

論文 束ね施工を考慮したフレキシブル鉄筋の付着特性

宇治 公隆^{*1}・武田 均^{*2}・平岡 寛^{*3}・有山 元茂^{*4}

要旨：上部空間の制約を受ける場合の地下連続壁の構造用鉄筋としてフレキシブル鉄筋を取り上げ、その付着特性を明らかにした。泥水中で施工されるフレキシブル鉄筋は、表面がスムーズであるため、抜け出しを生じやすい。この場合、最大付着応力度は 1.20 N/mm^2 程度と考えておく必要がある。付着応力度、ひび割れ分散性を向上させるためには、インテント加工が有効である。なお、フレキシブル鉄筋を用いる場合のひび割れ間隔は最大で異形鉄筋の3倍程度となり、耐久性、漏水防止のためには、これを踏まえて許容ひび割れ幅を設定する必要がある。

キーワード：フレキシブル鉄筋、付着、ひび割れ分散性、地下連続壁、束ね鉄筋

1. はじめに

道路、鉄道の路下のような上部空間の制約を受ける場合の地下連続壁の構造用鉄筋の建込みにおいて、通常の鉄筋を重ね継手により連続性を確保することは1本の長さが短くなることから、繁雑であるとともに不経済でもある。したがって、このような場合にはロール状で現地に搬入することができるフレキシブル鉄筋を使用することで、施工性が向上できると考えられる。

本研究では、異形鉄筋に比べて表面がスムーズなフレキシブル鉄筋の付着特性を明らかにし、フレキシブル鉄筋を使用した地下連続壁の構造安全性および耐久性について実験結果をもとに検討した。

2. 検討要因

フレキシブル鉄筋の引張強度は異形鉄筋に比べて高くなるものの、フレキシブル鉄筋の素線自体は表面がスムーズであり、異形鉄筋のように機械的な付着は期待しにくい。そこで、フレキシブル鉄筋の表面形状が付着特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、断面積を一致させて比較検討を行った。地下連続壁の構造用鉄筋としてD 41($13.40 \text{ cm}^2/\text{本}$)を想定した場合、これに対応するフレキシブル鉄筋には図-1に示す19本より線($5.089 \text{ cm}^2/\text{本}$)を3本使用すればよい。

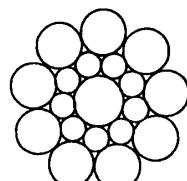


図-1 フレキシブル鉄筋
(19本より線)

本試験では、引抜き試験および両引き試験を行い、フレキシブル鉄筋の付着特性を把握した。供試体諸元は表-1に示す通りであり、異形鉄筋にD 25($5.067 \text{ cm}^2/\text{本}$)およびD 41の2種類、フレキシブル鉄筋にはそれぞれに断面積がほぼ対応する $\phi 27.6$ (19本より線) 1本ものおよび3本束ねの2種類とした。各要因に対して3体づつ試験を行いそれらの平均値で付着特性を評価した。

* 1 大成建設(株)技術研究所土木材料研究室主任研究員、工博(正会員)

* 2 大成建設(株)技術研究所土木材料研究室研究員、工修(正会員)

* 3 大成建設(株)技術本部技術開発第2部課長

* 4 大成建設(株)技術本部技術開発第2部主任

2.1 引抜き試験

フレキシブル鉄筋と異形鉄筋との付着特性の相違を明らかにするとともに、素線の表面状態、ならびに泥水の存在が付着特性に及ぼす影響を明らかにした。すなわち、素線自体の表面がスムーズであるフレキシブル鉄筋の表面をインデント加工（深さ0.2mmのくぼみを8mmピッチで設け、機械的定着を期待する）した場合の効果、ならびに実施工で想定される鉄筋表面に付着する泥膜の影響を実験的に評価した。

2.2 両引き試験

鉄筋コンクリート部材における曲げひび割れは、構造物の耐久性に影響を及ぼすことになり、ひび割れを分散させ、ひび割れ幅を抑制することが耐久性を確保することから重要である。そこで、フレキシブル鉄筋のひび割れ分散性を把握し、異形鉄筋との比較を行うとともに、素線の表面状態（インデント加工の有無）がひび割れ分散性に及ぼす影響を評価した。

