

報 告

調布高架橋の実橋載荷試験

－アウトプレート工法による補強工事－

The examination in the weighting

bridge of chofu viaduct

－Reinforcement work of Out plate method of

construction－

藤田 真実* 松田 義則**

高橋 輝光*** 鳥屋 隆志****

駒田 憲司*****

まえがき

中央自動車道の調布高架橋（都計 213 橋）は、供用後 28 年間が経過した RC3 径間連続 2 室箱桁橋であり、東京都調布市内の調布 IC 付近に位置している。本橋では、近年の車両大型化に対応するため、B 活荷重補強の実施を計画していた。しかし、事前の検査により、写真－1 に示すように、下床版に橋軸直角方向のクラックや漏水が、多数発生していることが判明した。さらに、交通車両による主桁のたわみも大きく、剛性低下が明らかであったため、耐荷力を向上するとともに、ひび割れを抑制して主桁剛性を改善する必要があると判断した。

このような場合、プレストレス導入工法の適用が妥当であると考えられるが、本橋は都道と交差しているため、桁下の建築限界を満足し、施工中の交通規制が生じず、緊張材の定着部補強が不要な方法が求められた。

そこで、本橋では、炭素繊維強化ポリマープレート（アウトプレート）を緊張して、プレストレスを導入し、コンクリートにアンカーで定着する補強方法を初めて採用した。以下は、この補強方法をアウトプレート工法と言う。図－1 に、本橋の概要を示す。

アウトプレート工法の補強効果は、試験体を用いた基礎実験¹⁾を実施して既に確認されている。しかし、実橋レベルでの補強効果がほとんど確認されていないのが現状であったので、本橋では、補強の前後に既知荷重車（45 t ラフ

タークレーン)による載荷実験を実施して、補強効果を確認した。また、アウトプレートの緊張時には、プレストレスの導入効果と定着部の安全性を確認した。

1. アウトプレート工法とは

アウトプレート工法とは、幅 50mm×厚さ 2mm の炭素繊維強化ポリマープレートを緊張して、コンクリートにアンカーで定着し、接着樹脂で接着する補強工法である(図-2)。写真-2に、補強が完了した状態を示す。

本工法では、既往のプレストレス導入工法と同様に、プレストレスにより、超過した荷重で発生した応力や変形を改善することができ、既存のひび割れを積極的に制御することが可能である。また、図-3に示すプレストレスによる不静定力を活用することで、連続桁橋の中間支点上に対しても、上面からの補強に依存せず、下面からの補強のみで対処できる。

また、アウトプレートによるプレストレスの導入量は、約 140kN/本(有効時)と小さいが、定着部に対する負荷が非常に小さいため、容量が大きい外ケーブルを用いた場合のように、定着に伴う支圧、割裂、背面の引張応力に対する補強が基本的に定着部に不要である。

2. 工事概要

表-1に主要橋梁諸元を示す。また、従来工法とアウトプレート工法の比較を表-2に示すが、本工法が、死荷重時からの応力や変形の改善では有効であり、本橋が抱える施工条件を満足し、経済性や工期も優れていることから、採用された。

アウトプレートの補強量は、死荷重とB活荷重による曲げモーメントに、プレストレスによる軸力と偏心モーメント、ならびに不静定力を考慮し、鉄筋の引張応力度が許容値を満足するように決定した。

本橋では、アウトプレートを各径間の主桁下縁に6本配置した。ただし、道路上の中央径間では、曲げ耐力がまだ不足するため、コンクリートの剥落対策も講じる必要があることから、炭素繊維シート接着工法も併用した。

本工法は、図-4に示す施工フローにしたがって、施工した。

3. 試験概要

3-1 概要

試験は、補強効果を確認する実橋載荷試験とアウトプレートによるプレストレス導入効果ならびに定着部の安全性を確認するプレストレス導入試験である。計測箇所は、下り線の側径間部とした。

また、事前に、実橋を再現して構築したモデルに対して、FEM 解析を実施し、解析値を算出した。

3-2 実橋載荷試験

既知荷重車（45t ラフタークレーン）の重量は、側径間の支間中央における正の最大曲げモーメントで比較した場合、B 活荷重の 26.3% に相当する。既知荷重車の載荷は、正の曲げモーメントが最大になるように、図-5 に示す支間中央付近の 3 ケースに対して、補強の前後に載荷し、応力や変形を計測した。写真-3 に載荷状況を示す。

