

論文 ストランドを主鉄筋に用いた梁部材の曲げ特性

田中篤史*1・田中良弘*2・趙 唯堅*3・弘埜 剛*4

要旨：上部空間の制約を受ける場所打杭に、フレキシブルな鉄筋（ストランド）を主鉄筋に用いた場合、その構造性能を左右する鉄筋の付着特性が、部材の剛性、耐力、変形性能等に及ぼす影響を確認する目的で、せん断スパン比、施工条件等をパラメーターとして梁部材による載荷実験を行った。RC解析値と比較検討した結果、せん断スパン比 $a/d=3.0$ 、泥水有りの供試体実験では、降伏時の割線剛性は約30%近い低下が見られたが耐力に及ぼす影響は見られなかった。また、せん断スパン比が大きくなれば、剛性低下に及ぼす影響は小さく抑えられることを明らかにした。

キーワード：ストランド、割線剛性、付着特性、せん断スパン比、泥水、鉄筋束ね

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基礎杭施工において、通常の鉄筋を重ね継手により連続性を確保することは、鉄筋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ある。そこでフレキシブルな鉄筋（ストランド）を主鋼材に用いることで、ロール状で現地搬入し連続的に建込むことで施工性の改善、およびコスト低減を図ることができる。

ストランドとは、ストランド状に撻った素線で構成されており、コンクリートとの付着強度を向上させる目的で表面にインデント加工（小さな凹）を施してある^{1) 2)}。その力学的特性としては、異形鉄筋と比べて、引張強度が高い反面伸びが小さく明瞭な降伏棚がない、単独では圧縮を受け持てないなどが挙げられるが、特にコンクリートとの付着強度が小さく場所打杭のようにベントナイト泥水中でコンクリート打設する場合には、付着強度はさらに低下し、部材の耐荷挙動に大きな影響を及ぼすものと思われる^{3) 4)}。そこで本研究では、ストランドを主鉄筋

に用いた梁部材による曲げ載荷実験を、せん断スパン比、施工条件等をパラメータとして行ない、剛性、耐力、変形性能等への影響をRC解析値と比較して検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体はいずれも断面形状が45cm×45cmの中規模矩形断面の梁部材で、引張主筋比は0.31%、せん断鉄筋比は0.32%、コンクリートの強度は40 N/mm²程度とし曲げ破壊先行型とした。

表-1 供試体一覧

供試体	パラメーター		
	せん断スパン比 (a/d)	泥水	主筋配置
B 1	a/d=3.0	無し	1本もの
B 2		2%	1本もの
B 3		2%	3本束ね
B 4		6%	1本もの
B 5	a/d=4.5	無し	1本もの
B 6		2%	1本もの
B 7		2%	3本束ね

*1 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）

*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 工博（正会員）

*4 大成建設（株）名古屋支店土木部担当部長

パラメーターには、せん断スパン比に $a/d=3.0$ と $a/d=4.5$ とした供試体に、打設時の鉄筋籠の泥水状態（無し、2%、6%）とストランドの配置方法（1本、3本束ね）を組み合わせた7体とした。

供試体7体の一覧を表-1に、断面形状および配筋図を図-1に、供試体寸法、載荷位置および計測位置図を図-2に示す。

2.2 材料および製作

(1) 鉄筋

今回の供試体に使用した主筋のストランド（SRD） $\phi 12.4$ とせん断筋に使用した異形棒鋼のSD345-D10の機械的性質を表-2に示す。また、ストランドの端部定着方法には、VSLのPタイプ定着を用いた。そして泥水有りでの供試体の鉄筋籠は、打設日の前日からベントナイト泥水中に入れ、一昼夜の浸漬けを行なった。泥水膜は現場施工に近い様に湿潤状態とした。

(2) コンクリート

供試体製作にはレディミクストコンクリート（ミキサー車2台分）を使用した。テストピースの養生は供試体と同一養生を行ない、材齢27日と28日の材料特性値を表-3に示す。供試体載荷実験もその前後に行っている。打設時に鉄筋籠に付着した泥水膜が取れないように供試体の側面方向から行った。

