

# アラミドFRP緊張材を用いた既設フーチングのせん断補強 — 男鹿大橋 —

加藤 修平\*1・佐藤 春浩\*2・藤田 学\*3・熊谷 紳一郎\*4

## 1. まえがき

日本海の水道に架かる一般国道101号・男鹿大橋は、下部工4車線、上部工2車線の暫定築造で、昭和49年に供用された橋長410mの橋梁である(写真-1)。橋梁形式は中央径間が鋼3径間連続1主箱桁橋で、側径間がPC3径間ポストテンション方式T桁橋×2連、下部工は扶壁式橋台と二柱式張出し式円柱橋脚である。橋梁の諸元を表-1に示す。今回、完成構造として上部工2車線を増設するにあたり、耐震性を強化するため現行の「道路橋示方書(平成8年12月)」に準拠した既設下部工の適合性を照査した結果、フーチング部ではせん断耐力が不足していることが明らかとなった。そこで、緊張材をフーチング下側主筋の上側で内部定着させ、鉛直方向にプレストレスを導入し、フーチングのせん断耐力を向上させる補強方法を提案した。しかし、既設フーチングのせん断補強の実績は少なく、さらに本補強方法は、「道路橋



写真-1 男鹿大橋

表-1 男鹿大橋の諸元

橋格	一等橋(TL-20)
橋長	410.0m
支間長	(3@34.0m)+(60.0m+80.0m+60.0m)+(3@34.0m)
上部構造	側径間 PC3径間ポストテンション方式T桁
	中央径間 鋼3径間連続1主箱桁橋
下部構造	橋台 扶壁式橋台
	橋脚 張出し式円柱橋脚
	橋台 鋼管杭基礎(φ800)
基礎構造	橋脚 鋼管杭基礎(φ800) P1, P2, P7, P8
	ケーソン基礎 P3, P4, P5, P6

示方書」におけるトラス理論が成立しないことから、鉛直方向のプレストレスによるせん断補強効果を確認する必要が生じた。本稿は、フーチングにおける本補強方法の妥当性を検証し、補強効果を定量的に評価するために実施した確認試験、および所定の緊張力が導入されることを確認するために実施した現場計測結果について報告するものである。

## 2. 確認試験

### 2.1 検討内容

フーチングの破壊モードとして、杭の押込み側(以後、正方向)では曲げ降伏とせん断破壊が同時に生じると推定され、引張主鉄筋の降伏後のせん断耐力が不明確であり、斜めひび割れによる脆性的な破壊が懸念された。一方、杭の引抜き側(以後、負方向)では、斜めせん断ひび割れ、および杭頭からのせん断ひび割れが予想された(図-1)。

補強方法として、下面増し厚工法も有効であるが、フーチング下面を掘削する必要があり、施工が困難を極める。そこで補強方針として以下の2点に絞り検討を行った。

- ① せん断耐力の増加を図る目的で、鉛直方向にプレストレスを導入する。
- ② せん断補強に加え、曲げ降伏耐力の制御を目的とし、水平方向にプレストレスを導入する。