一方、夜間の車線規制の中、既知荷重車を時速 50km/hr で走行させ、橋梁内に他の車両が走行していないことを確認して、固有振動数も計測した。

3-3 プレストレス導入試験

プレストレス導入試験は、中ウエブに配置したアウトプレートの 2 本に対して、実施した。アウトプレートは、初期緊張力 160kN/本で緊張し、支間中央付近と定着部付近の応力を計測した。

4. 計測項目

計測する項目を、図-6 に示す。

4-1 実橋載荷試験

- ①橋軸方向の鉄筋ひずみ（ひずみゲージ）。
- ②コンクリートのひび割れ幅（ π 型ゲージ）とひび割れ深さ（超音波法）。
- ③たわみ（高感度変位計）。
- ④固有周波数（圧電型加速度計）。

4-2 プレストレスト導入試験

- ①橋軸方向の鉄筋ひずみ（ひずみゲージ）。
- ②コンクリートのひび割れ幅（ π 型ゲージ）。
- ③橋軸方向のコンクリートひずみ（ひずみゲージ）。
- ①と②は、プレストレスの効果確認のため、支間中央付

近に、③は、定着部の安全性確認のため、定着部に設置した。

5. 実橋載荷試験の計測結果および考察

実橋載荷試験の計測結果は、図－7に、補強効果のまとめは、表－3に示す。計測値の鉄筋応力度は、検知されたひずみにヤング係数 ($2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$) を乗じて算出した。

ただし、本橋では、ひび割れ注入工法も実施するため、工程の関係上、補強後の計測時には、計測対象以外のひび割れに対して補修が完了した状態であった。

5-1 鉄筋の引張応力

補強前後の載荷により S1 (支間中央・中央) に発生した鉄筋の引張応力度は、FEM 解析値の 8.9 N/mm^2 とほぼ一致した値が得られた。鉄筋の引張応力度が、補強前の 9.8 N/mm^2 から補強後の 7.8 N/mm^2 に、20.4%減少したことから、本工法のプレストレスの効果により補強前のひび割れによる剛性低下面積が減少し、主桁剛性が向上することを確認した。

5-2 コンクリートのひび割れ幅とひびわれ深さ

補強前後の載荷による C2 (支間中央・中央) のひび割れ幅は、0.226mm から 0.188mm に、16.8%減少しており、それと相関してひび割れ深さも浅くなる方向に推移している。

補強後のひび割れは、プレストレスの導入により、直接的に閉口され、載荷による性状変化が小さくなることから、耐久性が向上することを確認した。

5-3 たわみ

補強前後の載荷による D1 (支間中央・中央) のたわみは、1.53mm から 1.07mm に、30.1%減少しており、壁高欄側の D2 では、1.88mm から 1.12mm に、40.4%減少した。補強後のたわみ量は、全断面有効とした FEM 解析値の 0.92mm とほぼ一致していることから、主桁剛性が向上したと想定される。

しかしながら、本橋は RC 橋であり、FEM 解析値にひび割れによる剛性低下が考慮されていないことから、解析値を修正し、再度比較を行なった。

ひび割れによる剛性低下を評価する方法は、たわみの断面二次モーメントが変化すると仮定して、既往の Branson

の式 2)により、算出することにした。この剛性低下を考慮した断面二次モーメントを用い、フレーム解析によりたわみを算出したところ、D1（支間中央・中央）で 1.14mm となり、全断面有効の場合と比べ、13.8%低下していた。

次に、このたわみ量を RC 橋の健全な変形と仮定し、計測値との比較を行い、その比率を健全度として評価することとした。健全度は、補強前が 74.5%で、補強後が 106.5%となった。

この健全度から、補強後に、主桁剛性が著しく改善していることが判る。また、補強後の健全度が 100%を超えているが、プレストレスの導入により、RC 断面の中立軸が変化し、圧縮側のコンクリート断面積が増加したためであると推察される。

本試験で載荷した荷重は、支間中央の最大たわみで比較すると、B 活荷重の 34.0%に相当している。そのため、供用中の実橋においては、主桁の変形が、かなり低減されたと考えられる。

5-4 固有振動数

1 次振動モードの固有振動数の計測値は、補強の前後で、補強前の 4.4Hz から補強後の 5.2Hz に改善した。固有振動数は、値が小さくなると、振幅が増加し、たわみが大きくなるため、計測結果の傾向は、たわみと全く一致している。また、図-8 に示す全断面を有効とした FEM 解析モデルによる固有値解析の結果、1 次モードの固有振動数は、5.393Hz であり、補強後の計測値とほぼ一致していた。そのため、たわみと同様に、補強により、主桁剛性が確実に向上したと考えられる。

