

炭素繊維シートによる橋脚の耐震補強 ー実験に基づく拘束効果の適用ー

大成建設（株）土木本部土木設計第一部	大竹明朗
新潟県西蒲原郡弥彦村役場建設課	柏木文男
新潟県西蒲原郡弥彦村役場建設課	小林忠秋
大成建設（株）技術本部技術研究所	正会員 宇治公隆
大成建設（株）技術本部技術研究所	正会員 細谷 学

1. はじめに

炭素繊維シートは、鋼材やコンクリートと比べて軽量で扱いやすく、高強度で、腐食しない、等の特長をもつ材料である。阪神大震災以降、既設橋脚の耐震補強が急ピッチで進められているが、炭素繊維シートはその特長を活かして、狭隘な場所や騒音が問題となるような状況、あるいは基礎の耐力に余裕がないため橋脚の重量を増加させずに補強を行いたい場合に用いられることが多い。本稿は、炭素繊維シート巻立て工法により既設橋梁の耐震補強（じん性補強）を行った事例を報告するものである。炭素繊維シートの巻立て量の決定に当たっては、単に、炭素繊維シートの拘束効果を帯鉄筋との材料強度比を用いて帯鉄筋換算して行うのではなく、実験結果に基づいて炭素繊維シートの拘束効果を評価した。

2. 既設RC橋脚の耐震性照査

本工事で耐震補強を行ったのは、新潟県西蒲原郡弥彦村村有の二本松橋梁のRC橋脚である。この橋梁は、JR弥彦線と交差する跨線橋であり、下部工が昭和53年、上部工が昭和54年に建設された。二本松橋梁の全体一般図を図2.1に示す。この橋梁について「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」¹⁾（以下、復旧仕様と略記）に基づく耐震性能の照査を行ったところ、橋脚高が高く、地震時に負担する上部工慣性力が大きいP3橋脚とP6橋脚が所要の耐震性能を有していないことが判明した。この橋脚2基を耐震補強する工法について、RC巻立て工法、鋼板巻立て工法および炭素繊維シート巻立て工法の3工法で比較検討を行った結果、付近に民家があるため、重機の使用や既設橋脚のチップング等で騒音をともなうRC巻立て工法や鋼板巻立て工法よりも、低騒音で人力による施工が可能な炭素繊維シート巻立て工法が適していると判断された。

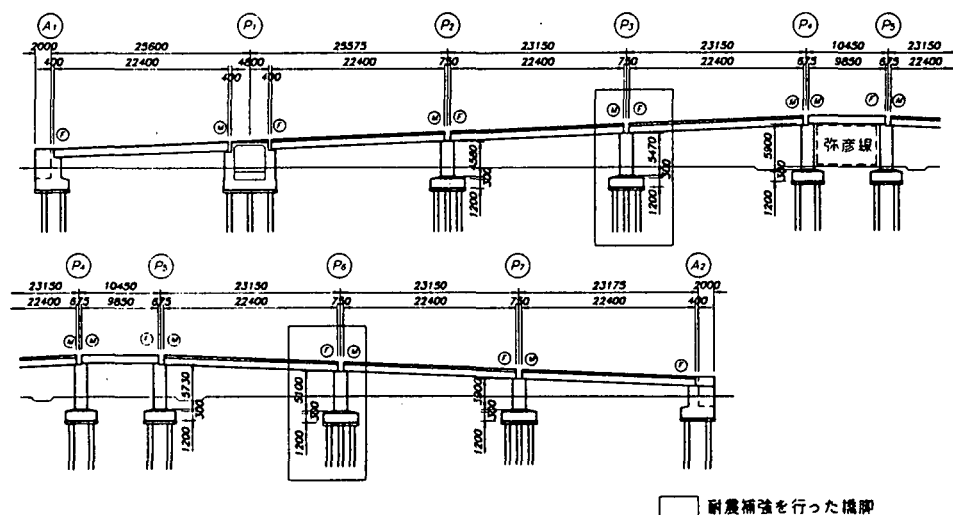


図 2.1 二本松橋梁の全体一般図

キーワード：炭素繊維シート、耐震補強、拘束効果、じん性補強設計

連絡先：東京都新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル tel.03-5381-5297 fax.03-3345-0490