3. 使用材料

試験用鉄筋の機械的性質は表-2に示す通りである。コンクリートは、過去の地下連続壁の実績を踏まえ、粗骨材の最大寸法20mm、目標スランプ 18 ± 2.5 cm、目標空気量 4.5 ± 1.5 %とした。コンクリートは試験が材齢28日または29日で行えるように分割して打設した。試験時の圧縮強度は平均 46N/mm^2 であった。

4. 供試体の製作

4.1 供試体の形状・寸法および配筋方法

引抜き試験、両引き試験の寸法は表-3～4に示す通りである。引抜き試験は、土木学会規準「引抜き試験による鉄筋とコンクリートの付着強度試験方法（案）」（JSCE-1988）[1]に準拠した。両引き試験用供試体の一辺は、村田らの研究[2]を参考として、試験用鉄筋径の

表-1 検討要因および供試体諸元

試験	鉄筋種類	径	インデント	束ね本数	泥水	記号
引抜き試験	フレキシブル鉄筋	$\phi 27.6$	なし	1	なし	H-FS-1
				1	あり	H-FS-1-D
			なし	3	なし	H-FS-3
			なし	3	あり	H-FS-3-D
			なし	1	なし	H-FI-1
			なし	1	あり	H-FI-1-D
	異形鉄筋	D25	あり	3	なし	H-FI-3
				3	あり	H-FI-3-D
		D41	なし	1	なし	H-T-25
		D41	なし	1	あり	H-T-25-D
		D41	なし	3	なし	H-T-41
		D41	なし	3	あり	H-T-41-D
両引き試験	フレキシブル鉄筋	$\phi 27.6$	なし	1	あり	R-FS-1-D
				3		R-FS-3-D
			なし	1		R-FI-1-D
			なし	3		R-FI-3-D
	異形鉄筋	D25	なし	1		R-T-25-D
		D25	なし	3		R-T-41-D
		D41	なし	1		
		D41	なし	3		

表-2 試験用鉄筋の機械的性質

鉄筋		公称断面積 (cm^2)	降伏点 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)
フレキシブル鉄筋	$\phi 27.6$, 1本	5.089	1260	1417.9
	$\phi 27.6$, 3本束ね	15.27		
異形鉄筋	D25	5.067	384	565
	D41	13.40		

表-3 引抜き試験用供試体の寸法

鉄筋種類		直径 D(cm)	供試体の1片の 長さ B(cm)=6D	付着長 4D(cm)	非付着長 (cm)
フレキシブル鉄筋	1本	2.8	17	11.0	5.5
	3本束ね	5.5	33	22.1	11.0
異形鉄筋	D25	2.5	15	10.2	5.1
	D41	4.1	25	16.5	8.3

表-4 両引き試験用供試体の寸法

鉄筋種類		供試体断面の1片 の長さ B(cm)=3D	供試体の長さ (cm)
フレキシブル鉄筋	1本	8.5	200
	3本束ね	16.5	
異形鉄筋	D25	7.5	
	D41	12.5	

3倍の正方形断面とした。なお、フレキシブル鉄筋のひび割れ間隔は異形鉄筋に比べて大きくなると予想されるが、未だこの種の試験は行われておらず、人工的な切欠きの妥当性が不明であることから、供試体の長さを2mとし、ひび割れの発生を自然に生じさせ、3体の試験結果を平均して評価することとした。また、通常の異形鉄筋の両引き試験においては、縦ひび割れを防止するためにらせん鉄筋で補強しているが、泥膜の付着したフレキシブル鉄筋とらせん鉄筋との隙間へのコンクリートの打設により、鉄筋表面状態を乱すことが懸念されたため、本試験では引抜き試験も含め、らせん鉄筋は配置していない。

