

## 論文 ストランドの付着特性に関する実験的研究

趙 唯堅\*1・田中良弘\*2・田中篤史\*3・佐々井佳紀\*4

要旨：ストランドを主鉄筋とする低空頭場所打杭工法の開発を目的として、杭の構造特性に大きな影響を及ぼすストランドとコンクリートとの付着特性について、束ね本数、コンクリート強度、および泥水の有無をパラメータとした引抜き試験を行った。その結果、ストランドの初期付着強度は異形鉄筋より大きいこと、ストランド拔出しのメカニズムとして素線のヨリ溝に沿って回転しながら滑ること、インデントが縁切れ後の付着応力増加に大きく寄与すること、ならびにコンクリート強度、束ね本数および泥水の影響が大きいことなどを明らかにした。

キーワード：ストランド、引抜き試験、付着強度、インデント、束ね本数、泥水

### 1. はじめに

ストランドとは、JIS G3506-1973 硬鋼線材に適合した7本より線で、公称径として12.4mmと16.5mmの2種類がある。規格降伏強度は900MPa、規格引張強度は1100 MPaとなっており、素線の表面形状は滑らかなものと、インデント（小さな凹み）付きのものがある。ストランドは、従来主にフレコン杭の主鉄筋として使われてきたが、最近、グラウトアンカーやフレキシブルな特性を活かして低空頭場所打杭の主鉄筋への適用<sup>1), 2)</sup>が注目されている。

ストランドはより線であるため、異形鉄筋のような節がなく、さらに低空頭場所打杭に適用する場合、それを泥水中に建て込むため、コンクリートとの付着強度が懸念される。ストランドの付着特性に関して、これまでいくつかの研究<sup>3)</sup>がなされているが、付着のメカニズムを含めてまだ十分に明らかにされていない。

そこで、本研究では、ストランドを主鉄筋とする低空頭場所打杭工法の開発を目的とし

て、杭の構造性能を左右するストランドとコンクリートの付着特性について、コンクリートブロックに埋め込んだストランドの引抜き試験を行い、付着滑り特性とそのメカニズムを明らかにしたうえで、束ね本数、コンクリート強度及び泥水の影響を評価した。

### 2. 試験方法

#### 2.1 試験要因

通常異形鉄筋の付着特性の影響要因として、鉄筋表面形状、鉄筋径、試験体寸法、付着長等のほかに、コンクリート強度は大きな影響を及ぼすことが知られている。ストランドの場合、表面形状および径の種類は少ないが、径が小さいため、実際の低空頭場所打杭の主鉄筋への適用を考える時、1本ものを使うよりはむしろ数本を束ねて用いる方が鉄筋面積を稼げる。さらに、場所打杭の施工において、通常鉄筋籠を泥水中に建て込んでから泥水置換のかたちでコンクリートを打設するため、鉄筋表面は泥膜に被覆されている状態

\*1 大成建設（株）技術研究所土木研究部土木構造研究室 工博（正会員）

\*2 大成建設（株）技術研究所土木研究部担当部長兼土木構造研究室室長 Ph.D（正会員）

\*3 大成建設（株）技術研究所土木研究部土木構造研究室（正会員）

\*4 大成建設（株）土木設計第二部陸上設計室 工修

表一 試験体一覧および試験結果

供試体名	試験条件					試験結果				
	鉄筋種類	束ね本数 (本)	コンクリート圧縮強度		打設時 鉄筋表面 環境	引抜き荷重		付着強度		
			基準強度 (MPa)	実強度 (MPa)		初期荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	初期強度 (MPa)	最大強度 (MPa)	最大/初期
T1-36-気	異形鉄筋	1	36	49.6	気中	10.45	41.56	5.23	20.78	3.98
F1-27-気	ストランド	1	27	30.7	気中	14.16	15.76	7.27	8.09	1.11
F3-27-気	ストランド	3	27	30.7	気中	27.72	38.83	4.74	6.64	1.40
F1-36-気	ストランド	1	36	49.6	気中	13.80	20.87	7.08	10.72	1.51
F3-36-気	ストランド	3	36	49.6	気中	33.41	52.93	5.72	9.06	1.58
F1-45-気	ストランド	1	45	58.0	気中	20.83	26.11	10.69	13.41	1.25
F3-45-気	ストランド	3	45	58.0	気中	46.10	86.65	7.89	14.83	1.88
F1-27-泥	ストランド	1	27	30.7	湿潤泥膜	4.21	7.40	2.45	4.16	1.69
F3-27-泥	ストランド	3	27	30.7	湿潤泥膜	5.27	11.60	0.82	1.89	2.29
F1-36-泥	ストランド	1	36	49.6	湿潤泥膜	4.53	11.75	3.34	7.68	2.30
F3-36-泥	ストランド	3	36	49.6	湿潤泥膜	11.40	23.60	2.29	4.11	1.79
F1-45-泥	ストランド	1	45	58.0	湿潤泥膜	8.53	17.48	4.11	9.11	2.22
F3-45-泥	ストランド	3	45	58.0	湿潤泥膜	18.64	28.82	3.63	5.73	1.58