以下、耐震補強を行った2橋脚のうち、P6橋脚に関する耐震補強設計および炭素繊維シート巻立ての施工について述べる。図2.2にP6橋脚の配筋図を示す。

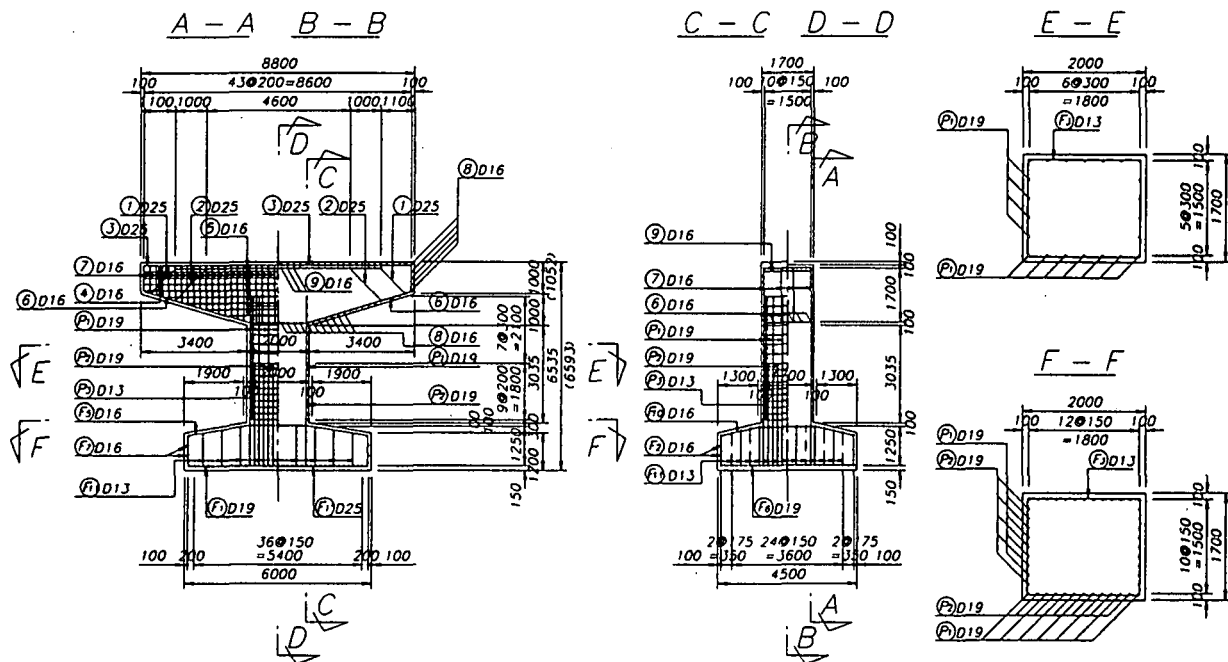


図 2.2 P6 橋脚の配筋図

P6橋脚の耐震性照査の結果、既設橋脚の橋軸方向地震時保有耐力のみがわずかに不足しており、じん性補強により、所要の耐震性能を確保できることが分かった。

3. 炭素繊維シート巻立て工法による耐震補強設計

3.1 炭素繊維シートの拘束効果に関する既往の研究

炭素繊維シートは鉄筋に比べて高強度であるが、帯鉄筋の代替として使用した場合に、強度に比例した拘束効果が得られないことが報告されている。例えば細谷らは、表3.1に示すごとく、断面形状、試験体寸法、炭素繊維比をパラメータとした供試体の一軸圧縮試験によって、このことを明らかにしている²⁾。この実験結果から評価した拘束効果と、復旧仕様に示されている式を比較すると図3.1～図3.3のようになり、復旧仕様に示される式では炭素繊維シートの拘束効果をうまく表すことができない。これは、炭素繊維シートの設計引張強度が帯鉄筋の降伏強度の10倍程度であることから、炭素繊維シートの断面積を帯鉄筋の1/10程度にすると、横拘束に対する引張剛性が帯鉄筋の1/10しかなく、炭素繊維シートの引張強度が最大になる前にコンクリート強度が最大値に達し、破壊し始めるためと考えることができる。²⁾

