

大規模地震時に対する 鋼管・コンクリート複合構造橋脚の設計計算例

緒方 辰男¹⁾・山口 貴志²⁾・加藤 敏明²⁾

¹⁾ 正会員 工修 日本道路公団 技術部 構造技術課 (〒100-8979 東京都千代田区霞ヶ関 3-3-2)

²⁾ 正会員 工修 (株)大林組 土木技術本部 設計第一部 (〒113-0033 東京都文京区本郷 2-2-9)

1. まえがき

鋼管・コンクリート複合構造とは、図-1に示すとおり高橋脚工事の省力化・急速施工および耐震性の向上を目的として開発された鋼管を主体とし、帯鉄筋にPC鋼より線を用いた鉄骨鉄筋コンクリート構造である。平成10年7月におけるJH設計要領第二集橋梁建設編¹⁾の改正に伴い、本構造に関する設計が新たに示されているが、この設計要領に準拠して耐震設計を行った例はまだ少ない。

本稿では、図-2に示すような不等橋脚を有する橋長627mの比較的大規模なPC連続ラーメン箱げた橋を対象に、大規模地震を考慮した地震動に対する鋼管・コンクリート複合構造の橋脚の耐震設計計算例について述べる。

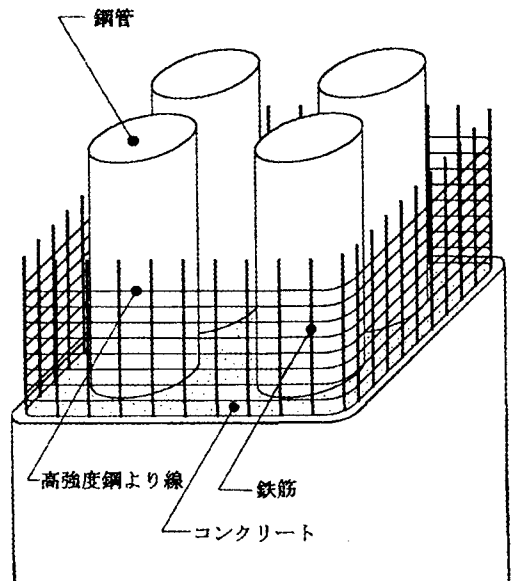


図-1 鋼管・コンクリート複合構造橋脚概念図

2. 解析対象橋梁

解析対象橋梁を図-2に示す。設計条件は次のとおりである。

- 形式：PC7径間連続ラーメン箱げた橋
- 支間割：56.0m+5@102.0m+59.0m
- 幅員：1.5+2@3.5+1.5=10.0m
- 活荷重：B活荷重
- 橋脚：柱式橋脚(中空断面) P1橋脚
鋼管・コンクリート複合構造橋脚
P2~P6橋脚
- 橋台：逆T式橋台
- 基礎：直接基礎 P3,P4
深礎杭基礎 A1,A2,P2,P3,P5,P6
- 支承：可動型ゴム支承
- 使用材料：表-1に示す
- 支持条件：表-2に示す

表-1 使用材料

部材	コンクリート	鉄筋	鋼管	PC鋼材
A1,A2橋台	$\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$	SD345	—	—
P1橋脚	$\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$		—	—
P2,P6橋脚	$\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$		SKK490	SWPR7B $\phi 15.2$
P3~P5橋脚			—	SWPR7B $\phi 12.7$
フーチング	$\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$		—	—
上部構造	$\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$		—	SWPR7B $\phi 12.7$