となる。これらのことを考えて、本研究ではストランドの表面形状、径、試験体寸法および付着長を統一し、以下に示す3つのパラメータを設定して引抜き試験を行うこととした。

- ①ストランドの束ね本数（1本，3本束ね）
- ②コンクリート強度（27，36，45 MPa）
- ③打設時鉄筋表面環境（気中，湿潤泥膜）

その他，比較するためにストランドとはほぼ同じ公称径を有する異形鉄筋も1ケースとして計画した。表一に試験体一覧を示す。

## 2.2 試験体および製作方法

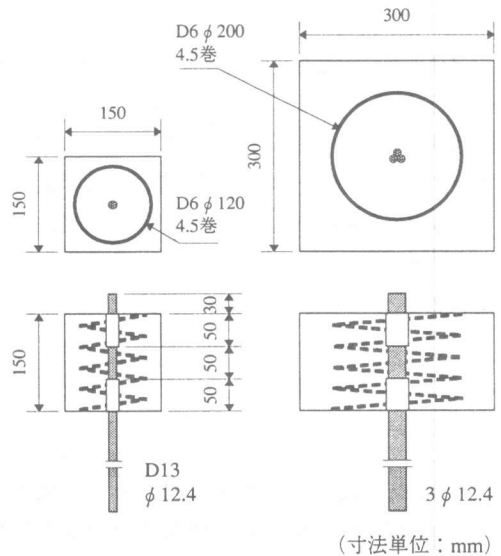
異形鉄筋はSD345のD13（公称径12.7）を使用し，ストランドは7本より，公称径φ12.4，インデント付き（凹み長さ3mm，深さ0.3mm，ピッチ6mm）のものを使用した。

図一に試験体の形状寸法及び鉄筋の配置状況を示す。ストランド及び異形鉄筋のコンクリートブロック内の付着長は，土木学会「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法（案）」（JSCE-G503-1988）<sup>4)</sup>を参考に，ストランド1本ものの公称径の4倍（50mm）とした。3本束ねの場合も1本ものに合わせて付着長を1本径の4倍とした。ただし，割裂破壊を防ぐために，コンクリートブロック断面の辺長を，束ね本数に応じて鉄筋外接円の径の10倍以上とし，さらに付着区

間の両端に50mmづつ非付着区間を設け，尚且つスパイラル鉄筋で補強した。非付着区間の付着を軟質パテ被覆によってカットした。

泥水は自然泥水に近い状況を想定して，2%のベントナイト安定液を使用した。泥水の配合および成績を表二に示す。泥水の付け方として，非付着区間処理が済んだ鉄筋を鉛直に型枠にセットし，泥水を型枠に入れて，1昼夜（24時間）の泥水浸漬をした。

コンクリートはレディーミクストコンクリー



図一 試験体の形状寸法

表-2 泥水の配合及び性質

材料	製品名	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )
ベントナイト	浅間300#	20
ポリマー	テホリマ-30	4
粘土	木節粘土	6
温度:20℃	pH:10.5	比重:1.025
ファンネル粘性:44"		

