

3. 研究成果

3.1 鋼製橋脚の新耐震設計WGの研究成果

3.1.1 活動概要

(1) 活動目的

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、数多くの橋脚が倒壊・損傷等の被害を受けた。鋼製橋脚においては、角型柱の補剛板や鋼管柱の座屈、変形や割れ等の被害を受けた橋脚や倒壊に至った角型橋脚もあり、設計法の見直しが必要となった。

一方、地震発生後、建設省を始め各関連機関において、復旧のための基準や新耐震設計の基準・資料等が発行され、鋼製橋脚の設計も従来とは異なった方法で行われることとなった。兵庫県南部地震以降に発行された主な耐震基準・設計資料は下記のとおりである。

- | | | | |
|----|---------|--|--------|
| 1) | 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係る仕様 | 建設省 |
| 2) | 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係る仕様」 の準用に関する参考資料 | 日本道路協会 |
| 3) | 平成8年12月 | 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編 | 日本道路協会 |
| 4) | 平成9年 3月 | 道路橋の耐震設計に関する資料 | 日本道路協会 |
| 5) | 平成9年 8月 | 既設道路橋の耐震補強に関する参考資料 | 日本道路協会 |

上記3)の「道路橋示方書V耐震設計編」で地震後の鋼製橋脚の耐震設計法については、一応の集約を見た感がある。4)の「道路橋の耐震設計に関する資料」には、改訂された道路橋示方書の準用が円滑に行われるように、設計の流れや計算例が資料としてまとめられている。

道路橋示方書の改訂では、鋼製橋脚は従来の震度法による耐震設計に加えて、地震時保有水平耐力法により耐震設計することとなった。また、設計地震力としては従来の設計地震力に加えて内陸直下型地震として兵庫県南部地震を考慮することとなった。ここで、当然のことながら、鋼製橋脚の設計においては従来の弾性設計を越えて、弾塑性域での設計を行うこととなる。特にコンクリートを充填しない橋脚においては、大きな地震力の作用を受けた場合の応答や抵抗メカニズム、じん性の評価等について未解明の部分が多いため、非線形動的解析により耐震性を判断することとなった。

非線形動的解析は、まったく新しい設計法ではないが、従来の震度法のための設計に慣れた橋梁設計実務者にとっては、取り組みにくい性格の代物である。そこで、本WGでは「コンクリートを充填しない橋脚」を対象に、設計実務者の立場から新設計方法の内容の理解を深めることを活動の目的とした。

(2) 活動内容

上記4)「道路橋の耐震設計に関する資料」の内、“4.2 コンクリートを充填しない鋼製橋脚を用いた場合の設計計算例”の内容について、本資料を実際に運用する実務者の立場として疑問事項・質問事項を抽出し、これら疑問・質問事項の解明を行うこととした。

疑問事項・質問事項は、本WGのメンバーのみならず、耐震・免震研究部会の部会員にアンケートを行い、集約した。

疑問・質問事項に対しては、主に既往の文献を調査・検討し、これらの解明に努め、最終的にはQ&Aの形でまとめることにした。

3.1.2 「道路橋の耐震設計に関する資料：

コンクリートを充填しない鋼製橋脚を用いた場合の設計計算例」の概要

(1) 資料の全体概要

「道路橋の耐震設計に関する資料(平成9年3月, (社)日本道路協会)」は、平成8年版道路橋橋示方書に準じて新設橋梁の耐震設計を行う場合の設計の流れや計算例を一般的な橋梁条件を対象にまとめた資料で、新道路橋示方書が円滑に運用されることを目的としている。

本資料の全体目次を下記に示すが、この中の“4. 鋼製橋脚を用いた場合の設計計算例”が、本WGの研究対象である。

道路橋の耐震設計に関する資料 目次

1. 本資料の利用に際して
2. 鉄筋コンクリート橋脚を用いた場合の設計計算例
3. 鉄筋コンクリートラーメン橋脚の設計計算例
4. 鋼製橋脚を用いた場合の設計計算例
5. 免震設計を用いた場合の設計計算例
6. 地震時に不安定となる地盤がある場合の設計計算例
7. ケーソン基礎の設計計算例
8. 鋼管矢板基礎の設計計算例
9. PHC杭基礎の設計計算例
10. 時刻歴応答解析に用いる標準地震入力例

更に4項の細目次は下記のとおりであり、本WGの研究対象は“4.2 コンクリートを充填しない鋼製橋脚を用いた場合の設計計算例”である。

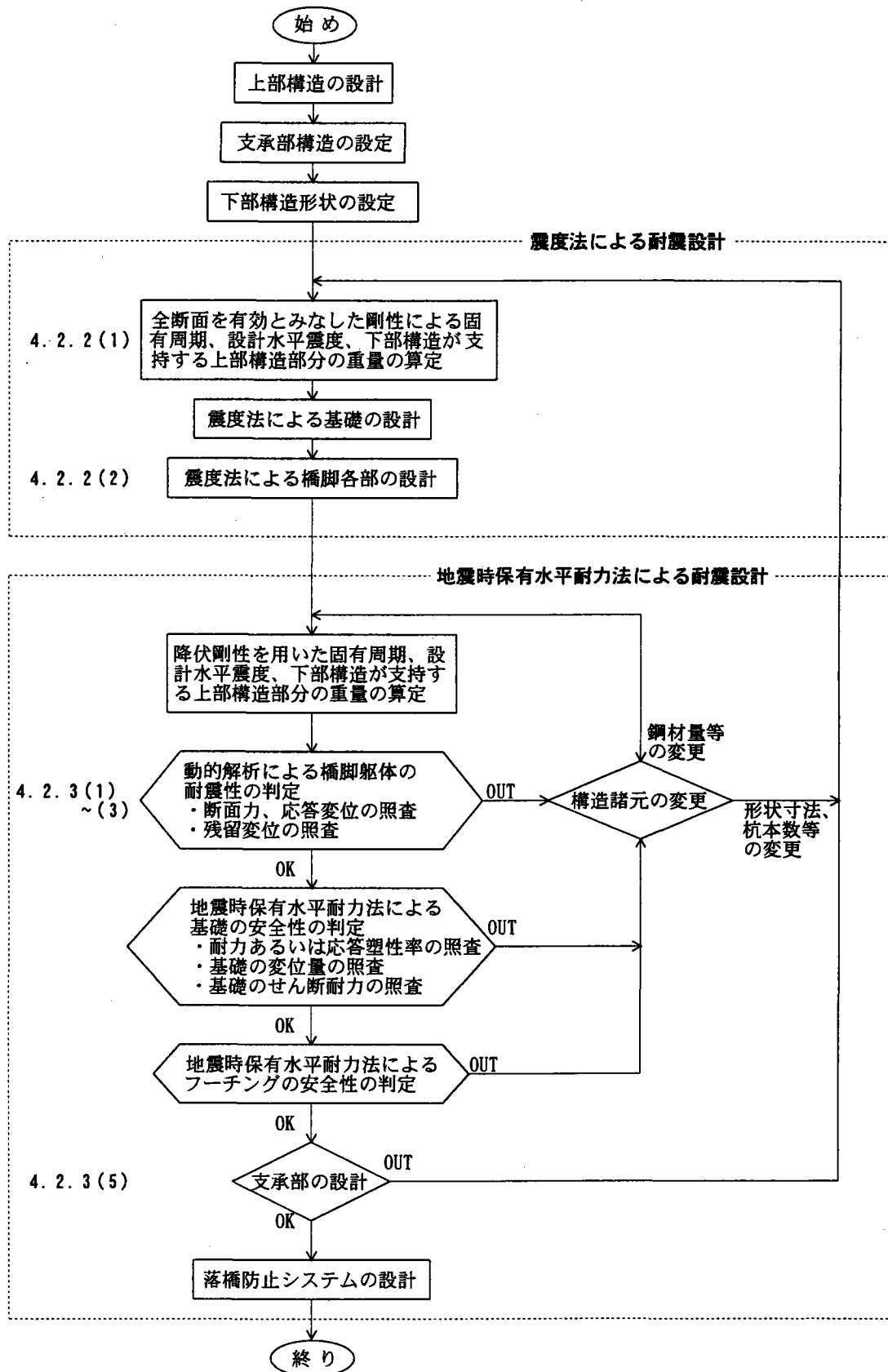
4. 鋼製橋脚を用いた場合の設計計算例
- 4.1 コンクリートを充填した鋼製橋脚を用いた場合の設計計算例
- 4.1.1 設計条件
- 4.1.2 震度法による耐震設計
- 4.1.3 地震時保有水平耐力法による耐震設計
- 4.1.4 支承部の設計
- 4.1.5 落橋防止システムの設計
- 4.2 コンクリートを充填しない鋼製橋脚を用いた場合の設計計算例
- 4.2.1 設計条件
- 4.2.1 震度法による耐震設計
- 4.2.2 動的解析による橋脚の耐震性の判定

