

Y型鉄筋コンクリート橋脚の構造検討および設計法

大阪第二建設部 設計課 吉川 実
大阪管理部 保全第二課 大西 久巳
大阪第二建設部 設計課 木代 穰

要 約

高架橋の計画において、周囲の景観と調和させ美観に配慮した橋脚形状が採用される機会が近年少くない。ここでとりあげる橋脚はY型の基本形状をもつ鉄筋コンクリート橋脚であり、圧迫感を軽減するためにはり部を曲線で構成するとともに、橋脚天端に円弧状の切欠きを設けている。さらにPC上部工断面との連続性を保持するように橋脚のプロポーシオンが定められている。

このY型形状を橋脚に採用する際に設計・施工上問題となるのは、切欠き部に発生が予想される使用時のひびわれの抑制、終局耐力の確保、複雑すぎることにない配筋仕様など、橋脚はり部の補強方法である。本論文は、切欠き部を有する曲線はり部に着目し、有限要素解析と1/10縮尺の模型載荷実験を通じた検討に基づいて、実務レベルでの合理的な設計手法を確立すべく、その設計法と構造細目を決定した経緯をとりまとめたものである。今後、同形式の橋脚を計画・設計する上での参考となることが期待される。

ま え が き

大阪池田線（延伸部）川西工区の高架橋では、景観を考慮してY型の基本形状をもつ鉄筋コンクリート橋脚が採用された。これは当該区間が住宅地に近接し、また猪名川沿いを通ることから、スリムでやわらかな印象を与え、圧迫感の少ないY型橋脚が有利と判断されたためである。

Y型橋脚を採用するにあたり、

- ・切欠きを有する鉄筋コンクリートはりの設計手法がかならずしも確立されていないこと
- ・はり天端中央の切欠き底部に応力集中によるひびわれが発生しやすいと考えられること

- ・鉄筋の配置、加工が複雑になりすぎないように、配筋補強方法に配慮する必要があること
- などの設計・施工上の問題点について検討が必要と考えられた。

そこで、まず設計荷重作用時を対象とした2次元FEM解析の応力分布を参考に基本配筋仕様を設定し、これをもとに1/10縮尺模型による載荷実験を実施した。そして切欠き底部の引張ひびわれ発生状況や耐荷性状などの実験結果の考察を通じて最終的な設計手法と構造細目を決定した。

本論文は、以上の解析・実験・設計にわたる一連の検討経緯をとりまとめて報告するものである。

1. 構造概要

検討の対象としたのは当区間において標準的なY型形状を有するVP-21 橋脚である(図-1)。

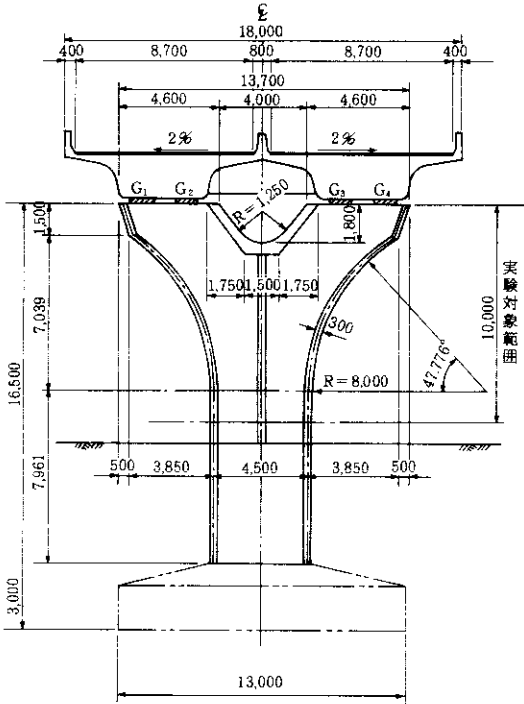


図-1 Y型橋脚基本形状

対象橋脚は2連のPC箱桁橋をそれぞれ2点の支承で支持する構造であり、死荷重(D)と活荷重(L)の上部工反力比は3.7:1と、死荷重の占める割合が比較的高い構造になっている。

