
鉄筋端部にネジ加工を施して取付けた機械式定着工法の開発

米田 大樹・竹内 秀聡^{*1}・吉良 拓人^{*2}・舟橋 政司・伊藤 始^{*3}・島 弘^{*4}

DEVELOPMENT OF MECHANICAL ANCHOR INSTALLED IN REINFORCED BAR WITH THREAD

Taiju YONEDA, Hideaki TAKEUCHI, Takuto KIRA, Masashi FUNAHASHI, Hajime ITO, Hiroshi SHIMA



研究の目的

鉄筋コンクリート構造物の配筋合理化を目的として、既往の鋭角フックや半円形フックの代わりに機械式定着を採用する例が増加している。しかし、既往の機械式定着工法は、いずれもフック定着と比較して高コストである。そこで、あらゆる種類の鉄筋に適用でき、かつ安価に加工可能な機械式定着として、鉄筋端部に雄ネジの加工を施して定着金物を取り付ける機械式定着工法を開発し、各種性能確認実験を行った。実験の結果、ネジ部の性能は、鉄筋径 D16～D35、鋼種 SD295～SD490 の範囲において、節形状が竹節・ネジ節に関わらず鉄筋母材で破断可能な性能を有していることを確認した。また、定着体の高応力繰返し引抜実験と梁の載荷実験の結果、鉄筋端部に雄ネジの加工を施して定着金物を取り付けた機械式定着が標準フックと同等もしくはそれ以上の定着性能を有していることを確認した。

技術の説明

定着具は、雄ネジを鉄筋端部に切削加工で成形して定着板を取付けたものであり、鉄筋径 D16～D35、鋼種 SD295～SD490 の範囲において、節形状が竹節・ネジ節に関わらず鉄筋の母材破断強度と同等以上の強度を有している。横方向鉄筋（せん断補強筋等）に対して、標準フックと同等として置き換え可能である。

主な結論

- (1) 定着具のネジ部の性能は、鉄筋径 D16～D35、鋼種 SD295～SD490 の範囲において、節形状が竹節・ネジ節に関わらず鉄筋母材で破断可能な性能を有していることを確認した。
- (2) 定着具のネジ嵌合部のすべり量は、鉄筋定着・継手指針に示されている基準値 0.3mm よりも大幅に小さい値となった。
- (3) 定着体の高応力繰返し引抜実験の結果、定着板の直径が鉄筋径の 2.5 倍以上であれば、30 回繰返し後の拔出量が標準フックよりも小さく、定着性能は同等以上である。
- (4) せん断破壊先行型の梁部材のせん断補強筋として適用した結果、標準フックと同等のせん断補強性能を有していることを確認した。

*1 本店 土木部設計グループ *2 ユニタイト株式会社 *3 富山県立大学 *4 高知工科大学

鉄筋端部にネジ加工を施して取付けた 機械式定着工法の開発

米 田 大 樹 竹 内 秀 聡^{*1}吉 良 拓 人^{*2} 舟 橋 政 司伊 藤 始^{*3} 島 弘^{*4}

要 旨

鉄筋コンクリート構造物の配筋合理化を目的として、既往の鋭角フックや半円形フックの代わりに機械式定着を採用する例が増加している。しかし、既往の機械式定着工法は、いずれもフック定着と比較して高コストである。そこで、あらゆる種類の鉄筋に適用でき、かつ安価に加工可能な機械式定着として、鉄筋端部に雄ネジの加工を施して定着金物を取り付ける機械式定着工法を開発し、各種性能確認実験を行った。実験の結果、ネジ部の性能は、鉄筋径D16～D35、鋼種SD295～SD490の範囲において、節形状が竹節・ネジ節に関わらず鉄筋母材で破断可能な性能を有していることを確認した。また、定着体の高応力繰返し引抜実験と梁の載荷実験の結果、鉄筋端部に雄ネジの加工を施して定着金物を取り付けた機械式定着が標準フックと同等もしくはそれ以上の定着性能を有していることを確認した。

キーワード 機械式定着／せん断補強筋／横方向鉄筋／ネジ／定着金物

目 次

- | | |
|-----------|------------|
| 1. 序論 | 4. せん断補強性能 |
| 2. ネジ部の性能 | 5. 結論 |
| 3. 定着体の性能 | |

DEVELOPMENT OF MECHANICAL ANCHOR INSTALLED IN REINFORCED BAR WITH THREAD

Taiju YONEDA
Takuto KIRA
Hajime ITO

Hideaki TAKEUCHI
Masashi FUNAHASHI
Hiroshi SHIMA

Synopsis:

To improve bar arrangement of reinforced concrete structure, cases are increasing that they replaced mechanical anchor from existing hook. But the mechanical anchor method is expensive in comparison with the existing hook method. Therefore the mechanical anchor method installed in reinforced bar with thread was developed for cost cut and to make that method that can apply to various ribs. From the test results, it was confirmed that thread strength equals to the base material strength in specification of diameters(D16-D35), strengths(SD295-SD490) and ribs(normal steel bar and steel bar with threaded rib). From the load test of beam, it was confirmed that performance of the mechanical anchor equals to performance of the existing hook anchor.

* 1 本店 土木部 設計グループ

* 2 ユニタイト株式会社

* 3 富山県立大学

* 4 高知工科大学

1. 序論

1.1 はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物には、耐震性向上の観点から大きな耐力と変形性能が要求されることが多く、鉄筋量の増加によって配筋が過密状態となっている。配筋の過密状態は、配筋作業の煩雑化やコンクリートの充填不良の原因となるため、従来のフック定着の代わりに鉄筋端部へ定着金物を取り付けた機械式定着工法の採用が増えている。しかし、既往の機械式定着工法は、配筋作業の合理化や工期短縮効果を考慮してもフック定着と比較して若干のコスト増となってしまう。また、現場で容易に取り付け可能なネジ節鉄筋と定着金物の組合せについても、特定の製品同士の組合せしかできず、製品の選択肢が限られるためコストダウンを図ることが難しい。そこで、あらゆる種類の鉄筋に適用でき、かつ安価な機械式定着工法として、写真-1 に示すような鉄筋端部に雄ネジの加工を施して定着金物を取り付けた機械式定着工法を開発し、各種性能確認実験を行った。本稿は、これらの性能確認実験について報告を行うものである。

1.2 本論文の構成と概要

鉄筋の機械式継手については、土木学会から鉄筋継手指針¹⁾²⁾が定められていたが、その後様々な機械式定着工法が開発されてきたことを踏まえ、2007年に機械式継手と機械式定着を含めた鉄筋定着・継手指針[2007年版]³⁾へ改定された。これにより、機械式定着工法は、統一的な性能照査方法が定められ、この照査を満足する機械式継手や機械式定着については、従来の重ね継手や標準フックを設けた部材と同等とみなして設計できるようになった。例えば、定着具の性能評価基準として表-1 に示す項

目の中から要求性能、使用目的、および工法に応じて必要なものを実施し、それぞれの基準を満足することを確認すると定めている。なお、本稿では、用語の定義として鉄筋定着・継手指針[2007年版]³⁾に従い、「定着具」を機械式定着において、鉄筋に作用する引張力をコンクリートに伝達するために鉄筋端部に設けられる板またはこぶ状のもの、「定着体」を定着される鉄筋端部（定着具やフックを含む）とその周囲の定着性能に寄与するコンクリートを含めた箇所、「定着部」を軸方向鉄筋においては定着体を含む部位、横方向鉄筋においては定着体を含む部材として用いる。