(2) コンクリートを充填しない鋼製橋脚の設計概要

コンクリートを充填しない鋼製橋脚の設計計算の流れを図-3.1.1に示す。図中の4.2.2(1)、4.2.2(2)、4.2.3(1)～(3)までが本WGの研究対象となる。また、資料が対象としている橋梁一般図および橋脚一般図を図-3.1.2及び図-3.1.3に示す。

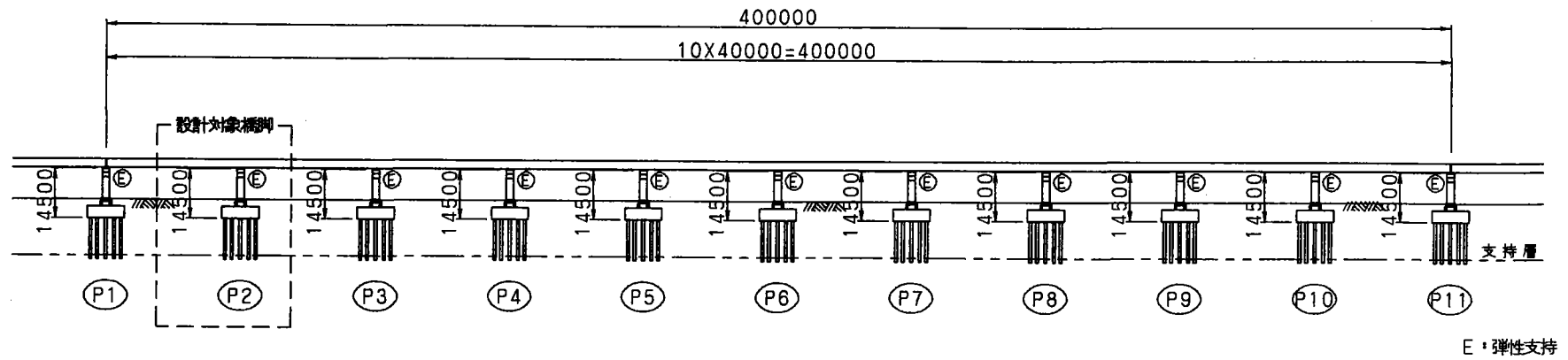
(3) 震度法による耐震設計

図-3.1.4に示す解析モデルで、固有周期・設計震度・設計断面力を算出して、橋脚の断面を決定している。

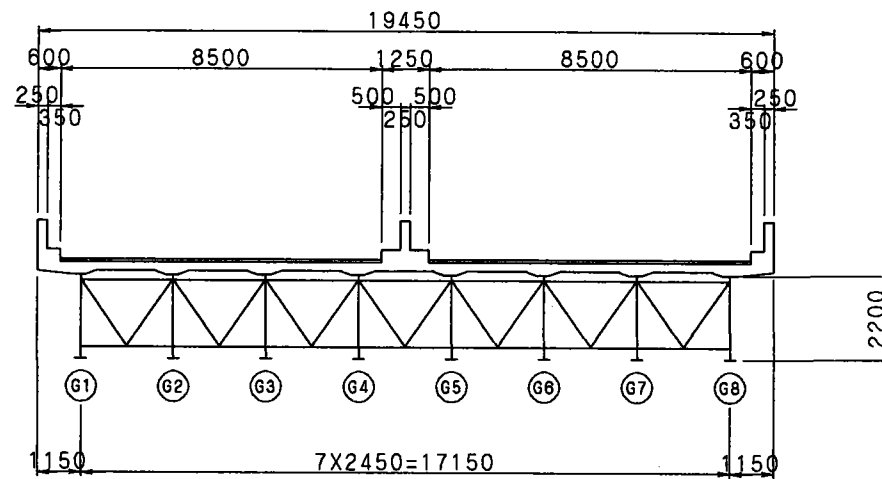


注) 図中の数字は本章の節番号を示す。

図-3.1.1 コンクリートを充填しない鋼製橋脚を用いた場合の設計計算の流れ
(資料の図-4.2.1を引用)

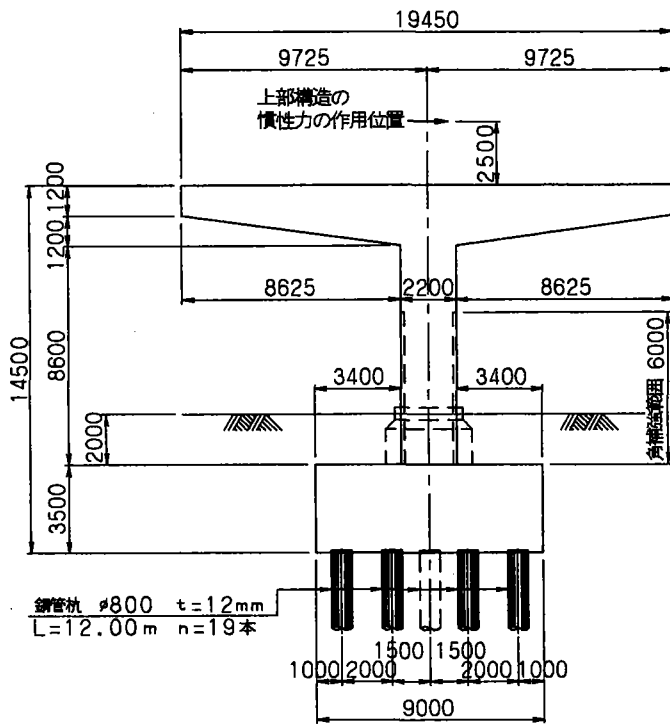


(a) 側面図

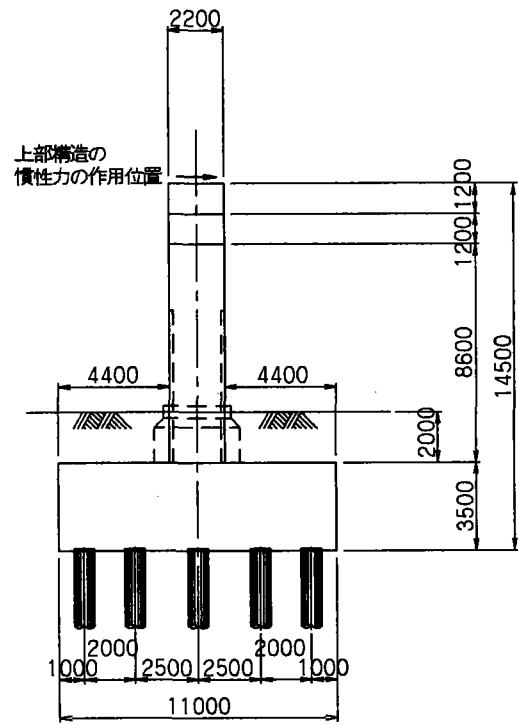


(b) 上部構造断面図

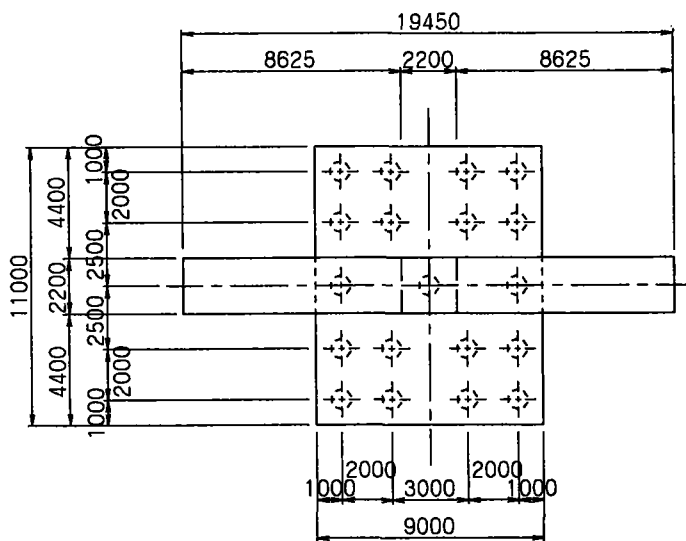
図-3.1.2 設計対象橋梁(資料の図-4.2.2を引用)



