

多柱式ラーメン橋脚の耐震設計事例

山本 章¹・井上 治郎²・西谷 真吾³・楊 政祥⁴

¹パシフィックコンサルタンツ（株） 横浜支社第一技術部 （〒221-0052 横浜市神奈川区栄町 1-1）

²パシフィックコンサルタンツ（株） 横浜支社第一技術部 （〒221-0052 横浜市神奈川区栄町 1-1）

³パシフィックコンサルタンツ（株） 横浜支社第一技術部 （〒221-0052 横浜市神奈川区栄町 1-1）

⁴コスモ技研（株） 東京支社技術部 （〒130 東京都墨田区両国 3-25-5）

1. はじめに

道路橋示方書V耐震設計編（平成8年12月）¹⁾（以下「道示V」と称す。）においては、新たに地震時保有水平耐力法によるラーメン橋脚面内方向に関する耐震設計法が導入された。

しかし、道示Vで明示されているのは、一層のRC門型ラーメン橋脚に関してであり、実務として設計を行うにあたり多柱式あるいは鋼製ラーメン橋脚への道示の適用については多々問題を有する。

本論文は、一層の多柱式RCラーメン橋脚および鋼製ラーメン橋脚を対象とし、道示Vに示す軸力変動を考慮した静的非線形解析による地震時保有水平耐力法を設計に適用した事例に関して、解析手法、解析結果および設計上の問題点等について論述する。

2. 解析の基本方針

本設計では震度法および橋軸方向の地震時保有水平耐力法により形状寸法および配筋が決定された橋脚に対し、道示V9.8「鉄筋コンクリートラーメン橋脚の地震時保

有水平耐力および許容塑性率」に準拠することを目的に静的非線形解析を行う。

具体的には、水平力漸増（水平変位漸増）解析により全体系の地震時保有水平耐力 P_a および許容塑性率 μ_a を算出し、 $P_a \geq K_h e W$ の照査を行う。ここで本設計における多柱式ラーメン橋脚の全体系終局の定義はRC、鋼製ともに力学的に構造系が不安定となる「不静定次数+1個の塑性ヒンジが終局に達するとき」とした。実際に道示Vに従いRCラーメン橋脚の解析を行う場合、発生する塑性ヒンジの個数は不静定次数+1個となる。

なお、本論文で対象とする橋梁の地盤種別はⅢ種地盤であり、設計水平震度はタイプⅠおよびタイプⅡでそれぞれ最大の1.0および1.5をとる。

3. 解析方法および解析手順

(1) 多柱式RCラーメン橋脚

本論文では橋脚高17.0m、はりスパン15.2mの3柱式RCラーメン橋脚の解析例を取り上げ、解析手法および結果の考察を行う。図-1に対象橋脚の解析モデルを示し、以下に解析の手順および各段階における考え方を示す。

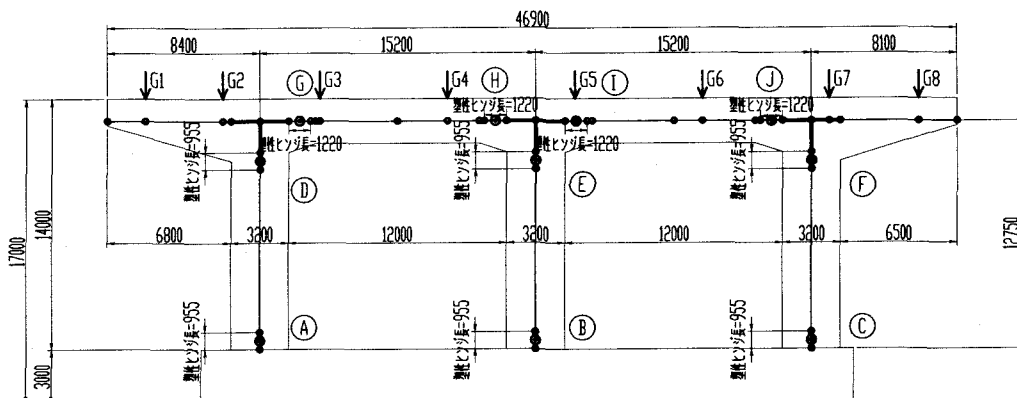


図-1 多柱式RCラーメン橋脚解析モデル

a) 断面の評価

解析を行うにあたり、各断面の $M-\phi$ 特性の評価を行う。仮定した塑性ヒンジ位置における初期剛性（完全降伏時剛性）を算出し、面内方向に水平地震力が作用した場合の軸力変動の影響を考慮するため、各断面において図-2に示す軸力 N —終局曲げモーメント M_u 相関曲線の評価を行う。