6. プレストレス導入試験の計測結果と考察

プレストレス導入試験の計測結果は、図-9 に、補強効果のまとめは、表-4 に示す。計測値の鉄筋応力度は、検知されたひずみにヤング係数 ($2.5 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$) を乗じ、コンクリートの応力度は、検知されたひずみにヤング係数 ($2.5 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$) を乗じて算出した。

6-1 鉄筋の圧縮応力

S1（支間中央）の鉄筋の圧縮応力度は、アウトプレート 2 本の緊張後に、 2.4 N/mm^2 であった。この値は、FEM 解析

値の 2.56N/mm^2 とほぼ一致しており、必要なプレストレスが導入されていることが確認できた。

6-2 コンクリートのひび割れ幅

C2（支間中央）のひび割れ幅は、アウトプレート 2 本の緊張後に、 0.015mm 閉口した。この閉口量を検証するため、コンクリート標準示方書³⁾に準拠し、鉄筋引張応力度によるひび割れ幅の式から、アウトプレートのプレストレス効果に相当するひび割れ幅を試算したところ、 0.02mm となり、計測値とほぼ一致した結果が得られた。

6-3 コンクリートの引張応力

アウトプレート 2 本の緊張後において、定着部背面のコンクリートに発生した引張応力度は、最大で 0.44 N/mm^2 （コンクリートひずみ： 22μ ）であった。この計測値は、FEM 解析値の 1.4 N/mm^2 やコンクリート標準示方書によるひび割れ発生限界の 1.9 N/mm^2 と比較して、はるかに小さい値であり、ひび割れを誘発するような引張応力ではなかった。したがって、本工法の定着構造が、比較的強度が低く損傷したコンクリートに対して、十分安全なことを確認した。

あとがき

本試験では、アウトプレート工法による補強の前後に、既知荷重車による実載荷試験を実施し、直接的に補強効果を実証した。最も顕著な補強効果は、たわみであり、固有振動数も減少する傾向を示したことから、プレストレスにより主桁剛性が大幅に改善されていることが判った。

さらに、鉄筋応力やひび割れ性状の改善により、耐荷性ならびに耐久性も確実に向上しており、定着部の安全性も確認された。したがって、本工法は、RC 橋に対して、極めて有効な補強工法であると考えられる。

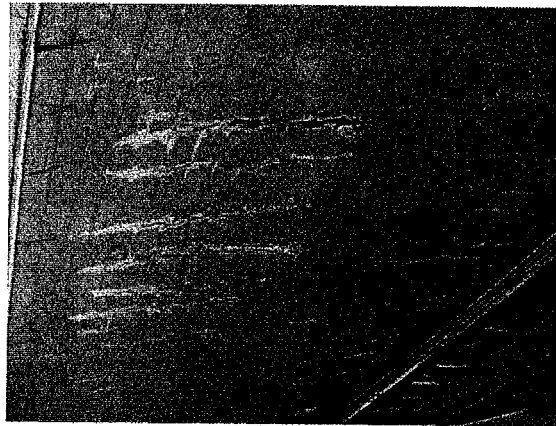
最後に、本報告が、同様な補強工事に対する一例として、参考になれば幸いである。

[参考文献]

- 1) 濱田譲, 井上真澄, 小林朗, 高木宣章, 児島孝之: 緊張した炭素繊維プレートによる既設コンクリート部材の補強に関する研究, 土木学会論文集, No. 711/V-56, 27-44, (2002.8)
- 2) 岡田清: 鉄筋コンクリート工学, 朝倉書店
- 3) (社) 土木学会: コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], (2002)

[プロジェクトデータ]

橋 名: 調布高架橋 (都計 213 橋)
所 在: 東京都杉並区高井戸～八王子市宇津木町
橋 長: 63.586m, (64.027m), 以下 () 内は下り線
支 間 長: 19.515+23.829+19.542m
(19.659+24.010+19.658m)
構造形式: RC3 径間連続箱桁橋
荷 重: TL-20 → B活荷重
事 業 主: 日本道路公団 東京管理局
補強設計: (株)建設技術研究所
補強施工: 鉄建建設(株)
施工協力: ドーピー建設工業(株)
載荷試験: 八千代エンジニアリング(株)
試験協力: ドーピー建設工業(株), (株)国際建設技術研究所
メーカー: 日鉄コンボジット(株)
工 期: 補強設計 2002 年 8 月 ～ 2003 年 3 月
補強施工 2003 年 6 月 ～ 2004 年 2 月
載荷試験 2003 年 8 月 ～ 2004 年 2 月