(a) 正面図

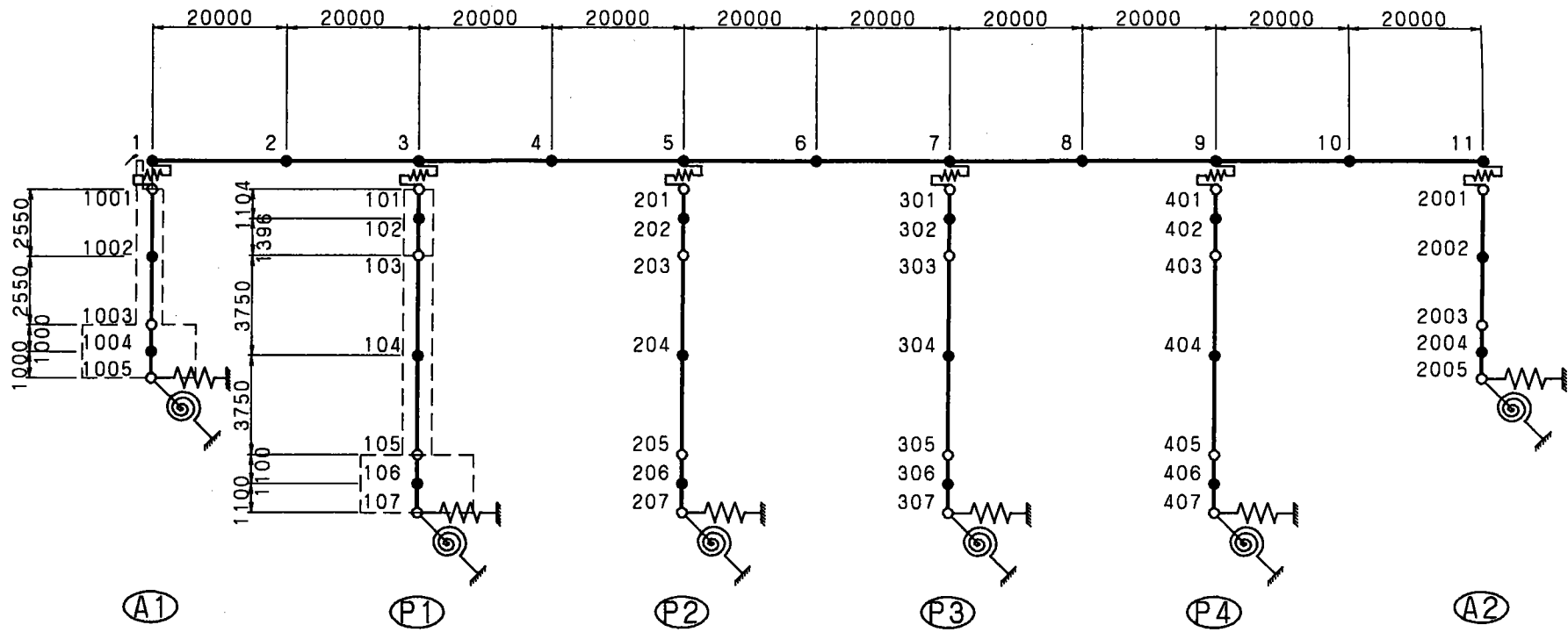


(b) 側面図



(c) 正面図

図-3.1.3 設計対象橋脚(P2橋脚) (資料の図-4.2.3を引用)



●: 重量に相当する力を作用させる節点
 ○: 断面が変化する節点
 注1) 節点1と1001, 3と101, 5と201, 7と301, 9と401, 11と2001は、同じ座標位置を示す。
 注2) 弾性支承部のモデルは、X方向をバネ支持、Z方向を拘束、Y軸回りを自由としている。

図-3.1.4 骨組構造モデル(橋軸方向) (資料の図-2.2.1)

(4) 動的解析による耐震性の判定

動的解析による耐震性の判定においては、震度法により決定された図-3.1.5に示す橋脚断面を用いて、図-3.1.6に示す解析モデルで非線形動的解析を行っている。

橋脚断面は道路橋示方書V耐震設計編にある“じん性の向上が期待できる断面”として、角部にコーナープレートを当てて補強した構造としている。

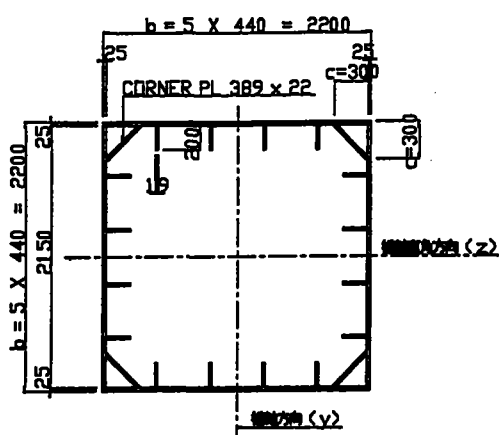
解析は上部構造部分、橋脚およびフーチングの重量を考慮し、ゴム支承、橋脚および地盤のばね定数をモデル化して行われている。また、橋脚の曲げ変形を橋脚基部の回転ばね K_p の変形で評価し、回転ばねより上の部材は剛部材としている。回転ばね K_p は図-3.1.7に示す角補強を有する橋脚の曲げモーメントと回転角の関係から設定している。この復元力モデルも角補強構造の場合の復元力モデルとして道路橋示方書V耐震設計編に示されている。

ただし、この復元力モデルの採用および解析モデルについて、資料中に下記のような注意事項が記載されている。

- 1) 橋脚の軸力比が大きい場合や橋脚高が高く細長比が大きい場合には、じん性が小さくなる傾向にあることから、既存の実験結果等を参考にして適宜許容値を低減し、その影響を考慮する必要がある。
- 2) 橋脚高が高くなると変形しやすくなり、本設計計算例に示す簡易なモデルではなく、上下部構造全体の挙動を表現できるような適切なモデル化を検討するとともに、構造系全体で耐震性を発揮できるように設計し、橋脚の応答が過大にならないように断面に配慮するのが望ましい。

時刻歴応答解析に考慮する地震動は、タイプIとタイプIIの標準加速度応答スペクトルに近い特性を有するように、既往の強震記録を振動数に応じて振幅調整した加速度波形としている。また、耐震性の判定は3つの波形に対する動的解析結果の平均値で行っている。これも道路橋示方書V耐震設計編の記述のとおりである。

耐震性は、橋脚の最大応答変位が応答の許容変位以下であることで判定している。橋脚の最大応答変位は橋脚基部の回転ばねの最大回転角に橋脚高さを掛けた値とし、許容変位はタイプIでは降伏変位の4倍($4\sigma_y$)、タイプIIでは降伏変位の5倍($5\sigma_y$)である。また、資料では、震度法で決定した断面では橋脚の最大応答変位が応答の許容変位を越えたため、断面変更を行っている。



断面積

$$A = 3125 \text{ cm}^2$$

断面2次モーメント

$$I_y = 2.382 \times 10^7 \text{ cm}^4$$

$$I_z = 2.382 \times 10^7 \text{ cm}^4$$

断面係数

$$Z_y = 2.1655 \times 10^5 \text{ cm}^3$$

$$Z_z = 2.1655 \times 10^5 \text{ cm}^3$$

(全断面有効とする)

図-3.1.5 断面形状および断面諸元(資料の図-4.2.5を引用)

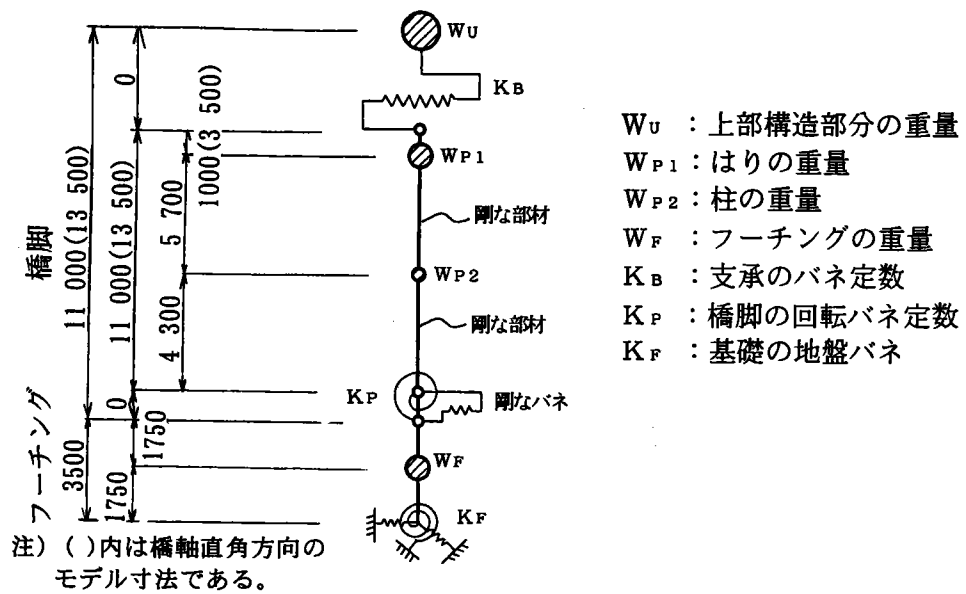


図-3.1.6 動的解析モデル(資料の図-4.2.6を引用)