4.2 コンクリートの打設

コンクリートの打設は、引抜き試験用供試体では鉄筋軸方向に、両引き試験用供試体では鉄筋軸直角方向とした。なお、泥水ありのシリーズでは、防水した型枠に鉄筋を配置して表-5の配合の泥水（ポリマー系中粘度耐塩性安定液）を満たして1日静置し、コンクリートの打設直前に泥水を排出した。コンクリートの締固めは突き棒および木槌で表面の泥膜を乱さないように注意して締固めを行った。

5. 試験方法

引抜き試験は、土木学会規準「引抜き試験による鉄筋とコンクリートの付着強度試験方法（案）」（JSCE-1988）に準拠して行った〔1〕。載荷速度は鉄筋の引張応力度が毎分49.0N/mm²となるようにし、49.0Nの荷重増加ごとにすべり量を測定した。

両引き試験における載荷速度は、鉄筋の引張応力度が毎分49.0N/mm²となるようにし、49.0Nの荷重増加ごとにひび割れの進展状況を観察した。

6. 試験結果および考察

6.1 引抜き試験

（1）荷重・すべり関係

表-6に試験結果を、図-2に各供試体の荷重・すべり関係を示す。破壊状況は鉄筋の抜け出しと割裂破壊の2種類である。フレキシブル鉄筋で泥水ありの場合には抜け出しを生じる傾向にある。ただし、3本束ねでインデント加工した場合には抜け出しを防止し、割裂破壊となっている。なお、異形鉄筋の場合は泥水の有無に関係なく、割裂破壊を生じる。

表-5 泥水の配合

使用材料名	単位量 (kg/水1m ³)	重量%
テルポリマー30	2	0.2
ペントナイト(浅間)	40	4.0

表-6 引抜き試験結果

供試体記号	すべり増加時		最大（割裂）荷重時		破壊状況
	荷重 (KN)	すべり量 (mm)	荷重 (KN)	すべり量 (mm)	
H-FS-1	55.7	0.065	(75.0)*	(4.0)*	抜け出し
H-FS-1-D	16.2	0.0034	(36.0)*	(4.0)*	抜け出し
H-FI-1	—	—	95.3	0.41	割裂
H-FI-1-D	75.0	0.90	—	—	抜け出し
H-T-25	—	—	81.0	0.2	割裂
H-T-25-D	—	—	67.0	0.13	割裂
H-FS-3	187	0.13	333	3.17	割裂
H-FS-3-D	93.0	0.06	(198)*	(4.0)*	抜け出し
H-FI-3	—	—	360	0.35	割裂
H-FI-3-D	—	—	360	0.55	割裂
H-T-41	—	—	164	0.29	割裂
H-T-41-D	—	—	225	0.57	割裂

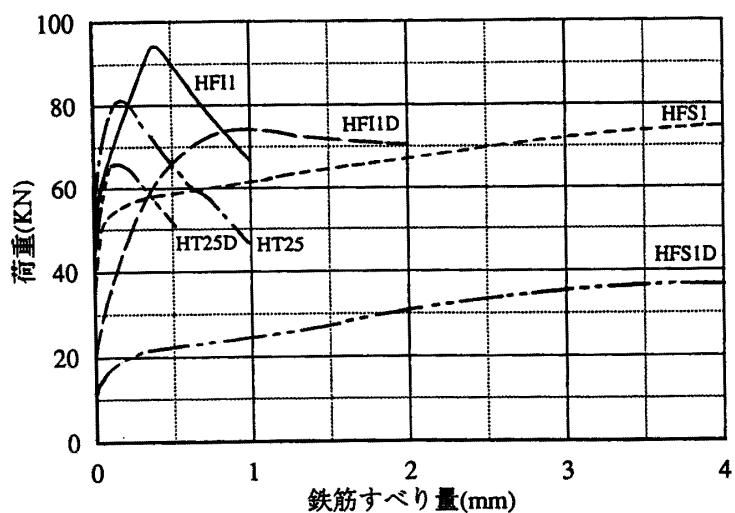
*荷重の低下がなく、参考として4.0mm時の荷重を記述した。

泥水なしの場合でも1本もので表面がスムーズな供試体では抜け出しを生じるが、インデント加工を行うことにより割裂破壊となる。また、表面がスムーズな1本ものを3本束ねた場合には割裂破壊となっており、インデント加工や3本束ねによる表面形状の変化が付着性能を改善することが分かる。