使用材料は以下のとおりである。

- ・コンクリート: $\sigma_{ck} = 270\text{kgf/cm}^2$
- ・鉄筋: $\sigma_{sy} = 3500\text{kgf/cm}^2$ (SD35)

2. FEM解析による基本配筋仕様の検討

2-1 FEM解析結果

基本配筋の設定にあたっては、まず全断面有効を仮定したコンクリート部材の2次元FEM弾性解析により、はり部の応力分布性状を把握した。

主応力分布の一例を図-2に示す(設計荷重時)。FEM解析結果をまとめると以下ようになる。

- (1) はりのU形切欠き部表面に沿って引張主応力が分布し、切欠き底部に向けて応力集中が認められる。その最大値は死荷重時 44kgf/cm^2 、設計荷重時 56kgf/cm^2 とかなり大きな引張応力度である。
- (2) 切欠き底部から下方には鉛直方向引張応力度が比較的深部まで分布しており、その最大値は死荷重時 8kgf/cm^2 、設計荷重時 10kgf/cm^2 である。
- (3) せん断力によるはり部の斜め引張応力度はそれほど顕著ではなく、Y型橋脚としての形状特性からコーベル状の応力分布性状を示している。

2-2 基本配筋仕様

- (1) はり部の引張主鉄筋

図-2に示した主応力の分布状態から図-3の

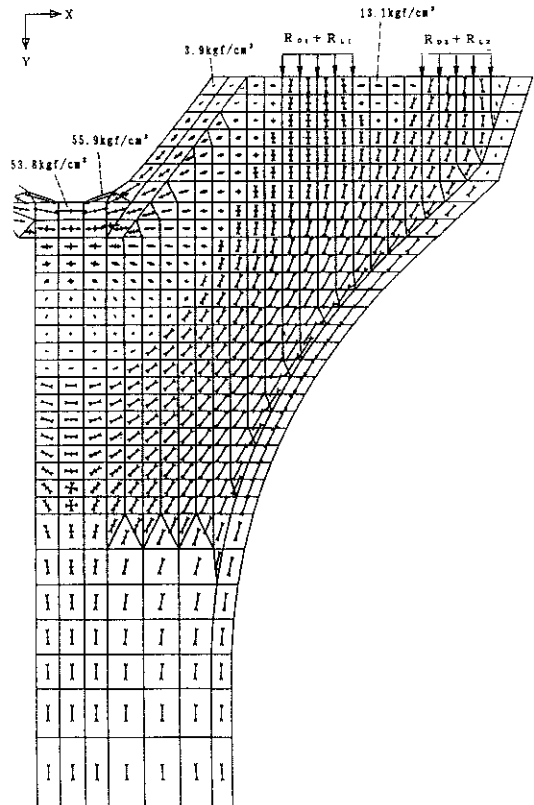


図-2 FEM解析による主応力分布図
(設計荷重作用時)

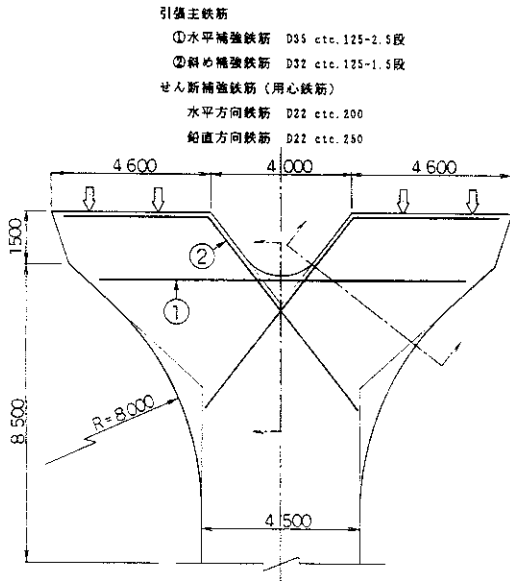


図-3 実験に用いた基本配筋仕様

水平補強鉄筋①、斜め補強鉄筋②をはり部の引張主鉄筋とみなすことにした。これらの補強鉄筋量はFEM解析による各着目断面の引張応力度の合力Tに見合う鉄筋量として以下のように定めた。