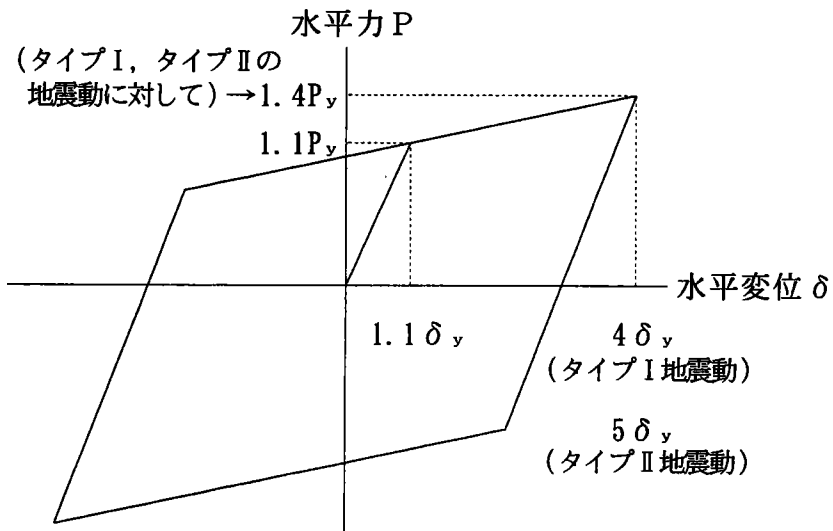


図-3.1.7 角補強を有する橋脚の復元力モデル(資料の図-4.2.7を引用)

表-3.1.1 動的解析モデルの諸元(資料の表-4.2.7を引用)

| | | | | 橋軸方向 | 橋軸直角方向 |
|-----|---------------|----------|---------|----------------------|----------------------|
| 重 量 | 上部構造 | W_U | tf | 944 | 957 |
| | はり | W_{P1} | tf | 100 | 100 |
| | 柱 | W_{P2} | tf | 26 | 26 |
| | フーチング | W_F | tf | 866 | 866 |
| 部 材 | ゴム支承 | K_B | tf/m | 4099 | 4099 |
| | 橋脚 | K_P | tfm/rad | 図-4.2.8 | 図-4.2.9 |
| 剛 性 | 地盤バネ K_F | A_{ss} | tf/m | 3.492×10^5 | 3.492×10^5 |
| | | A_{sr} | tf/rad | -3.717×10^5 | -3.717×10^5 |
| | | A_{rr} | tfm/rad | 6.613×10^6 | 4.650×10^6 |

3.1.3 疑問・質問事項の集約結果

「道路橋の耐震設計に関する資料（平成9年3月（社）日本道路協会）：4.2コンクリートを充填しない鋼製橋脚を用いた場合の設計計算例」についての疑問・質問を本研究部会員にアンケート形式でヒアリングをした結果、24項目が集まった。これらの疑問・質問項目を下記の4つに分類し、集約した。

- ・震度法による耐震設計について
- ・動的解析モデルについて
- ・動的解析結果について
- ・その他の脚柱の設計について

以下に内容を記載する。なお、「3.1.4 アンケート回答集」に収録した項目には、項目末に*印を付けた。

(1) 震度法による耐震設計について

- (a) 固有周期を算出する解析モデルにおいて図-2.2.1(2-8頁)の骨組みモデルでは2種類の地盤ばねの図となっているが、表-4.1.6(4-7頁)にはAss、Asr、Ars、Arrの4種類の地盤ばね定数が提示されている。実際の解析においてこれらをどのようにモデル化すればよいのか。*
- (b) 固有周期を算出する解析モデルにおいてRC床版・壁高欄の剛性は上部工の剛性として評価するのか。また、非合成桁・合成桁により評価の有無を変えるのか。*
- (c) 震度法の設計の角補強断面計算(4-56頁)において、角補強材を有効としているが、現場継手部などで不連続となるケースでも有効としてよいのか。
また逆に、現場継手部・横リブ・ダイヤ部で角補強材が不連続とならないためにはどのような構造にすればよいのか。

(2) 動的解析モデルについて

- (d) 「コンクリートを充填しない鋼製橋脚を用いた場合の設計計算の流れ」(4-51頁)のなかで、“全断面を有効とみなした剛性”と“降伏剛性”とあるが、両者の違いは何か。*
- (e) 動的解析モデル：図-4.2.6(4-59頁)において、支承のばね定数はどのように算出するのか。算定式を提示願いたい。*
- (f) 動的解析モデル：図-4.2.6(4-59頁)において、橋脚の回転ばね定数は”角補強を有する橋脚断面”の場合のみ復元力モデルとして提示されているが、他の断面形式を採用する場合はどうしたらよいのか。（角部を円弧状とした断面、縦リブを密に配置した断面、円形断面等）*
- (g) 動的解析モデル：図-4.2.6(4-59頁)において、基礎の地盤ばね定数は道示IV編10.6および10.7に従って算出される(4-6頁)わけであるが、具体的に算出手順を提示願いたい。*
- (h) 動的解析モデル：図4.2.6(4-59頁)においてフーチングの極慣性モーメントは考慮しなくてよいのか。
- (i) 動的解析モデル：図4.2.6(4-59頁)において基礎の地盤ばねが考慮されている。震度法の設計における脚柱基部断面力の算出や保有水平耐力設計(コンクリート充填)における保有水平耐力の算出には基礎の地盤ばねは考慮されていない。また動的解析結果の最大水平変位の判定においても基礎の変形は含まれていない。
動的解析モデルに基礎の地盤ばねをモデル化する理由がわからない。

- (j) 復元力モデルの設定にあたっては、”軸力比が大きい場合や橋脚高が高く細長比が大きい場合には適宜許容値を低減し、その影響を考慮する必要がある”(4-58頁下から10行目)とあるが、資料または道示に提示されている復元力モデルが適用できる軸力比および細長比はどの程度か。また、適用範囲を越えた場合には許容値をどのように低減して復元力モデルを設定したらよいのか。*
- (k) 橋脚高が高くなると資料に提示されている簡易な解析モデルではなく、適切なモデル化を検討すること(4-58頁下から6行目)とあるが、適切なモデル化とは具体的にどのようなものか。*
- (l) 復元力モデルの計算(4-60頁)において、 $P-\delta \rightarrow M-\theta$ に変換する際に $\theta y = \delta y / h$ とあるが、車両衝突用の中埋めコンクリートが充填されている場合に問題はないか。(中埋め天端と基部とのどちらが先に降伏するかにより異なると考えられる)*
- (m) 減衰定数は道示V編(解6.2.1)式により算出した1次モードの等価減衰定数を用いた(4-62頁上から2行目)とあるが、(解6.2.1)は行列式で表示されており具体的な算出手順がわからない。