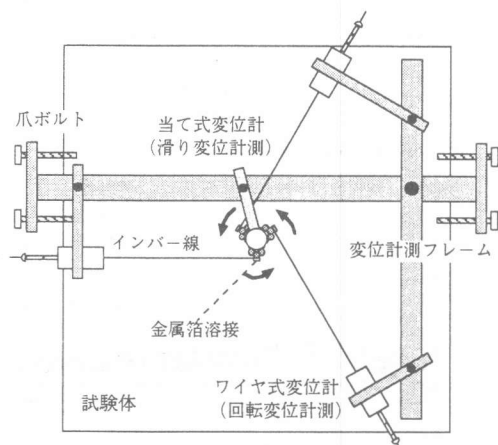


図-2 変位計測方法 (自由端正面図)

トを使用し、泥水を型枠から排出直後ぬるぬるの状態に鉄筋自由端の面から打設した。試験体は霧室 (湿度 100%) で養生した。

### 2.3 載荷方法及び測定項目

引抜き試験は 1000kN 万能試験機で行った。異形鉄筋の場合、鉄筋を直接チャックで掴んで引き抜いたが、ストランドの場合は、VSL の E タイプ 定着具 (アンカーヘッド+くさび) を介して引抜き荷重を加えた。

載荷方法は、基本的に単調引抜きであり、載荷速度は鉄筋の引張応力増分が毎分 32MPa とした。測定項目は引抜き荷重、自由端滑り量、及び自由端回転量とした。自由端回転量の測定方法は図-2 に示す。ステンレス箔で挟みストランドの素線に溶接したインバー線 (ステンレスワイヤ  $\phi$  0.5mm) を、ストランド回転の接線方向にできるだけ長く伸ばして、ワイヤ式変位計に取り付けた。1本ものは1箇所、3本束ねは3箇所の回転量を計測した。

ストランドが引き抜かれる時の滑り量と回転量の関係を調べるために、ストランド素線

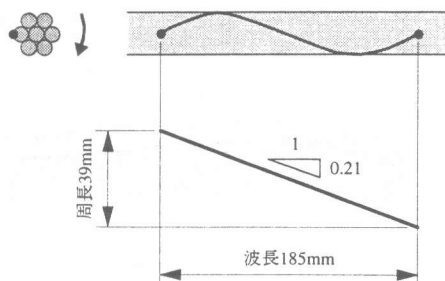


図-3 ストランド素線の1周展開図

のヨリ寸法を測り、素線の1周展開図を図-3 に示す。ストランド切断面における素線の外縁点 (インバー線溶接位置) に着目して、1周燃った時の軸方向長さは 185mm、回転方向の長さは外接円の周長である 39mm であり、その比率は 1 : 0.21 である。

## 3. 試験結果及び考察

### 3.1 ストランドの付着滑り特性と付着強度

図-4 にストランドの付着応力-滑り量関係を示す。比較するために異形鉄筋の試験結果の一例を合わせて図-4a) に示した。また、表-1 に引抜き荷重、付着強度等の試験結果を示す。ここでいう付着応力及び付着強度は、引抜き荷重を付着区間 (50mm) の鉄筋表面積で割り平均値として計算した。ストランドの場合、公称径を用いて表面積を求めた。また、3本束ねの表面積は単純に1本ものの3倍とした。初期荷重及び初期付着強度とは、土木学会コンクリート標準示方書 (基準編)<sup>4)</sup> に準拠した、自由端滑り量が鉄筋公称径 D の 0.2% (約 0.025mm) 時の荷重及び付着強度、最大荷重及び最大付着強度とは、引抜き荷重の最大値及びその時点の付着強度である。表-1 には各ケースに関して3体の試験結果の平均値を示している。これらの図表からストランドの引抜き特性を次のように読み取れる。