現場条件を検討し、本橋においてはせん断補強材としてアラミド繊維緊張材(AFRPロッド)の使用を選定した(図-2)。

しかしながら、フーチングのせん断補強の実績は少なく、さらに緊張材が主筋の内側でしか定着できず、「道路橋示方書」におけるトラス理論が成立しないことから、事前にモデ

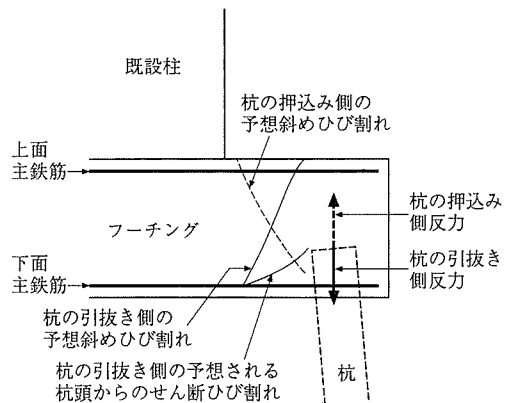


図-1 想定されるせん断破壊モード

\*1 Shuhei KATO: 秋田県建設交通部 仙北建設事務所 道路課長  
 \*2 Haruhiro SATO: 秋田県建設交通部 秋田建設事務所 道路課主査  
 \*3 Manabu FUJITA: 住友建設(株) 技術研究所 主任研究員  
 \*4 Shin-ichiro KUMAGAI: 住友建設(株) 土木本部 技術部長

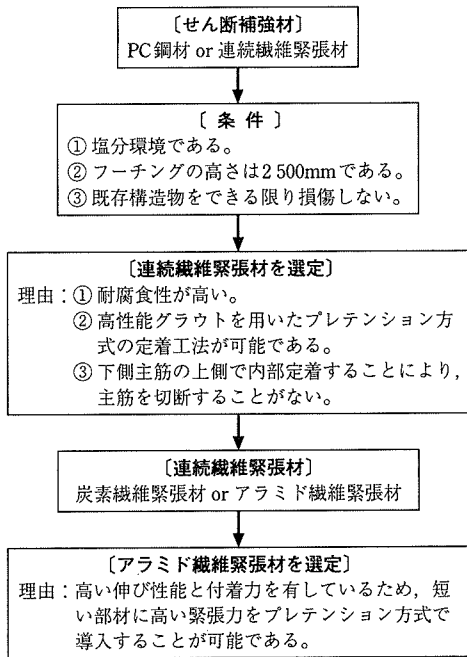


図-2 アラミド緊張材選定に至るまでのフロー

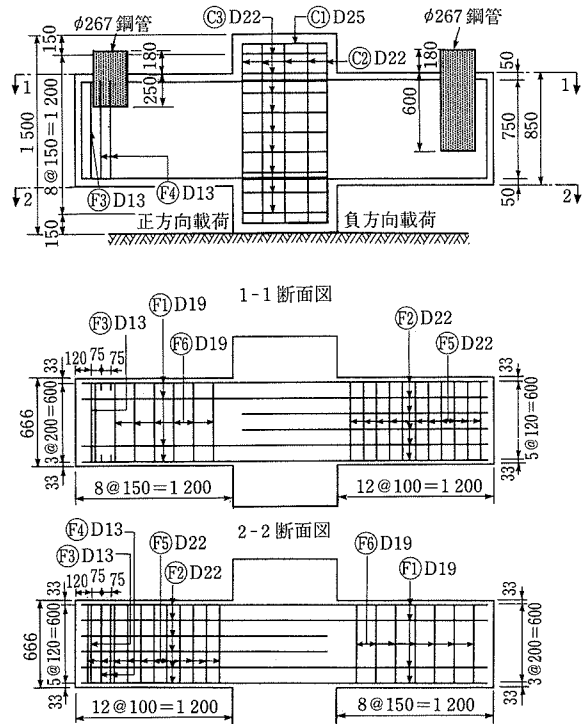


図-3 供試体配筋図

ル供試体による試験を行い、せん断補強効果を確認した。

2.2 試験内容

供試体の諸元を表-2に示す。供試体はフーチングの有効高さを基準にして、1/3の縮尺率で縮小し、せん断スパン930 mm、有効高さ800 mmとした。また、橋軸直角方向の単位幅は、杭1本あたりの有効幅を基準とし667 mmとした。なお、杭はφ267の鋼管でモデル化した。コンクリートは、対象橋脚と同じ設計圧縮強度21N/mm<sup>2</sup>、スランプ=8 cm、最大骨材寸法=25 mmを用いた。