(3) 動的解析結果について

- (n) 時刻歴応答解析に考慮する地震動は既往の強震記録をタイプIおよびIIの各々に対して3つ程度使用するわけであるが、強震記録のデジタルデータを入手するには、どうしたらよいのか。*
- (o) 時刻歴応答解析に考慮する地震動は、タイプIおよびタイプIIの標準加速度応答スペクトルに近い特性を有するように、既往の強震記録を振動数に応じて振幅調整する(4-62頁上から10行目)とあるが、具体的にどのようなデータをどのように調整するのか。*
- (p) 耐震性の判定において、”3つの波形に対する動的解析結果の平均値で行った”(4-62頁)とあるが、なぜ平均値をとるのか。*
- (q) 残留変位の照査(4-66頁)において、設計例のような残留変位は振動の途中で塑性域に入っても最終的に振り戻されて結局0の点に戻ることがある。このときの残留変位は0でよいのか。また、他に残留変位の取り方はあるのか。
- (r) 角補強照査(4-66頁)において、保有水平耐力照査後、動的解析をおこなった場合、動的解析では時刻歴での最大曲げモーメントが計算されるが、角補強直上の断面の降伏水平耐力 $P_{ys} = M_y / (h - h_c)$ を計算するときの M_y は保有水平耐力法で計算された M_y を使用するのか、動的解析で求めた最大曲げモーメントを使用するのか。
- (s) 市販の動的解析ソフトについて、同じモデルを扱っても応答値が多自由度系だと10%程度の相違があると聞いている。その要因は収束計算過程で変位に着目するのか、荷重に着目するのかの相違によるものだとも聞いている。耐震設計の実務者としてどのように考えたらよいのか。

(4) その他の脚柱の設計について

- (t) 資料においてはT型1本柱の橋脚を対象としているが、門型ラーメンや複雑な構造をした橋脚はどのように扱えばよいのか。*
- (u) 一般的に都市部の鋼製橋脚では、車両衝突による変形防止のためにコンクリートを中埋めすることが多い。この場合は”コンクリートを充填した鋼製橋脚”として設計するのか。”コンクリートを充填しない橋脚”にコンクリートを中埋めすることは許されないのか。*

- (v) 既設の橋脚に角補強をする場合、縦リブの間隔が狭くて”角補強による占有幅 $2c$ が全幅 b の25%程度以上”確保できない場合がある。(4-56頁)この場合に角補強を行うと、どのような影響がでるのか。または、どう対処すべきか。*
- (w) 4-58頁6～8行目に”タイプⅡの地震動による橋脚の最大応答変位が応答変位の許容値を上回ったため断面を変更した”とあり、断面積 $A=2,506\rightarrow 3,125\text{cm}$ と25%UPになっているが、柱部の重量は26tのままを使用している。微少なので無視しているのか。また、このときの具体的な設計経緯や動解モデルの固有値解析結果も示して欲しい。
- (x) 4-60・61頁において、降伏モーメント M_y を1.1, 1.4倍した値と復元モデル図の値が一致しないのは何故か。

3.1.4 Q & A 集

前項「3.1.3 疑問・質問事項の集約結果」のうち、設計実務者として知見があった方が良いと思われる事項、今後設計を進める上で問題となりそうな事項を抽出して、回答集を作成した。回答の作成に当たっては、主に既往の文献の調査を行い、ワーキングメンバー独自の意見や考えはなるべく排除した。

従って、設計を行う上で特に支障が無いと思われる事項((m)(r)(s))、ワーキングメンバーの意見や考えのみの回答となる事項((h)(i)(q))、資料の誤記と思われる事項((w)(x))は割愛した。

以降に回答集を示す。

分類1. 震度法による耐震設計において

(a) 骨組モデルのばね定数

Q. 固有周期を算出する解析モデルにおいて、図-2.2.1(2-8頁)の骨組モデルでは2種類の地盤ばねの図となっているが、表-4.1.6(4-7頁)にはAss、Asr、Ars、Arrの4種類の地盤ばね定数が提示されている。実際の解析においてこれらをどのようにモデル化すればよいのか。

A :

4つのばね定数は、各々下記の地盤ばね定数を表しています。

Ass : 水平方向ばね定数 (tf/m)

Asr : 水平力による回転ばね定数 (tf/rad)

Ars : 曲げモーメントによる水平方向ばね定数 (tf・m/m)

Arr : 回転ばね定数 (tf・m/rad)

Asrは単位角度の回転変位を与える水平力を示し、Arsは単位長さの水平変位を与える曲げモーメントを示している連成ばね定数です。

計算においては、下記のマトリックスとして取り扱います。

$$\begin{bmatrix} H \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ass & Asr \\ Ars & Arr \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ \theta \end{bmatrix}$$

各バネ定数の具体的な算出方法は、「分類2. 動的解析モデル(g)」をご参照下さい。

分類1. 震度法による耐震設計において

(b) 上部工剛性

Q：固有周期を算出する解析モデルにおいてRC床版・壁高欄の剛性は上部工の剛性として評価するのか。また、非合成桁・合成桁により評価の有無を変えるのか。

A：

床版に関しては、次のような参考例があります。

「日本道路公団 設計要領第二集」¹⁾によれば、「2. 震度法による耐震設計」の項目に、「上部工の剛性は、床版を含めて全断面有効として算出する」との記述があります。また、その解説には、「地震時において床版はけたと一体となって挙動することから、床版は合成げた、非合成げたにかかわらず全断面有効として上部構造剛性を算出してよい」とあります。

さらに、同基準の地震時保有水平耐力法による耐震設計の「3-5上部構造」の項目にも同様の記述があります。ただし、この項目では、上部構造を全断面有効として計算した断面力が降伏耐力を越えた場合には、床版のひび割れを考慮した降伏剛性を用いて再計算するとあります。

具体的な計算例としましては、「道路橋の耐震設計計算例（山海堂）」²⁾があります。

壁高欄に関しましては、具体的な例を示すことが出来ませんが、「道路橋の耐震設計計算例（山海堂）」では考慮していないようです。この理由としては、壁高欄構造は単位長さ毎に目地が入っており、上部工全体挙動としての応力が伝達されないためと思われませんが、明確な記述はありません。

参考文献

- 1) 日本道路公団：設計要領第二集，平成10年7月
- 2) 川島一彦他：道路橋の耐震設計計算例，山海堂，平成6年5月

分類2. 動的解析モデルについて

(d) 降伏剛性

Q：「コンクリートを充填しない鋼製橋脚を用いた場合の設計計算の流れ」(4-51頁)のなかで、“全断面を有効とみなした剛性”と“降伏剛性”とあるが、両者の違いは何か。

A：

「道路橋示方書・同解説V耐震設計編¹⁾ 3.3.2固有周期の算定方法(3)」に下記のような記述があります。

一固有周期の算出にあたっては、構造部材に生じる変形の大きさに見合った剛性を用いるとともに、原則として基礎地盤の変形の影響を考慮するものとする。 —

更に同解説(3)の1)に下記のような記述があります。

一橋脚の剛性は、震度法による耐震設計では橋脚の全断面を有効とみなして算出される剛性を、地震時保有水平耐力法による耐震設計では橋脚の降伏剛性を用いる。ここで、降伏剛性は、橋脚の曲げ変形による降伏時の割線剛性 K_y をいい、橋脚の降伏耐力 P_y と降伏変位 δ_y の比 ($K_y = P_y / \delta_y$) により求める。これは、一般に橋の振動応答の中では、橋脚に生じる塑性ヒンジが主たる非線形要因であることから、この影響を降伏剛性として取り入れることとしたものである。(以下略) —

よって、“全断面を有効とみなした剛性”と“降伏剛性”の違いは、弾性係数を割線弾性係数に代えることと理解してよいでしょう。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，平成8年12月

分類2. 動的解析モデルについて

(e) 支承のばね定数

Q. 動的解析モデル：図-4.2.6(4-59頁)において、支承のばね定数はどのように算出するのか。算定式を提示願いたい。

A :

ゴム支承の水平ばね定数 K_s は、道路橋支承便覧¹⁾3.6.1「ゴム支承の機能」に下記のとおり記載されております。

$$K_s = \frac{G \cdot A'}{\sum t e}$$

ここに、 G : せん断弾性係数 $G=8, 10, 12 \text{ kgf/cm}^2$
 A' : ゴム支承の製品寸法により求めた支圧面積 cm^2
 $\sum t e$: 弾性ゴムの総厚 cm

ゴムの材質 天然ゴム(NR)
 クロロプレンゴム(CR)

参考文献

1) 日本道路協会：道路橋支承便覧、平成3年7月

分類2. 動的解析モデルについて

(f) 橋脚断面の復元力モデル

Q. 動的解析モデル：図-4.2.6(4-59頁)において、橋脚の回転ばね定数は”角補強を有する橋脚断面”の場合のみ復元力モデルとして提示されているが、他の断面形式を採用する場合はどうしたらよいのか。（角部を円弧状とした断面、縦リブを密に配置した断面、円形断面等）

A :

道路橋示方書（V耐震設計編10.3）では、「非線形性を考慮した動的解析に用いる鋼製橋脚の弾塑性挙動を表す諸数値は、同等の構造細目を有する供試体の繰り返しの影響を考慮した載荷実験データに基づいて定めることを原則とする。」とあります。