(3) ベントナイト泥水

ベントナイト泥水濃度は、実際の場所打杭の施工で使用しているものに近い濃度のポリマー系安定液の2%濃度を主にし、1体だけをベントナイト系安定液の6%濃度とした。そのベントナイト泥水の配合を表-4に示す。

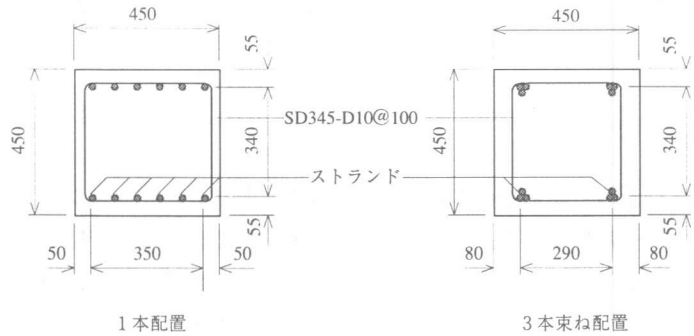


図-1 断面形状および配筋図

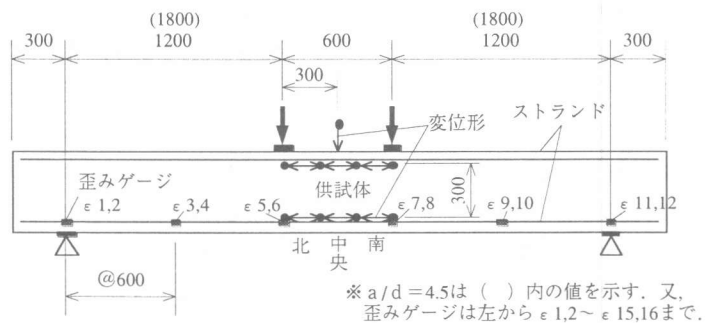


図-2 供試体寸法図

表-2 鉄筋の機械的性質

鉄筋名称	公称断面 (mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	弾性係数 (kN/mm ²)
SRD $\phi 12.4$	92.9	1240	1460	7.3	190
SD345-D10	71.33	389	537	14.1	190

表-3 コンクリートの材料特性値

供試体	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
B1,2,3,5	27	38.8	27.9
B4,6,7	28	40.0	29.3

表-4 泥水配合 (単位質量)

泥水濃度	ベントナイト (kg/m ³)	ポリマー (kg/m ³)	加重材 (kg/m ³)
2%	20	4	6
6%	60	1	40

2.3 載荷方法

供試体載荷方法は、軸力無しの単純梁で4点曲げ載荷とする。載荷パターンは基本的に単純載荷とするが、付着劣化の有無および変形回復性能を確認する目的で、ひび割れ定常状態時(曲げモーメントで $144\text{kN}\cdot\text{m}$)と引張鉄筋降伏後(降伏変位の約3倍)に除荷を行ない、それを3回繰り返した。図-2に荷重載荷位置、支点位置および供試体寸法を示す。

2.4 計測項目

計測項目は、各載荷ステップ時の曲げひび割れ状況(幅と間隔)、供試体中央部の荷重-たわみ関係、曲げ区間の断面曲率、および引張筋と圧縮コンクリートひずみとした。但し、荷重は両載荷点に等荷重を与えており、実験値の荷重は片側の荷重を示している。図-2に中央変形量計測と断面曲率計測の計測器位置および主筋のひずみゲージ位置を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ状況

各供試体のひび割れ定常状態($144\text{kN}\cdot\text{m}$)時のひび割れ状況図を図-3に、荷重と曲げ区間の平均ひび割れ幅との関係を図-4に示す。ひび割れ幅は、クラックスケールで目視により、曲げ区間内両側の引張鉄筋位置での幅を計測した。これらを

