

平賀橋・耐震補強工事の設計と施工

千葉県東葛飾土木事務所	矢部 圭輔
(株)建設技術研究所	藤田 玲
(株)大林組 平賀橋工事事務所	黒瀬 祐志
同上 土木技術本部	古賀 政二郎

§ 1 平賀橋の概要

平成7年1月に発生した兵庫県南部地震において大きな被害が発生した道路橋は、災害時の緊急物資輸送路としての機能が不能となると共に、道路橋が交差する河川や道路構造物の機能阻害の大きな原因の一つもなった。

千葉県では、これらの事態を教訓として落橋等に伴う震災時の二次災害を防止するために、跨線橋や跨道橋等緊急度の高い橋梁を優先的に、平成7年度より耐震補強を実施してきている。

平賀橋は、昭和48年3月、一般県道白井流山線がJR常磐線と交差する千葉県松戸市東平賀に架橋された、RCラーメン造および鋼単純鉸桁造からなる橋長82.9mの橋梁であり、鉄道を跨線していることから、早急に耐震性を照査し必要な耐震補強を実施すべきであるとされた橋梁である。

平賀橋の橋梁諸元を以下に、また、橋梁の一般構造概要を図-1に示す。

橋格： 1等橋、 設計荷重： TL-20
橋長： 82.90m、 支間構成： 3@10.00m+22.90m+3@10.00m
幅員： 13.00m、 幅員構成： 歩道1.75m、 車道9.00m
上部工形式： 二径間連続RCラーメン橋2連、RC単純鉸桁橋2連、鋼単純合成鉸桁橋1連
下部工形式： A1橋台-逆T式、A2橋台-パイルベント式、橋脚-RCラーメン式
基礎工形式： 場所打ち杭

本橋は、近年都市化の進行した東葛飾地域の商業・住宅地域に位置することから、交通量が非常に多く、また、その架橋位置がJR線北小金駅前でもあることから、高架橋下空間は市営駐輪場として有効利用されている。