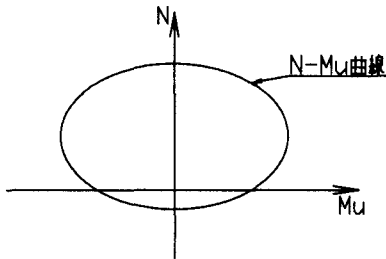


図-2 N-Mu相関曲線

b) 骨組モデルの作成

解析モデルは完全弾塑性型のバイリニアモデル（ $M-\theta$ 型）を使用する。

塑性ヒンジ長の回転変形を塑性ヒンジ長 L_p の中点 1 点で取らせることを考え、その 1 点に塑性ヒンジ長全体の弾塑性回転変形を評価できる部材長ゼロの「塑性回転バネ」を設ける²⁾。 θ は塑性ヒンジ長 L_p 分の回転角であり、 $M-\theta$ 関係は以下となる。

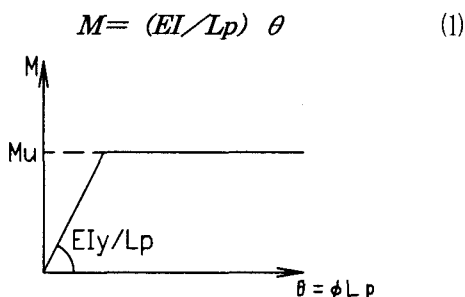


図-3 塑性回転バネ要素の $M-\theta$ 関係

図-3に示す塑性回転バネ要素は図-2の $N-Mu$ 相関関係に従い、軸力の変動を考慮して M_u を評価する。なお、塑性ヒンジ長は道示に従い設定した。

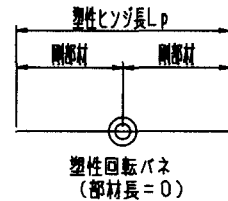


図-4 $M-\theta$ 解析における塑性ヒンジのモデル化

c) 解析の実行

完全弾塑性型のバイリニアモデルを用いた解析を行う場合、解析の安定性を考え、梁と柱の交点に強制変位を与えることによる水平変位漸増解析を行う。このとき上部工慣性力作用位置から骨組モデルの梁軸線までの上部工慣性力によるモーメントを考慮する³⁾。

d) 全体系終局の判定

塑性化した各塑性ヒンジ位置において、塑性回転角により終局の判定を行う。塑性ヒンジの終局は塑性回転角 θ_p が以下の式(2)に示す終局塑性回転角 θ_{pu} となったときとする。 ϕ_y および ϕ_u はそれぞれ降伏、終局時のたわみ角である。

$$\theta_{pu} = (\phi_u / \phi_y - 1) \cdot L_p \cdot \phi_y \quad (2)$$

終局塑性回転角の算出にあたっては全体系終局時の軸力を考慮する必要がある。

そして、各塑性ヒンジにおいて θ_{pu} となったときの全体系変位 δ を求め、塑性化したすべての塑性ヒンジ（不静定次数+1個となり、3柱式ラーメン橋脚の場合 $6+1=7$ 個）が終局に達したときの δ を全体系終局変位 δ_u とする。