本稿では、2章で定着具としての性能について鉄筋と定着金物の引張試験からネジ部の接続強度が鉄筋母材と同等以上の性能を有していることを報告する。3章では、定着体としての性能についてコンクリートに埋め込んだ定着具の引抜試験結果から、標準フックと同等以上の定着性能を有していることを報告する。4章では、梁のせん断破壊実験から本機械式定着をせん断補強筋の端部に用いた場合の性能が標準フックと同等以上であることを報告する。

2. ネジ部の性能

2.1 実験要因

定着具の性能評価実験として表-1 に示す（i）引張強度、（ii）嵌合部の残留すべり量、（iii）勾配引張強度の3種類の実験を実施した。試験体は、表-2 に示す通り、鉄筋の節形状として竹節鉄筋とネジ節鉄筋の2種類を、鉄筋径としてD16、D25、D35の3種類を、鉄筋の強度としてSD295、SD345、SD390、SD490の4種類を用いた。載荷方法は、「2.2 実験方法」で述べるように、鉛直引



写真-1 雄ネジと定着金物

表-1 定着具の性能評価項目³⁾

性能試験項目	性能の条件
(i) 引張強度	定着具の強度が使用する鉄筋の規格引張強さ以上 ^{※1}
(ii) 嵌合部の残留すべり量	嵌合部のすべり量(δ_s ^{※2})が0.3mm以下
(iii) 勾配引張強度 ^{※3}	使用する鉄筋の規格引張強さ以上
(iv) 疲労強度	設計で想定した繰返し回数に対する強度以上 ^{※4}
(v) その他の性能 (顕微鏡観察、硬度分布、接合部切出し引張強度等)	定着具および鉄筋に有害な変状がない

※1 定着具の強度とは最大引張荷重を鉄筋の公称断面積で除した値である

※2 δ_s は鉄筋応力で $0.95f_{ym}$ まで加力後、 $0.02f_{ym}$ まで除荷した時点の残留すべり量とする(f_{ym} :鉄筋の規格降伏強度)

※3 支圧面に勾配を有する座金を用いて定着具に偏心力が作用するようにした試験

※4 複数水準の応力振幅に対して疲労試験を行い、S-N線図が得られていることが望ましい

表-2 定着具の実験要因一覧

呼び径	節形状	鋼種			
		SD295	SD345	SD390	SD490
D16	竹節	3本(i, ii) 3本(iii)	3本(i, ii) 3本(iii)	3本(i, ii) 3本(iii)	-
	ネジ節	-	3本(i, ii) 3本(iii)	-	-
D25	竹節	-	3本(i, ii) 3本(iii)	3本(i, ii) 3本(iii)	-
	ネジ節	-	3本(i, ii) 3本(iii)	3本(i, ii) 3本(iii)	3本(i, ii) 3本(iii)
D35	竹節	-	3本(i, ii) 3本(iii)	-	3本(i, ii) 3本(iii)
	ネジ節	-	3本(i, ii) 3本(iii)	-	-

※ i, ii, iiiは、「表-1」の性能試験項目を表す

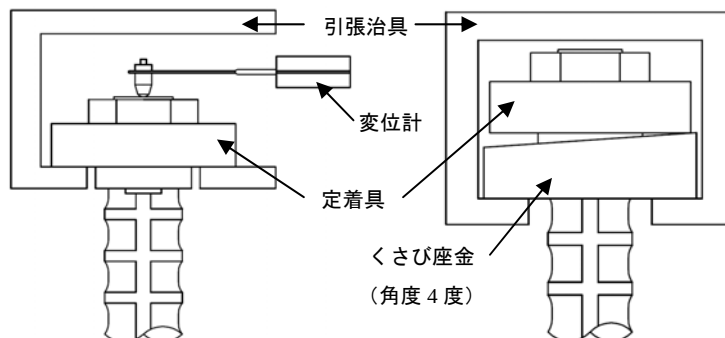


図-1 引張試験方法(左:鉛直引張, 右:勾配引張)

張・勾配引張の 2 種類とした。実施したパラメータと試験体数の組合せを表-2 に示す。試験体は、実験パラメータごとに 3 本を実施した。

2.2 実験方法

定着具の引張試験方法を図-1 に示す。(i) 引張強度と(ii) 嵌合部の残留すべり量は、図-1(左)に示すように治具で定着金物を固定し、定着金物に対して鉄筋を鉛直方向に引っ張ることで実施した。すべり量の計測は、定着金物に治具を介して取付けたカンチレバー型変位計を用いて鉄筋との相対変位を計測した。(ii) 嵌合部の残留すべり量は、(i) 引張強度と合わせて実施し、最初に上限応力として $0.95f_{ym}$ まで加力した後、下限応力の $0.02f_{ym}$ まで除荷してすべり量の計測を行った。その後、鉄筋が破断するまで再度加力を行い、引張強度を測定した。



写真-2 定着具の引張試験状況

(左：鉛直引張，右：勾配引張)



写真-3 定着具の引張試験結果 D16 SD345(竹節)

(左：鉛直引張，右：勾配引張)



写真-4 定着具の引張試験結果 D25 SD345(竹節)

(左：鉛直引張，右：勾配引張)



写真-5 定着具の引張試験結果 D35 SD345(竹節)

(左：鉛直引張，右：勾配引張)

ここで、 f_{ym} は鉄筋の規格降伏強度である。(iii) 勾配引張強度は、図-1(右)に示すように、4 度の勾配を持つくさび型の座金を引張治具と定着金物の間に挟みこむことで実施した。鉛直引張試験状況を写真-2(左)に、勾配引張試験状況を写真-2(右)に示す。

2.3 実験結果

写真-3～写真-5 に引張試験後の破断状況の一例を示す。また、表-3 に実験結果の一覧を示す。表-3 に示す通り、定着具の鉛直引張試験、勾配引張試験のいずれにおいて