実構造物に作用する外力は、杭頭反力、杭頭モーメント、水平力、フーチング自重によるモーメントである。試験供試体において供試体の耐力は杭頭反力に着目し、主筋量を調整することにより実構造物の作用モーメント、作用せん断力に対する曲げ耐力およびせん断耐力の比率を一致させた。耐力計算は、「道路橋示方書・解説・下部構造編」に従った。

表-2 供試体の諸元

	単位	モデル橋脚	試験供試体	摘要
有効高さ	mm	2 400	800	
断面幅	mm	2 000	667	
せん断スパン	mm	2 800	930	
せん断スパン比		1.16	1.16	
正方向 載荷	曲げ耐力	kN・m	49 810 (1.01)	428 (0.97)
	作用モーメント	kN・m	49 327	440
	せん断耐力	kN	23 291 (1.01)	475 (1.00)
	作用せん断力	kN	23 104	474
負方向 載荷	曲げ耐力	kN・m	53 535 (4.24)	839 (4.02)
	作用モーメント	kN・m	12 621	209
	せん断耐力	kN	9 159 (1.01)	225 (1.00)
	作用せん断力	kN	9 081	225

( )は耐力/作用力の比率

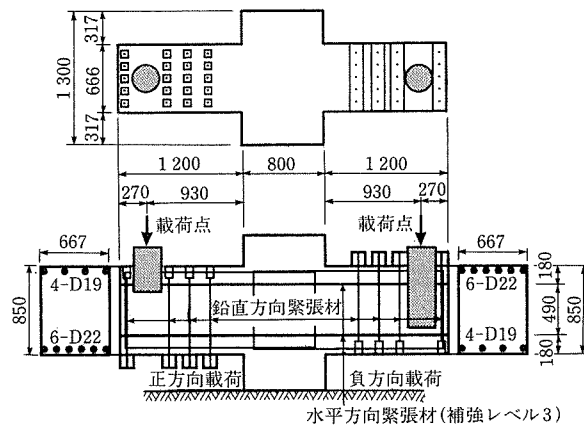


図-4 供試体概略図

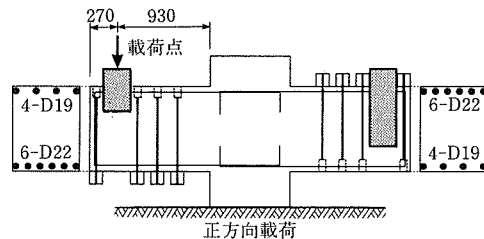


図-5 正方向載荷図

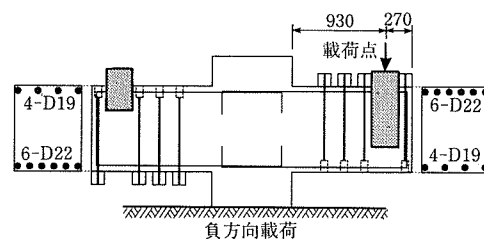


図-6 負方向載荷図

表-3 試験水準

	補強量 (kN)	せん断耐力 (正方向載荷) (kN)	せん断耐力 (負方向載荷) (kN)	補強方法
無補強	0	475	225	
補強レベル1	108	583	332	鉛直緊張材
補強レベル2	183	658	408	〃
補強レベル3	265	739	489	鉛直+水平緊張材

供試体配筋図を図-3に、概略図を図-4に示す。供試体は中央に柱がある両側張出し梁構造としている。1体で正方向・負方向載荷側の2タイプの試験ができるよう、正方向・負方向載荷側とは、上筋(6-D22)と下筋(4-D19)の配置を反対として別々に定着している。正方向載荷図を図-5に、負方向載荷図を図-6に示す。それぞれのタイプを個別に一方から載荷可能とした。