$$A_{sreq} = T / \sigma_{st} \quad (1)$$

ここに

- A_{sreq} : 必要補強鉄筋量 (cm²)
- T : 引張応力度の合力 (kgf)
- σ_{st} : 鉄筋の許容応力度 (kgf/cm²)
- 死荷重時 (D) 1,200 kgf/cm²
- 設計荷重時 (D+L) 1,800 kgf/cm²

なお死荷重時の鉄筋の許容応力度は、ひびわれ制御の観点¹⁾から上記のように設定した。

(2) 切欠き底部の鉛直補強鉄筋

切欠き底部から下方に分布する鉛直方向引張応力度に対しては鉛直鉄筋を積極的に配置して補強することも考えられるが、コンクリートの引張強度で対処できることを期待し、原則として補強鉄筋を配置しないことにした。ただし、実験で鉛直応力による有意な損傷がみられればその発生応力度に応じた補強を考えることにした。

(3) せん断補強鉄筋

橋脚はり部を「はり部材」として捉えた場合、

せん断補強鉄筋として最小鉄筋量 A_w 以上のスターラップを配置することになる。しかしながら本橋脚はFEM解析結果にみられるように「コーベル部材」として扱うことが妥当であると判断され、とくにはり部材の規定に縛られる必要はないと考えられる。このときコーベル側面には用心鉄筋を配置する必要があるが、本橋脚はり部は標準的なコーベルではなく大きな切欠き部を有しているため、この用心鉄筋量の設定は明確ではない。ここでは、はりの外表面全体を囲む水平・鉛直方向鉄筋量をそれぞれ仮定し、全体の終局耐力を実験的に確認することにした。

3. 模型載荷実験²⁾

3-1 実験目的

切欠き部をもつ片持梁ないしはコーベルとしての配筋方法の妥当性を実験的に検証することを目的とし、以下の点に着目して模型実験を行った。

(1) ひびわれ発生前の応力状態

FEM弾性解析結果と試験体のひびわれ発生前の応力状態を比較し、解析の妥当性を確認する。

(2) 設計荷重時でのひびわれと鉄筋の応力状態

切欠き底部での引張ひびわれに着目し、死荷重、設計荷重に相当する荷重載荷時におけるひびわれの発生状況と鉄筋の応力状態を把握し、補強鉄筋配置の妥当性を検討する。

(3) 終局耐力と破壊モード

コーベル状の性状を示すと予想されるはり部全体の終局耐力と破壊モードを把握し、その補強について検討する。

3-2 試験体と実験ケース

試験体はプロトタイプ¹⁾の1/10縮尺模型とし、モルタルと異形3mm鉄筋とを用いて製作した。

配筋については、模型とプロトタイプの各断面の鉄筋量の比が1:100となる条件を満たすようにした。またモルタルはプロトタイプ¹⁾の設計基準強度と同程度の圧縮強度が実験時材令に発現するように配合を定めた。

実験ケースとしては、切欠き部水平補強鉄筋量をパラメータとした2種類の配筋方法を設定するとともに、切欠き部表面に鋼板接着した場合の効果を調べるために、以下の3ケースとした。

CASE 1：基本ケース（2-2の設定にしたがって配筋）

CASE 2：切欠き部水平補強鉄筋量をCASE 1の1.5倍としたケース

CASE 3：CASE 1の配筋を基本とし、さらに切欠き部上面に鋼板接着を施したケース（ $t=0.6\text{mm}$ 、RC床版補修用接着剤“シーカデュア315”使用、鋼板接着後2.5日経過後に実験実施）