表-3 定着具の引張試験結果一覧

鉄筋			勾配 (度)	引張強さ(N/mm ²)			残留すべり量(mm)		破断 位置
呼び径	鋼種	節形状		試験値	平均値	規格値	試験値	平均値	
D16	SD295	竹節	0	569	571	440～600	0.027	0.036	母材
				569			0.052		母材
				574			0.028		母材
			4	584	583		—	—	母材
				583			—		母材
				582			—		母材
	SD345	竹節	0	569	572	490以上	0.026	0.024	母材
				574			0.016		母材
				574			0.031		母材
			4	579	578		—	—	母材
				577			—		母材
				577			—		母材
	SD345	ネジ節	0	609	609	490以上	0.017	0.011	母材
				609			0.003		母材
				609			0.014		母材
			4	615	617		—	—	母材
				617			—		母材
				619			—		母材
	SD390	竹節	0	650	647	560以上	0.029	0.023	母材
				645			0.026		母材
				645			0.015		母材
			4	652	652		—	—	母材
				652			—		母材
				651			—		母材
D25	SD345	竹節	0	576	577	490以上	0.019	0.026	母材
				578			0.042		母材
				578			0.018		母材
			4	578	579		—	—	母材
				580			—		母材
				578			—		母材
	SD345	ネジ節	0	563	563	490以上	0.028	0.016	母材
				564			0.001		母材
				563			0.020		母材
			4	561	560		—	—	母材
				563			—		母材
				557			—		母材
	SD390	竹節	0	622	625	560以上	0.002	0.017	母材
				628			0.020		母材
				624			0.029		母材
			4	622	623		—	—	母材
				624			—		母材
				624			—		母材
	SD390	ネジ節	0	639	643	560以上	0.026	0.015	母材
				647			0.020		母材
				643			0.000		母材
			4	641	640		—	—	母材
				641			—		母材
				639			—		母材
SD490	ネジ節	0	726	726	620以上	0.050	0.038	母材	
			728			0.043		母材	
			724			0.021		母材	
		4	713	731		—	—	母材	
			746			—		母材	
			734			—		母材	
D35	SD345	竹節	0	587	584	490以上	0.000	0.002	母材
				584			0.005		母材
				582			0.000		母材
			4	589	585		—	—	母材
				581			—		母材
				585			—		母材
	SD345	ネジ節	0	554	556	490以上	0.000	0.000	母材
				556			0.000		母材
				557			0.000		母材
			4	556	555		—	—	母材
				553			—		母材
				555			—		母材
	SD490	竹節	0	708	710	620以上	0.000	0.000	母材
				711			0.000		母材
				711			0.000		母材
			4	705	706		—	—	母材
				703			—		母材
				709			—		母材

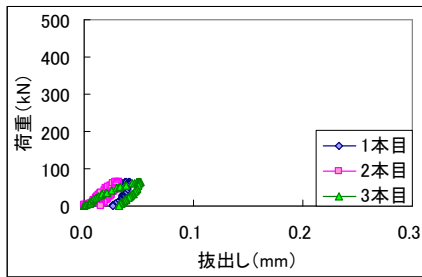


図-2 残留すべり量
(D16 SD345 竹節)

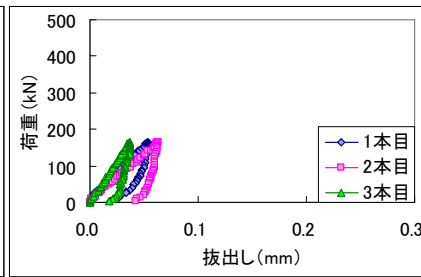


図-3 残留すべり量
(D25 SD345 竹節)

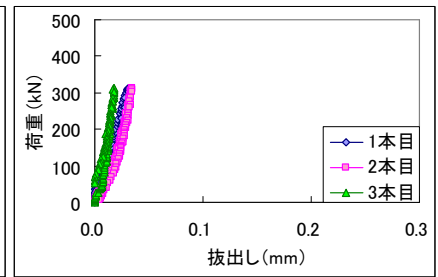


図-4 残留すべり量
(D35 SD345 竹節)

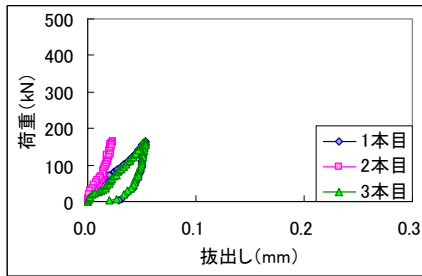


図-5 残留すべり量
(D25 SD345 ネジ節)

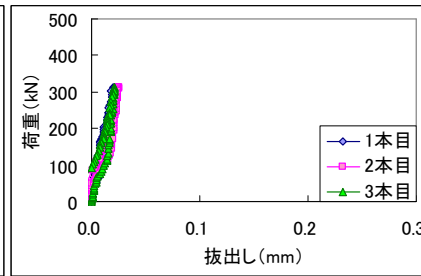


図-6 残留すべり量
(D35 SD345 ネジ節)

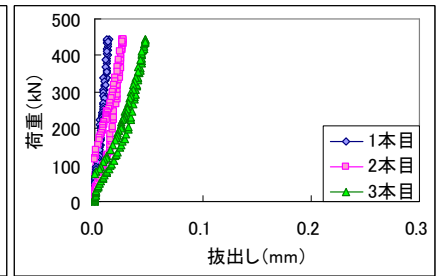


図-7 残留すべり量
(D35 SD490 竹節)

表-4 定着体の性能評価項目³⁾

性能の分類	性能の条件
あり	下限を鉄筋の規格降伏強度の2%以下、上限を鉄筋の規格降伏強度の95%とした応力で静的に30回の繰返し載荷を行った場合、30回目の上限応力時の拔出し量が横方向鉄筋の評価基準フックの場合の値以下、かつ30回目と1回目の上限応力時の拔出し量の差が評価基準フックの値以下
なし	上記以外

表-5 鉄筋の強度

公称直径	降伏点	規格降伏強度	強度	規格引張強度
D (mm)	f_y (MPa)	f_{yn} (MPa)	f_u (MPa)	f_{un} (MPa)
19.1	370	345	557	490以上
34.9	561	490	740	620以上

も鉄筋の強度、径、節形状に関わらず鉄筋の母材部分で破断することを確認した。

嵌合部の残留すべり量の実験結果の一例を図-2～図-7に示す。いずれの結果も指針³⁾で示されている残留すべり量の上限値 0.3mm に対して 0.05mm 以下の非常に小さいすべり量であることが確認された。以上より定着具（ネジ部）としての性能は、十分な強度を有していることが確認された。

表-6 定着体の実験要因一覧

呼び径	鋼種	実験条件				コンクリート強度 (MPa)	試験数 n 個
		形状	対象	かぶり	定着板 (/呼び径)		
D19	SD345	標準フック	軸方向	あり	-	33.5	3
		機械式	"	"	2.5D	29.1	3
		機械式	"	"	2.0D	31.9	3
		標準フック	横方向	なし	-	33.3	3
		機械式	"	"	2.5D	31.6	3
		機械式	"	"	2.0D	33.1	3
D35	SD490	標準フック	"	"	2.5D	31.2	3
		機械式	"	"	2.5D	31.2	3

3. 定着体の性能

3.1 実験要因

定着体の性能評価実験として、鉄筋定着・継手指針[2007 年版]³⁾に従い表-4 に示す高応力繰返し性能の確認実験を実施した。鉄筋は、D19 (SD345) と D35 (SD490) の 2 種類を用いた。使用した鉄筋の機械的性質を表-5 に示す。D19 (SD345) を用いたものは、軸方向鉄筋を対象とした図-8 に示すようなかぶりを有するタイプと、横方向鉄筋を対象とした図-9 に示すようなかぶりの剥落を考慮したタイプの 2 種類の引抜実験を実施した。定着の形状は、標準フックおよび定着板の直径を鉄筋径の 2.5 倍としたものと 2.0 倍としたものの 3 種類とした。D35 (SD490) を用いたものは、図-9 に示す横方向鉄筋を対象とした引抜実験のみを実施した。定着の形状は、標準フックと定着板の直径を鉄筋径の 2.5 倍としたものの 2 種類とした。実験要因の一覧を表-6 に示す。コンクリー