したがって、角補強を有する橋脚断面以外の鋼製橋脚を施工する際は、載荷実験が必要となります。

しかしながら、載荷試験には多くの時間と費用が必要となるため、類似断面の研究成果がある場合にはそれらの結果を参考とするのが望ましいと思われま

具体的参考事例としては、鋼製橋脚の耐震設計法に関する共同研究プロジェクト¹⁾（建設省土木研究所、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、名古屋高速道路公団、鋼材倶楽部、日本橋梁建設協会）があります。

共同研究プロジェクトの対象断面形式は以下のようになっております。

矩形基本断面／矩形コンパクト断面／矩形縦リブ高剛性断面／矩形角補強断面
矩形マルチセル断面／八角形断面／コーナーR断面／円形基本断面
円形コンパクト断面／円形縦リブ補強断面

また、参考とする際の注意事項としては次のようなことがあります。①に関しては、諸条件の相関を考慮した復元特性に関する推定式を利用する方法があります。²⁾

- ① 実験断面と施工断面の諸条件（座屈パラメータ 例えば幅厚比、細長比、軸力比等）の相違に留意すること。
- ② 単橋脚構造を対象としていること。

参考文献

- 1) 日本橋梁建設協会：鋼製橋脚の耐震設計マニュアル，平成10年11月
同上：鋼製橋脚の耐震設計マニュアル（資料編），平成10年11月
（共同研究プロジェクトの成果をコンパクトにまとめたものです。）
- 2) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研究WG
：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術，平成8年7月

分類 2. 動的解析モデルについて

(g) 地盤のばね定数

Q. 図-4.2.6(4-59頁)において、基礎の地盤ばね定数は道示IV編 10.6 および 10.7 に従って算出される(4-6頁)わけであるが、具体的に算出手順を提示願いたい。

A :

動的解析に使用される地盤のばね定数は道示V耐震設計編に規定される地盤のせん断弾性波速度 V_{SD} および地盤反力係数の基準値 k_{H0} 、 k_{V0} を用いて道示IV下部構造編に規定されている方法に従って K_v 、 $K_1 \sim K_4$ 、 A_{ss} 、 A_{sr} 、 A_{rs} 、 A_{rr} を算出します。以下に算出フローを示します。

1. N_i : 標準貫入試験による i 番目の地層の平均 N 値 (入力データ) の測定
2. V_{si} (i 番目の地層の平均せん断波速度) の算出¹⁾ * 道示V式 (3.6.2)
3. V_{SDi} (地盤ばねの算出に用いる i 番目の地層の平均せん断波速度) の算出
* 道示V (解 3.3.13)
4. G_D (地盤の動的せん断変形係数) の算出 * 道示V (解 3.3.12)
 E_D (地盤の動的変形係数) の算出 * 道示V (解 3.3.11)
なお、この式で使用される地盤の動的ポアソン比 ν は地盤、地下水位の位置等で異なる (道示V3.3.2解説(3)2) 参照)。
5. k_{H0} (水平方向地盤反力係数の基準値) の算出 * 道示V (解 3.3.10)
 k_{V0} (鉛直方向地盤反力係数の基準値) の算出 * 道示V (解 3.3.11)
 k_H (水平方向地盤反力係数) の算出 * 道示IV (解 7.6.4)
ただし、この式で使用される k_{H0} は上記で算出したものを用いる。
 B_H (荷重作用方向に直交する基礎の換算載荷幅) の算出 * 道示IV (表-解 7.6.2)
 β (杭の特性値) の算出 * 道示IV (表-解 7.6.2)
なお、このルーチンは繰り返し計算となる。
6. K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 (杭軸直角方向のばね定数) の算出 * 道示IV (表-解 10.6.1)
7. K_{vp} (杭軸方向のばね定数) の算出 * 道示IV (解 10.6.1)
ただし、この式に使用される a は以下の2通りの算出方法がある。
① 既往の載荷試験に基づく推定法 : 道示IV (解 10.6.2) (杭の種類により異なる。)
② 土質試験の結果による推定法 : 道示IV (解 10.6.3)
ただし、 k_v (杭先端地盤の鉛直方向地盤反力係数) と C_s (杭と周辺地盤のすべり係数) を土質試験によって推定しなければならない。
8. A_{ss} (道示IVでは A_{xx})、 A_{sr} ($A_{x\alpha}$)、 A_{rs} ($A_{\alpha x}$)、 A_{rr} ($A_{\alpha\alpha}$) の算出
* 道示IV (解 10.7.2)

なお、計算例は「道路橋の耐震設計計算例 (山海堂)」¹⁾ に掲載されております。その中には 5. で行わなければならない繰り返し計算の回避の仕方も載っております。

参考文献

- 1) 川島一彦他 : 道路橋の耐震設計計算例, 山海堂, 平成 6 年 5 月

分類2. 動的解析モデルについて

(j) 軸力比と細長比の影響

Q：復元力モデルの設定にあたっては、“軸力比が大きい場合や橋脚高が高く細長比が大きい場合には適宜許容値を低減し、その影響を考慮する必要がある”（4-58頁下から10行目）とあるが、資料または道示に提示されている復元力モデルが適用できる軸力比及び細長比はどの程度か。また、適用範囲を超えた場合には許容値をどのように低減して復元力モデルを設定したらよいのか

A：

道路橋示方書では角補強の復元力モデルの許容水平変位をタイプⅠ地震動、タイプⅡ地震動それぞれに対して $4\delta_y$ 、 $5\delta_y$ としています。

この許容水平変位を適用して良い軸力比・細長比の範囲を明確に記載した文献はありませんが、6者共同研究¹⁾における角補強構造の実験モデルでは、軸力比は0.129～0.207、細長比パラメータは0.256～0.265の範囲にあり、参考になりましょう。

許容変位を低減する方法の一例として、「鋼製橋脚の耐震設計マニュアル」²⁾では、既設橋脚の耐震補強に角補強断面を利用する場合に、下記のような低減式があることを紹介しています。

$$C_R = \sigma_{SN} / \sigma_y * \lambda * R_F$$

σ_{SN} ：軸方向応力度

σ_y ：降伏応力度

λ ：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編2.2解説に示される細長比パラメータ

R_F ：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編3.2解説の式（解3.2.4）に

おける幅厚比パラメータ

表 許容水平変位 (δ_a/δ_y) と終局水平耐力 (P_u/P_y)

| 断面の種類 | 補強工法 | タイプⅡ地震動に対する許容水平変位 δ_a/δ_y | タイプⅠ地震動に対する許容水平変位 δ_a/δ_y | 終局水平耐力 P_u/P_y |
|-------|------|--|--|---------------------|
| 矩形断面 | 角補強 | 4.5 ($C_R \leq 0.017$) -125 C_R +6.63 ($0.017 \leq C_R \leq 0.025$) 3.5 ($C_R \geq 0.025$) | 左欄の値から1.0低減した値とする | 1.4 |

(既設道路橋の耐震補強に関する参考資料³⁾，表-5.2.1)

参考文献

- 1) 土研, 首都公団, 阪神公団, 名古屋公社, 鋼材倶楽部, 橋建: 道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書(I)～(VII), 平成9年4月
- 2) (社)日本橋梁建設協会: 鋼製橋脚の耐震設計マニュアル, 平成10年11月
- 3) (社)日本道路協会: 既設道路橋の耐震補強に関する参考資料, 平成9年8月

分類2. 動的解析モデルについて

(k) 橋脚高

Q：橋脚高が高くなると資料に提示されている簡易な解析モデルではなく、適切なモデル化を検討すること(4-58頁下から6行目)とあるが、適切なモデル化とは具体的にどのようなものか。

A：

日本橋梁建設協会「鋼製橋脚の耐震設計マニュアル」¹⁾によると、「上部構造が連続桁形式で、各橋脚ごとの高さ、基礎形式、地盤種別が異なる場合などでは、上部工を含めた全体系モデルとして扱うか、各橋脚ごとのモデルとして扱うかを確認する。(中略)鋼製橋脚の場合、特に橋脚高が高くなると変形しやすくなり、簡易なモデルを用いた動的解析では地震時の挙動を十分に評価できない場合がある。このような場合には、上下部構造全体の地震時の挙動を表現できるような適切なモデル化を検討するとともに、構造系全体で耐震性を発揮できるよう設計するのが望ましい。」とほとんど同様の記述があります。