3-3 荷重方法と計測項目

図-4に示すように、試験体を天地反転した状

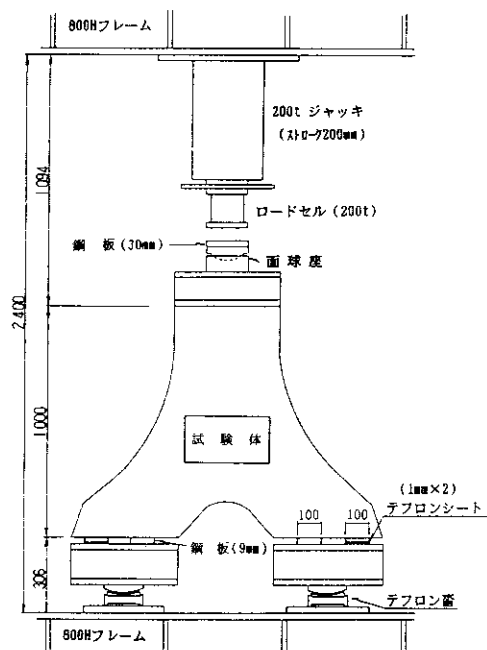


図-4 荷重方法

態で荷重装置に設置し、本来の橋脚天端を支承側、橋脚下端を載荷側として、載荷部から200tf油圧ジャッキにより載荷した。試験体支承部では実橋の支承条件を再現するために合計4点支持とし、

それぞれテフロンによる線支承とスライド支承を組合せたものとした。計測項目を表-1に示す。

表-1 計測項目および計測方法
(1試験体あたり)

項目	記号	使用機器	
荷重	P	ロードセル (200tf)	
変位	D1 ~ D13	変位計	
鉄ひずみ	斜め筋	SS1 ~ SS18	ひずみゲージ
	水平筋	S1 ~ S18	
コンクリート表面ひずみ	単軸 C1-1~C1-12 2軸 (V, H) C2-1~C2-9 3軸 (V, D, H) C3-1~C3-4	箱型ひずみゲージ	
ひびわれ幅	初期ひびわれ部 切欠き底部	クラックスケール 簡易顕微鏡 (0.05)	

荷重パターンについては、プロトタイプ的设计荷重が橋脚全体で1874tfであり、これに対応する模型での荷重が $P_{D+L} = 18.7\text{tf}$ となることを考慮してつぎのように定めた。すなわち、荷重ステップの増分荷重を $\Delta P = 1.5\text{tf}$ とし、初期ひびわれ発生 (P_{cr}) 時、実橋から換算した死荷重 ($P_D = 14.7\text{tf}$) 時、設計荷重 ($P_{D+L} = 18.7\text{tf}$) 作用時、設計荷重の2倍および3倍荷重載荷時の各時点に着目して、除荷/再載荷を繰返す載荷パターンとした。

3-4 実験結果

実験結果の一覧を表-2に示す。また結果の一例として、基本タイプ (CASE 1) の荷重-変位曲線、ひびわれ分布の状態を図-5、6に示す。

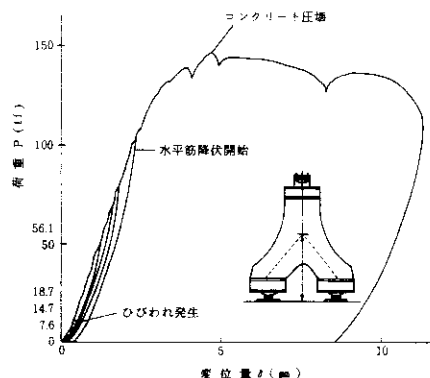


図-5 荷重-変位曲線 (CASE 1)