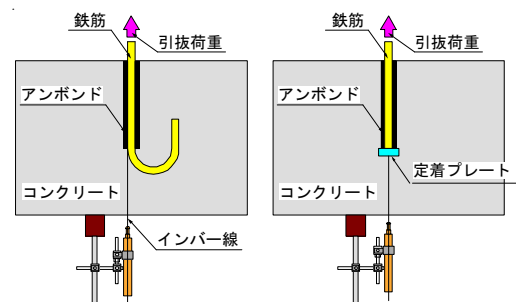


図-8 引抜実験の模式図（かぶりあり）

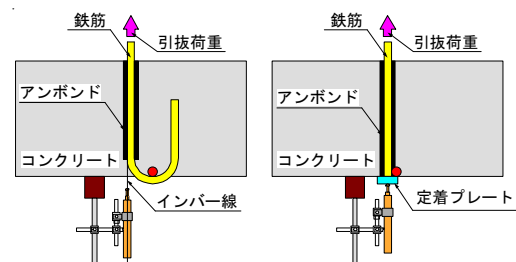


図-9 引抜実験の模式図（かぶりなし）

ト強度の目標値は、いずれも 30MPa とし、結果のばらつきを考慮してパラメータごとに 3 体ずつ引抜実験を実施した。

3.2 载荷方法

载荷は、上限応力 $0.95f_{ym}$ と下限応力 $0.02f_{ym}$ で 30 回繰返した後、規格引張強度を超える荷重まで载荷した。ここで、 f_{ym} は鉄筋の規格降伏強度である。測定項目は、引き抜き荷重と抜き出し量とした。抜き出し量の測定は、かぶりのない機械式定着は、定着金物に直接変位計を接触させて抜き出し量を計測した。それ以外の試験体については、**図-8** と **図-9** に示すようにステンレス線を試験体外に引き出して変位計で測定した。なお、標準フックのステンレス線は、折り曲げ開始位置に取り付けた。

3.3 実験結果

引抜き荷重-抜き出し変位関係の実験結果を**図-10**～**図-17**に示す。また、実験状況を**写真-6**に示す。今回の実験では、各パラメータで試験体数を 3 体としているが、ばら

つきを考慮して標準フックは 3 体の中で最も抜き出し量が小さいもの、機械式定着は最も抜き出し量が多いものと比較した。D19 を用いた試験体の 30 回繰返し後の抜き出し量は、軸方向鉄筋を対象とした標準フックで約 0.5mm、横方向鉄筋を対象とした標準フックで約 0.6mm であった。定着板を鉄筋径の 2.0 倍の大きさとしたものは、軸方向鉄筋、横方向鉄筋共に標準フックよりも抜き出し量が増加する結果となり、特に軸方向鉄筋タイプとしたものは、抜き出し変位が 3.9mm と標準フックより約 8 倍も大きくなる結果となった。一方、定着板を鉄筋径の 2.5 倍としたものは、軸方向鉄筋、横方向鉄筋共に 0.25mm 以下となり、標準フックと比較して抜き出し量が半分以下となった。D35 を用いた試験体の 30 回繰返し後の抜き出し量は、標準フックが約 3.2mm に対して定着板を鉄筋径の 2.5 倍とした機械式定着は約 0.65mm と 1/5 の抜き出し量となった。以上より、鉄筋端部に雄ネジの加工を施して定着金物を取り付けた機械式定着の定着体としての性能は、定着金物の直径を鉄筋径の 2.5 倍以上とすれば、標準フックと同等以上であることが確認された。

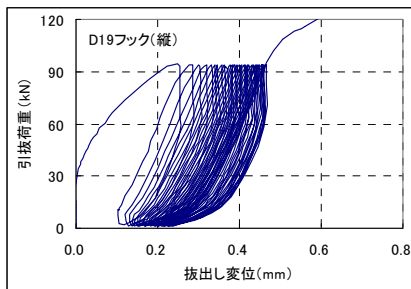


図-10 引抜実験結果
D19 フック(縦)

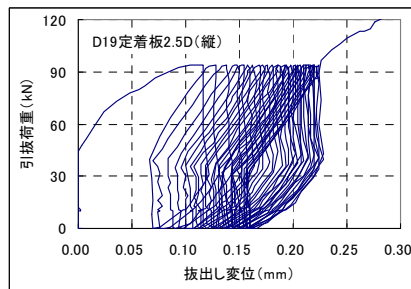


図-11 引抜実験結果
D19 定着板 2.5D(縦)

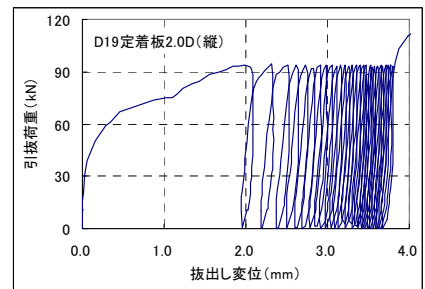


図-12 引抜実験結果
D19 定着板 2.0D(縦)

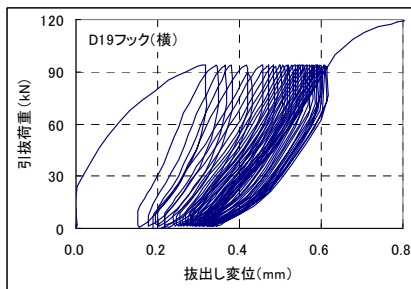


図-13 引抜実験結果
D19 フック(横)

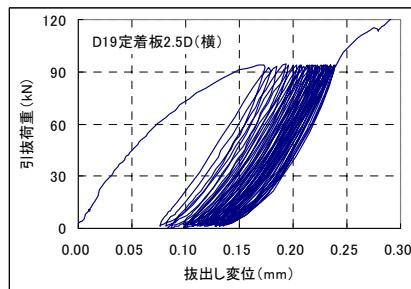


図-14 引抜実験結果
D19 定着板 2.5D(横)

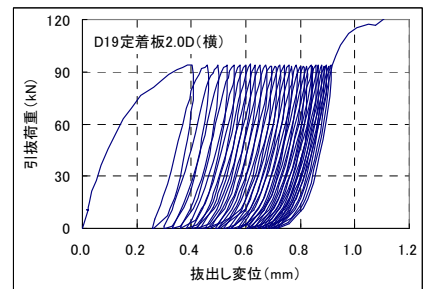


図-15 引抜実験結果
D19 定着板 2.0D(横)

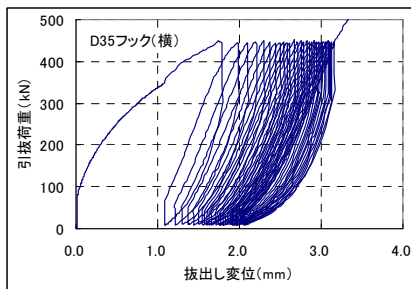


図-16 引抜実験結果
D35 フック(横)

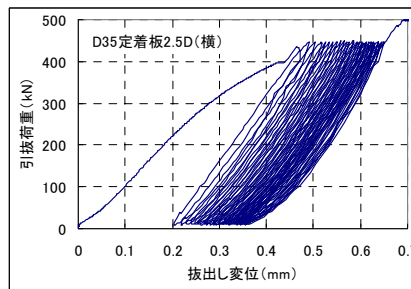


図-17 引抜実験結果
D35 定着板 2.5D(横)