①ストランドの初期付着剛性及び初期付着強度は異形鉄筋より大きい。ストランドの初期付着強度が異形鉄筋より大きいのは、両方

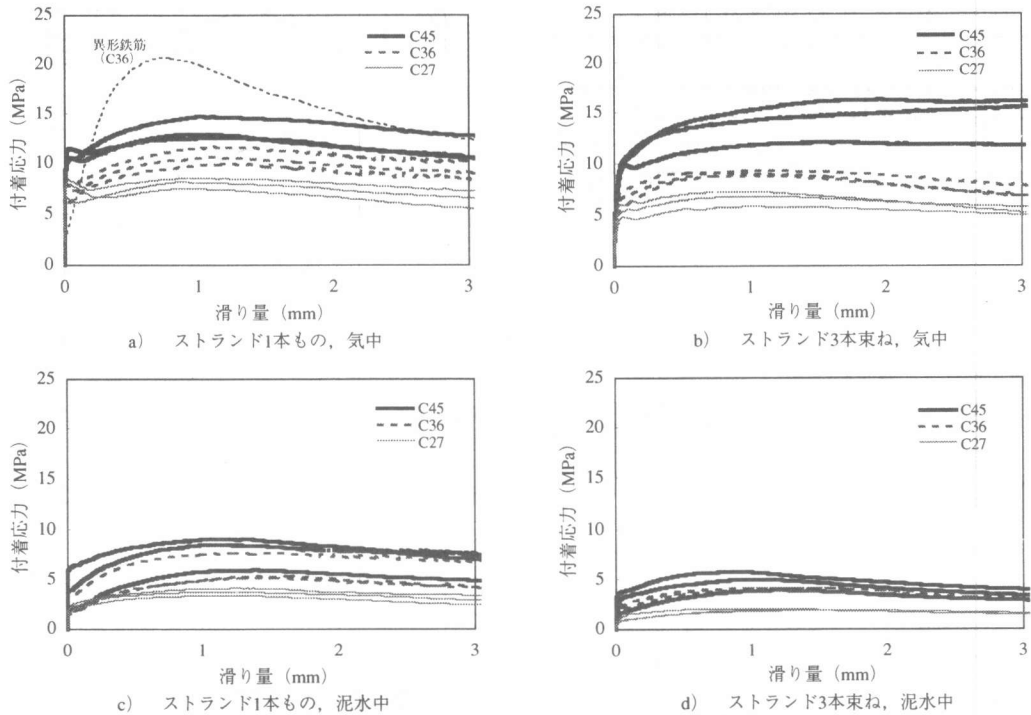


図-4 スtrandの付着応力-滑り関係

とも公称径を用いて付着応力を計算したが、同程度の公称径に対してstrandの実際の表面積は大きいからである。

②縁切れ後のstrandの付着剛性および最大付着強度は異形鉄筋より小さい。strandは縁が切れると同時に滑り量が急激に増加し、その後の付着強度の増加は異形鉄筋より少ない。strandの最大付着強度は気中の場合、異形鉄筋の約1/2である。

③最大荷重以後strandの付着応力の低下は異形鉄筋より小さい。strandの軟化曲線は極めて緩やかであり、実用で考えられる滑り量の範囲では付着応力が初期付着強度を下回ることはない。

④本試験の全てのケースにおいて付着割裂破壊はなかった。strandの初期付着強度に対する最大付着強度の比は気中で約1.4、泥水中では約2.0となっている。泥水中でこの比率が大きくなっているのは最大付着強度が大きかったのではなく、反対に初期付着強度の

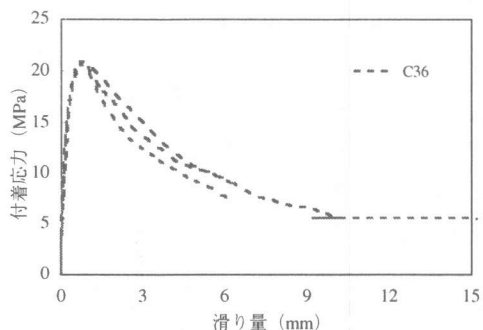
低下が大きかったことによる。

### 3.2 strandの付着メカニズム

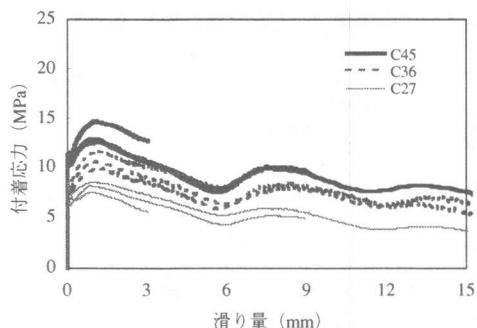
図-5は横座標を大きく取り、気中における異形鉄筋とstrand1本ものの付着応力-滑り量関係の比較を示すものである。ここで、ピーク後の付着強度低下の様子を注目されたい。異形鉄筋の場合、ピーク後の付着強度は単調に低下するが、strandの場合、インデントのピッチ(6mm)に応じて、周期的に山と谷が現れている。この山と谷の差分はインデントの効果と考えられる。コンクリート強度が大きいほど、山と谷の差が大きく、インデントの効果は大きい。