一方、林川らは²⁾、橋脚の高さが異なる場合の動的解析を実施し、高橋脚が含まれる場合は、応答変位が大きくなり、橋脚高さが低い橋脚には橋脚高さが高い橋脚よりも支承部に大きな地震力が作用し、それにより橋脚基部に大きな塑性域が生じるとの報告がなされています。

しかしながら、連続高架橋の動的解析を全体モデルで行う場合、橋脚のモデル化についてはせん断ばねモデル、M- ϕ 関係を有する梁モデルなどがありますが、未だにはっきりとした結論が出ていません。日本橋梁建設協会「鋼製橋脚の耐震設計マニュアル」によると、「むやみに多くの非線形特性を有することは、必ずしも正確な結果とならないことから、十分な事前検討が必要である。」と記載されています。

参考文献

- 1) 日本橋梁建設協会：鋼製橋脚の耐震設計マニュアル，平成10年11月
- 2) 林川俊郎他：橋脚長と支承部が異なる高架橋の大地震非線形応答解析，平成10年11月，第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集

分類2. 動的解析モデルについて

(1) 復元力モデルと中埋めコンクリート

Q. 復元力モデルの計算(4-60頁)において、 $P-\delta \rightarrow M-\theta$ に変換する際に $\theta y = \delta y/h$ とあるが、車両衝突用の中埋めコンクリートが充填されている場合に問題はないか。(中埋め天端と基部とのどちらが先に降伏するかにより異なると考えられる)

A :

衝突対策のために設けられた中埋めコンクリートは、通常地震に対して何ら期待をしていません。したがって復元力モデルを計算する場合には、中埋めコンクリートが充填されていないものとして計算されると考えられます。

しかしながら、中埋めコンクリートの取り扱いについては明確に記述されたものではありません。本回答集(u)も参考として下さい。

分類3. 動的解析結果について

(n) 強震記録

Q. 時刻歴応答解析に考慮する地震動は既往の強震記録をタイプⅠおよびⅡの各々に対して3つ程度使用するわけであるが、強震記録のデジタルデータを入手するには、どうしたらよいのか。

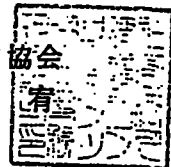
A :

地震波の入手は、(社)建設コンサルタンツ協会からタイプⅠについては9波、タイプⅡの波形についても9波配布されています。

この波形は建設省土木研究所新藤研究室により提供されています。

各 位

(社)建設コンサルタンツ協会
専務理事 田 村



道路橋耐震設計の動解用標準波形について

拝啓 時下益々御清祥のこととお慶び申し上げます。

平素は、当協会の諸活動に対し、種々ご支援、ご協力を頂き、有難うございます。

さて、標記に掲げる「動解用標準波形」は、道路橋の耐震設計に関する資料(平成9年3月)の「10. 時刻歴応答解析に用いる標準地震入力例」に、時刻歴応答解析用標準波形の例として示されている18波形と同一のものです。 フロッピーディスクには、

- README.TXT
- TYPE1ACC.TXT
- TYPE2ACC.TXT

の3ファイルが入っております。README.TXTには、別紙のような内容が入っているフロッピーディスクを、建設省土木研究所振動研究室のご好意により入手致しましたので、ご希望の方は必要枚数を取りまとめ、当協会にお申し込み下さい。

敬 具

分類3. 動的解析結果について

(0) 振幅調整

Q. 時刻歴応答解析に考慮する地震動は、タイプⅠおよびタイプⅡの標準加速度応答スペクトルに近い特性を有するように、既往の強震記録を振動数に応じて振幅調整する(4-62頁上から10行目)とあるが、具体的にどのようなデータをどのように調整するのか。

A :

「道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編¹⁾ 6.3動的解析に用いる地震入力」の解説に、次のような記述があります。

ー 時刻歴応答解析に用いる地震入力としては、架橋地点で観測された強震記録を用いるのが望ましいが、一般にそのような記録は得られていないのが普通である。したがって、動的解析では、地震の強度、周期特性、継続時間、ならびに橋の固有周期、減衰定数などを考慮してタイプⅠおよびタイプⅡの標準加速度応答スペクトルに近い特性を有するように、既往の代表的な強震記録を振動数領域で振幅調整した強震記録を用いることを原則とした。また、振幅調整に用いる既往の代表的な強震記録は、以下のように選定するのがよい。

- 1) 架橋地点とよく似た地形や地盤条件の地点で観測された強震記録
- 2) 目標とする加速度応答スペクトルと類似した特性を有する強震記録

振幅調整は、「動的解析と耐震設計」²⁾によれば、フーリエ変換された地震波形を利用して、下記のように行われます。

ー 目標スペクトルを $S_u(T; p_0)$ とし、原波形 $x^{(0)}(t)$ のフーリエ振幅を $A^{(0)}(\omega_k)$ とすると、次式から修正フーリエ振幅 $A^{(1)}(\omega_k)$ が求まる。

$$A^{(1)}(\omega_k) = \frac{S_u(2\pi/\omega_k; p_0)}{S^{(0)}(2\pi/\omega_k)} \cdot A^{(0)}(\omega_k)$$

ただし、 $\omega_k = k\Delta\omega$ ($k=1, 2, \dots, n$) である。

これを用いて、修正波形 $x^{(1)}(t)$ を次式から求める。

$$x^{(1)}(t) = \frac{\Delta\omega}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^n A^{(1)}(\omega_k) \cdot \cos(\omega_k \cdot t + \phi_k)$$

ただし、 ϕ_k は原波形のフーリエ位相である。

さらに、 $x^{(1)}(t)$ の応答スペクトル $S^{(1)}(T)$ を求め、 $S_u(T; p_0)$ との差が充分小さくなるまで、 $x^{(1)}(t)$ を新たに $x^{(0)}(t)$ に置き換えて繰り返し計算を行う。

また、道示Ⅴでは、「タイプⅡの地震入力を求めるために振動数領域で振幅調整する際には、Ⅰ種地盤においては神戸海洋気象台の記録、Ⅱ種地盤においてはJR西日本鷹取駅の記録、Ⅲ種地盤においては東神戸大橋周辺地盤上の記録を用いるのが良い。」とありますが、これらは(n)にて記述した(社)建設コンサルタンツ協会から配布された動解用標準波形に含まれており、既に振幅調整が行われています。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，平成8年12月
- 2) 土木学会編：動的解析と耐震設計[第1巻]，擬報堂出版，平成元年6月

分類3. 動的解析結果について

(p) 入力波形

Q：耐震性の判定において、“3つの波形に対する動的解析結果の平均値で行った”
(4-62頁)とあるが、なぜ平均値をとるのか。

A：

「道路橋示方書・同解説V耐震設計編¹⁾ 6.3動的解析に用いる地震入力」の解説(1)の2)に次のような記述があります。

－ (前略)

なお、動的解析に用いる加速度波形としては、一般に1波形だけでなく、3波形程度用いるのがよい。これは、当該地点に予想される地震動は、地震の特性や規模等によって異なるため、3波形程度の入力地震動に対する動的解析結果の平均値を用いて耐震性を照査するのがよいためである。 —

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，平成8年12月

分類4. その他の脚柱の設計について

(1) 門型ラーメン橋脚等

Q. 資料においてはT型1本柱の橋脚を対象としているが、門型ラーメンや複雑な構造をした橋脚はどのように扱えばよいか。

A :

ラーメン橋脚についての具体的な設計方法は無いのが現状です。
ここでは、参考として次の様なものを挙げておきます。

① 「鋼製橋脚の耐震設計マニュアル」¹⁾には下記のような記述があり、これは梁部は弾塑性挙動を許さず、あくまでも弾性域で設計を行い、柱部で塑性ヒンジ部をコントロールした方が良いという記述です。

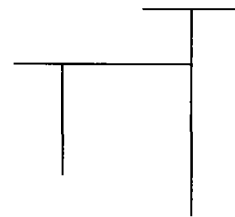
…。通常の鋼断面を用いたラーメン橋脚の場合は、多くの部位に塑性域が現れ全てが終局状態にいたるような断面構成は望ましくないことから、1層のラーメン橋脚では、図-5.5.16のように柱部の基部と隅角部直下に塑性域を考慮したモデルとするのが望ましい。