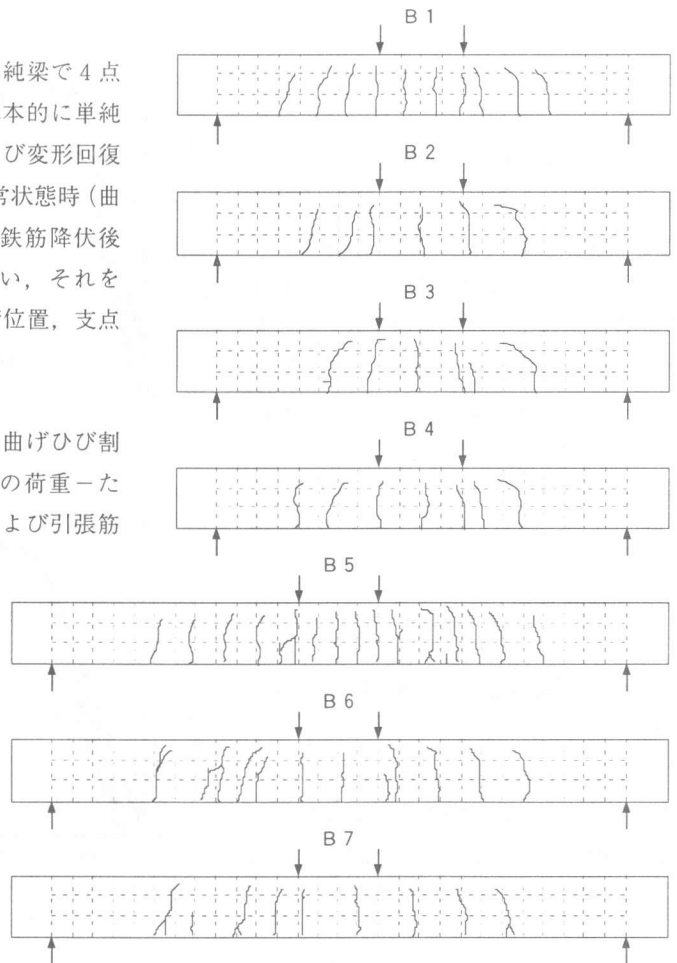


図-3 ひび割れ状況図

見ると、泥水有り供試体のひび割れ性状は、泥水無し供試体に比べひび割れ間隔が約1.5~2倍になり、ひび割れ幅についても約1.5~2倍と大

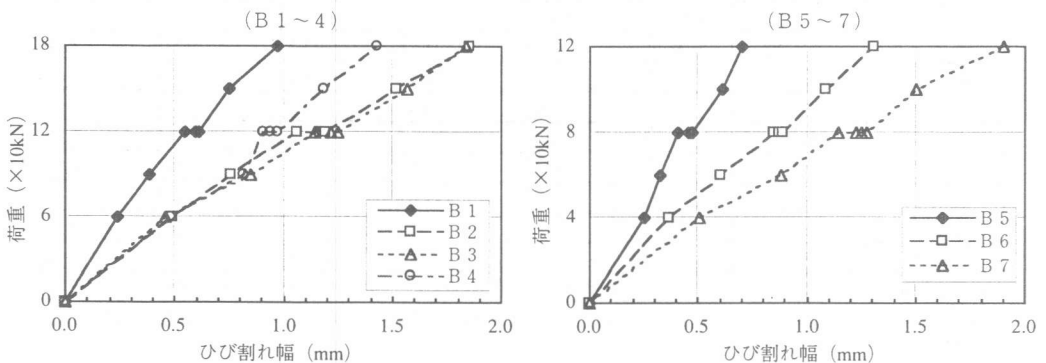


図-4 荷重-ひび割れ幅関係図

きくなっている。泥水によってストランドとコンクリートの付着力の低下が生じ、ひび割れ分散性が悪くなっていることが分かる。実験結果では、今回使用した程度の泥水濃度の違いや、ストランドの束ねが及ぼす影響は、ひび割れの発生本数の散つきや、計測誤差による散つきにより、計測値は散つきの範囲が大きいいため一概には言えないが、影響は少ないと思われる。図-4のB2とB4の泥水濃度の大小とひび割れ幅の大小の対応についての説明は困難であるが、荷重90kNから120kNの間で曲げ区間付近に新たなクラックが入ったと予測される。今回、ひび割れ幅や間隔に関してのRCとの比較実験は行なわなかったが、参考までにコンクリート標準示方書 [設計編]⁵⁾の曲げひび割れ幅算定式 ($k=1.3$ を使用) に、実験のひび割れ定常状態時 (144kN・m) のストランドの応力度 600N/mm^2 を用い、主筋1本配置ものでひび割れ幅を求めたところ、 0.97mm となった。