表-2 支持条件

	A1,A2橋台	P2~P6橋脚	P1橋脚
橋軸方向	可動	ラーメン固定	可動
橋軸直角方向	固定	ラーメン固定	固定

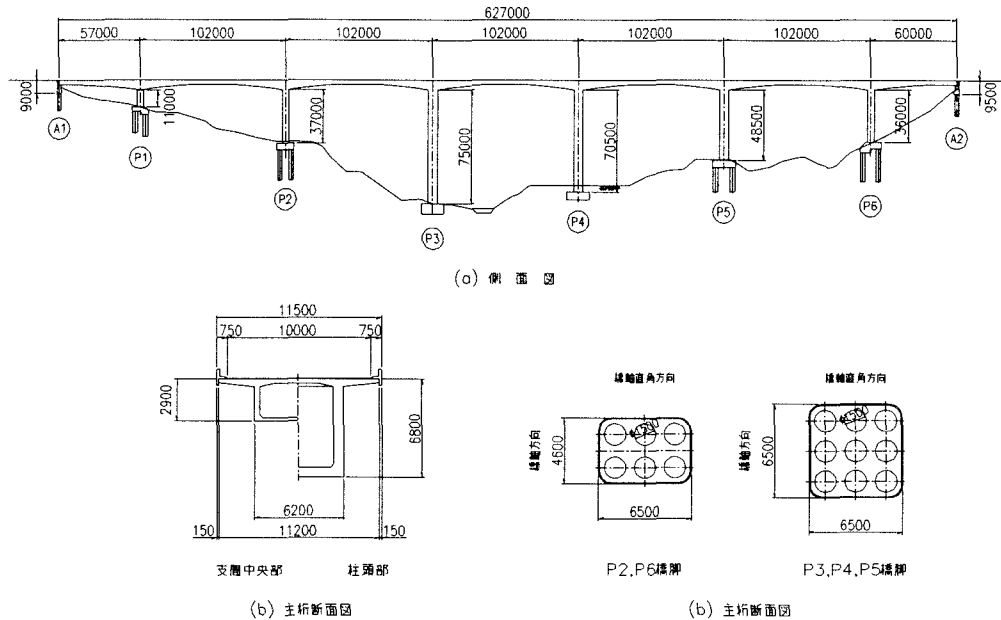


図-2 解析対象橋梁

3. 解析方法と解析モデル

(1) 解析方法

本構造は模型載荷実験結果²⁾から、非線形領域では、曲げ耐力が鋼管とコンクリートの付着挙動の影響により、鉄筋コンクリート構造とは異なった挙動を示すことが明らかとなっている。このため、一般に非線形領域の応答となる大規模地震を考慮した地震動に対しては、本構造の構造特性を合理的に設計に反映させることが可能な非線形トリリニアモデルを取り入れた動的解析により設計を行った。図-3は、その設計の流れを示したものである。動的解析では、橋脚部材の非線形性を直接履歴モデルに取り込める非線形時刻歴応答解析法を用いた。積分法はNewmarkのβ法(β=0.25)とし、収束計算方法としてはNewton法を用い、積分時間間隔を0.002秒とした。

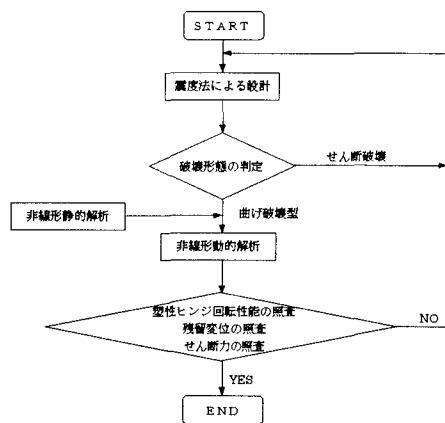


図-3 耐震性照査の流れ

(2) 解析モデル

解析モデルは橋軸方向、橋軸直角方向とも橋全体系の平面骨組みモデルとした。

(3) 部材のモデル化

1) モデル化

上部構造は線形梁要素とし、下部構造は塑性ヒンジが発生すると想定される箇所を非線形回転バネ要素とし、その他を非線形梁要素としてモデル化した。これら要素の復元力モデルは剛性低下型トリリニアモデル(武田型)とした。