写真－１ 補強前劣化状況



写真－２ 補強後状況



写真－３ 45t ラフタークレーン載荷状況

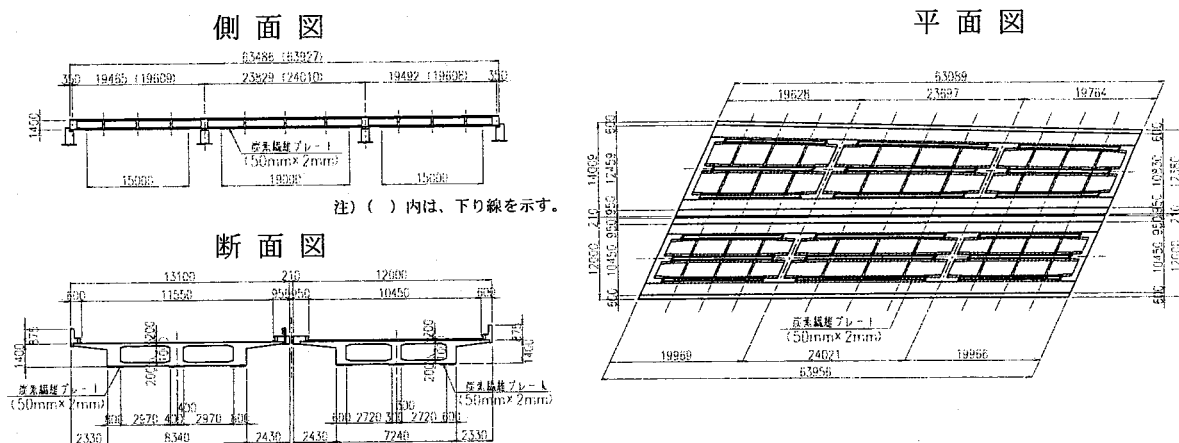


図-1 橋梁一般図

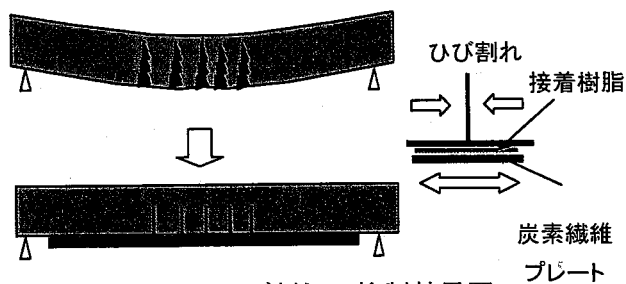


図-2 ひび割れの抑制効果図

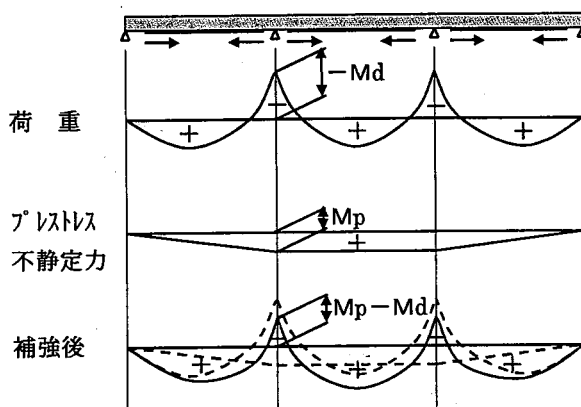
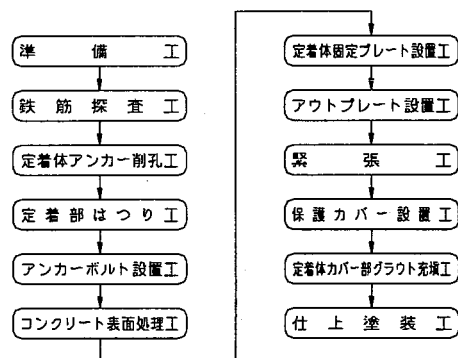
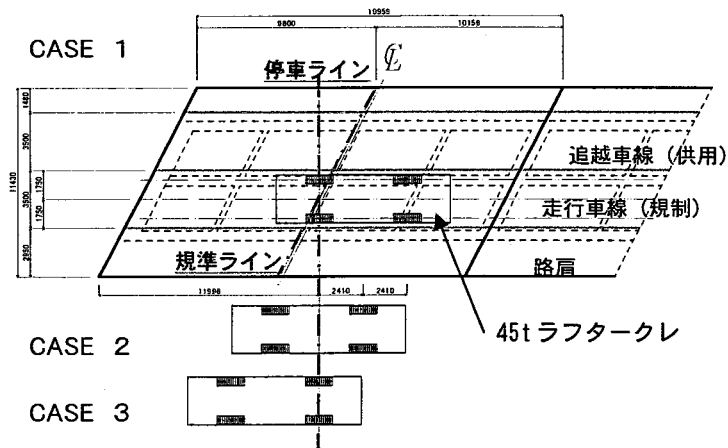