表 3.1 試験体の諸元²⁾

NO.	断面形状	試験体寸法	炭素繊維比 ρ_{CF} (%)	NO.	断面形状	試験体寸法	炭素繊維比 ρ_{CF} (%)
1	円形	$\phi 500\text{mm}$ $\times h 1500\text{mm}$	—	9	円形	$\phi 200\text{mm}$ $\times h 600\text{mm}$	—
2			0.044	10			0.056
3			0.089	11			0.111
4			0.178	12			0.167
5	正方形	$\square 500\text{mm}$ $\times h 1500\text{mm}$	—	13	正方形	$\square 200\text{mm}$ $\times h 600\text{mm}$	—
6			0.044	14			0.056
7			0.089	15			0.111
8			0.178	16			0.167

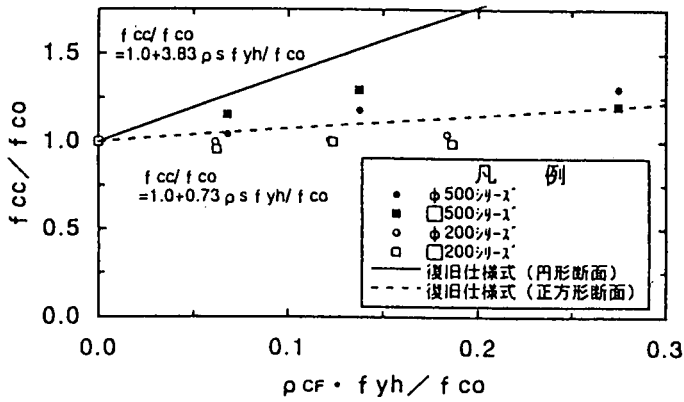


図 3.1 横拘束と最大圧縮応力の関係²⁾

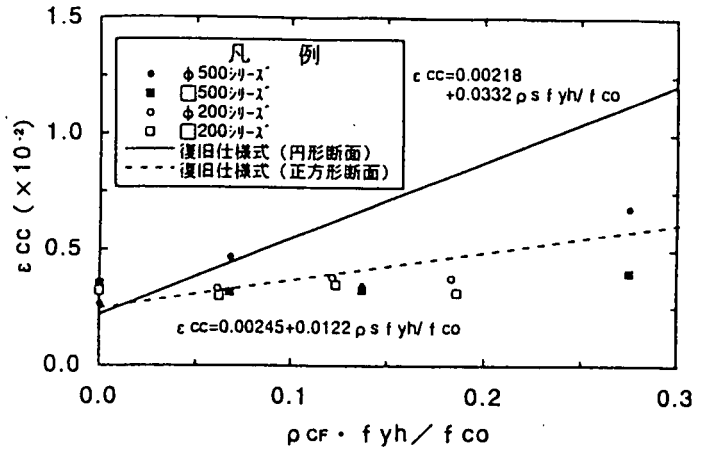


図 3.2 横拘束と最大圧縮応力時ひずみの関係²⁾

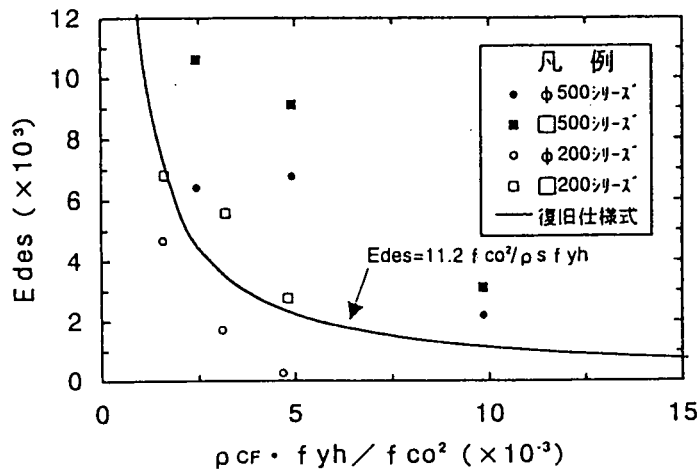


図 3.3 横拘束と下降勾配の関係²⁾

$$\rho_{CF} = 4 \times n \times t_{CF} / d$$

ρ_{CF} : 炭素繊維比

n : 炭素繊維シートの巻立て層数

t_{CF} : 炭素繊維シート 1 層の厚さ

d : コンクリート柱の断面長

f_{yh} : 炭素繊維シートの設計引張強度

f_{co} : 無補強試験体の圧縮強度

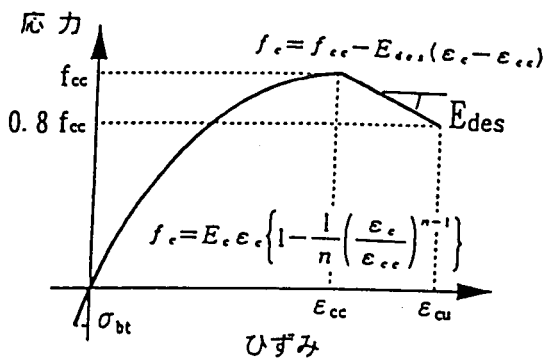


図 3.4 復旧仕様に示されているコンクリートの応力度～ひずみ曲線¹⁾

f_c : コンクリート応力度

f_{cc} : 横拘束筋で拘束されたコンクリートの強度

f_{co} : コンクリートの設計基準強度

ϵ_c : コンクリートのひずみ

ϵ_{cc} : 最大圧縮応力時ひずみ

ϵ_{cu} : 横拘束筋で拘束されたコンクリートの終局ひずみ

E_c : コンクリートのヤング係数

E_{des} : 下降勾配

ρ_s : 横拘束筋の体積比

$$\rho_s = 4 A_s / (s \cdot d)$$

A_s : 横拘束筋の断面積

s : 横拘束筋の間隔

d : 横拘束筋の有効長

3.2 耐震補強設計

ここでは、前述の実験結果に基づいて、炭素繊維シートの巻き立て量を求めることとした。今回の補強はじん性補強であるため、橋脚のじん性に最も影響の大きいコンクリートの終局ひずみに着目して炭素繊維量を求めた。具体的な手順は以下の通りである。