2) コンクリートの応力度-ひずみ曲線

帯鉄筋(PC鋼より線)による横拘束効果を見込んだコンクリートの応力度-ひずみ曲線は、道示V編³⁾より求めるとし、横拘束筋(PC鋼より線)の体積比 ρ_s は以下のように算出した。

$$P_w = \frac{A_{pc} \times \left(\frac{\sigma_{pcy}}{\sigma_{sy}}\right)}{B \times a} \times 100 \quad (1)$$

$$\rho_s = \frac{4A_h}{S d} \quad (2)$$

ここに、

- P_w : PC鋼より線の換算体積比 (%)
- A_{pc} : PC鋼より線の断面積 (mm^2)
- σ_{pcy} : PC鋼より線の降伏点 ($1570\text{N}/\text{mm}^2$)
- σ_{sy} : 鉄筋の降伏点 ($345\text{N}/\text{mm}^2$)
- s : PC鋼より線の間隔 (mm)
- d : PC鋼より線の有効長 (mm)
- B : 橋脚幅 (mm)
- ρ_s : PC鋼より線の体積比 (%)

ここで求めた横拘束筋の体積比 ρ_s を用いてコンクリートの応力度-ひずみ曲線を求めると図-4のようになる。

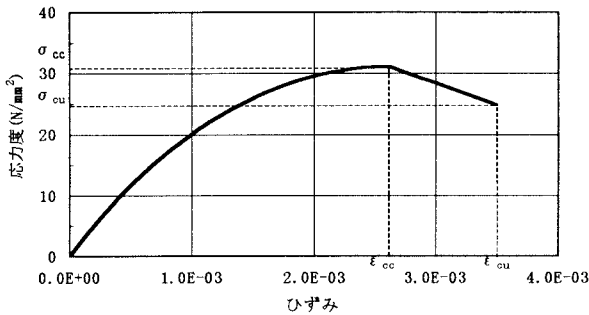


図-4 コンクリートの応力度-ひずみ曲線

3) 曲げモーメント-曲率の関係

非線形解析に用いる曲げモーメントと曲率の関係は、コンクリートの有効断面を考慮し、鋼管を鉄筋層に置換してRC梁理論により求めたモーメント-曲率をもとに式(3)による最大モーメントを考慮して本構造のモーメント-曲率関係を決定した。すなわち、曲げひび割れ発生モーメント (M_{RC}^{cr}) と最外縁引張鉄筋降伏モーメント (M_{RC}^y) との交点の延長と最大曲げモーメント (M_{SRC}^u) が交差する点を本構造の設計用降伏点としたトリリニアモデルとした。

$$M_{SRC}^u = \alpha M_{RC}^u \quad (3)$$

ここに、 M_{SRC}^u は鋼管・コンクリート複合構造橋脚断面の終局曲げモーメントであり、 M_{RC}^u はRC梁理論により求めた最大モーメント (到達可能最大モーメント) である。なお、付着を考慮した耐力低減係数 α は実験結果を参考にして0.9と定めることで十分に安全側の設計となっている。