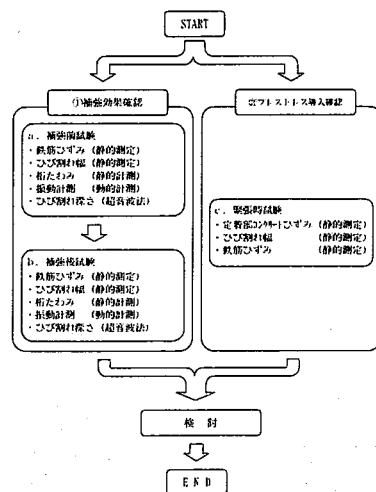
図-3 曲げモーメントの分布図



図－４ 施工フロー



図－５ 荷重車による載荷位置図



図－６ 試験の流れと確認項目

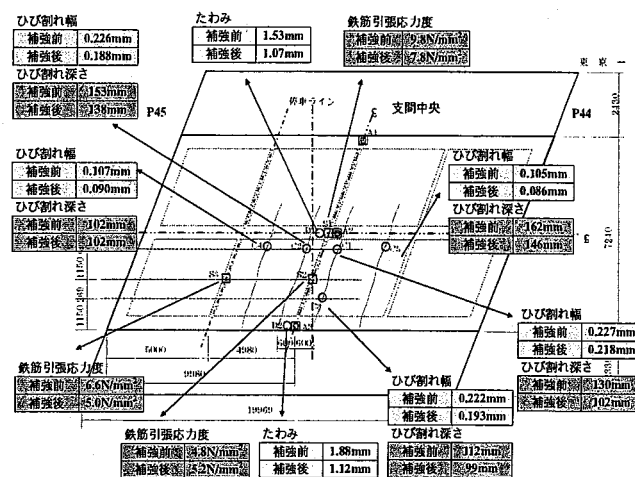


図-7 実橋載荷試験の計測結果

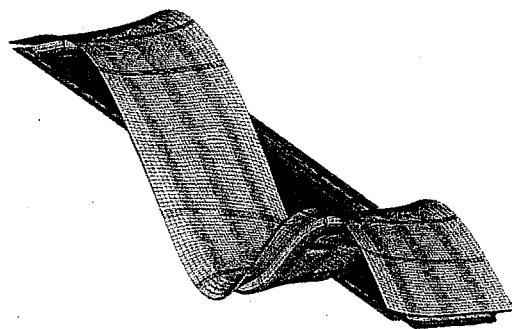


図-8 解析1次モード図: 5.393Hz

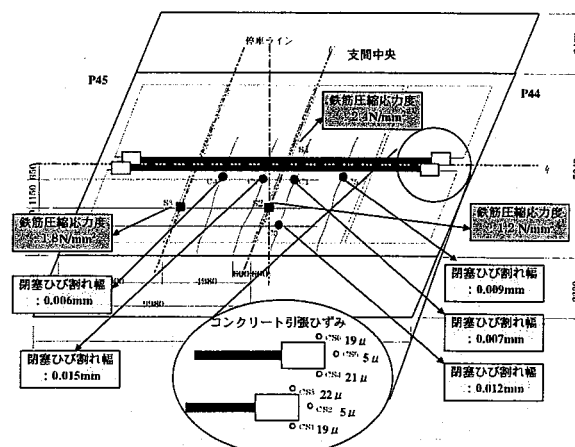
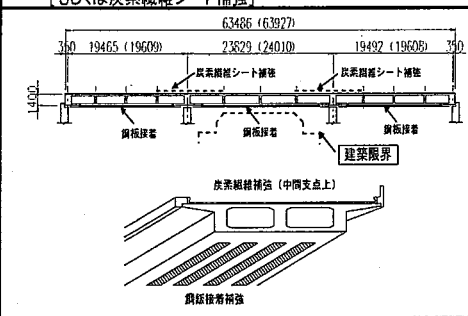
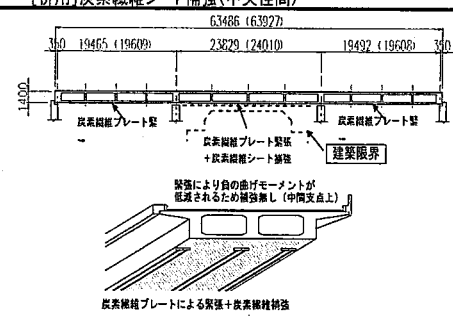