試験水準を表-3に示す。モデル橋脚における作用せん断力の1.2倍のせん断耐力を目標せん断耐力に設定し、フーチングに付与するものとした。そして、目標せん断耐力と設計せん断耐力との差分を補強量とした。供試体の補強量は、モデル橋脚に対する補強量の比率を基準に設定した。補強レベル1は必要最低補強量である。補強レベル2は、鉛直方向のプレストレスで可能な最大限の補強量である。補強レベル3は、補強レベル2に水平方向の補強を加えたものである。プレストレスによるせん断補強効果の計算値は、せん断ひび割れが45度方向に発生する仮定で算出した。載荷は供試体を反力床に固定し、反力梁に取り付けたジャッキを使用し、あらかじめコンクリート内に埋設した杭頭をモデル化した鋼管より荷重制御で一方載荷した。

### 2.3 試験結果

#### (1) 正方向の変形状

すべての供試体でせん断ひび割れが発生する以前に引張鉄筋が降伏し、圧縮側のコンクリートが圧壊した。その結果、供試体は曲げ降伏から曲げ破壊に至る間も明確なせん断ひび割れは発生せず、せん断補強効果は明確にならなかった。なお、水平方向プレストレスの影響により、補強レベル3供試体の引張鉄筋降伏荷重が増加しているのが確認された。載荷点における変位量の履歴を図-7に示す。補強レベル3供試体は、降伏荷重の増加が確認でき水平方向の

緊張材の効果が確認できる。また、載荷荷重  $P=550$  kN、変形量  $\delta=12$  mmで急激に荷重が低下している。これは、水平方向緊張材が破断した影響であると思われる。

#### (2) 負方向の変形状

すべての供試体で曲げによる損傷が軽微な段階でせん断ひび割れが発生し、せん断破壊に至った。負方向載荷の履歴を図-8に示す。無補強供試体は、杭頭からのせん断ひび割れ発生と同時に急激に耐力を失った。破壊荷重は431 kNであった。例として補強レベル1について、供試体破壊時のひび割れ図とFEM解析により得られたひび割れ図の比較

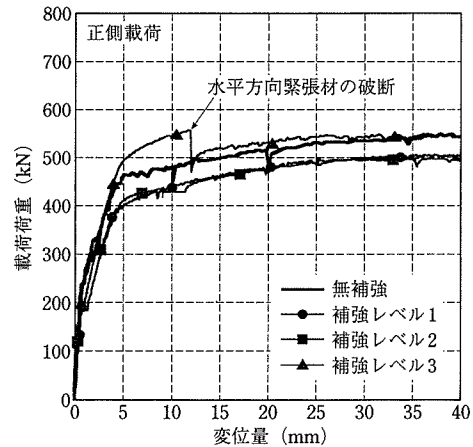


図-7 変位量の履歴(正方向載荷)

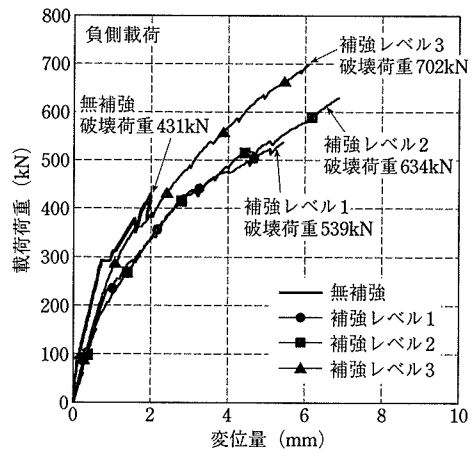
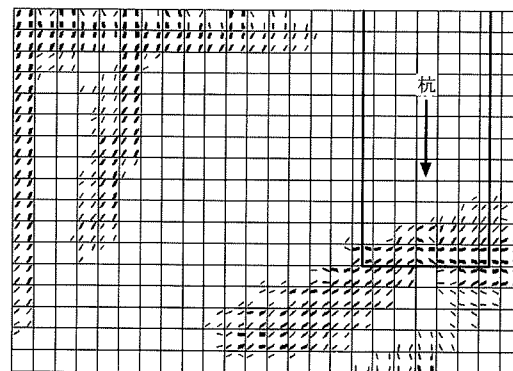
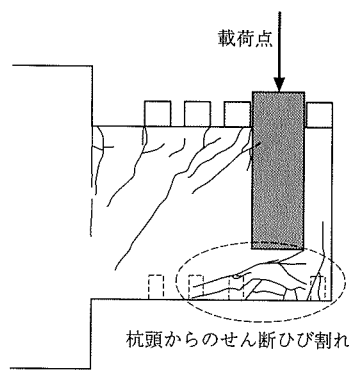