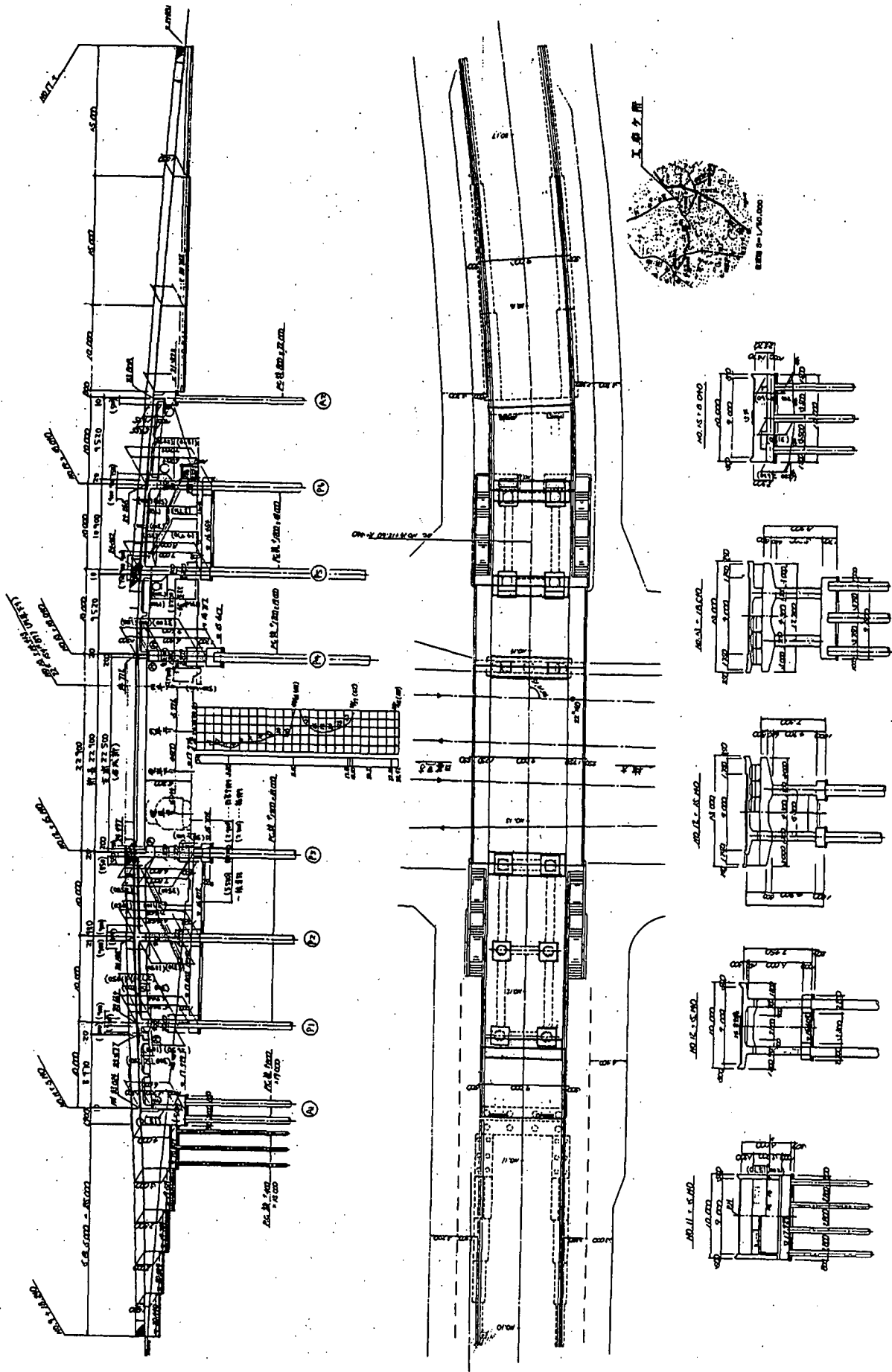
§ 2 平賀橋の耐震診断と耐震補強方針

2-1 適用基準等

本橋梁の耐震診断と耐震補強を実施するに当たり適用した基準類は以下の通りである。

- ・建設省、兵庫県南部地震道路橋耐震対策委員会（平成7年2月）：
「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に関わる仕様および復旧仕様の解説（案）」
- ・(社)日本道路協会（平成7年6月）：
「『兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に関わる仕様』の準用に関する参考資料（案）」
- ・(社)日本道路協会（平成2年2月）：「道路橋示方書、I共通編、IV下部構造編、V耐震設計編」
- ・(社)日本道路協会（平成8年12月）：「道路橋示方書、I共通編、IV下部構造編、V耐震設計編」
- ・日本道路公団（平成8年7月）：「耐震設計・施工要領（案）」

連絡先：(株)大林組 土木技術本部 技術第五部 古賀 政二郎
住所 東京都文京区本郷2丁目2番9号 センチュリータワー
電話 03-5689-9013 Fax 03-5689-9010



图一 平賀橋、一般構造図

2-2 橋梁設計条件および耐震性照査方針

表-1 上部工死荷重反力の推定設計値

(単位: tf)

橋脚番号		P1	P2	P3	P4	P5	P6
鉛直死荷重反力		85.231	74.274	115.933	150.586	96.894	106.013
上部工負担重量	橋軸方向	125.996	125.996	125.996	102.014	126.080	126.080
	橋軸直角方向	85.231	74.271	115.933	150.586	92.280	100.965

(1) 橋梁設計条件設定

橋梁設計条件は、現存している設計図面、および現地調査結果を基に以下の通り設定した。

上部工死荷重重量は、設計図面から算出し、現況との寸法差異が多々あることを考慮し、一律に5%増しした値を設計値として用いることとした。上部工死荷重反力の推定設計値を表-1に示す。

下部工各橋脚は何れも2柱式ラーメン構造であり、各橋脚での左右各柱の形状、配筋条件、上部工重量は等しいとした。各橋脚柱の断面大要を図-2、3に示す。

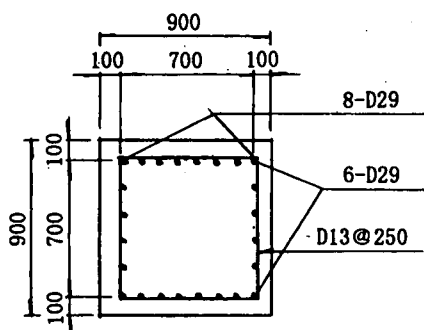


図-2 P1、P2、P5、P6 橋脚柱の断面大要図

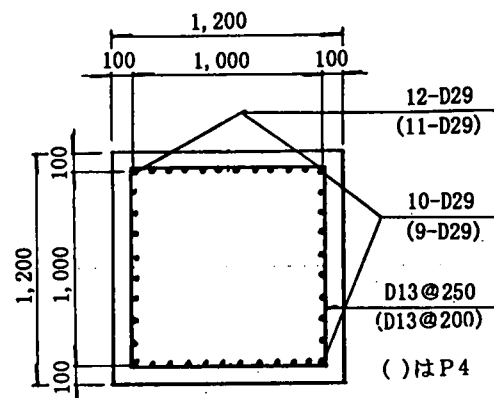


図-3 P3、P4 橋脚柱の断面大要図

橋脚に使用されているコンクリートは、その設計基準強度を $\sigma_{cs}=240\text{kgf/cm}^2$ 、許容曲げ圧縮応力度を $\sigma_{ca}=80\text{kgf/cm}^2$ とし、鉄筋は、その材質をSD30(SD295)、許容引張応力度を $\sigma_{sa}=1800\text{kgf/cm}^2$ とした。