- ① 復旧仕様では、図3.4のようにコンクリートの応力度～ひずみ曲線を定式化している。そこでこれに準じて、炭素繊維シートで横拘束した場合の応力度～ひずみ曲線を設定する。すなわち、図3.1～図3.3において、□500シリーズの結果にフィッティングするように復旧仕様における係数を変化させ、今回補強を行う橋脚における炭素繊維シートの拘束効果の定式化を行う。得られた式を次に示す。

<今回用いた式>

$$f_{cc}/f_{co} = 1.0 + 1.41 \rho_{CF} \cdot f_{yh} / f_{co} \quad \text{式 (3.1)}$$

$$\epsilon_{cc} = 0.00285 + 0.0447 \rho_{CF} \cdot f_{yh} / f_{co} \quad \text{式 (3.2)}$$

$$E_{des} = 31.0 \rho_{CF} \cdot f_{yh} / f_{co}^2 \quad \text{式 (3.3)}$$

f_{yh} : 炭素繊維シートの設計引張強度 (=35500kgf/cm²)

<復旧仕様による式> (矩形の場合)

$$f_{cc}/f_{co} = 1.0 + 0.73 \rho_s \cdot f_{yh} / f_{co}$$

$$\epsilon_{cc} = 0.00218 + 0.0332 \rho_s \cdot f_{yh} / f_{co}$$

$$E_{des} = 11.0 \rho_s \cdot f_{yh} / f_{co}^2$$

f_{yh} : 帯鉄筋の降伏強度 (=3000kgf/cm²)

- ② 式(3.1)～(3.3)および復旧仕様を示されている次式より、炭素繊維シートの横拘束 ($\rho_{CF} \cdot f_{yh} / f_{co}$) とコンクリートの終局ひずみ (ϵ_{cu}) の関係を求める。

$$\epsilon_{cu} = \epsilon_{cc} + 0.2 f_{cc} / E_{des}$$

- ③ 復旧仕様より得られる帯鉄筋の横拘束とコンクリートの終局ひずみの関係を同様に求める。この関係と②で得られた関係を図3.5に示す。
- ④ P6橋脚について、復旧仕様に基づく耐震補強設計を行い、所要の耐震性能を確保するために必要な帯鉄筋量を求める。
- ⑤ 図3.5に④で求めた帯鉄筋量をプロットし、これと同じコンクリートの終局ひずみが得られる炭素繊維シートの量を求める。これを補強に必要な炭素繊維シートの量とする。

以上の方法により炭素繊維シート量を算定した結果、単なる帯鉄筋との強度比換算で炭素繊維量を決定した場合よりも1層多く、2層必要という結果になった。図3.6に補強前および補強後のP6橋脚の荷重～変位曲線を、表3.2に耐震補強設計結果を示す。