e) 破壊形態の判定

曲げ破壊型を基本とし、せん断破壊型あるいはせん断破壊から曲げ破壊移行型と判断された場合には、配筋の変更を行う。

f) 地震時保有水平耐力の照査

全体系 $P-\delta$ 曲線より、許容塑性率 μ_a および等価水平震度 K_{he} を算出し、 $P_a \geq K_{he} W$ の照査を行う。

以上はほぼ道示Vに示す手順どおりである。

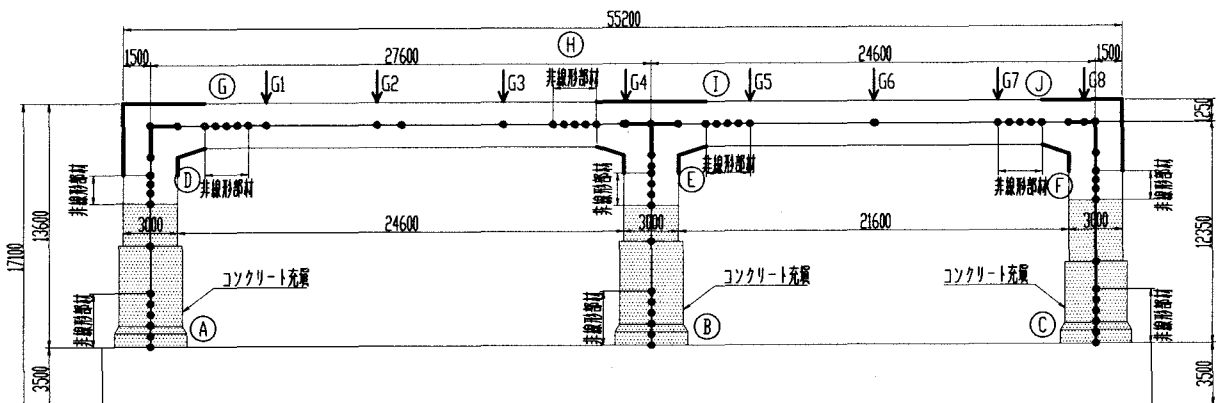


図-5 多柱式鋼製ラーメン橋脚解析モデル

(2) 多柱式鋼製ラーメン橋脚

図-5に対象橋脚の解析モデルを示す。対象橋脚は3柱式の鋼製ラーメン橋脚で、橋脚高 17.4m、はりのスパンは左 27.6m、右 24.6m である。また、柱基部におけるじん性補強方法は中埋めコンクリート方式とし、震度法で決定した断面に対し、橋軸方向の保耐で決定する必要高さまで中埋めコンクリートを充填したものである。

ラーメン橋脚面内方向の保耐では柱下端以外の塑性化も考慮するため、柱上端およびはり端部に関して角補強構造を適用しじん性を確保する。

以下に解析手順を示す。

a) 断面の評価

解析は M-φ 型のバイリニアモデルを使用し、前記 RC 橋脚で示した M-θ 型（塑性ヒンジ長を設定し、塑性回転バネ部材を設ける方法）は採用しない。これは、鋼製橋脚のコンクリート充填部および非充填部に関して塑性ヒンジ長の規定がないこと、および鋼製橋脚の場合、コンクリート充填部、非充填部ともに図-6に示す断面降伏後の2次剛性を評価したバイリニアモデルを用いるため、各塑性ヒンジの終局の判定を塑性回転角 θ_p でなく曲げモーメントにより行うことができることによる。

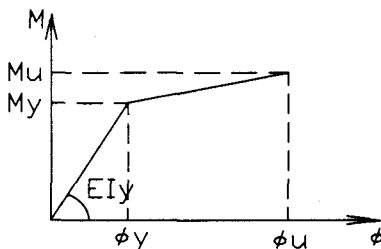


図-6 M-φ型バイリニアモデル

コンクリート充填部の評価は道示V10.2.1に従い、角補強部については道示V10.3に示す動的解析に用いる復元力モデルを参照して断面の M-φ 特性の評価を行った。したがって降伏および終局モーメントは下式となる。

$$M_{yo} = (\sigma_y - \sigma_N) I / y \quad (3a)$$

$$M_y = 1.1 M_{yo} \quad (3b)$$

$$M_u = 1.4 M_y \quad (3c)$$

ここで、I は断面2次モーメントであり、角補強部に関しては I_y (完全降伏時) = I (全断面有効時) とする。

また、断面の降伏および終局の判定においてラーメン橋脚の軸力変動を考慮するため、軸力 N-降伏および終局曲げモーメント M_y , M_u 相関曲線を求めた。

b) 骨組モデルの作成

前述のように、鋼製橋脚のコンクリート充填部および非充填部に関して、道示において塑性ヒンジ長の規定がないことより、塑性ヒンジの降伏および終局の評価は安全側を考慮して柱下端のコンクリート充填部では柱基部断面にて行った。また、柱上端部、梁端部では隅角部と

一般部の板厚変化位置が弱点となるため、降伏および終局の評価は板厚変化位置にて行う。

M-φモデルでは、変形を曲げモーメントに応じた曲率分布により求めるため、計算の精度を考慮して部材分割をある程度細かく設定する必要がある⁴⁾。

c) 解析の実行

水平力漸増解析をある変位（終局変位以上）まで行う。

このとき、上部工慣性力作用位置から骨組モデルの梁軸線までの上部工慣性力によるモーメントを考慮する。

d) 全体系終局の判定

全体系の降伏および終局の判定は基本的には RC ラーメン橋脚の手法に準ずる。

各塑性ヒンジの降伏および終局の判定は、図-7に示す軸力-曲げモーメント関係により行う。降伏時と終局時では部材に作用する軸力が異なるため、角補強構造の場合においても降伏時のモーメント M_y に対し、厳密には式(3c)に示した $M_u = 1.4 M_y$ とはならないことに注意が必要である。

そして、各塑性ヒンジで、終局曲げモーメント M_u に達したときの上部工慣性力作用位置における変位 δ を求め、構造系が不安定となる「不静定次数+1」個の塑性ヒンジが終局に達したときの上部工慣性力作用位置における変位を全体系の終局変位 δ_u とする。