地盤条件は、一般図中のP3~P4橋脚間に記されている柱状図から読みとり、全橋脚とも同じ地盤条件として扱うこととした。地盤は、第1層が層厚9.7mの粘性土で平均N値1.8、第2層が層厚5.8mの砂質土で平均N値15.2、第3層が層厚4.6mの粘性土で平均N値15.9、第4層が層厚2.6mの砂質土で平均N値36.3で構成されることから、その耐震設計上の基盤面を地表面より22.6m、地盤の特性値を $TG=0.55$ 秒、地盤種別をII種と推定した。

(2) 地震時安全性照査方針

各橋脚の地震時安全性は、平成2年版道路橋示方書に定める地震時保有水平耐力法により照査した。

照査に用いる橋脚柱高は、上下端が固定されているラーメン橋脚柱の柱上端に作用する水平力により発生する曲げモーメントが1本柱の場合のそれに比して1/2以下となることから、実橋脚高の1/2とした。なお、P4橋脚は、段落しがあることから、全橋脚高で地震時保有水平耐力照査を行った。

2-3 地震時安全性照査結果

橋脚柱の地震時安全性照査結果は表-2の通りである。

表-2 既設橋脚柱の地震時安全性照査結果

橋脚 No	橋軸方向		橋軸直角方向	
	破壊形態	安全性	破壊形態	安全性
P1	せん断破壊先行	×	せん断破壊先行	×
P2	せん断破壊先行	×	せん断破壊先行	×
P3	せん断破壊先行	×	せん断破壊先行	×
P4	曲げ破壊先行	×	せん断破壊先行	×
P5	せん断破壊先行	×	せん断破壊先行	×
P6	せん断破壊先行	×	せん断破壊先行	×

2-4 耐震補強方針

(1) 耐震補強全体方策の検討

P1~P3間およびP4~P6間を、耐震補強壁構造、ブレース(斜材)構造、橋脚柱巻立構造の各案により耐震補強する方法を検討した。

耐震補強壁構造案は、耐震壁により下部構造の剛性向上を目的とする案であるが、基礎と下部構造の重量

負担が大となること、高架橋下空間の有効利用が出来なくなること、および、経済性と工期、の点から不適であるとした。また、ブレース(斜材)構造案は、橋脚間に構築した斜材に地震力を負担させる構造であるが、大地震に対する計算法が未定であること、高架橋下空間の有効利用が悪くなること、および、経済性と工期、の点から不適であるとした。

橋脚柱巻立構造案は、橋脚柱の破壊形態をせん断破壊から曲げ破壊先行へ移行させ、柱基部の曲げ靱性能を向上させる案であり、高架橋下空間の有効利用が現在とほぼ同じであること、および、経済性と工期の点で優れていることから、巻立て工法と材料についての検討を十分行うことを前提として採用した。

(2) 耐震補強方針

耐震補強全体方策の検討結果を参考として、橋脚柱巻立補強工法は比較的大きい変位を発生する可能性が高いことから、上部工の落橋防止工法を併用することで、橋梁全体の耐震性を確保することとした。

落橋防止工法は、JR線に近接しているP3、P4橋脚へ落橋防止構造を付すことに施工上の制約があることから、橋面上からの施工が可能である床版連結工法と橋台桁掛り縁端拡幅工法とで構成した。

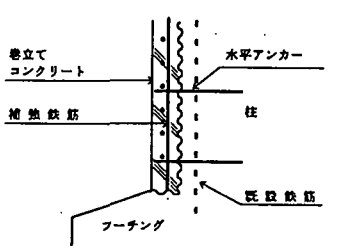
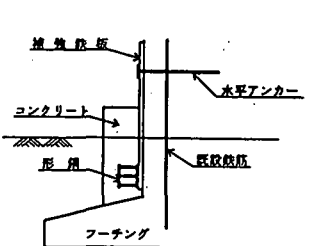
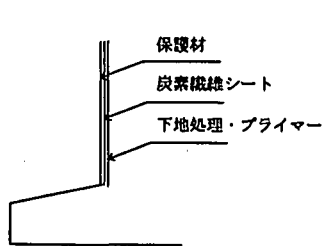
§ 3 橋脚の耐震補強工