過去の実験<sup>3)</sup>では、インデントが無い場合、縁切れ後の応力増加がほとんどなかったことから、インデントは縁切れ後の付着強度を増加させ、特に泥水中ではその効果が大きい。

図-6にstrand自由端の回転量-滑り量の関係の一例を示す。1本もの場合も3本束ねの場合も、滑り変位と回転変位の関係は



a) 異形鉄筋1本もの、気中



b) スtrand1本もの、気中

図-5 異形鉄筋とスrandの比較

ほぼ直線でその比率は1:0.21となっている。この現象は泥水中の場合も同様である。このことから、スrandはヨリ溝に沿って回転しながら滑っており、ヨリ溝を埋めたコンクリートは縁切れ後基本的に摩擦抵抗しなくなり、それ自身が壊れることはないと推測される。また、スrand3本束ねの場合も1本ずつ独立して回転しているのが確認され、お互いの拘束効果は存在しないことが分かった。

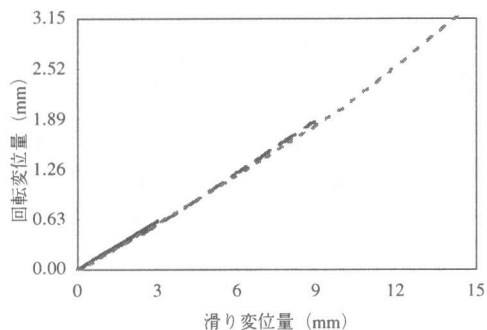
### 3.3 諸要因が付着強度に及ぼす影響

#### (1) 束ね本数の影響

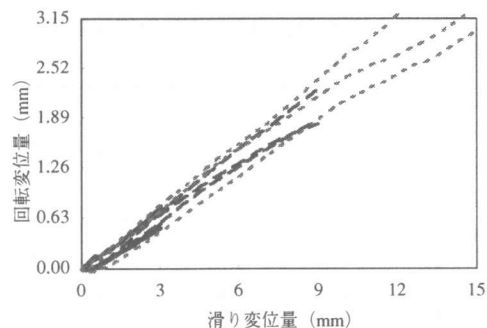
図-7に束ね本数が付着強度に及ぼす影響を示す。初期付着強度も最大付着強度も3本束ねの方が1本ものに比べて小さい。これは、スrandを束ねることにより、実際の付着表面積が1本ものの公称径の3倍で計算したものより減ることと、表面凹凸が増え泥膜が付きやすくなったためと考えられる。

#### (2) コンクリート強度の影響

図-8にコンクリート強度が付着強度に及



a) スrand1本もの、C27、気中



b) スrand3本束ね、C27、気中

図-6 スrandの滑り変位-回転変位特性

ぼす影響を示す。コンクリート強度が大きくなるほど初期付着強度も最大付着強度も大きくなる。これは、コンクリート強度が大きいほど、粘着力、摩擦抵抗、およびインデントを埋めているコンクリートによる噛み合わせ抵抗がともに増加するためと考えられる。

#### (3) 泥水の影響

図-9に打設環境(泥水)が付着強度に及ぼす影響を示す。気中に比べ、泥水中の初期付着強度及び最大付着強度はともに低下する。表-1の試験結果からも分かるように、特に3本束ねの方が泥水による低下は大きい。また、本試験の範囲では、泥水による付着強度の低下率は、初期付着強度について約6割、最大付着強度について約5割となっている。

図-10に気中における付着強度と泥水中における付着強度の関係をプロットしたものを示す。本試験の泥水濃度の場合、泥水中付着強度と気中付着強度の間には、束ね本数によらずほぼ直線的な相関関係が認められる。