図-9 プレストレス導入試験の計測結果
(アウトプレート2本緊張後)

表-1 主要橋梁諸元

橋 梁 名	調布高架橋（都計 213 橋）
路 線 名	中央自動車道 富士吉田線
道路規格	第 1 種・第 2 級（設計速度 100km/h）
工事箇所	東京都杉並区高井戸～八王子市宇津木町
構造形式	RC3 径間連続箱桁橋（上り線，下り線）
橋 長	63.586m, (64.027m), 以下（ ）内は下り線
支 間 割	19.515+23.829+19.542m (19.659+24.010+19.658m)
有効幅員	12.459～10.830m , (10.450m)
斜 角	65° 38' 24" ～66° 30' 53" (64° 31' 49" ～65° 47' 7")
荷 重	TL-20 → 補強後 B活荷重

表-2 補強工法の選定

	従来工法(設計要領:保全編)	アウトプレート工法
補強方法	上面:増厚(中間支点上)⇒今回は炭素繊維シートで検討 下面:鋼板接着(側径間+中央径間+側径間) [もしくは炭素繊維シート補強]	上面:補強なし 下面:炭素繊維プレート(側径間+中央径間+側径間) [併用]炭素繊維シート補強(中央径間)
概要図		
構 造 性	長所 ・活荷重に対して、補強効果大 ・剥落対策としても有効である(中央径間)	・死荷重+活荷重に対して、補強効果大 ・プレストレスが導入されるため、死荷重時の剛性低下、ならびにひび割れに対する閉塞効果と抑制効果がある ・フラットな補強のため、桁下の建築限界に影響しない(中央径間)
	短所 ・本線規制を伴う ・上面の補強には、排水性舗装の撤去が伴う	・施工実績が少ないため、施工時に補強効果の確認試験が有効である ・剥落対策には、シート系の補強材が必要である(中央径間)
経済性	・炭素繊維シート補強[中間支点上]:上面補強(373.9m ²) ・下面鋼板接着費[側径間+中央径間+側径間]:下面補強(911.3m ²) 橋面積あたり 約75,000円/m ² (1.00)	・炭素繊維プレート緊張工:36本(=6×3×2) ・下面炭素繊維シート工[中央径間]:下面補強4層(343.0m ²) 橋面積あたり 約60,000円/m ² (0.80)
施工性	・昼夜連続規制を伴う(本線)、標準工程:60日	・車線規制の必要なし(本線)、標準工程:40日
総合評価	△	○

表－3 補強効果（実橋載荷試験）

項 目	測定 位置	結 果			備 考		
		補強前	補強後	補強効果	解析 1	解析 2	解析 3
鉄筋引張応力度 (N/mm ²)	S1	9.8	7.8	20.4%減			8.9
ひび割れ幅 (mm)	C2	0.226	0.188	16.8%減			
ひび割れ深さ (mm)	C2	153	138	9.8%減			
たわみ (mm)	D1	1.53	1.07	30.1%減	1.14	0.98	0.92
固有振動数 (Hz)	A2	4.4	5.2	18.2%増			5.393

注 1) 解析値 1 は、棒解析 (Branson の式) の結果から抽出した。

注 2) 解析値 2 は、棒解析 (全断面有効) の結果から抽出した。

注 3) 解析値 3 は、FEM 解析の結果から抽出した。

表－4 プレストレス導入試験（アウトプレート 2 本緊張時）

項 目	測定 位置	結 果		備 考
		アウトプレート C1	アウトプレート C1+C2	FEM解析値
鉄筋圧縮応力度 (N/mm ²)	S1	1.2	2.4	2.56
ひび割れ幅 (mm)	C2	-0.006	-0.015	(全体で約-0.040mm 閉口)
定着部背面コンクリートの発生引張応力 (N/mm ²)	CS3	-0.44		-1.40 (ひび割れ発生限界値: -1.9N/mm ²)