3-1 橋脚耐震補強工の設計

(1) 補強工法の選定

橋脚の耐震補強方法は、原則として用いられているコンクリート巻立て工法が基礎への反力増加をもたらすと同時に側道および高架橋下空間を狭くすること、実績の多い鋼板巻立て工法がP3とP4橋脚ではJR線に近接しており足場および重機使用のための作業スペース確保が困難であること、また、根巻きコンクリートによる増厚が側道を狭くすること、工事期間が限られていること、等の理由により、表-3の橋脚柱の耐震補強工法比較表を基に、炭素繊維シート巻立て工法を採用することとした。

表-3 橋脚柱の耐震補強工法比較表

案	RC巻立て工法	鋼板巻立て工法	炭素繊維シート巻立て工法
概略図			
工法概要	最も標準的な橋脚耐震補強工法である。	建設省等の推奨する「鋼板による曲げ制御方式」の橋脚耐震補強工法である。	高強度・高弾性の炭素繊維シートを樹脂等を用いて縦・横に貼付し、巻付ける橋脚耐震補強工法である。
構造的性	コンクリート重量の増加がある。既設コンクリートとの界面の一体性に問題がある。柱寸法が大きくなる。	鋼板を鉄筋換算して構造計算を行う。現場溶接やエポキシ樹脂等充填などの信頼性に問題がある。	炭素繊維シートを鉄筋換算して構造計算を行う計算手法が確立されつつある。樹脂等の塗布状態を確認しつつ施工を進めるので接着度に信頼性がある。
施工性・供用性	本橋跨線橋部においては、線路との間が狭く、コンクリートの打設環境が充分ではない。	施工時にRC巻立て工法と同様の施工スペースを必要とする。施工中、常時、クレーン等の重機を必要とし、周辺交通の支障となる。	使用材料が小型・軽量であり、狭隙部での施工が容易である。
維持・管理性	RC造であり、維持管理が容易である。	鋼材の防食管理が必要である。また、鋼材の亜鉛メッキは経済性に乏しい。	材料は高耐久性である。耐衝撃性は、表面仕上げ材の選定で対応が可能である。
経済性	1. 0	1. 4	1. 4
工期	9. 0ヶ月	12. 0ヶ月	4. 0ヶ月
総合評価	経済性に優れるが、施工環境・構造上の制約が多く、不適である。	経済性に乏しく、また、施工環境および工期への対応性も悪く、不適である。	経済性には劣るが、施工環境および工期への対応性に優れ、最適案である。ただし、表面仕上げ材の検討が必要である。
	×	×	○

(2) 耐震補強後の地震時安全性照査結果

炭素繊維シート巻立て工法に使用した炭素繊維シートの特性値は、表-4の通りである。

橋脚柱鉛直方向は、不慮の曲げひび割れ発生防止、およびP4においては段落し部補強を目的として、繊維目付量200g/m²を1層貼付し、柱円周方向は、繊維目付量300g/m²を、P3、P4橋脚には3層、他の橋脚には2層貼付した。平成2年版道路橋示方書 V 耐震設計編に拠り実施した、耐震補強後の地震時安全性照査結果を表-5に示す。

表-4 炭素繊維シートの特性値

繊維目付量	g/m ²	200	300
ヤング係数	kgf/cm ²	2.35×10 ⁴	
引張強度	kgf/cm ²	35,000	
設計引張強度	kgf/cm ²	23,000	
設計付着強度	kgf/cm ²	4.5	
設計厚	mm/枚	0.0111	0.0167