図-8 変位量の履歴(負方向載荷)



試験結果

FEM解析結果

図-9 供試体(補強レベル1)破壊時におけるひび割れ比較

を図-9に示す。ひび割れ性状の解析結果は、試験結果とほぼ一致している結果が得られた。補強供試体は、杭頭からのせん断ひび割れ発生後、斜めひび割れが発生するが、最終的に破壊は杭頭からのせん断ひび割れによるせん断破壊であった。破壊荷重は、補強レベル1で539 kN、補強レベル2で634 kN、補強レベル3で702 kNとなり、補強量の増加に伴いせん断破壊荷重が増加することが確認された。また、補強レベル3供試体は、補強レベル1、2供試体に比べ同荷重時の変形量が少ない。これは、水平方向緊張材が曲げに対し有効に機能し、変形を抑制している影響であると思われる。

(3) 鉛直方向緊張材によるせん断補強効果

導入緊張力 ( $P_e$ ) とせん断補強効果 ( $V_s$ ) の関係を図-10に示す。図中の2本の破線は、導入緊張力の0.7倍と1.0倍の2通りでせん断耐力に計算した際の計算上の補強効果を示している。実線は実験値を線形回帰した直線である。実験値の線形回帰式は、非常に相関性が良好であり (相関係数=0.99998),  $y = 0.367 + 0.798x$  の式で補強効果を評価することができる。現行の「道路橋示方書」の設計においては、有効緊張力のせん断方向成分をせん断耐力に計算している。しかし、今回の場合、トラス理論が成立しない状態、すなわち、主鉄筋より内側の位置からしか緊張力が導入できない不利な条件のもとでの試験である。試験で確認された補強効果は、計画段階において想定した導入緊張力の0.7倍の補強効果に対して安全側となっている。したがって、設計に反映させるために、以下に示すように導入緊張力を低減係数  $\alpha$  を用いて補強効果を低減した設計式を提案した。

$$V_s = \alpha \times P_e / \gamma$$

ここで、

$V_s$  : せん断補強効果

$P_e$  : 導入緊張力

$\alpha$  : 低減係数 (たとえば0.7)