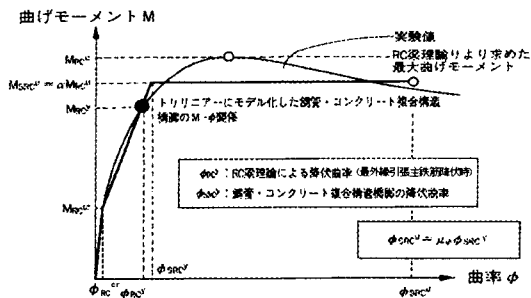


図-5 本構造の橋脚断面のモーメント-曲率関係

ここで、一例として P2 橋脚の曲げモーメント-曲率曲線を図-6 に示す。

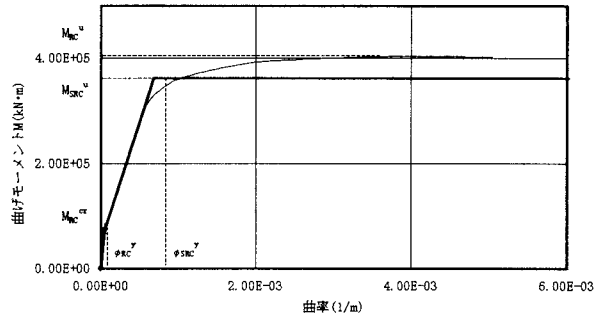


図-6 P2 橋脚のモーメント-曲率曲線

4) 非線形回転バネの曲げモーメント-回転角の関係

非線形回転バネの曲げモーメントと回転角の関係は、ひびわれ時および最外縁主鉄筋の降伏時に非線形回転バネにより生じる上部構造の慣性力作用位置の水平変位が道示V9.3に規定されるひびわれ時および初降伏時 (最外縁引張鉄筋の降伏時) の水平変位とそれぞれ等しくなるよう調整して求めた。

(4) 減衰

減衰については、上部構造に3%、下部構造に2%、基礎に10%を与え、Rayleigh型の減衰を用いた。

(5) 入力地震動

入力地震動には、タイプI、IIに対して各々3標準波形を用いた。

(6) 初期断面力

設計対象橋梁は、不等橋脚を有する多径間連続ラーメン箱げた橋であり、クリープ等による不静定力が照査結果に与える影響が大きいと考えられるので地震動が作用する前の初期断面力を死荷重(クリープ・乾燥収縮終了時)の断面力とした。

(7) 軸力変動の影響

ラーメン橋の橋軸方向に水平方向の荷重が作用すると橋脚躯体の軸力が変動することにより部材の曲げモーメント-曲率および曲げモーメント-回転角の関係が変化する。本稿では、事前に行った非線形静的解析により軸力変動の影響は、橋脚躯体の安全性評価に与える影響は小さいと考え、これを考慮しないものとした。

4. 橋脚躯体の安全性の判定

安全性の評価は塑性回転角、断面力および橋全体の残留変位により行った。

(1) 塑性回転角に対する照査

動的解析により得られた塑性ヒンジ部の非線形回転バネの最大応答回転角が許容回転角以下であるこ

とを照査した。なお、安全性の評価に用いる許容回転角 θ_{ua} は次式により算出した。

$$\theta_{ua} = \theta_{SRC}^y \cdot \mu_{\theta a} \quad (4)$$

ここに、

θ_{ua} : 許容回転角 (rad)

θ_{SRC}^y : 本構造の設計用降伏時の塑性ヒンジ部の回転角 (rad)

$\mu_{\theta a}$: 許容回転角塑性率

また、許容回転角塑性率は鋼管・コンクリート複合構造橋脚設計マニュアル4章4.6.1に基づき、算定した。表-3に一例としてP2橋脚塑性ヒンジ部の許容回転角を示す。

タイプI地震動に対して

$$\mu_{\theta a} = 1 + \{2\beta_p(6.0-1)\} / (1 + \gamma_p \cdot \alpha_p)$$

タイプII地震動に対して

$$\mu_{\theta a} = 1 + \{2\beta_p(12.0-1)\} / (1 + \gamma_p \cdot \alpha_p)$$

表-3 P2橋脚塑性ヒンジ部の許容回転角

	降伏時の回転角 θ_{SRC}^y (rad)	許容回転角塑性率 $\mu_{\theta a}$		許容回転角 θ_{ua} (rad)	
		タイプI	タイプII	タイプI	タイプII
橋軸方向上端	1.455×10^{-3}	6.33	12.72	9.210×10^{-3}	18.51×10^{-3}
橋軸方向下端	1.519×10^{-3}	6.31	12.68	9.580×10^{-3}	19.25×10^{-3}
橋軸直角方向下端	1.748×10^{-3}	6.22	12.48	10.87×10^{-3}	21.81×10^{-3}

