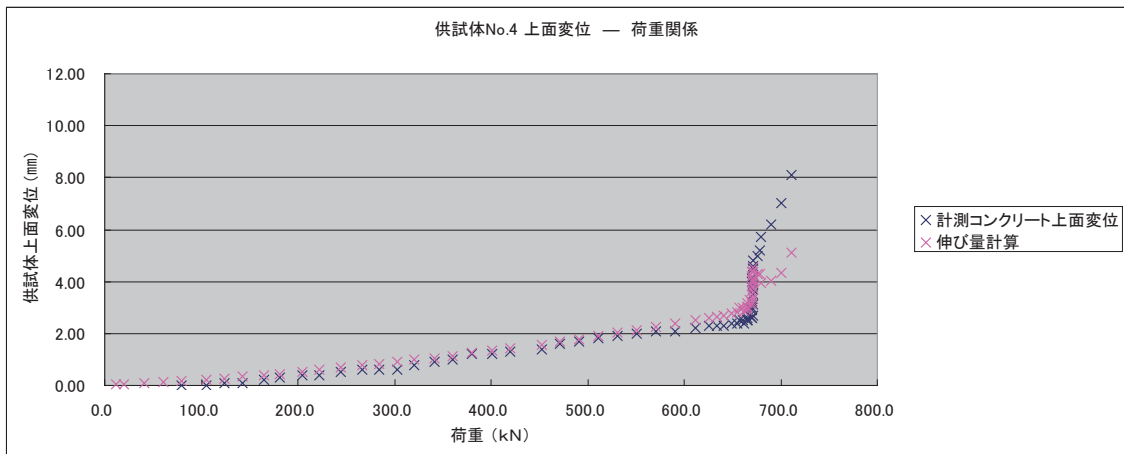


図 3.5.9 供試体 No. 1～6 上面変位—荷重関係

両者は降伏点以下の範囲において概ね一致し、ひずみデータの妥当性が確認できた。降伏点に達し、ひずみが急増し始めると、実測変位と計算変位は一致しなくなった。

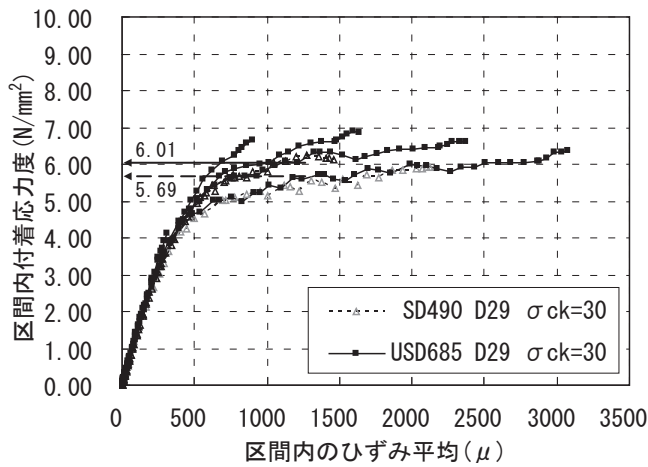
## (7) 発揮される付着性能

任意のひずみ計測区間における隣接 2 計測点のひずみ平均値  $\mu$  と計測区間内の付着応力度  $\tau$  の関係について、鉄筋強度及び鉄筋径に着目した比較結果を図 3.5.10(a)及び(b)に示す。いずれのケースにも、付着応力度はひずみ平均が  $300\mu$  あたりまではほぼ直線的に増加した後、ある付着応力度にて頭打ちになるバイリニアの関係を示した。そこで、付着応力度が頭打ちとなり平均値  $1000\mu \sim 1500\mu$  の範囲における付着応力度の平均値（以下、発揮付着応力度）を読み取り比較を行った。値は図中に表記した。