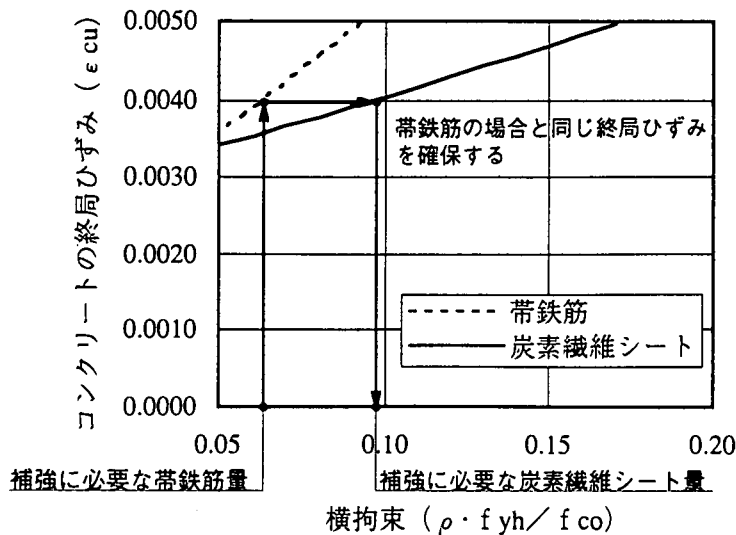


図3.5 横拘束とコンクリートの終局ひずみの関係

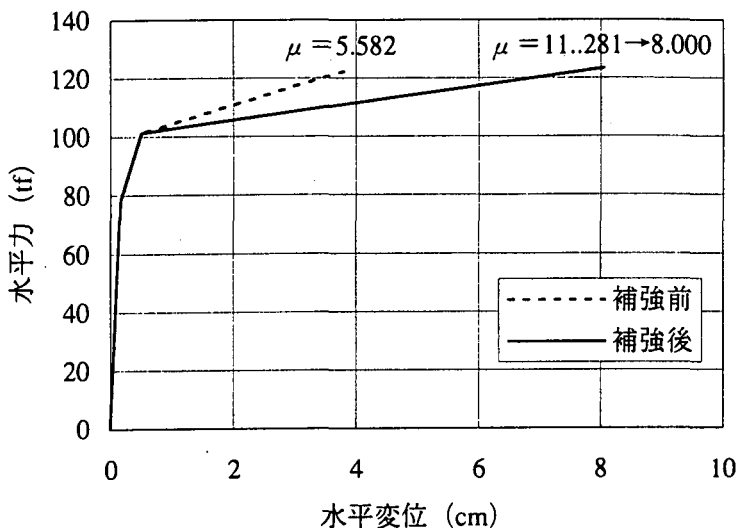


図 3.6 P6 橋脚の荷重～変位曲線（橋軸方向）

4. 施工

炭素繊維シートの巻き立ては、図 4.1 に示す手順に従って 1997 年 10 月に行った。図 4.2 に P6 橋脚の補強設計図を、写真 4.1 に施工状況写真を示す。事前調査として橋脚を基部まで掘削し、損傷状況の調査および必要に応じて断面修復・表面処理を行った。既設橋脚の隅角部は、巻立てた炭素繊維シートに応力集中が生じて破損することのないように、半径 3cm 程度の面取りを行った。またプライマーおよび接着材として使用したエポキシ樹脂は、水分の介在により接着効果が阻害されるため、結露や雨、地下水などに十分に留意して貼付け作業を行った。表 4.1 に使用したエポキシ樹脂の仕様を示す。施工性を考慮して、炭素繊維シートは幅 50cm、長さ 3.8m に裁断し、円周方向のラップ長は 10cm、鉛直方向の継目は突き合わせとしてシートを割り付けた。表 4.2 に炭素繊維シートの仕様を、図 4.3 に炭素繊維シートの割り付け図を示す。最後に、紫外線による劣化防止および美観の向上を目的として塗装を行い、車両の衝突等によるシートの破損がないように橋脚周辺に防護柵を設けた。幸いなことに既設橋脚の損傷はほとんどなく、晴天にも恵まれたため、稼働日約 11 日で施工を終了することができた。

表 3.2 耐震補強設計結果

耐震設計の諸元	補強前	補強後
許容塑性率 μ	5.582	11.281→8.000
地震時保有耐力 P_a (tf)	115.6	110.7
等価水平震度 K_{he} (tf)	0.35	0.29
地震時慣性力 $K_{he}W$ (tf)	123.1	102.0
判定 $P_a > K_{he}W$?	NG	OK