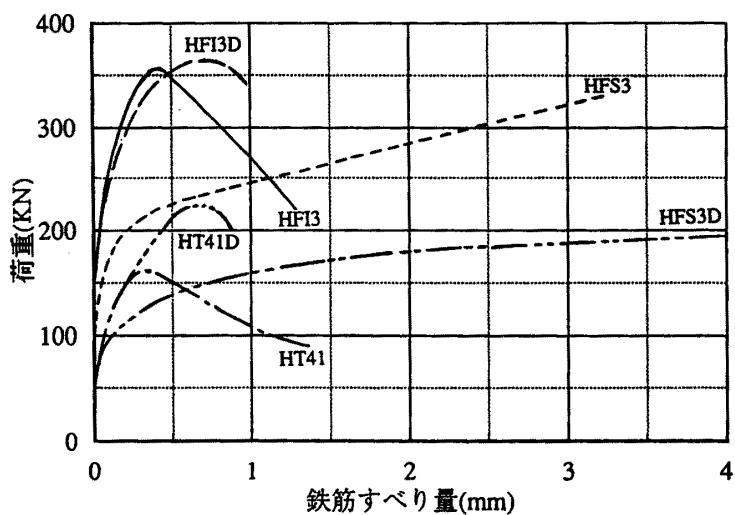
ところで、割裂破壊を生じたフレキシブル鉄筋の最大(割裂)荷重は異形鉄筋よりも大きくなっている。これは、異形鉄筋がふしのくさび効果で付着を確保するのに対し、フレキシブル鉄筋ではインデント加工のくぼみ部およびフレキシブル鉄筋の素線の軸方向に対する傾斜により抵抗するものと考えられ、フレキシブル鉄筋が全表面で均等に抵抗していると考えることができる。

(2) 付着応力度

すべりが急激に増加する荷重をフレキシブル鉄筋の周長で除して最大付着応力度を求めた。なお、付着に寄与するフレキシブル鉄筋の周長をどのように考えるかで最大付着応力度は異なる。1本ものではフレキシブル鉄筋の公称直径である2.76cmを用い、また3本束ねの場合には図-3の太線で示すように三角形のみで抵抗する最も不利な条件とすると、周長は1本もので8.67cm、3本束ねで16.95cmとなる。一方、コンクリートと接するフレキシブル鉄筋の素線を考慮した全表面が周長として有効であると考えると、1本もので12.25cm、3本束ねで30.46cmとなる。これらを用いて計算した最大付着応力度を表-7に示す。また、1本ものと3本束ねの付着応力度比を泥水の有無ならびに周長ごとに印したのが図-4である。公称直径または三角形で抵抗とした場合、泥水なしではフレキシブル鉄筋の1本ものが3本束ねに対して2割



(a) 1本ものおよびD 2.5



(b) 3本ものおよびD 4.1

図-2 荷重・すべり関係(引抜き試験)

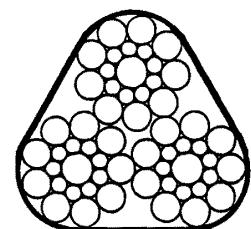


図-3 すべり抵抗部の仮定
(3本束ね)

程度高くなる。一方、泥水ありでは1本ものが4割程度低い値となっている。また、全表面積を有効と考えた場合、泥水なしでは1本ものが3本束ねに対して5割程度高くなるが、泥水ありでは1本ものが1割程度低い値となってくる。その他、両ケースの中間的なものも考えられるが、必ずしも泥水の有無の両者において付着応力度比が1.0に近づくことはない。