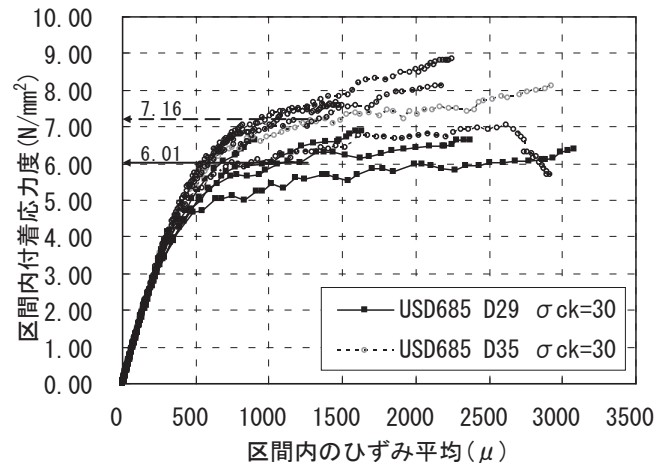
鉄筋強度の比較である(a)より、ひずみと付着応力度の関係は鉄筋強度の違いに依らずほぼ同等となった。これは、鉄筋とコンクリートとの付着は鉄筋の弾性域内で発揮されるため、弾性係数が同等であれば鉄筋強度が異なっても付着応力度発揮傾向に差は生じないことを示すものであると考えられる。また、D29 に対する D35 の発揮付着応力度の比率は 1.19 となり、鉄筋径が大きいほど発揮付着応力度も大きくなる傾向を示した。さらに、それぞれの鉄筋径についてコンクリートのせん断抵抗断面積  $A_c$  を比較した(図 3.5.11)。その結果、D29 では  $A_c=5200\text{mm}^2$ 、D35 では  $A_c=6253\text{mm}^2$  となり、D29 に対する D35 の断面積比率 1.20 は、前述の発揮付着応力度の比率 1.19 と近いものとなった。

以上より、高強度鉄筋の付着メカニズムについて以下のことが考察できる。

- ・コンクリートと鉄筋の付着応力度の分布傾向は、深さ方向にほぼ一定を保ったまま推移する。
- ・発揮される付着応力度はある一定値で頭打ちとなり、鉄筋弾性域内ではその値を保持する。
- ・鉄筋の降伏に伴う鉄筋とコンクリートとのひずみ差の増大により付着劣化が発生する。
- ・付着上端側から鉄筋の降伏が発生すると、付着劣化は加速度的に深さ方向に進展し、鉄筋は引き抜ける。
- ・コンクリートと鉄筋の間で発揮される付着性能は、鉄筋強度よりも、鉄筋径及び鉄筋のふし形状により決まるコンクリートのせん断抵抗断面積に依存する可能性がある。



(a) 鉄筋強度の比較



(b) 鉄筋径の比較

図 3.5.10 ひずみと付着応力度の関係

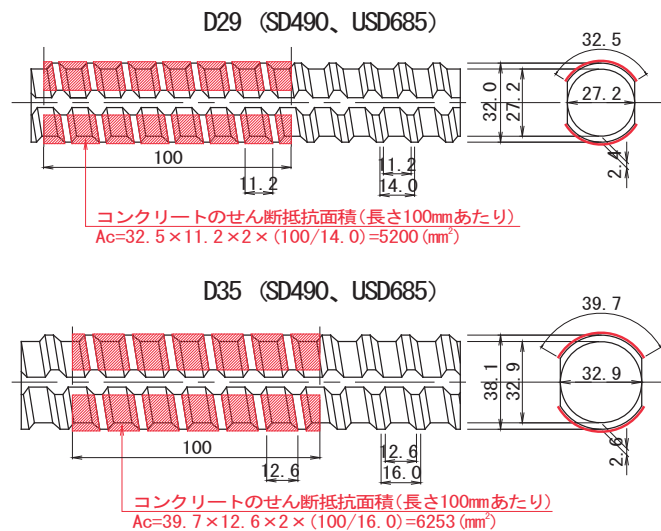


図 3.5.11 鉄筋のふし形状とコンクリートのせん断抵抗

【参考文献】

- 1) 島弘、周礼良、岡村甫：マッシュ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 No. 378, V-6, pp. 165-174, 1987. 2
- 2) 島弘、周礼良、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 No. 378, V-6, pp. 213-220, 1987. 2