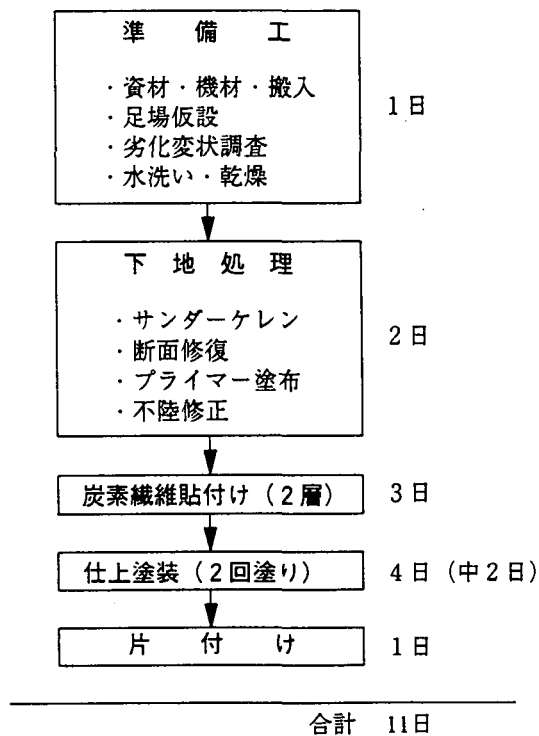
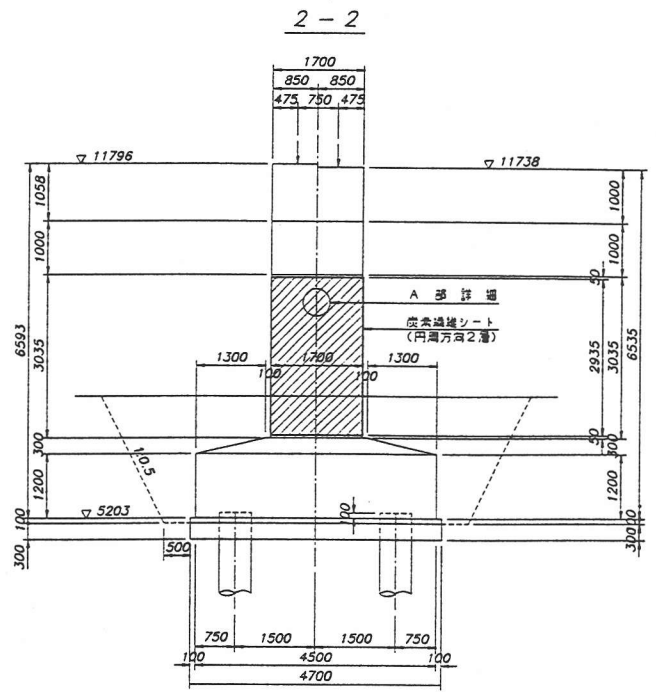
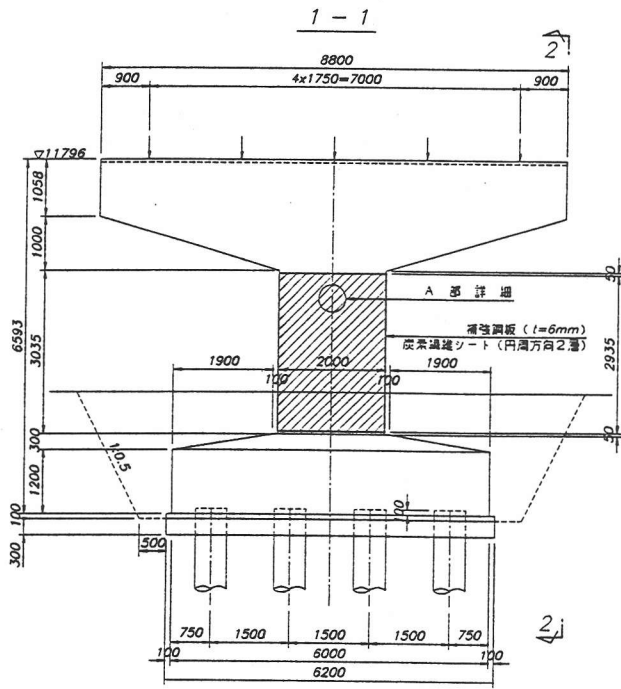