$\gamma$  : 安全係数

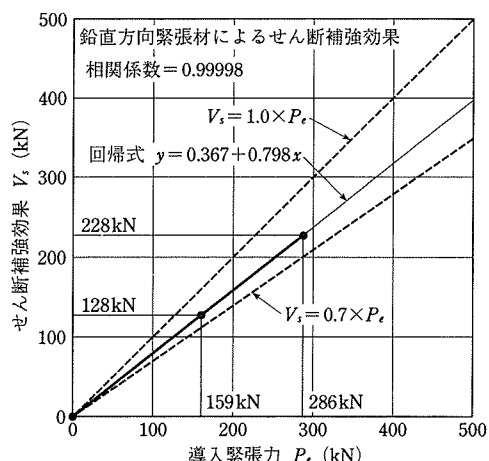


図-10 導入緊張力とせん断補強効果の関係

(4) 水平方向緊張材によるせん断補強効果

水平方向緊張材によるせん断補強効果を図-11に示す。

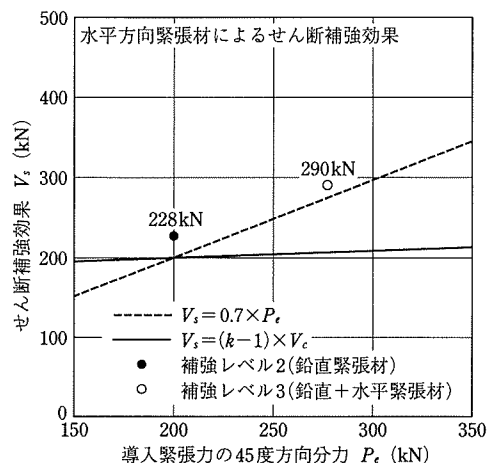


図-11 水平方向緊張材によるせん断補強効果

図中の破線は水平方向緊張力の45度方向分力をせん断耐力に計算した補強効果を、実線は水平方向緊張力を「道路橋示方書」のデコンプレッションモーメントを用いた式より算出し加算した補強効果を表している。

水平方向緊張力により60 kNの耐力増加が確認された。その補強効果は、導入緊張力の約0.7倍に相当していた。また、「道路橋示方書」のデコンプレッションモーメントを用いた式に対し安全側であることが確認された。

2.4 まとめ

本試験より以下の知見を得た。

(1) 正側荷重試験

- ① 鉛直方向緊張力が曲げ耐力に及ぼす影響は少ない。
- ② 今回モデル化した荷重条件は、せん断耐力と曲げ耐力がほぼ同レベルであったが、すべての供試体において曲げ破壊が先行した。
- ③ 水平方向にプレストレスを導入することで主鉄筋の降伏荷重が増加する。

(2) 負側荷重試験

- ① アラミド緊張材で鉛直方向に緊張力を導入することにより、フーチングのせん断耐力が向上することが確認された。
- ② 鉛直方向の緊張力が受け持つせん断耐力は、 $V_s = 0.367 + 0.798 P_e$  で表すことができる。
- ③ 導入緊張力を低減係数  $\alpha$  (たとえば0.7) で補正することにより、鉛直方向緊張力が受け持つせん断耐力を設計式に反映することが可能である。
- ④ 水平方向緊張力が受け持つせん断耐力は、導入緊張力の0.7倍で表すことができる。そして、水平方向緊張力が受け持つせん断耐力は、デコンプレッションモーメントを用いた現行示方書の設計方法に対して十分な安全を有している。

本試験結果をフーチング部の補強設計に反映し、実施工を行った。次章では、現場計測について報告する。

3. 現場計測

3.1 概要

アラミド緊張材を用いてフーチングのせん断補強を行う

際、所定の緊張力が導入されるように緊張管理を行う必要がある。そこで、アラミド緊張材にあらかじめひずみゲージを貼付し、緊張時および切断時のひずみ変化を測定し、所定の緊張力が導入されることを確認するために現場計測を実施した。

使用したアラミド緊張材は9φ7.4である。ひずみゲージ取付け位置図を図-12に示す。

今回、計測対象となったのはP7橋脚のフーチングである。計測位置図を図-13に示す。計測箇所は、代表として10カ所(No.1~10)とした。10カ所中2カ所(No.3, 8)は9本すべてのアラミド緊張材にひずみゲージを貼付し、ひずみ値のばらつきを確認した。それ以外の8カ所(No.1, 2, 4~7, 9, 10)は、9本中2本のひずみ値を計測した。