したがって、付着抵抗部を特定することができない。この理由は明確ではないが、泥水の有無によるすべり増加時の荷重の相違が関係していることが1因と考える。すなわち、泥水ありの場合には低い荷重レベルにおいて泥膜近傍でのすべりを生じるのに対し、泥水なしでは高い荷重レベルに達し、付着抵抗部が三角形に近づいたものと考える。なお、泥水中での施工となる地下連続壁においては、コンクリートと接する全表面を有効と考え、最大付着応力度を1.20N/mm²程度に設定することが妥当であろう。

泥水の有無の影響についてみると、図-5のごとく、1本ものでは泥水ありは泥水なしの3割程度にすべり増加時荷重は低下しているものの、3本束ねでは5割程度の値となっている。これは、3本束ねによる形状効果によるものと推測できる。

なお、インデント加工した場合の泥水中での付着応力度は、表面がスムーズな場合の4倍以上の値を示し、かつ泥水なしで表面がスムーズな場合よりも高い値が得られており、インデント加工が有効であることが分かる。

6. 2 両引き試験

観察されたひび割れ本数と平均ひび割れ間隔を表-8並びに図-6に示す。フレキシブル鉄筋のひび割れ間隔は異形鉄筋よりも大きくなり、ひび割れ分散性は悪くなることが分かる。フレキシブル鉄筋1本の場合では異形鉄筋の約2倍のひび割れ間隔となり、インデント加工した場合でも3割程度大きくなる。一方、3本束ねの場合には、さらにひび割れ分散性は低下しており、表面がスムーズなフレキシブル鉄筋の場合は3.1倍程度のひび割れ間隔となり、インデント加工でも2.9倍である。

表-7 付着応力度の試算

供試体記号	すべり増加時荷重(KN)	公称直徑を用いて周長を計算した場合		全表面積を有効と考えて周長を計算した場合	
		付着面積(cm ²)	付着応力度(N/mm ²)	付着面積(cm ²)	付着応力度(N/mm ²)
H-FS-1	55.7	95.37	5.84	134.75	4.13
H-FS-1-D	16.2		1.78		1.20
H-FI-1-D	75.0		7.86		5.57
H-FS-3	187	374.60	4.99	673.17	2.78
H-FS-3-D	93.0		2.48		1.38

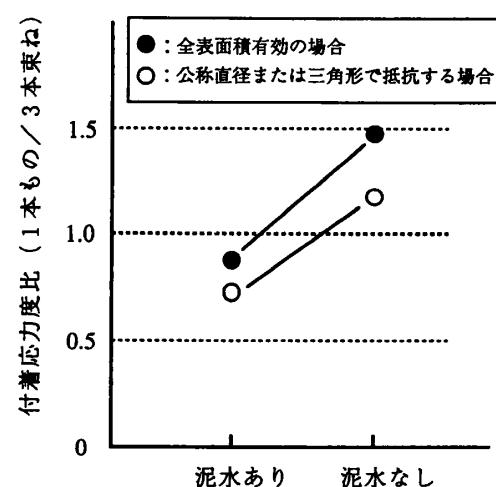


図-4 1本ものと3本束ねの付着応力度比

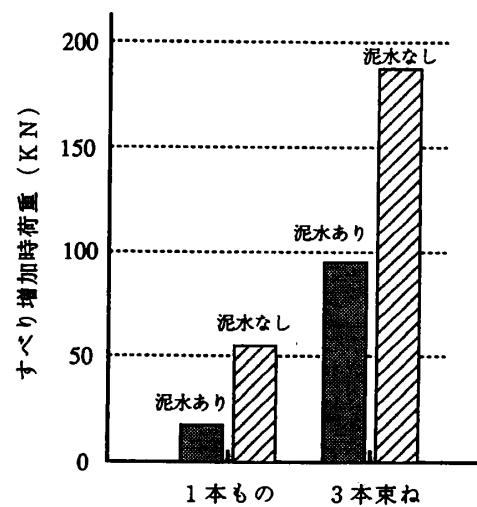


図-5 すべり増加時荷重に及ぼす泥水の影響

異形鉄筋D25の公称周長は8.0cm、D41の公称周長は13.0cmである。仮りにフレキシブル鉄筋の1本ものの周長を12.25cm、3本束ねの周長を30.46cmとすれば、それぞれ1.53倍、2.34倍の周長を有していることになる。なお、一方でひび割れ間隔は1.97倍ならびに3.10倍である。したがって、計算上、フレキシブル鉄筋の付着応力度は1本もので異形鉄筋の1/3.01、3本束ねで異形鉄筋の1/7.25に相当することになる。