表-5 耐震補強後の橋脚柱地震時安全性照査結果

橋脚番号	地震方向	P2		P3		P4		P5	
		橋軸方向	直角方向	橋軸方向	直角方向	橋軸方向	直角方向	橋軸方向	直角方向
	炭素繊維シート枚数 (枚)	2		3		3		2	
P-δ関係	比力荷重 P _c (tf)	22.368	22.194	62.076	61.972	20.968	53.040	21.459	21.292
	降伏荷重 P _y (tf)	69.513	68.006	181.903	181.034	56.056	140.856	64.904	63.520
	終局荷重 P _u (tf)	93.650	92.205	244.789	243.218	74.402	187.542	86.807	85.486
	比力変位 δ _c (cm)	0.067	0.067	0.033	0.033	0.390	0.059	0.088	0.088
	降伏変位 δ _y (cm)	0.500	0.498	0.237	0.237	2.618	0.380	0.624	0.621
	終局変位 δ _u (cm)	3.966	3.967	2.299	2.329	24.341	3.627	4.561	4.611
	せん断耐力 P _s (tf)	160.016	160.016	306.479	306.479	301.543	313.882	160.016	160.016
	破壊形態 P _s /P _u	1.71(曲げ)	1.74(曲げ)	1.25(曲げ)	1.26(曲げ)	4.05(曲げ)	1.67(曲げ)	1.84(曲げ)	1.87(曲げ)
	許容塑性率 μ	5.621	5.644	6.792	6.876	6.532	6.696	5.206	5.286
	等価固有周期 T _e (秒)	0.193	0.151	0.076	0.072	0.462	0.137	0.219	0.191
	設計水平震度 K _{hc}	0.850	0.804	0.700	0.700	0.850	0.778	0.850	0.850
	等価水平震度 K _{he}	0.266	0.251	0.197	0.196	0.245	0.221	0.280	0.270
	等価重量 W (tf)	131.168	79.443	133.376	123.313	122.429	170.999	131.268	94.468
	地震時慣性力 P _e (tf)	34.891	19.940	26.275	24.169	29.995	37.791	36.755	26.316
	地震時保有水平耐力 P _a (tf)	86.604	84.139	223.827	222.490	68.287	171.980	79.506	78.164
	耐力比 P _a /P _e	2.45	4.22	8.52	9.21	2.28	4.55	2.16	2.97
	判定	○	○	○	○	○	○	○	○

3-2 橋脚耐震補強工の施工

橋脚の耐震補強工施工順序を、落橋防止工等の施工と共に、図-4に示す。また、各工種の施工法大要は以下に述べる通りである。

(1) 仮設駐輪場整備工

施工箇所が、現在松戸市営の最寄り駅利用通勤客用駐輪場として使用されているため、駅隣接地に借地を行い整備した後、駐輪場を移転して工事に着手した。

(2) 鉄道防護柵設置工

P3、P4橋脚施工時に、既設の鉄道線路防護柵が支障となるので、JRとの協議を経てJR敷地内に仮設の線路防護柵を設置した後、既設防護柵を撤去し、橋脚施工終了後に現状へ復旧することとした。鉄道防護柵設置計画を図-5に示す。

(3) 掘削・土留め工

橋脚周りの舗装切断後、0.1m³バックホー、および人力による掘削土を2tダンプに積込み搬出した。線路に近接しているP3、P4橋脚は、ライナープレートを使用して土留め工を実施した。