写真-6 引抜実験状況

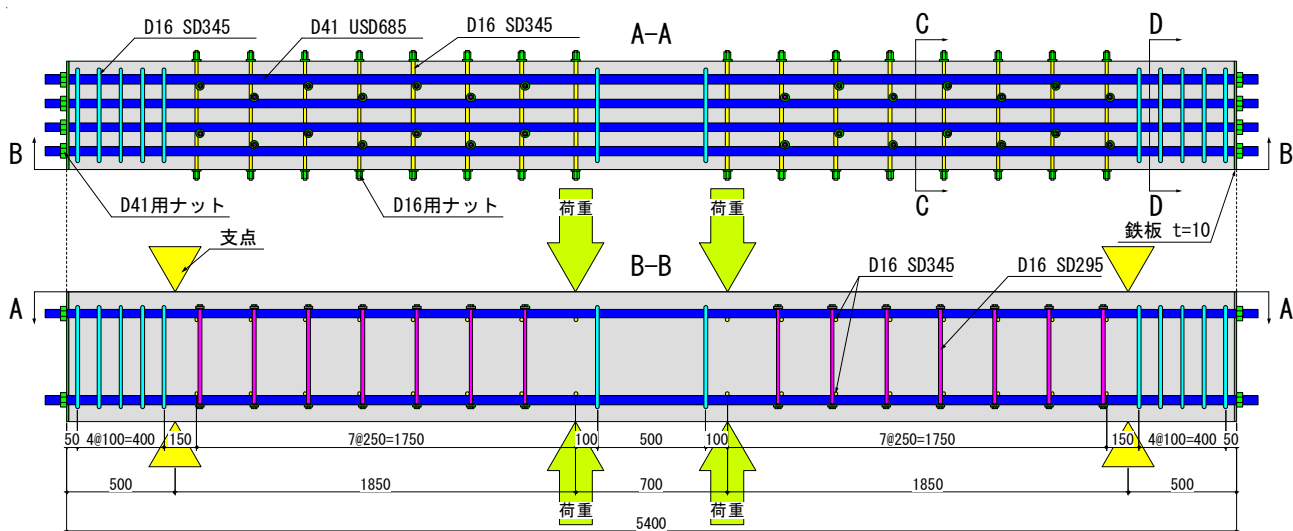


図-18 B-3 試験体(上:平面図, 右:側面図)

表-7 梁試験体の実験要因一覧

番号	形状			コンクリート		主鉄筋		せん断補強筋			
	幅 b_w (mm)	有効 高さ d (mm)	せん断 スパン比 a/d	強度 f_c (MPa)	骨材 寸法 G_{max} (mm)	降伏 強度 f_y (MPa)	呼び 径 D (mm)	降伏 強度 f_{wy} (mm)	呼び 径 D (mm)	本数 n (本)	配置 間隔 S_s (mm)
B-1	500	500	3.70	33.8	20	701	41	-	-	-	-
B-2	500	500	3.70	33.8	20	701	41	358	16	2	250
B-3	500	500	3.70	37.4	20	679	41	355	16	2	250

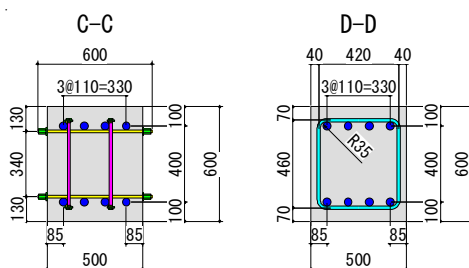


図-19 B-3 試験体(断面図)

4. せん断補強性能

4.1 実験要因

部材としてのせん断補強性能を確認するため、せん断補強筋の端部に雄ネジの加工を施して定着金物（定着板）を取り付けた機械式定着を用い、せん断破壊先行型の梁部材で荷重実験を実施した。定着板の直径は、要素実験で標準フックと同等以上の性能を有していることが確認された2.5倍とした。

梁の部材実験を実施した試験体は、表-7 に示す B-1、B-2、B-3 の3体である。試験体の外形寸法は、全て高さ600mm（有効高さ500mm）、幅500mm、長さ5400mmとした。主鉄筋は、せん断破壊が先行するように D41（USD685）の高強度鉄筋を上下4本ずつ配置し、配力筋は D16（SD345）を250mm ピッチで配置した。代表して機械式定着を用いた試験体 B-3 の形状寸法および配筋を図-18 と図-19 に示す。B-1 は、せん断補強筋の無い基準試験体であり、せん断補強筋以外の条件は、B-3 と同じである。B-2 は、B-3 に対してせん断補強筋の端部の定着を既往のフック定着としたものである。B-2 と B-3 のせん断補強筋は、配力筋と同じ250mm ピッチで2本ずつ配置した。従来、ボックスカルバート等においては、有効高さの確保を目的として配力筋を内側、主鉄筋を外側とした配筋が主流であったが、配筋作業の合理化を目的として土木構造物設計マニュアル（案）⁴⁾では、主鉄筋を内側、配力筋を外側へ配置するように改定されている。しかし、せん断補強筋端部の機械式定着が細径の配力筋を介して

表-8 せん断耐力の計算値と実験値

番号	コンクリート 負担分 $V_{c,cal}$ (kN)	せん断補強 筋負担分 $V_{s,cal}$ (kN)	せん断 耐力 $V_{u,cal}$ (kN)	実験値			
				正側荷重		負側荷重	
				$V_{u,exp}$ (kN)	$V_{u,exp}/V_{u,cal}$	$V_{u,exp}$ (kN)	$V_{u,exp}/V_{u,cal}$
B-1	481※	-	481	459	0.96	-469	0.98
B-2	481※	495	975	1048	1.08	-1266	1.30
B-3	499※	490	989	1090	1.10	-1155	1.17

※コンクリート負担分のせん断耐力 $V_{c,cal}$ は、表-7のコンクリート強度から3MPaを引いた値で計算

主鉄筋を拘束するよりも、太径の主鉄筋を直接拘束した方が条件としては厳しくなる。そこで、今回の実験では、あえて不利な条件とするため配力筋を内側、主鉄筋を外側とした従来の形状に従うこととした。すなわち、B-2 と B-3 のせん断補強筋は主鉄筋を直接拘束するように配筋している（図-19）。

4.2 荷重および計測

荷重は、図-18 の側面図に示すように梁両端から500mm を支点として、等曲げ区間を700mm、せん断スパン1850mm として正負に荷重を実施した。計測は、荷重点と支点にロードセルと変位計を取り付けて荷重と変位を計測し、荷重点の荷重の和と荷重点の変位の平均で制御を行った。また、主筋とせん断補強筋にひずみゲージを貼り付けてひずみを計測した。

加力は、B-1 と B-2 は予備荷重後、せん断破壊まで単調で荷重を行い、正側でせん断破壊した後に正負に繰返し荷重を行った。B-3 は、B-1 のせん断破壊時の変位の整数倍で正負交番荷重を実施した。

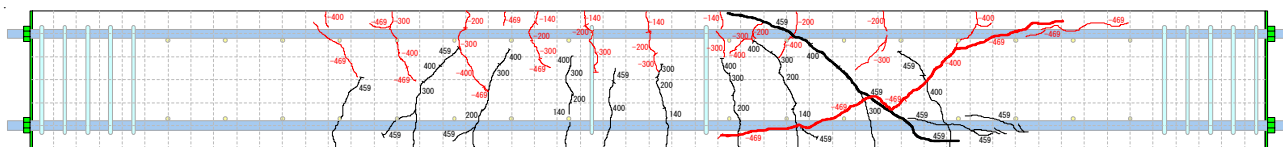


図-20 ひび割れ図 (B-1)