3.2 荷重-たわみ関係

図-5～図-6に各実験結果の荷重-たわみ関係をRC解析結果 (Fiberモデル, 完全付着, コンクリート引張強度無視) と合わせて示す。また、表-5にはそれぞれの降伏変位 (解析に

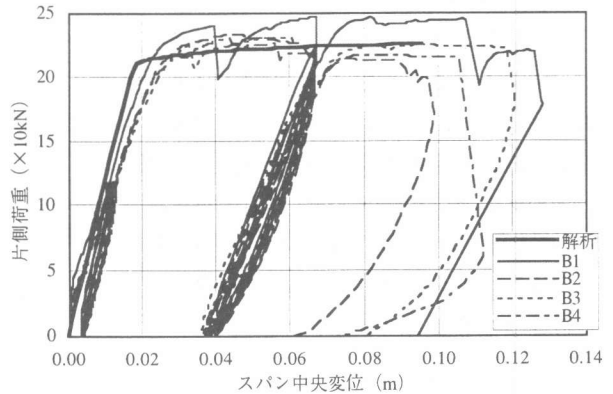


図-5 P-δ関係 (B1,B2,B3,B4)

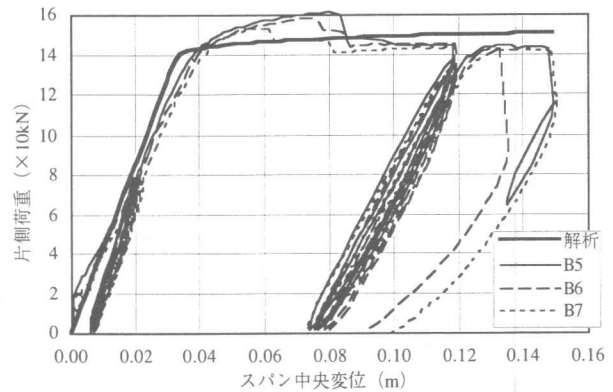


図-6 P-δ関係 (B5,B6,B7)

より求めた降伏荷重時の変位とした) と各実験結果のRC解析値に対する降伏時割線剛性の低下率、終局時の変位と荷重および靱性率 (終局変位 / 降伏変位) を示す。

表-5 実験結果一覧

供試体	供試体パラメーター		降伏変位 ^{※2} (mm)	剛性低下率 ^{※3} (%)	終局変位 ^{※4} (mm)	終局荷重 ^{※4} (kN)	靱性率 ^{※5}	
	a/d	泥水						鉄筋
B 1	3.0	無し	1本	21.9	14.2	107.3	244	4.90
B 2		2%	1本	24.9	24.5	97.3	200	3.91
B 3		2%	3本	26.5	29.1	118.4	223	4.47
B 4		6%	1本	26.8	29.9	105.4	216	3.93
B 5	4.5	無し	1本	39.0	5.6	147.6	143	3.78
B 6		2%	1本	40.3	8.7	132.3	143	3.28
B 7		2%	3本	42.6	13.6	148.4	141	3.48
解析値 ^{※1}	3.0	—	—	18.8	—	95.8	226	5.10
解析値 ^{※1}	4.5	—	—	36.8	—	149.1	150	4.05

※1: 平面保持を仮定したFiberモデルを用いて引張鉄筋が降伏歪みに達した時点を降伏, 7%歪みの時点を終局と定義。

※2: 各供試体の降伏変位は解析による降伏荷重時 (a/d=3.0の場合 $P_y=212\text{kN}$, a/d=4.5の場合 $P_y=142\text{kN}$) の変位。