(4) 足場組立工

掘削完了後、炭素繊維巻立工のため、枠組み、および単管パイプを使用して足場を組み立てた。足場組立工計画を図-6に示す。

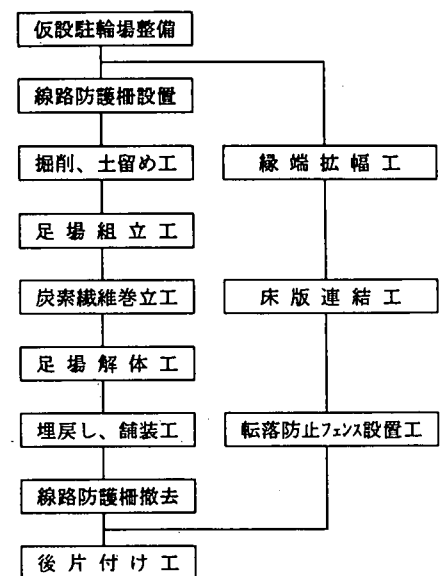


図-4 橋脚耐震補強工、施工順序

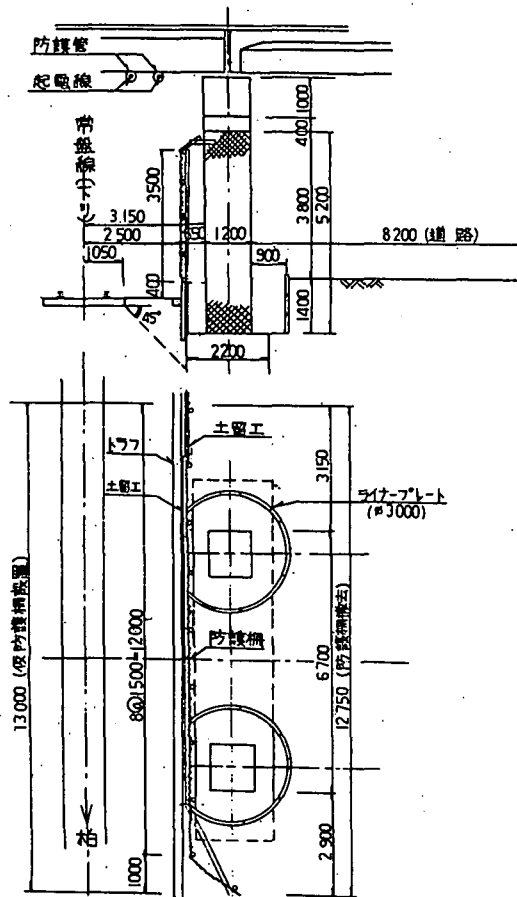


図-5 鉄道防護柵設置計画図

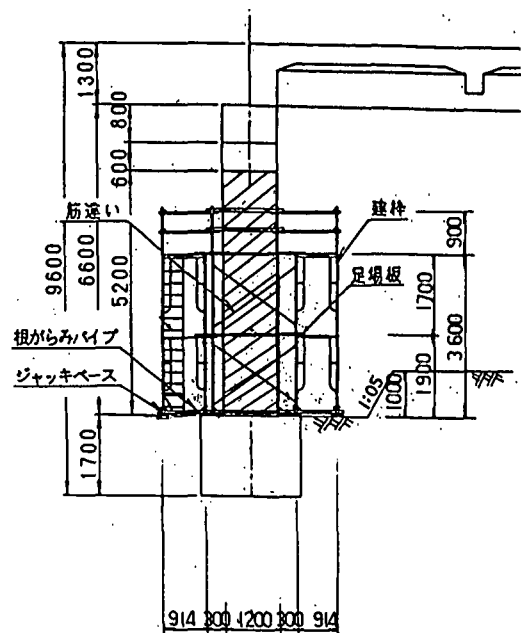


図-6 足場組立工計画図

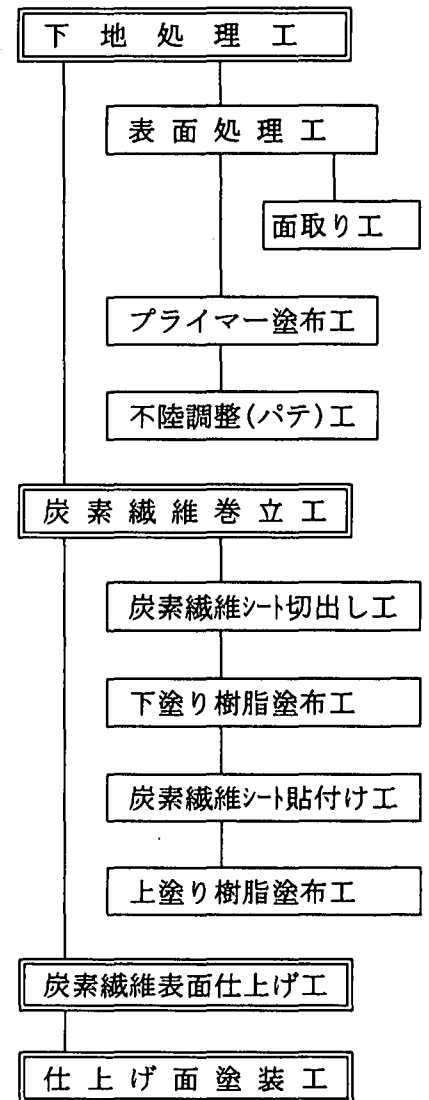


図-7 炭素繊維シート工施工順序

(5) 炭素繊維シート工

炭素繊維シート工の施工順序を、図-7 に示す。また、各工種の概要は以下の通りである。

1) 表面処理工

炭素繊維シートによる補強は、炭素繊維シートをコンクリート素地面に接着して構造物と一体化するので、コンクリート表面の劣化層、ゴミ、モルタル、塗装等の付着物、および鋭角的な段差を除去するために、ディスクサンダー等を用いて研磨した。また、柱隅角部はR=50mmにカッターおよびパテ等で曲面整形を行った。

2) プライマー塗布工

コンクリート表面の乾燥を確認ののち、可使時間内に使い切る量を所定配合で電動攪拌機により均一に混合した二液性エポキシ樹脂系プライマーをローラーで塗布した。なお、塗布量は $250\text{g}/\text{m}^2$ とし、原則として気温 5°C 以上および湿度 85% 以下の条件下で施工した。

3) 不陸調整(パテ)工

プライマーの指触乾燥確認後、可使時間内に使い切る量を所定配合で電動攪拌機により均一に混合した二液性エポキシ樹脂系パテを用いて全面塗布により柱表面を平滑に調整した。