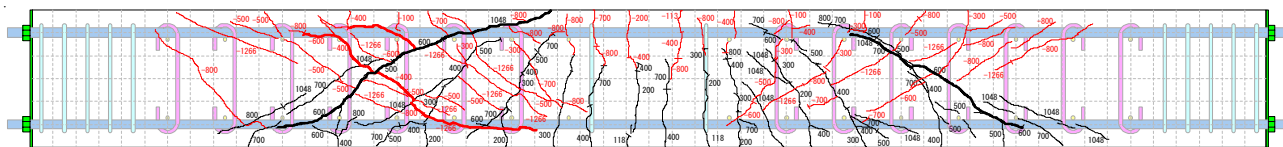


図-21 ひび割れ図 (B-2)

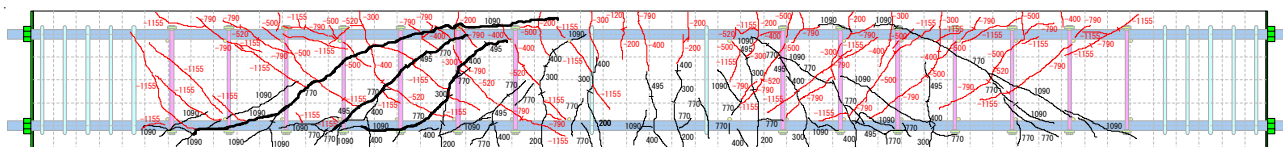


図-22 ひび割れ図 (B-3)

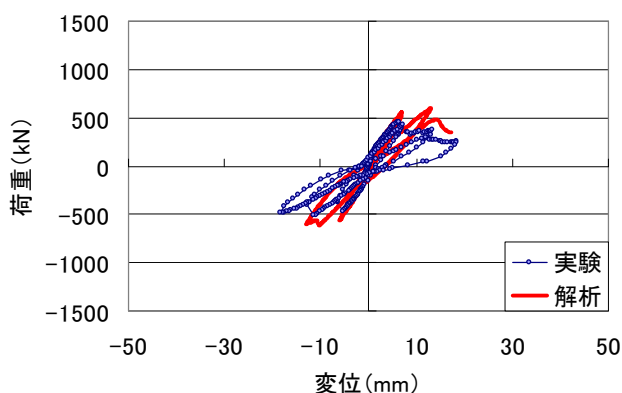


図-23 B-1 の履歴曲線

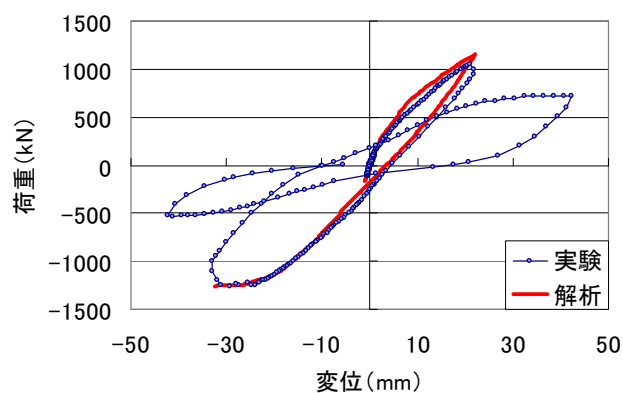


図-24 B-2 の履歴曲線

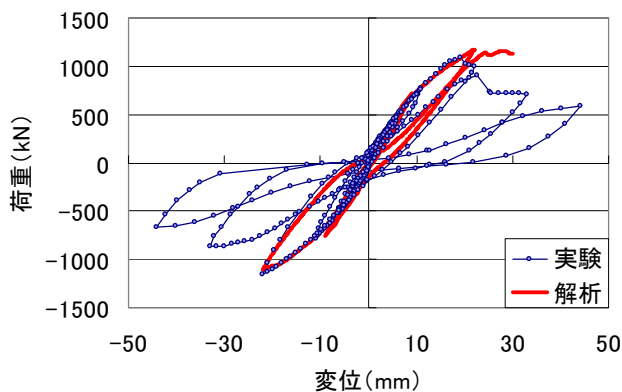


図-25 B-3 の履歴曲線

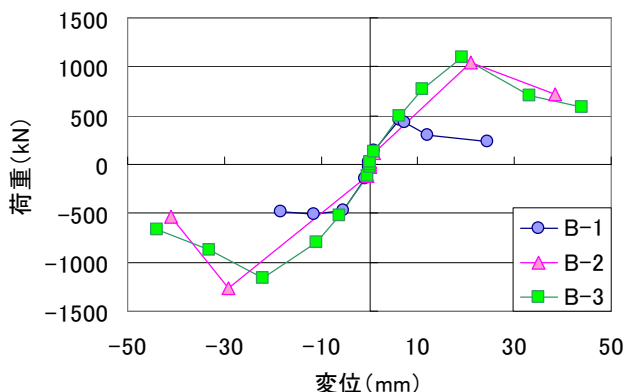


図-26 荷重変位関係の包絡線

4.3 破壊状況および荷重変位履歴曲線

表-8 に各試験体のせん断耐力の実験値を示す。また、ひび割れ図を図-20～図-22 に、荷重変位履歴曲線を図-23～図-25 に示す。

せん断補強筋の無い B-1 は、せん断スパン区間に生じた鉛直方向の曲げひび割れが荷重 400kN 付近から斜めへ方向を変えた後、459kN で斜めひび割れが圧縮縁へ貫通して荷重が低下した。負側荷重も正側と同じ-400kN 付近で曲げひび割れから斜めひび割れへ向きを変えた後、-469kN で圧縮縁へ斜めひび割れが貫通して荷重が低下

した。その後、正側は変位 10mm 付近で荷重が若干増加する傾向が見られたが、最大荷重を超えることなく破壊が進行した。一方、負側は荷重が-514kN まで再度上昇したが、最初に荷重の低下が確認された-469kN を負側のせん断耐力とした。せん断補強筋の端部をフック定着とした B-2 は、B-1 と同様に±400～±500kN の範囲で曲げひび割れから進展した斜めひび割れの発生が確認され、正側は 1048kN で荷重が低下した。その後の負側荷重では、正側より若干大きい-1265kN で荷重が低下した。B-3 は、B-1、B-2 と同様に、正側、負側とも±400kN へ

500kN の範囲で斜めひび割れの発生が確認され、正側は 1090kN（変位 22mm）で荷重が低下した。一方、負側は変位-22mm で荷重-1155kN に達しても荷重の低下は確認されなかったが、正側と同じ変位に合わせて荷重を反転させた。その後、B-3 の荷重は、正側、負側ともにそれまでの最大荷重に達することではなく、破壊が進行した。B-1～B-3 のいずれも梁中央に貼り付けたひずみゲージの値で主鉄筋の降伏は確認されず、破壊モードはせん断破壊であった。

全ての試験体において、正側よりも負側の荷重が若干大きくなる傾向が見られた。先行ひび割れを有する部材のせん断耐力については、ひび割れの無い部材より耐力能力が向上することが報告されている^{5),6)}。今回の実験においても、正側載荷時に導入されたひび割れが、負側載荷時の部材耐力機構にプラスの効果を付与していたものと推察される。