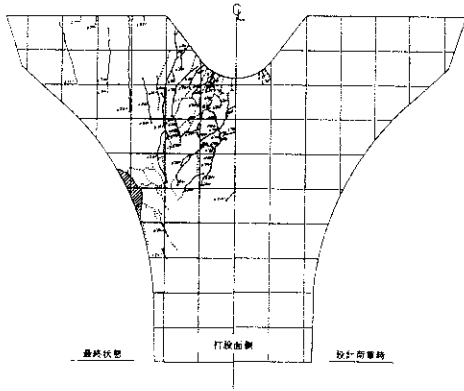


図-6 ひびわれ分布図 (CASE 1)

3-4-1 ひびわれ発生前の応力状態

各ケースについて、ひびわれ発生前のコンクリート表面での応力分布状態をFEM解析結果と比較したところ、FEM解析は主応力の流れを定性的によく表わしていた。

表-3に切欠き底部中央におけるコンクリート

表-3 切欠き底部中央におけるコンクリート引張応力度の比較

	死荷重時 (P ₀)		設計荷重時 (P _{0+L})	
	水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向
FEM解析	43.1	7.9	53.8	9.9
CASE 1	30.3	8.4	38.5	10.7
CASE 2	28.2	6.8	35.8	8.7
CASE 3	23.8	6.7	30.3	8.5

(単位: kgf/cm²)
 ※実験値(CASE1~3)はひびわれ発生以前のコンクリートひずみから換算して求めた値

引張応力度を比較して示す。同表によると、CASE 1では水平方向引張応力度はFEM解析結果の約70%であった。これは切欠き底部近傍に多段配置した水平補強鉄筋の影響によるものと考えられる。また鉛直方向応力度はFEM解析結果の約105%であった。実験時のひずみレベルが小さいために測定誤差を含んでいる可能性もあるが、FEM解析によりほぼ把握できるものといえよう。

CASE 2、3についてもCASE 1とほぼ同様の状況であるが、どちらのケースもCASE 1よりも応力度が小さくなっていた。

3-4-2 ひびわれ発生時の状況

CASE 1、2では死荷重時よりも低い荷重でいずれも切欠き底部肩口(円弧と直線の接合部付近)にひびわれが発生した。水平補強鉄筋量の多いCASE 2の方がCASE 1よりも低い荷重でひびわれが発生し(表-2参照)、さらに切欠き底部中央のコンクリート引張応力度もCASE 1よりもむしろ大きかったことが注目される。これは水平補強鉄筋が1.5倍に増えたことで、ひびわれ発生による応力再配分効果が少なくなったことに一因があると考えられる。鋼板接着したCASE 3では他のケースよりもひびわれ発生荷重は高かったが、設計荷重時の切欠き底部中央のコンクリート応力度は、ひびわれ発生による応力再配分が生じていたCASE 1より大きかった。

なお、FEM解析で指摘した切欠き底部中央の鉛直方向引張応力度についてはいずれのケースでも対応するひびわれが発生しなかったことから、コンクリート引張強度で抵抗することが可能であるものと判断した。

3-4-3 設計荷重時付近の状況

CASE 1の場合、死荷重時から設計荷重時にかけて表面ひびわれの進展はみられず、ひびわれ幅のみが拡大した。また切欠き部表面の部材厚方向へのひびわれの進展は、死荷重時で部材厚の約10%、設計荷重時で約20%であり、いずれも部材を貫通していなかった。この状況はCASE 2の場合も同様であった。このことから、発生したひびわれはこれらの荷重レベルでは局部的なものであり、水平補強鉄筋の配置によりひびわれが抑制されたことのほか、切欠き底部付近における乾燥収縮等の影響も一部考えられる。

つぎに水平補強鉄筋位置での最大ひびわれ幅は、予想されるように死荷重時、設計荷重時ともCASE 2の方がCASE 1よりも小さくなった(表-2参照)。プロトタイプに換算して推定した場合、いずれもコンクリート標準示方書¹⁾7章 使用限界状態に示された一般の環境での許容ひびわれ幅 0.425mmの制限を満足する結果であった。