4) 炭素繊維シート切出し工

炭素繊維シートは、その接着位置を現地墨出し後実測して所定長さに切出して、繊維を切断、折り曲げ等で傷つけないよう留意して巻き取り、保管した。

5) 下塗り含浸接着樹脂塗布工

パテ処理面の指触乾燥確認後、可使用時間内に使い切る量を所定配合で電動攪拌機により均一に混合した二液性エポキシ系含浸接着樹脂を、炭素繊維目付量200g/m²の場合は400g/m²、目付量300g/m²の場合は500g/m²を標準として、ローラーで均等に塗布した。

6) 炭素繊維シート貼付け工

下塗り含浸接着樹脂塗布後、炭素繊維シートを、振れたりホツレたりしないよう貼り付けて、脱泡ローラーを繊維方向に動かして接着面の空気を脱泡しながら圧着した。

7) 上塗り含浸接着樹脂塗布工

炭素繊維シート貼付後、30分程度放置して炭素繊維シートに下塗り含浸接着樹脂が充分含浸したことを確認し、かつ、樹脂の指触乾燥前に、炭素繊維シート上面に上塗り含浸接着樹脂を、目付量200g/m²の場合は200g/m²、目付量300g/m²の場合は300g/m²を標準として塗布した。

なお、これらの樹脂塗布作業は、原則として気温5℃以上および湿度85%以下の条件下で施工することとし、樹脂塗布面に結露が発生している場合は、ウェス等で乾拭きし、乾燥等の処置を行った後に実施した。

(6) 仕上げ工

上塗り含浸接着樹脂の初期硬化後、樹脂モルタル10mmをこて塗り2回で施工した。さらに、周辺との色調調和を目的として塗装を施した。

§ 4 上部工の落橋防止工

4-1 橋台桁座の縁端拡幅工

(1) 縁端拡幅工の設計

橋台での縁端拡幅は、床版連結により一体化した上部構造の地震時橋軸方向変位により橋桁端が橋台より落下することを防止する目的を持つものであり、床版連結工と連動して落橋防止装置として機能させることとした。

縁端拡幅部は、橋台支点に作用するRC桁の死荷重反力40tfに対してせん断と曲げに抵抗するものとし、RC桁の支間を対象とした桁掛り長を満足する拡幅長500mmとした。縁端拡幅部構造を図-8に示す。

(2) 縁端拡幅部の施工

橋台全面にD29アンカーを埋設し、鉄筋組立完了後、合板型枠組立を行い、コンクリートを打設した。コンクリート締固めは棒状バイブレーターを使用し入念に行い、コンクリート露出面を養生マットで覆い、急激な温度変化、乾燥、および荷重衝撃等の有害な影響を与えない様に養生した。

4-2 上部工の床版連結工

(1) 床版連結工の設計

床版連結部は、合成桁橋部死荷重反力150tfとラーメン橋部死荷重反力210tfの合計360tfが水平力として作用した場合に、伸縮目地連結部に新しく配置した鉄筋の応力度が $\sigma_{ss} = 1800\text{kgf/cm}^2$ 以下となるよう計画した。床版連結部構造を図-9に示す。

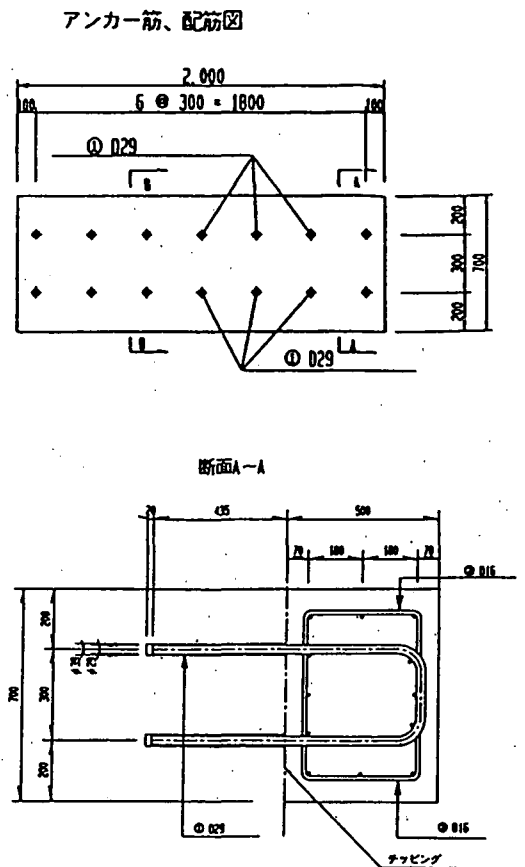


図-8 縁端拡幅部構造大要図

(2) 床版連結工の施工

厚50mmの橋面舗装を切断撤去して床版コンクリート t=100mmをブレーカーにてハツリ、鉄筋組立完了後超速硬コンクリートを打設した。コンクリート締固めは棒状バイブレーターを使用し入念に行い、打設後約3時間のコンクリート硬化を待って、密粒度アスファルト コンクリート t=50mmを施工した。