4.4 荷重変位関係の包絡線

図-26 に B-1, B-2, B-3 の荷重変位関係の包絡線を示す。B-1 はせん断補強筋が無い場合、B-2, B-3 と比較して小さいせん断耐力となっている。せん断補強筋にフック定着を用いた B-2 と機械式定着を用いた B-3 の正側載荷時の荷重変位関係はほぼ同じ結果であった。負側載荷時は、B-2 の荷重が若干大きい結果となっているが、これは、負側載荷時にせん断破壊するまで載荷を進めた B-2 に対し、B-3 はせん断破壊に至る前の-22mm で正側へ荷重を反転させているためと考えられる。図-27 に示すように、B-2 の包絡線を B-3 と同じ変位時の荷重で描いた場合、B-2 と B-3 の結果はほぼ同じとなる。

4.5 せん断補強筋のひずみ分布

図-28 と図-29 に B-2 と B-3 のせん断補強筋のひずみから算出したせん断補強筋の負担荷重を示す。荷重の算出に用いた鉄筋の応力ひずみ関係は、鉄筋の材料試験結果を用い、せん断補強筋の手前側と奥側の 2 本分を足し合わせた値として示している。図-27 と図-28 に示す通り、B-2 と B-3 のせん断補強筋はいずれも載荷点と梁両側付近を除いて降伏荷重に達しており、せん断補強筋としての性能を十分に発揮していることが確認された。

4.6 設計耐力評価式との比較

土木学会コンクリート標準示方書⁷⁾では、棒部材のせん断耐力 V_u をコンクリート負担分の V_c とせん断補強筋負担分の V_s の和としている（式[1]）。

$$V_u = V_c + V_s \quad [1]$$

ここに、 V_c ：せん断補強鋼材を用いない棒部材のせん断耐力（kN）、 V_s ：せん断補強筋により受け持たれる

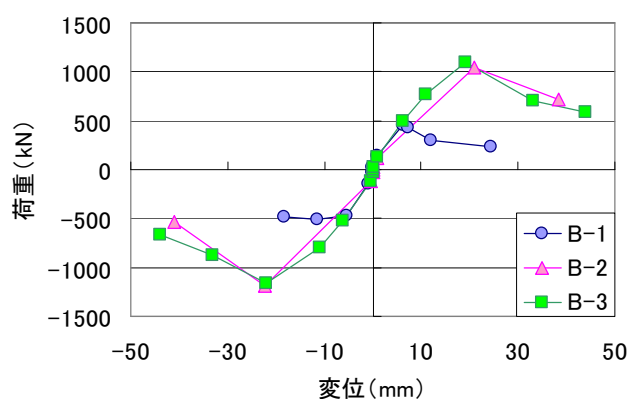


図-27 荷重変位関係の包絡線（変位修正）

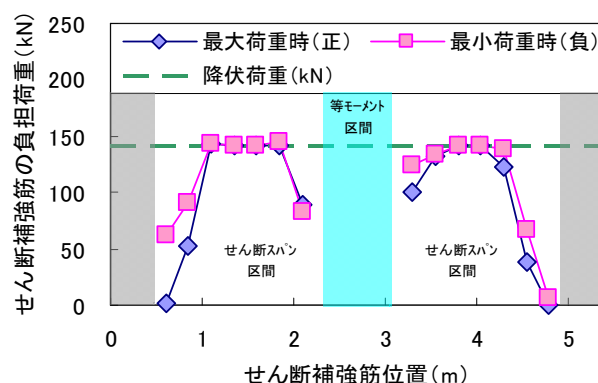


図-28 せん断補強筋の負担荷重（B-2）

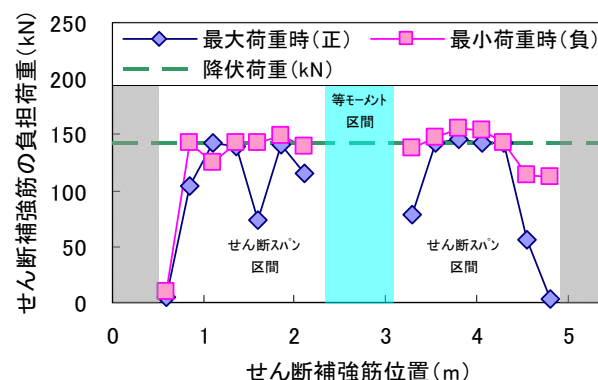


図-29 せん断補強筋の負担荷重（B-3）

せん断耐力（kN）である。

コンクリート負担分の V_c は式[2]の形で表され、コンクリート強度の影響、鉄筋比の影響、寸法効果の影響、軸力の影響の積の形で表現されている。

$$V_c = 0.23 \sqrt{f'_c} \cdot \sqrt[3]{100 p_v} \cdot \sqrt[4]{1000/d} \cdot \beta_n \cdot b_w d \quad [2]$$

$$\beta_n = 1 + 2M_0/M_{ud} \quad (N'_d \geq 0) \quad [3]$$

$$= 1 + 4M_0/M_{ud} \quad (N'_d < 0) \quad [4]$$

$$p_v = A_s / (b_w d) \quad [5]$$

ここに、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度（MPa）、 d ：有

効高さ (mm), b_w : 梁幅 (mm), M_θ : 設計曲げモーメント M_d に対する引張縁において軸方向力によって発生する応力を打ち消すのに必要な曲げモーメント, M_{ud} : 軸方向力を考慮しない純曲げ耐力, A_s : 引張側鋼材の断面積である。

部材中のコンクリートの引張強度は、乾燥収縮等の影響によって低下している可能性があり、圧縮強度も封緘養生供試体と部材から採取したコア強度で比較すると若干封緘養生供試体の値が大きくなるようである⁸⁾。そこで、せん断耐力の算出にあたり、JASS5⁹⁾に従って封緘養生供試体の材料試験結果から 3MPa を引いた値をコンクリート強度として用いることとした。コンクリート負担分の V_c は、せん断補強筋の無い棒部材のせん断耐力に対応し、表-8 と図-30 に示すように、B-1 の実験結果はコンクリート標準示方書⁷⁾によるせん断耐力評価式とほぼ同じ値となっている。

せん断補強筋負担分の V_s は、トラス理論より式[6]の形で表される。

$$V_s = A_w f_{wy} \left(\frac{\sin \alpha}{\tan \theta} + \cos \alpha \right) z / S_s \quad [6]$$

$$= A_w f_{wy} \left(\frac{\sin \alpha}{\tan \theta} + \cos \alpha \right) d / 1.15 S_s \quad [7]$$

ここに、 V_s : トラス作用で受け持たれる耐力 (kN), A_w : 一組のせん断補強筋の総断面積 (mm²), f_{wy} : せん断補強筋の降伏強度 (MPa), α : せん断補強筋と部材軸のなす角度, θ : 圧縮斜材と部材軸のなす角度 (一般に 45 度を仮定), z : 応力中心間の距離 (mm), d : 有効高さ (mm), S_s : せん断補強筋の間隔 (mm) である。