表-2 実験結果の一覧

	試 験 体			
	CASE1	CASE2	CASE3	
	基本ケース	1.5×CASE1	CASE1+鋼板	
ひびわれ発生荷重 P_{cr} [tf]	8.7	7.7	17.0	
鉄筋降伏開始時荷重 P_s [tf]	97.4	109.9	92.9	
最大荷重 P_{max} [tf]	147.0	169.3	142.2	
ひびわれ幅 ¹⁾	死荷重時 $P_D = 14.7\text{tf}$	0.025	0.01	—
w [mm]	設計荷重時 $P_{des} = 18.7\text{tf}$	0.03	0.01	0.01
鉄筋応力度 ²⁾	死荷重時 $P_D = 14.7\text{tf}$	247	317	175
σ_s [kgf/cm ²]	設計荷重時 $P_{des} = 18.7\text{tf}$	397	392	227
切欠き部接着鋼板剥離時の荷重 [tf]	—	—	34.5	

1) 水平補強鉄筋位置での最大ひびわれ幅 2) 切欠き近傍の補強鉄筋各ゲージの最大値

水平補強鉄筋、斜め補強鉄筋の最大応力度は表-2に示すように、いずれのケースとも2-2で想定したよりもかなり低い値を示した。これは、発生したひびわれが局部的なものであって、鉄筋ひずみゲージ位置の深さまで進展しなかったか、あるいは微細なものであったためと推定される。

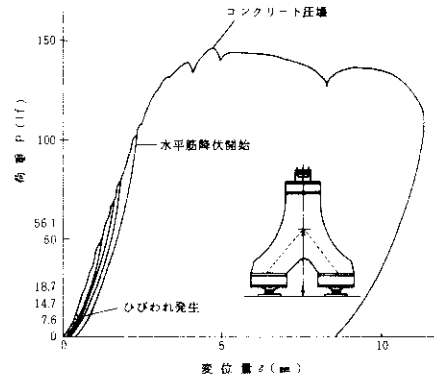
CASE3の場合、死荷重時にはひびわれは発生せず、設計荷重時には鋼板接着の効果によりひびわれ幅、最大鉄筋応力度ともCASE1よりも小さかった。しかしそれ以上の荷重レベルではひびわれ分散性がよくなく、とくに接着鋼板の剥離後はひびわれが偏在することによりCASE1よりも最大ひびわれ幅が大きくなった。

3-4-4 終局耐力と破壊モード

いずれのケースの破壊モードもほぼ同様であった。すなわち、設計荷重以降のかなり高い荷重レベルで、まず水平補強鉄筋が切欠き底部近傍から降伏し始め、荷重の増加とともに順次降伏に至り、斜め補強鉄筋も水平補強鉄筋との交差点で降伏した。その後、最大荷重に至って試験体側面においてコンクリートが圧壊したが、圧壊後も比較的じん性的な挙動を示し、コンクリートが剥離しながら徐々に荷重が低下していった(図-5)。

は鉄筋量の増加(水平補強鉄筋+斜め補強鉄筋の合計で33%)に比べて小さく、多段配置による水平補強鉄筋の増加は十分にその効果を発揮しているとはいえない結果となった。

CASE3では鉄筋降伏時荷重、最大荷重とも



CASE1より5%程度低めの値であった。このように切欠き部表面に接着した鋼板は終局耐力には有効でなく、むしろひびわれを遍在させることで終局耐力を低下させる結果となった。

3-5 実験結果のまとめ

- (1) 弾性FEM解析結果は、ひびわれ発生前のコンクリートの主応力の流れを定性的にはよく示している。定量的には、切欠き底部に配置された水平補強鉄筋を考慮していないため、この部分の水平方向引張応力度を大きめに評価する傾向にある。
- (2) 死荷重時・設計荷重時の基本タイプ(CASE1)のひびわれは切欠き底部肩口に発生したが、部材を貫通せずに局部的なものであり、プロトタイプに換算したひびわれ幅も許容ひびわれ幅を満足すると推定される。
- (3) 基本タイプの終局耐力は設計荷重に対して十分大きく、最大荷重後もじん性的な挙動を示す。
- (4) 以上より、設計荷重時のひびわれ抑制と終局耐力の確保に関して、基本タイプの鉄筋配置で十分対処できるものといえる。なお、切欠き底部中央の鉛直方向引張応力度に対する補強鉄筋の必要性は少ないといえる。ただし、切欠き底部肩口の局部ひびわれ発生に関しては配筋上なんらかの配慮が必要となる。
- (5) 基本タイプの補強鉄筋を1.5倍に増やした場合(CASE2)、ひびわれ幅は小さくなるが、