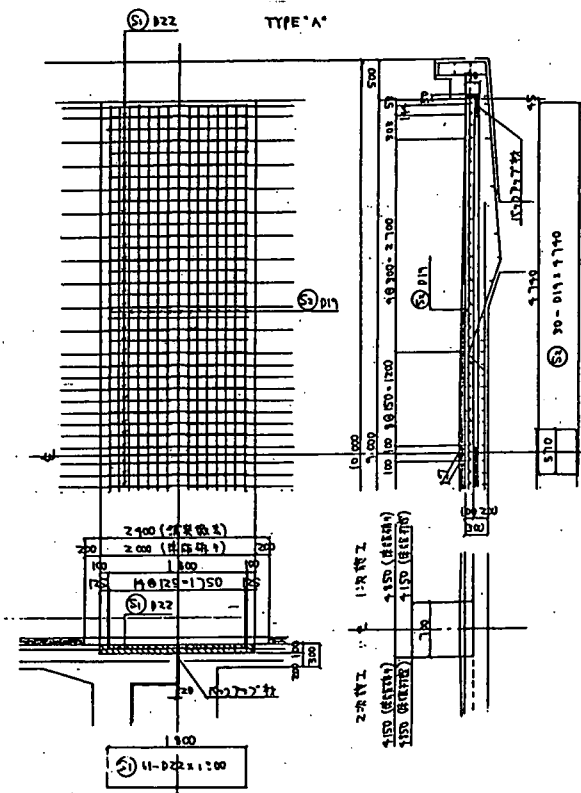


図-9 床版連結部構造大要図

表-6 主要工事数量および材料品質

工種	仕様・品質	数量	単位
炭素繊維巻立て工	(橋脚柱12本)		
借地整備・復旧		1.0	箇所
仮設		1.0	式
掘削		271.2	m ³
土留め	ライブレットφ3,000	3.0	m
埋戻し		256.8	m ³
舗装	t 50mm	96.2	m ²
足場組立撤去		375.0	m ²
下地処理		244.1	m ²
炭素繊維巻立	縦貼200g/m ² ×1層	244.1	m ²
	横貼300g/m ² ×2層	154.8	m ²
	横貼300g/m ² ×3層	89.3	m ²
表面仕上げ	樹脂モルタル t=10mm	244.1	m ²
仕上げ塗装		185.8	m ²
縁端拡幅工	(4箇所)		
アンカー		56.0	本
鉄筋加工組立	D16~29	0.555	t
型枠		12.4	m ²
コンクリート	21N-8-25	2.8	m ³
床版連結工	(5箇所)		
舗装・床版毀し	t=50+100mm	108.0	m ²
鉄筋加工組立	D19~22	3.269	t
コンクリート	超速硬コンクリート	9.0	m ³
橋面防水		108.0	m ²
表層仕上げ	t=50mm	108.0	m ²

§ 5 平賀橋、耐震補強工事総括

主要工事数量および材料品質を 表-6 に、実施工事工程を 表-7 に示す。

炭素繊維シートによる橋脚耐震補強は初めての施工であったが、周辺住民の方々や鉄道管理者であるJR東日本とのトラブルも無く、4ヶ月弱の約定工期内で工事を完了することが出来た。

本工事は、炭素繊維シートによる構造物の補強工法が、狭隘な箇所においては他の補強工法より短期間でかつ施工性に優れ、また、住宅近接部においては他の工法より低騒音、かつ第三者に対してより安全な工法であることを実感した工事であった。

表-7 実施工事工程表

工程	11月	平成9年12月					平成10年1月					平成10年2月		
	24-28	1-5	8-12	15-20	22-26	29-2	5-9	12-16	19-23	26-30	2-6	9-13	16-20	
計画・準備工	準	仮												
A1 橋台縁端拡幅工														
P1 橋脚補強工														
P2 橋脚補強工														
P3 橋脚補強工														
P4 橋脚補強工														
P5 橋脚補強工														
P6 橋脚補強工														
A2 橋台縁端拡幅工														
後片付け工														

凡例 準:準備、仮:仮設、ア:アンカー埋設、鉄:鉄筋組立、型:型枠組立、コ:コンクリート打設、養生:養生、解:型枠解体、防:防護柵設置、掘:掘削、足:足場組立、下:下地処理、炭素:炭素繊維シート貼付、仕:仕上げ、解:足場解体、埋:埋戻し、舗:舗装、床:床版連結、駐輪場:駐輪場整備・復旧