図 4.1 施工手順



A部詳細

炭素繊維シート施工接着仕様図

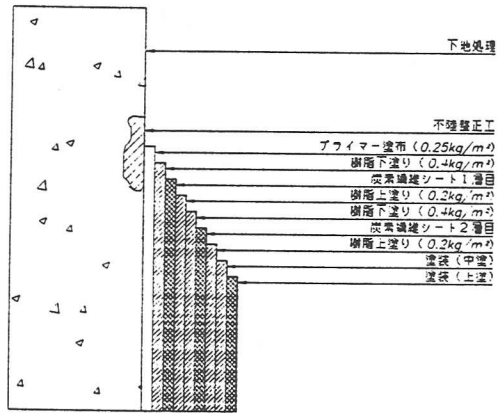
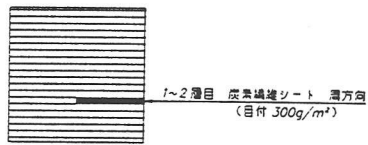


図 4.2 P6 橋脚補強設計図

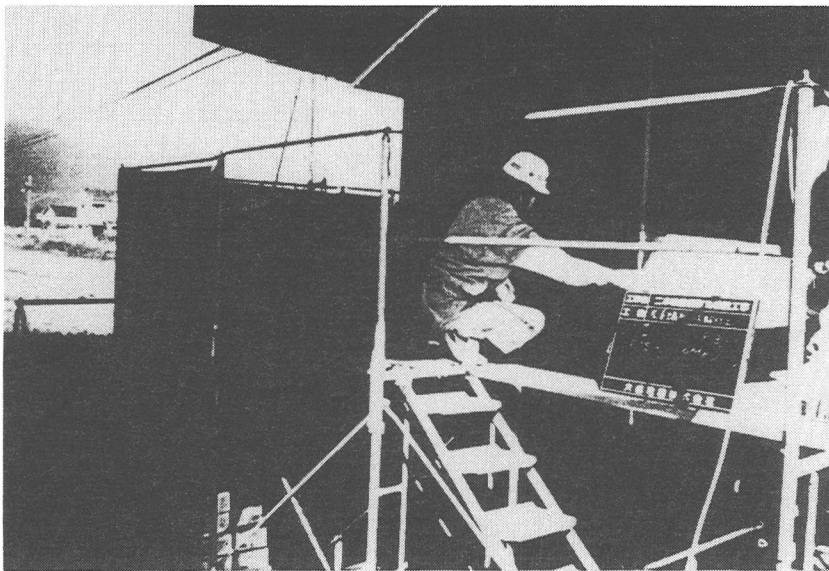


写真 4.1 施工状況 (炭素繊維シート貼付)

表 4.1 エポキシ樹脂の仕様

(a) プライマー		(b) 含浸樹脂	
適用温度 (°C)	5~15	適用温度 (°C)	5~15
可使時間 (分)	@30°C @20°C @10°C	可使時間 (分)	@30°C @20°C @10°C
乾燥時間 (時間)	@20°C	硬化時間 (時間)	@30°C @20°C @10°C
主剤・硬化剤 (重量比)	2:1	養生期間 (日)	@30°C @20°C @10°C
粘度 (cps)	@20°C	主剤・硬化剤 (重量比)	2:1
仕様	1,300 冬用・無溶剤	粘度 (cps)	@20°C
		仕様	10,000 冬用

表 4.2 炭素繊維シートの仕様

繊維目付 (g/m ²)	標準施工厚さ (mm)	設計厚さ (mm)	設計強度 (kg/cm ²)	設計弾性率 (kg/cm ²)	破断時伸度 (%)
300	0.6	0.167	35,500	2.35×10 ⁶	1.5