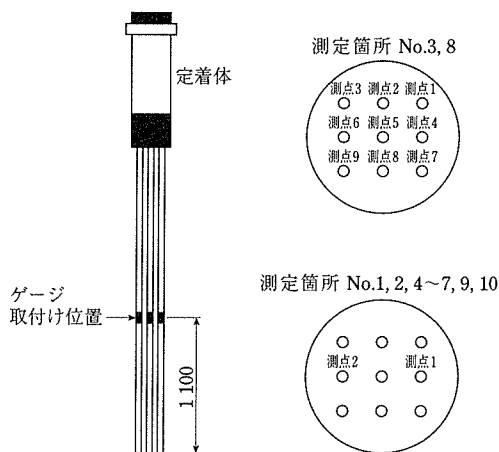


図-12 ひずみゲージ取付け位置図

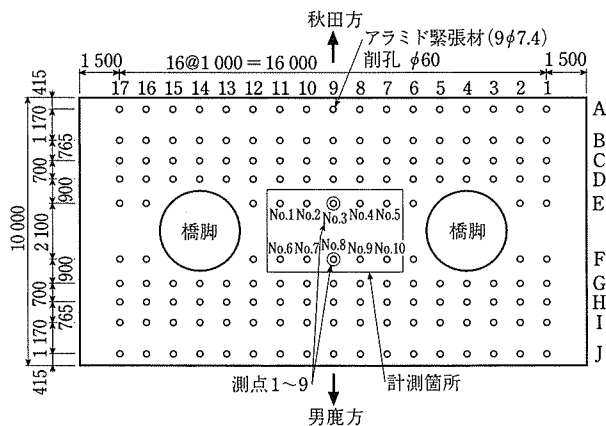


図-13 計測位置図

1カ所あたりの導入緊張力は343 kNであり、アラミド緊張材の有効断面積は42.4mm<sup>2</sup>、リラクセーション値は20.7%であることより、1カ所あたりの初期緊張力は432 kNとなる。これより、アラミド緊張材のひずみ値は21 415μ、応力は1 133 (N/mm<sup>2</sup>)を施工目標値とした。