② 都市高速の橋脚耐震補強工事において、馬型ラーメン橋脚を下記のように設計した例があります。

柱毎にそれぞれの柱が分担する慣性力を求め、
柱毎に2質点系の1本柱モデルを作成する。

次に上下の質点によるモーメントを重ね
合わせて抵抗モーメント図を作成する。

制御断面における発生モーメントが2質点系
モデルと等価になる1質点系モデルを作成し、
1質点系にて柱の補強を行う。



上記の①、②に挙げた内容はあくまでも参考であり、実際にラーメン橋脚を設計する場合には、その方法について十分に検討する必要があります。

参考文献

1) 日本橋梁建設協会：鋼製橋脚の耐震設計マニュアル，平成10年11月

分類4. その他の脚柱の設計について

(u) 中埋めコンクリート

Q. 一般的に都市部の鋼製橋脚では、車両衝突による変形防止のためコンクリートを中埋めすることが多い。この場合は“コンクリートを充填した鋼製橋脚”として設計するのか。“コンクリートを充填しない橋脚”にコンクリートを中埋めすることは許されないのか。

A :

変形防止のためにコンクリートを中埋めした橋脚を“コンクリートを充填した鋼製橋脚”として設計するか否かを明確に記した文献はありません。

“コンクリートを充填しない鋼製橋脚”に変形防止のためのコンクリートを中埋めしていけないことはなく、その構造物の特性や基礎との関係等により中埋めコンクリートの取り扱いを設計者が適宜判断しているものと思われます。

ただし、コンクリートを充填しない鋼製橋脚の中埋めコンクリートに関する注意事項として、「鋼製橋脚の耐震設計マニュアル」¹⁾に下記のように記載されています。

コンクリートを充填しない鋼製橋脚であっても車両の衝突対策等により、橋脚基部に中埋めコンクリートを施工する場合がある。その場合には、以下のような点に留意する。

- (1) 鋼製橋脚内部に充填するコンクリートには、低強度のコンクリート ($\sigma_{ck}=150 \sim 160 \text{kgf/cm}^2$) を用いるのがよい。
- (2) コンクリートの充填高さは、充填したコンクリートの真上の鋼断面部に座屈が生じないように定めるものとする。(道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 10. 2. 2)
- (3) 矩形断面橋脚の基部に車両の衝突時の変形防止を目的とした中埋めコンクリートを充填する場合、充填部において補剛板がすべて外側にはらみ出す変形モードが発生して角割れが生じ、鋼中空断面部分に進展するおそれがある。したがって、中埋めコンクリートを補剛板の変形が拘束されるダイヤフラム等の位置まで充填したり、角割れを防ぐ構造細目をコンクリート充填部にも重なるように採用する等、ぜい性的な破壊を防ぐための対策を施す必要がある。

(道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 10. 3解説)

参考文献

- 1) 鋼製橋脚の耐震設計マニュアル：日本橋梁建設協会，平成10年11月

分類4. その他の脚柱の設計について

(v) 既設橋脚の角補強

Q. 既設の橋脚に角補強をする場合、縦リブの間隔が狭くて”角補強による占有幅 $2c$ が全幅 b の25%程度以上”確保できない場合がある。(4-56頁)この場合に角補強を行うと、どのような影響がでるのか。または、どう対処すべきか。

A :

建設省土木研究所の実験により、角補強の占有幅を全幅の25%以上確保することによって橋脚のぜい性破壊を回避し、じん性の向上が期待できることが確認されています。したがって、占有幅が25%以下であると十分なじん性が確保できない可能性があります。ただし下記のとおり、「既設道路橋の耐震補強に関する参考資料」¹⁾の中に対処方法が記述されています。

5. 2. 3 補強材による鋼断面の補強

(6) 構造細目

1) 角補強

図-5. 2. 5に角補強構造における補強材の詳細を示す。図に示すように補強材を高力ボルトにて接合した構造を基本とする。以下に設計上の留意事項を示す。

a) 角補強の寸法・形状

角補強材の占有幅は橋脚断面の全幅に対して両側の占有幅を合わせて25%程度以上とするのを基本とするが、既設橋脚の場合には既存縦リブとの取り合い上、十分な占有幅を確保するのが困難な場合が予想される。このような場合には角部の閉断面が可能な限り大きくなるようにした上で、以下の項目を満足するよう寸法形状を設定する。

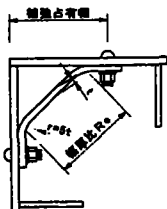


図-5. 2. 5 基本となる角補強構造

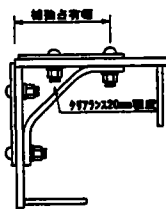


図-5. 2. 6 外面補強板を併用した構造

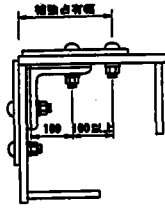


図-5. 2. 7 アングル材を用いた構造

- ・補強材による断面二次モーメントの増加率は、補強前の1.2倍程度を目安とする。
- ・コーナープレーットの曲げ加工半径は $5t$ (t :補強材の板厚)としてよい。
- ・コーナープレーットの材質は母材と同等以上とするのを基本とする。
- ・コーナープレーットの板厚は、道路橋示方書Ⅱ編3.2.1の両縁支持板としての幅厚比パラメータ R_c が0.5以下となるように設定する。

なお、縦リブ間隔によっては、角部の空間が狭く補強前の1.2倍程度の断面二次モーメントの確保が困難な場合がある。その様な場合には、図-5. 2. 6に示す構造を検討する。それでもコーナープレーットの取り付けが困難な場合には、図-5. 2. 7に示す構造を検討する。これらの2種類の構造に対する許容水平変位 $\delta a / \delta y$ は、表-5. 2. 1の値に対して1.0低減した値を用いるものとする。また、図-5. 2. 6, 7に示す構造のように外面補強板を取り付けた場合、既存の実験結果によれば耐力上昇に寄与してくるので、コーナープレーットの断面を断面計算に考慮するものとする。

参考文献

- 1) 日本道路協会：既設道路橋の耐震補強に関する参考資料，平成9年8月

3.1.5 まとめ

兵庫県南部地震以降、建設省をはじめとする関連各機関において、鋼製橋脚の研究が行われている。中でも、鋼製橋脚の耐震設計法に関する共同プロジェクト（建設省土木研究所・首都高速道路公団・阪神高速道路公団・名古屋高速道路公社・鋼材倶楽部・日本橋梁建設協会）においては、単橋脚の二軸正負交番繰り返し載荷実験が大がかりに行われ、その結果は改訂された道路橋示方書Ⅴ耐震設計編10章の基礎となっている。この共同プロジェクトの実験は、コンクリートを充填した橋脚・しない橋脚、角柱・丸柱等、多くの試験体を対象として行われており、角補強角型断面・二重鋼管断面以外の断面を使用した場合の変形性状を知ることができる。

改訂された道路橋示方書では、鋼製橋脚を設計する上で、①ぜい性的破壊モードの回避、②必要なじん性の確保、が重要なポイントとなっている。また、地震力も兵庫県南部地震レベルのものも考慮することとなり、鋼製橋脚の設計にあたっては従来の震度法に加えて地震時保有水平耐力の照査や非線形動的解析を行うこととなった。すなわち、強固な構造物からしなやかな構造物へと設計思想の転換が行われたと言われている。

本WGでは、このような設計思想の転換にあたり、その具体的な設計方法を既刊の資料や文献を参考に調査・研究してきたが、まだまだ通り一辺倒の感は否めなく、今後課題とするところは多い。例えば今回のアンケートにおいて回答は用意したものの十分な知見が得られていない事項が挙げられよう。特に都市高速の高架橋には、その立地条件等からT型や門型等の単純な形式の橋脚は少なく、二層・三層・主桁と剛結等のかなり複雑な形状をした橋脚が多い。これらを画一的な方法で設計することは困難で、その性状を個々に捉え、独自に設計せざるを得ないであろう。このような場合、今回の道路橋示方書の改訂の主旨を理解し、適切な方法で安全性を評価する必要がある。また、アンカーフレームについては今回の対象とはしなかったが、アンケートにはアンカーフレームに関する質問も幾つかあった。そのなかで、脚柱断面が温度や風等の地震以外の要因で決定されるような場合でもアンカーフレームの耐力は脚柱断面の終局耐力以上とする必要があるか等は、設計実務を行っていくうえで、問題となる事項であろう。

本WGで対象としたのはT型の単柱ではあるが、複雑な構造を対象とする場合にはこのような単純な構造が基礎となると考えられ、理解を深めることは重要であろう。いずれにしても、設計技術者には設計思想や構造物の特性等をよく理解して、高度な知見の基に設計することが要求されており、更なる研さんが必要である。