※3: 解析値に対する剛性低下率。

※4: ストランドの破断時が終局。

※5: 靱性率=終局変位/降伏変位。

荷重-たわみ関係から、実験値は解析値に対し、それぞれ降伏時の剛性低下が見られる。せん断スパン比の小さい $a/d=3.0$ で泥水有りの供試体は、表-5の剛性低下率を見ると、低下率の大きいもので30%近い剛性低下が見られるが、せん断スパン比 $a/d=4.5$ では、剛性低下は10%前後に抑えられる。剛性低下は、泥水中では気中に比べ大きく、さらにせん断スパン比が小さいほど大きくなることが確認された。また、ペントナイト濃度6%は2%よりも、そして3本束ねのものは1本ものよりも、僅かに剛性低下を示した。曲げ耐力的には7体とも実験結果と解析値はほぼ同等で、耐力低下への影響はほとんどないと考えられる。コンクリートの圧壊の時期は、泥水等の影響によりコンクリートの損傷が集中する区間で少し早まると見られる。終局時はどれもストランドの破断で決まり、最終変形量は、降伏変形量が大きかった $a/d=3.0$ のB4とB3と、せん断変形の見られたB1とB3供試体でRC解析値に対して若干大きくなっている。但し、靱性率については降伏変位が大きくなる為、すべての供試体でRC解析値よりも低下する。

3.3 曲率分布

曲率は供試体の純曲げ区間を3区間（北、中央、南）に分けて計測を行った。計測方法は、供試体側面の上下に取り付けた変位形の変形量の差から求めた。

せん断スパン比 $a/d=3.0$ のB1とB2供試体の供試体中央変位毎の曲率分布図を図-7、図-8に示す。泥水無しの供試体の曲率分布に比べて、泥水有りでは曲率の集中している区間が表われる。ストランドの付着強度は、泥水中ではかなり低下するために断面曲率が分散されにくく、コンクリートのひび割れが集中する区間に大きく曲率が表われた。この曲率の集中はB3供試体（3本束ね）やB4供試体（6%濃度泥水）にも表われており、せん断スパン比 $a/d=4.5$ の供試体にも泥水の有無で同様の差が表われている。