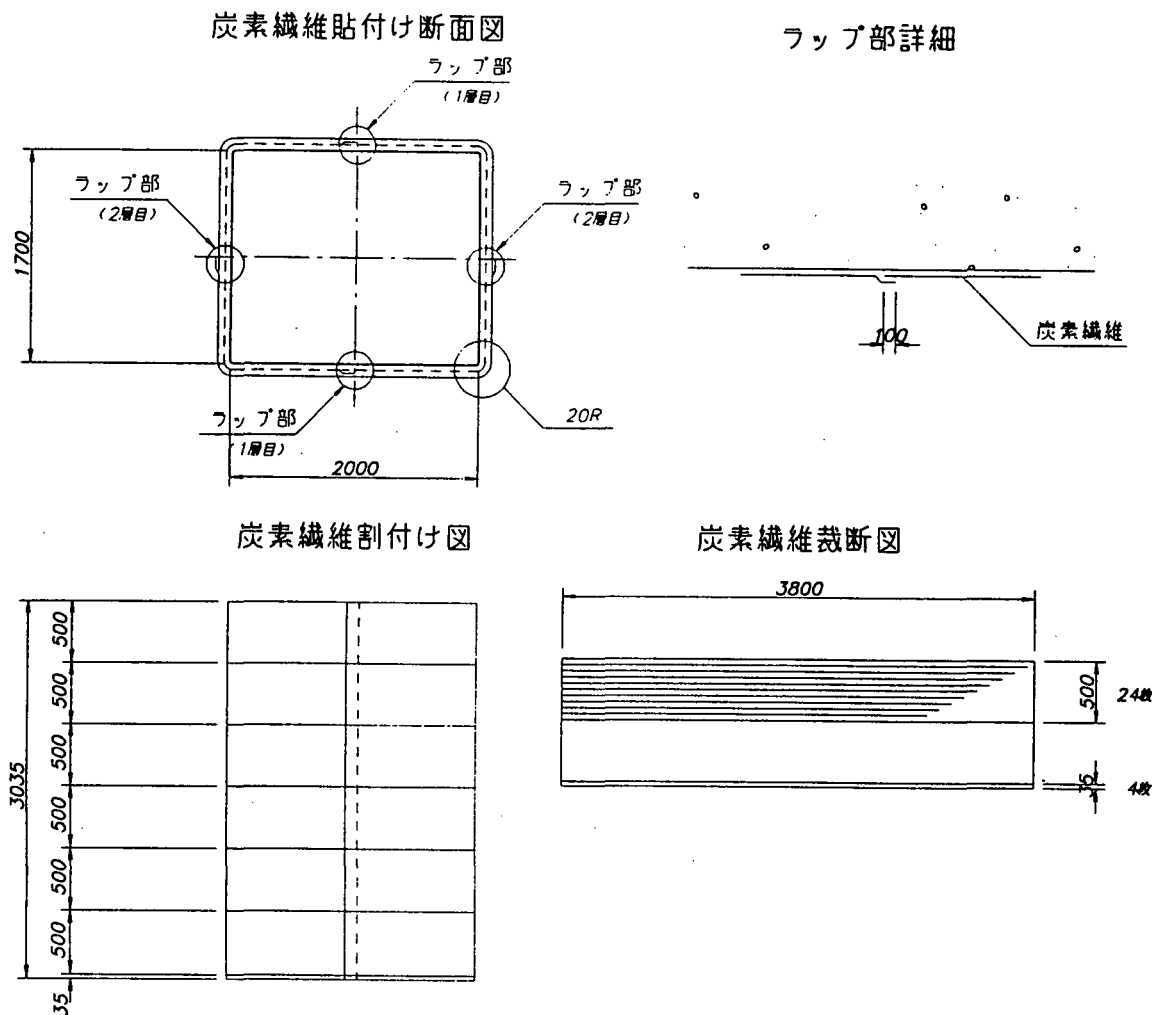


図 4.3 炭素繊維シート割付図

5. まとめ

炭素繊維シートやPC鋼材等の高強度の材料を用いてじん性補強を行う場合の拘束効果については、現段階では未解明な部分もあるが、帯鉄筋との強度比で換算して補強材の断面積を算定するのは、危険側の設計となる可能性があることが指摘されている。本報告では、このような事柄を踏まえ、一軸圧縮試験の結果をもとに炭素繊維シートによる補強設計の考え方および実施工の紹介を行った。前述のごとく、炭素繊維シートは鋼やコンクリートにない特長を持っているため、耐震補強はもとより他の用途においても使用の増大が予想される材料である。今後、炭素繊維シートが普及していくためには、炭素繊維に係わる設計・施工指針の整備、材料の低コスト化等が必要と思われる。

参考文献

- 1) 兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様 平成7年2月
- 2) 細谷学、川島一彦、星隈順一、宇治公隆：炭素繊維シートで横拘束されたコンクリート柱の応力度—ひずみ関係、東工大土木工学科研究報告 No.53 3月(1996)