そして、アラミド緊張材にあらかじめひずみゲージを貼付し、アラミド緊張材設置時の導通確認、緊張時(ナット定着直後)、および切断直前と切断直後のひずみ値を計測した。

計測状況を写真-2に、作業フローを図-14に示す。

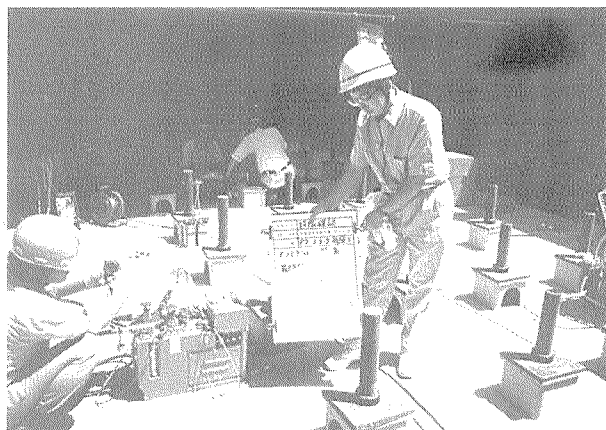


写真-2 計測状況

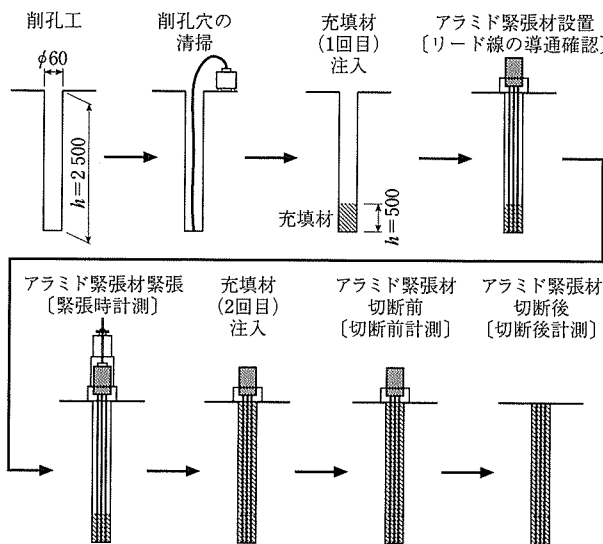


図-14 作業フロー図

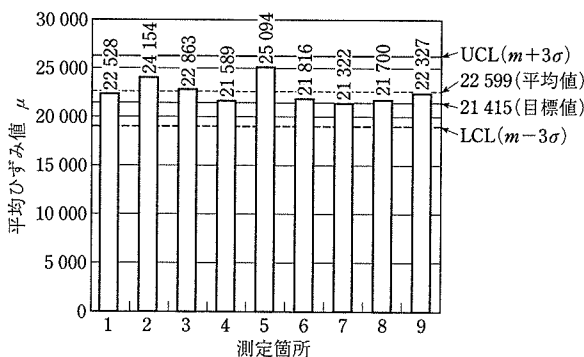


図-15 測定箇所No.3の各測点のひずみ値

### 3.2 測定結果

#### (1) No.3の測定結果

緊張直後(ナット定着直後)において9測点のひずみ値のばらつきを評価した。計測箇所No.3における各測点のひずみ値の例を図-15に示す。各測点のひずみ値の平均値は、22 599μで目標値の21 415μを上回り、また各ひずみ値は3σ管理限界内に収まっていることから、所定の緊張力が保持されていることが確認された。

#### (2) 緊張直後(ナット定着直後)の平均ひずみ値

各測定箇所(No.1~10)の緊張直後(ナット定着直後)に

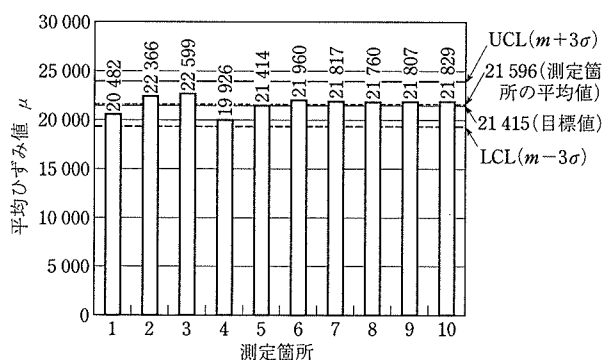


図-16 各測定箇所の平均ひずみ値

おける平均ひずみ値を図-16に示す。測定箇所の平均値は21 596 μで目標値の21 415 μを上回った。測定箇所No.1, 4で目標値をやや下回ったが、各ひずみ値は3σ管理限界内に収まっていることから、所定の緊張力が保持されていることが確認された。

(3) 切断直前、切断直後の平均ひずみ値

各測定箇所における切断直前、切断直後の平均ひずみ値を表-4に示す。切断直前、切断直後において、平均ひずみ値の変化はほとんど見られなかった。これより、アラミド緊張材とコンクリートの付着は十分にあり、所定の緊張力がフーチングに導入されたことが確認された。

4. あとがき

アラミド緊張材による鉛直方向プレストレスカの8割が

表-4 切断直前、切断直後の平均ひずみ値

測定箇所	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
切断直前	20 117	22 569	22 316	19 685	21 401
切断直後	20 151	22 513	22 347	19 741	20 350
差	34	-56	31	56	-51
測定箇所	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10
切断直前	21 569	21 459	21 598	21 627	21 442
切断直後	21 609	21 518	21 535	21 625	21 477
差	40	59	-63	-2	35

フーチングのせん断補強に有効であるという要素試験結果を設計・施工に反映することができた。そして、実施工においてアラミド緊張材のひずみ変化を計測することにより、所定の緊張力がフーチングに導入されたことが確認され、当補強工事は平成12年3月に無事終了した。本稿が同様の耐震補強工事の参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー，No.88，1996
- 2) 建設省土木研究所：橋梁基礎のフーチングおよび頂版の耐力に関する実験的研究，土木研究所資料，第3483号，1997.3
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，下部構造編，1996.12
- 4) Leonhardt, Monnig：続鉄筋コンクリートの設計，鹿島出版会，1984

[2000年10月12日受付]



刊行物案内

PC構造物の耐震設計の現状

第27回PC技術講習会

(平成11年2月)

頒布価格：5 000円 (送料 500円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会