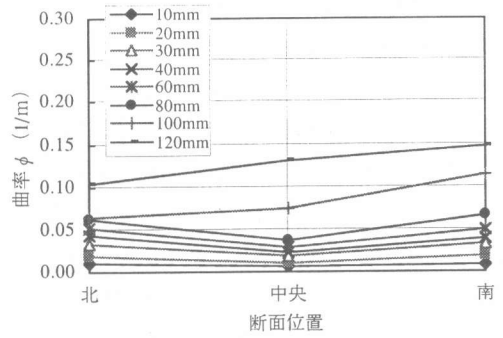


図-7 B1 曲率分布

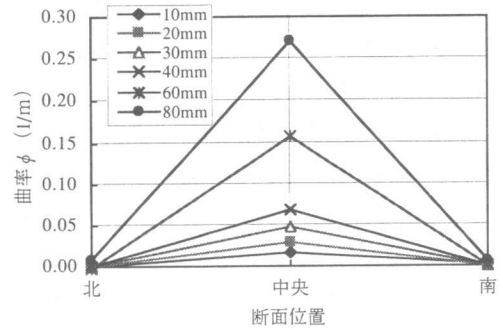


図-8 B2 曲率分布

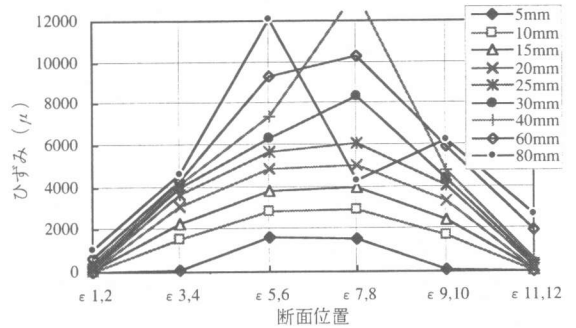


図-9 B1 主筋ひずみ分布

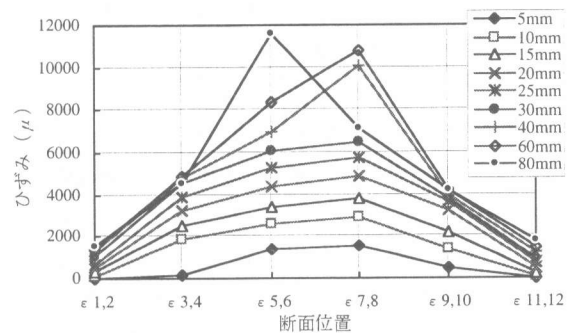


図-10 B2 主筋ひずみ分布

3.4 軸方向主筋ひずみ分布

図-9～図-11に供試体B1, B2, B6のストランドの引張ひずみ分布を示す。B1供試体を見ると主筋のひずみ分布は、降伏変位付近(25mm)までは支点部のひずみは小さく、ひずみの分布図はほぼ荷重による曲げモーメント分布に相似した形になって表われている。これはストランドの付着が機能しており降伏付近までは支点まで応力が伝わっていない。ストランドの降伏を過ぎると支点部のひずみも発生しており、付着力の低下が支点付近まで伝わっているのが分かる。B2供試体は降伏前から支点部でのひずみが表われており、付着滑りが早期に生じているのが分かる。しかしいずれもひずみは均一にはならずある程度の付着が機能しているものと考えられる。せん断スパン比 $a/d=4.5$ のB6供試体になると、支点部のひずみは終局時まで小さく、ひずみ分布は、モーメント分布形となっており、泥水中でもストランドの付着切れは支点まで伝わっていないと考えられる。このことは、B5供試体(泥水無し)はもちろんB7供試体(3本束ね)も同様である。

4. まとめ

ストランドを用いた場所打杭の構造特性を調べる目的で梁部材による曲げ載荷実験を行った。本実験結果から明らかになったことを以下にまとめる。

- (1) ストランドとコンクリートとの付着強度は、泥水中では低下し、ひび割れ分散性が悪化し、ひび割れ幅が大きくなるが、泥水濃度やストランドの束ねの影響は少なかった。
- (2) 部材剛性はRC解析値と比較して低下が見られた。剛性低下に影響する要因として泥水の影響とせん断スパン比による影響が大きく、気中に比べ泥水の方が、そしてせん断スパン比が小さい方が低下率が大きくなる。但し、せん断スパン比が $a/d=4.5$ 以上になれば剛性低下への影響は小さく抑えられる。鉄筋束ねと泥水濃

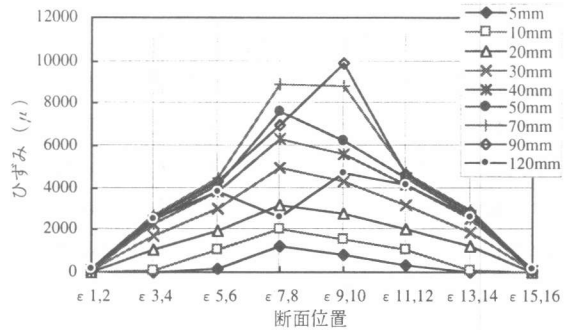


図-11 B6主筋ひずみ分布

度の影響は、今回の実験では少ないと考えられる。

- (3) 曲げ耐力についてはストランドの付着強度の影響は少ないと考えられる。実験値はRC解析値とほぼ同等であったので耐力低下への影響はほとんど無かった。
- (4) コンクリート圧壊の時期は、ストランドの付着力低下の影響がコンクリートの損傷を集中させるので若干早まると思われる。
- (5) 終局変形量は降伏変形量増加の影響でRCと比較して伸びると考えられる。但し、靱性率は小さくなる。また、終局状態はストランドの破断となった。

参考文献

- 1) 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.18，No.2，pp.497-502，1996
- 2) 宇治公隆・武田 均・平岡 寛・安部吉生：フレキシブル鉄筋の付着特性，土木学会第51回年次学術講演会，V-423，pp.846-847，1996.9
- 3) 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，土木学会第52回年次学術講演会，V-462，pp.924-925，1997.9
- 4) 森 圭太郎・趙 唯堅・築嶋大輔・小林寿子：ストランド場所打杭の剛性低下について，土木学会第53回年次学術講演会，V-576，pp.1152-1153，1998.10
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書〔平成8年版〕設計編