以上の両引き試験の結果より、フレキシブル鉄筋を用いた場合のひび割れ間隔は異形鉄筋D41との比較では約3倍となり、ひび割れ幅も約3倍となることを想定しておく必要がある。ひび割れ幅は鋼材の腐食を左右する主要因であり、また漏水とも関係している。したがって、これらが問題となる場合においては、グリップ等により機械的に付着を確保し、ひび割れ分散性を改善することが必要となる。

7. 結論

フレキシブル鉄筋の付着特性

を異形鉄筋と比較検討した結果、以下の事柄が明らかとなった。

- 泥水中で施工されるフレキシブル鉄筋は、表面がスムーズであるため、すべり（抜け出し）を生じる傾向にある。フレキシブル鉄筋の最大付着応力度は 1.20N/mm^2 程度と考えておく必要がある。なお、両引き試験のひび割れ間隔の測定結果から、フレキシブル鉄筋の付着応力度は1本もので異形鉄筋の1/3程度、3本束ねで1/7程度と推測される。
- インデント加工を施すことにより、泥水中においても付着応力度を向上し、ひび割れ分散性を改善できる。
- 異形鉄筋D41相当のフレキシブル鉄筋では、ひび割れ間隔は異形鉄筋の3倍程度となる。したがって、耐久性上または漏水対策上、ひび割れ幅を抑制しなければならない場合、グリップ等により機械的に付着を確保し、ひび割れ分散性を改善する必要がある。

参考文献

- [1] 土木学会：コンクリート標準示方書【平成3年版】規準編、pp.289-293
- [2] 村田二郎、河合糸茲：両引き試験による鉄筋コンクリートのひびわれ分散性に関する研究、土木学会論文集、第378号、pp.107-115、1987年2月

表-8 両引き試験結果

供試体記号	ひび割れ本数	平均ひび割れ間隔	異形鉄筋に対する比率
R-FS-1-D	9本	19.6cm	1.97
R-FI-1-D	13本	13.4cm	1.34
R-T-25-D	19本	9.97cm	1.00
R-FS-3-D	4本	39.0cm	3.10
R-FI-3-D	5本	36.8cm	2.92
R-T-41-D	15本	12.6cm	1.00

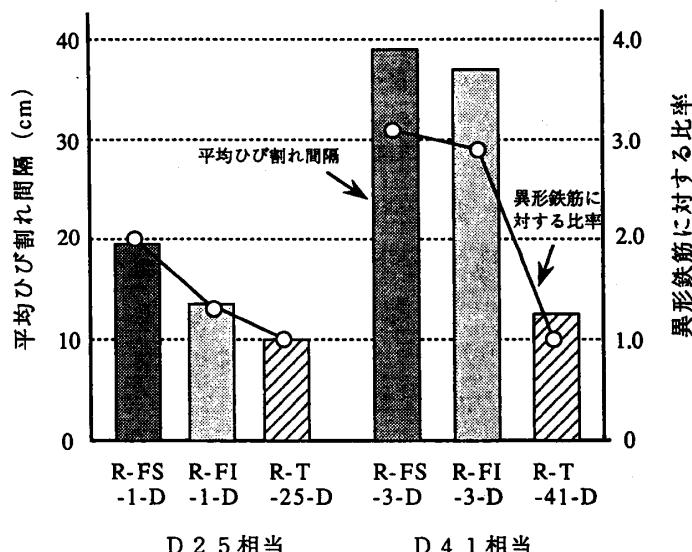


図-6 平均ひび割れ間隔および異形鉄筋に対する比率