せん断補強筋を有する B-2 と B-3 の実験結果は、せん断耐力評価式よりも若干大きめの値を示している (表-8)。これは、せん断補強筋降伏後のひずみ硬化の影響や、圧縮斜材と部材軸のなす角度 θ が 45 度より減少すること等が理由として考えられている¹⁰⁾。コンクリート標準示方書⁷⁾のせん断耐力評価式は θ を 45 度とすることで安全側に評価している。せん断補強筋の定着形状に、フック定着を用いた B-2 と機械式定着を用いた B-3 のどちらにおいても、図-30 に示すようにコンクリート標準示方書のせん断耐力評価式による計算値を上回っており、既往の実設計と同様に $\theta=45$ 度とし、本機械式定着を標準フックと同等として用いることが可能であると考えられる。

4.7 解析による確認

梁試験体 B-1~B-3 について、アクティブクラック法による多方向固定分散ひび割れモデルで平面応力 2 次元有限要素法解析^{11),12),13)}を実施した。解析コードは UC-Win WCOMD¹⁴⁾である。B-1, B-2, B-3 の全てにおいて、「4.6 設計耐力評価式との比較」の際と同様に JASS5⁹⁾に従って封

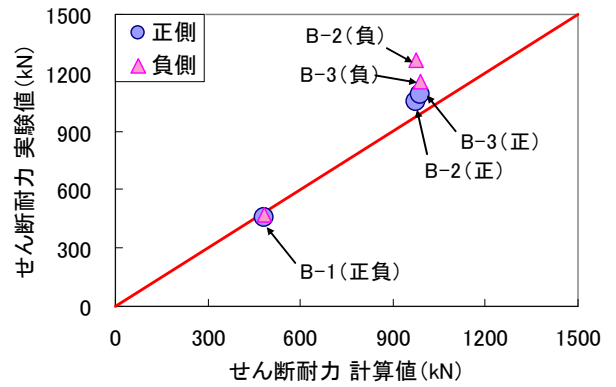


図-30 せん断耐力の計算値と実験値の比較

緘養生供試体の材料試験結果から 3MPa を引いた値をコンクリート強度として用いている。また、全て普通強度コンクリートとして、せん断伝達低減係数を 1.0 とした。B-2 と B-3 のせん断補強筋の奥行き方向への 3 次元的配置は、これまでに有効性が報告されている奥行き方向に節点変位を共有させて 2 つの要素を重ねた合わせた overlap 要素を用いて考慮した^{15),16)}。B-2 と B-3 の要素分割は同じであり、材料物性値のみを各々の材料試験結果に基づいて設定している。B-1 は、B-2 と B-3 で overlap 要素とした部分を無筋コンクリート要素単体とした。無筋コンクリート要素のひび割れ発生以降の引張軟化は、式[8]と式[9]より引張応力開放率を決定し、その際の破壊エネルギーは実際に使用したコンクリートの粗骨材寸法 20mm より CEB-FIP 式[10]¹⁷⁾を用いて算出した。

$$\int_{\epsilon_{tu}}^{\epsilon_{te}} \sigma_c(\epsilon_c) d\epsilon + \frac{1}{4} f_t \epsilon_{tu} = G_f / l \quad [8]$$

$$\sigma_c(\epsilon_c) = f_t (\epsilon_{tu} / \epsilon_c)^C \quad [9]$$

$$G_f = \alpha_f (f'_c / 10)^{0.7} \quad [10]$$

$$\alpha_f = 1.25 d_{\max} + 10 \quad [11]$$

ここに、 G_f : 破壊エネルギー (N/mm), l : 要素寸法 (mm), ϵ_{tu} : ひび割れ発生ひずみ, ϵ_{te} : 終局引張ひずみ, f_t : コンクリートの引張強度 (MPa), C : 応力開放率, f'_c : コンクリートの圧縮強度 (MPa), $d_{\max}$: 骨材の最大寸法 (mm) である。解析は変位制御で行い、実験と同じ載荷パターンで正負に変位を変化させた。

B-1~B-3 の解析結果を実験結果と合わせて図-23~図-25 に示す。解析は、いずれかの要素の平均ひずみが 10% に達した時点で終了した。B-1, B-2, B-3 の解析結果は、比較的实验結果と良く一致していると考えられる。また、B-2 と B-3 においても、載荷履歴の違いによる影響を良く表していると思われる。B-2 と B-3 の要素分割は同一であり、材料物性値と載荷履歴のみが異なることを考慮すれ

ば、「4.4 荷重変位関係の包絡線」で述べたように B-2 の荷重が B-3 より若干大きかった原因として、載荷履歴が異なることが理由であることを解析からも説明できていると考えられる。

5. 結論

鉄筋端部に雄ネジの加工を施して定着金物を取り付けた機械式定着工法を開発し、各種性能確認試験を行った。得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 定着具のネジ部の性能は、鉄筋径 D16～D35、鋼種 SD295～SD490 の範囲において、節形状が竹節・ネジ節に関わらず鉄筋母材で破断可能な性能を有していることを確認した。
- (2) 定着具のネジ嵌合部のすべり量は、鉄筋定着・継手指針に示されている基準値 0.3mm よりも大幅に小さい値となった。
- (3) 定着体の高応力繰返し引抜実験の結果、定着板の直径が鉄筋径の 2.5 倍以上であれば、30 回繰返し後の拔出し量が標準フックよりも小さく、定着性能は同等以上である。
- (4) セン断破壊先行型の梁部材のせん断補強筋として適用した結果、標準フックと同等のせん断補強性能を有していることを確認した。

以上より、鉄筋端部に雄ネジの加工を施して定着金物を取り付けた機械式定着を設計上、標準フックと同等として用いることが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー49 鉄筋継手指針，昭和 57 年 2 月
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー55 鉄筋継手指針（その 2），昭和 59 年 9 月
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー128 鉄筋定着・継手指針[2007 年版]，2007.8
- 4) 国土交通省：土木構造物設計マニュアル（案），平成 13 年 12 月
- 5) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村甫：せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.167-176，1986.8
- 6) 田中泰司，岸利治，前川宏一：人工亀裂を有する RC 部材のせん断耐力増進機構の実験的検討，土木学会論文集，No.802/V-69，pp.109-122，2005.11
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書[2007 年制定]設計編，2007.
- 8) 梶田佳寛，佐藤幸恵，友澤史紀：高強度コンクリートの構造体中での強度発現性と調合強度，日本建築学会構造系論文集第 537 号，pp.13～20，2000.11
- 9) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2003，2003.2
- 10) 岡村甫：コンクリート構造の限界状態設計法[第 2 版]，共立出版，1984.5
- 11) 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，技報堂出版，1991.5
- 12) K. Maekawa, H. Okamura: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003.3
- 13) 前川宏一，福浦尚之：擬似直交 2 方向ひび割れを有する平面 RC 要素の空間平均化構成モデルの再構築，土木学会論文集，No.634，V-45，pp.157-176，1999.11
- 14) (株)フォーラムエイト：UC-WinWCOMD 電子マニュアル，2006.11
- 15) 土屋智史，中浜俊介，前川宏一：梁のせん断耐力と斜めひび割れの 3 次元分布に及ぼす側方筋の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.997-1002，2001.
- 16) 土屋智史，三島徹也，前川宏一：高強度構成材料を用いた RC 梁部材のせん断破壊と数値性能評価，土木学会論文集，No.697，V-54，pp.65-84，2002.2
- 17) CEB Comite Euro-International du Beton:CEB-FIP Model Code 1990.