(2)せん断力に対する照査

応答最大せん断力がせん断耐力以下であることを照査した。設計対象橋梁は極端な不等橋脚を有する連続ラーメン橋であるので、せん断力が集中すると予想される中規模橋脚の代表であるP2橋脚で最も厳しくなり、震度法により決定した帯鉄筋量ではせん断耐力が不足したので、帯鉄筋(PC鋼より線)の配置間隔を小さく変更し、安全性を確保した。なお、せん断耐力はコンクリート、PC鋼より線および鋼管が負担する分の総和として求めた。本構造の特長の一つであるPC鋼より線のせん断補強筋への適用についてはPC鋼より線の降伏強度を考慮し、鋼管の負担せん断応力度 τ_t については、実験および解析結果から $\tau_t = 59\text{N/mm}^2$ とした。

(3)残留変位に対する照査

残留変位が許容残留変位以下であることを照査した。ここでの残留変位は、動的解析において地震動が終了した時点での変位とした。また、許容残留変位は橋脚高(橋脚下端から上部構造の慣性力の作用位置までの高さ)の1/100とした。

(4)塑性化を想定していない部材に対する照査

塑性ヒンジ領域以外の橋脚各部材の応答曲率塑性率(応答曲率を降伏曲率で除したもの)が1以下であり、想定した塑性ヒンジ領域以外で塑性化を生じていないことを確認した。

表-4 安全性評価項目

安全性評価項目	照査値	許容値
塑性回転角	$\theta < \theta_{ua}$ ここに、 θ : 非線形動的解析で得られた塑性ヒンジ部の最大応答回転角 θ_{ua} : 許容回転角塑性率	$\theta_{ua} = \theta_{SRC}^y \cdot \mu_{\theta a}$ $= \theta_{SRC}^y \cdot [1 + \{2\beta_p(\mu_{\theta a} - 1)\} / (1 + \gamma_p \cdot \alpha_p)]$ $\alpha_p = 1 - L_p / h$ $\beta_p = (1 + \alpha_p) / 2$ $\gamma_p = \phi_{RC}^y / \phi_{SRC}^y + (1 - \phi_{RC}^y / \phi_{SRC}^y) \cdot (1 - L_p / L')$ $L' = (1 - M_{RC}^y / M_{SRC}^y) \cdot h$ ここに、 $\mu_{\theta a}$: 許容曲率塑性率 ϕ_{RC}^y : 鋼管を鉄筋とみなして算定した曲げひびわれ発生時の曲率 ϕ_{SRC}^y : 本構造の降伏曲率 L_p : 塑性ヒンジ長 M_{RC}^y : 鋼管を鉄筋とみなして算定した曲げひびわれ発生モーメント M_{SRC}^y : 図-5により算定された終局モーメント
せん断力	$P_{su} < S_u$ ここに、 P_{su} : 各部材の最大応答せん断力 S_u : 部材各断面のせん断耐力	$S_u = S_c + S_{pc} + S_t$ $S_c = 1000 C_c \cdot C_c \cdot C_{pr} \cdot \tau_c \cdot b_c \cdot d$ $S_{pc} = A_s \cdot \sigma_{py} (\sin \theta + \cos \theta) \cdot d / (1000 \cdot 1.15 \cdot a)$ $S_t = \tau_t (\Sigma A_t / 2)$ S_c : コンクリートが負担するせん断耐力 S_{pc} : PC鋼より線が負担するせん断耐力 S_t : 鋼管が負担するせん断耐力
残留変位	$\sigma < \sigma_{Ra}$ σ_{Ra} : 許容残留変位	$\sigma_{Ra} = h / 100$ ここに、 h : 橋脚下端から上部構造の慣性力の作用位置までの高さ

5. 耐震設計のまとめ

本構造橋脚の耐震設計を行う上での安全性評価項目を表-4に示す。

6. あとがき

本稿は、鋼管・コンクリート複合構造のラーメン橋脚の非線形動的解析による設計計算例を述べた。この計算例が、今後の設計の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本道路公団：設計要領第二集橋梁建設編、平成10年7月
- 2) 渡辺将之、今泉安雄、若間広志、大内一：鋼管・コンクリート複合構造橋脚模型の靱性試験、コンクリート工学年次論文報告集、1997.
- 3) (社)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
- 4) 日本道路公団：鋼管・コンクリート複合構造橋脚設計マニュアル、平成10年8月