設計荷重時の鉄筋応力度は同程度であり、多段配置された鉄筋すべてが有効には寄与していない。
 (6) 基本タイプに鋼板接着した場合(CASE 3)、設計荷重レベルでのひびわれ抑制効果は認められるものの、ひびわれ発生後のひびわれの分散性がよくなく、降伏荷重、最大荷重は小さくなった。

4. 設計手法と構造細目

以上の解析的・実験的検討を経て、最終的な設計方法と構造細目を以下のように決定し、この工区のY型橋脚の設計実務に適用した。

4-1 設計断面と設計方法

はり各部の設計断面と設計方法を図-7に示す。

- ①-①断面 FEM解析に基づき式(1)により鉄筋量を算定
(引張領域を横切る鉄筋をすべて有効とする)
- ②-②断面 コーベルとして設計(さらに $3/2H$ の範囲には
コーベルとしての必要鉄筋量の50%を側面水平
用心鉄筋として配置する)
- ③-③断面 曲げを受けるはりとして設計
- ④-④断面 せん断力を受けるはりとして設計
- ⑤-⑤断面 曲げと軸方向力を受けるはりとして設計
- ⑥-⑥断面 せん断力を受けるはりとして設計

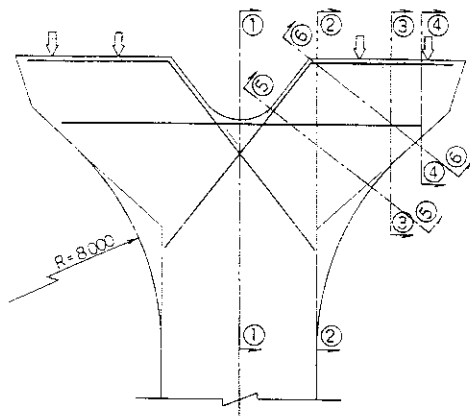


図-7 はり部の設計断面と設計方法

4-2 構造細目と配筋要領

(1) 水平方向補強鉄筋ははり側面までのばして定着する。また斜め補強鉄筋はFEM解析により求められた圧縮領域に定着長 35ϕ 以上で定着する。

(2) かぶりが大きい切欠き底部肩口に発生が予想されるひびわれに対処するため、部材表面近くにD16 ctc. 250の補強鉄筋を別途配置する。

(3) はり側面の曲線部には、実験でみられたコンクリートの圧壊による剝離および橋軸直角方向地震時の鉄筋のはらみだしに対処する目的で、曲線の半径方向に補強鉄筋を配置する。

あとがき

本論文では、FEM解析と模型載荷実験に基づいて、切欠き部を有するY型鉄筋コンクリート橋脚の実務レベルでの合理的な設計手法を確立すべく各種の検討を行った。これを通じて、この形式の橋脚の設計について一定の成果が得られたものと考えられる。川西工区に限らずこのようなタイプの橋脚形状が採用される機会も増えてくると予想されるが、今後同様な形式の鉄筋コンクリート橋脚を計画・設計する上での一助となれば幸いである。

なお、この検討にあたっては技術審議会・コンクリート構造分科会の各委員の適切なお指導をいただいたほか、関係各位の協力を得た。記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編、pp. 75-79、昭和61年10月。
- 2) 吉川・大西・西林・友永：鉄筋コンクリートY型橋脚の模型載荷実験、土木学会第44回年次学術講演会概要集、平成2年10月。