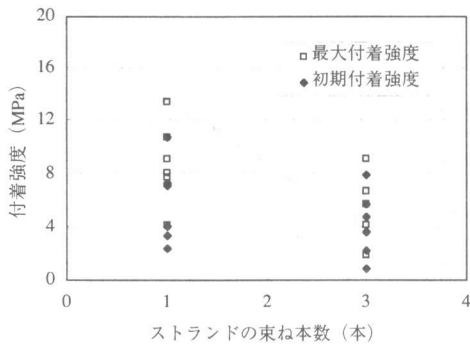


図-7 束ね本数が付着強度に及ぼす影響

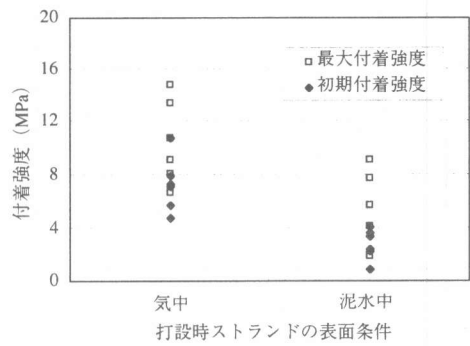


図-9 打設環境(泥水)が付着強度に及ぼす影響

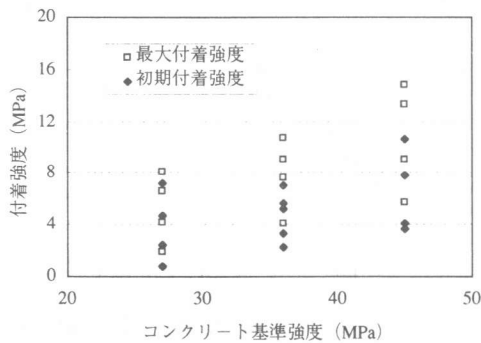


図-8 コンクリート強度が付着強度に及ぼす影響

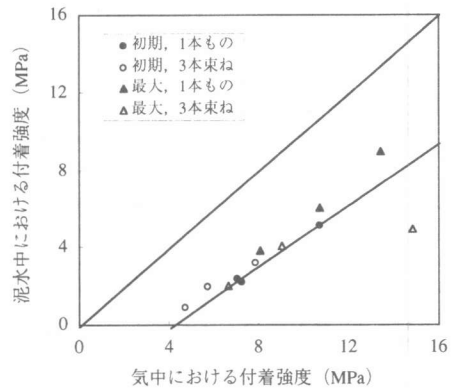


図-10 気中付着強度と泥水中付着強度の関係

#### 4. まとめ

低空頭場所打杭の主鉄筋へストランドを適用することを目的として、ストランドの付着特性について、束ね本数、コンクリート強度、および泥水の有無をパラメータとした引抜き試験を行った結果、以下の結論が得られた。

(1) ストランドの初期付着剛性および強度は同等の公称径を有する異形鉄筋より大きい。緑切れ後の剛性および最大付着強度は異形鉄筋より小さい。気中の場合、ストランドの最大付着強度は異形鉄筋の約1/2である。

(2) ストランドの抜け出しのメカニズムとして、素線のヨリ溝に沿って回転しながら滑っていることが明らかとなった。また、インデントは緑切れ後の付着強度増加に寄与し、気中では約40%増、泥水中では約100%増となり、特に泥水中では大きな効果があることが認められた。

(3) コンクリート強度が大きいほど、付着強度は大きくなる。1本ものに比べて3本束ねの付着強度が約2~3割低下する。気中に比べ泥水中の付着強度は約1/2以下に低下する。気中付着強度と泥水中付着強度の間にはほぼ直線的な相関関係が認められた。

#### 参考文献

- 白石英俊, 趙 唯堅, 田中良弘, 小林俊彦: フレキシブル鉄筋場所打杭の部材力学特性, 土木学会年次学術講演会概要集 (V), pp.924-925, 1997
- 森 圭太郎, 趙 唯堅, 築島大輔, 小林寿子: ストランド場所打杭の剛性低下について, 土木学会年次学術講演会概要集 (V), pp.1152-1153, 1998
- 宇治公隆, 武田 均, 平岡 寛, 有山元茂: 束ね施工を考慮したフレキシブル鉄筋の付着特性, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.2, pp.497-502, 1996
- 土木学会: コンクリート標準示方書 (基準編), 平成6年版