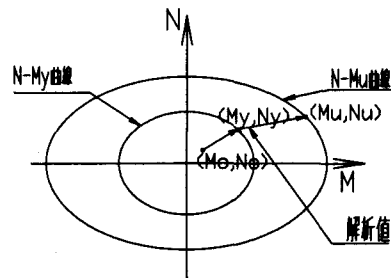


図-7 降伏および終局曲げモーメント M_y , M_u の評価

e) 許容塑性率および地震時保有水平耐力 P_a の算定

全体系降伏位置についても RC 橋脚に準拠し、全体系 P-δ 曲線における1次剛性と2次剛性の交点とした。

地震時保有水平耐力 P_a および許容塑性率 μ_a は道示 V10.2 より下式による。

$$P_a = P_y + (P_u - P_y) / \alpha \quad (4a)$$

$$\mu_a = 1 + (\delta_u - \delta_y) / (\alpha \delta_y) \cdot P_y / P_a \quad (4b)$$

ここで、 α は安全係数でありタイプ I で 3.0、タイプ II で 1.5 である。

4. 解析結果および考察

(1) 多柱式 RC ラーメン橋脚解析結果

図-8に解析結果より求めた全体系 P-δ 曲線を、表-1にタイプ I における地震時保有水平耐力の照査結果を示す。

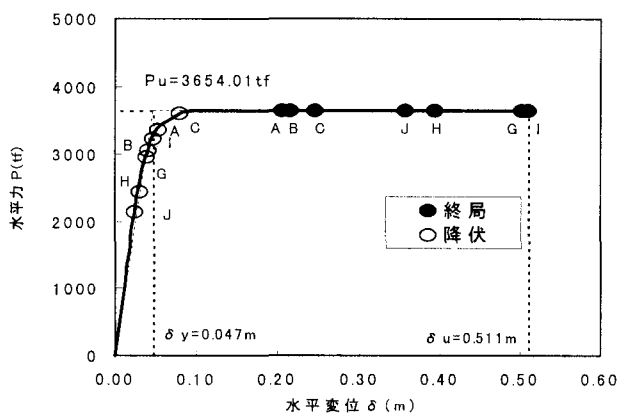


図-8 RCラーメン橋脚全体系P-δ曲線(解析結果)

表-1 地震時保有水平耐力照査結果(RCラーメン橋脚)

地震時保有水平耐力の照査	タイプⅠ	タイプⅡ
終局水平耐力 P_u (tf)	3654.0	3654.0
降伏変位 δ_y (m)	0.047	0.047
終局変位 δ_u (m)	0.511	0.511
許容塑性率 μ_a	4.31	7.62
設計水平震度 K_{hc}	1.00	1.500
等価水平震度 K_{he}	0.40	0.40
$K_{he} \cdot W$ (tf)	1252.4	1252.4
地震時保有水平耐力 P_a (tf)	3654.0	3654.0

残留変位の照査	タイプⅠ	タイプⅡ
橋脚の応答塑性率 μ_R	0.867	1.326
残留変位 δ_R (m)	0.000	0.009
許容残留変位 δ_{Ra} (m)	0.164	0.164

注) 上記結果はすべてタイプⅠの σ - ϵ 曲線を使用。

照査結果より面内方向地震時保有水平耐力 P_a は $K_{he}W$ に対して著しく強度を持っており、 $P_a \geq 1.5K_{he}W$ より基礎の耐倒照査において、応答塑性率の照査を行うことができる。しかし、破壊形態の照査により、一部配筋を変更して曲げ破壊型としている。

(2) 多柱式鋼製ラーメン橋脚解析結果

図-9に解析結果より求めた全体系P-δ曲線を、表-2に地震時保有水平耐力の照査結果を示す。

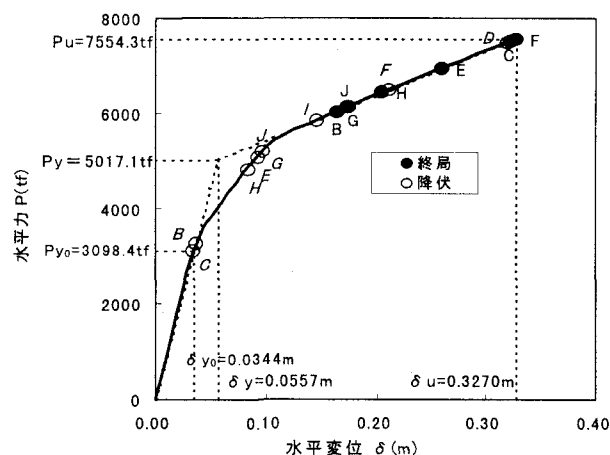


図-9 鋼製ラーメン橋脚全体系P-δ曲線(解析結果)

表-2 地震時保有水平耐力照査結果(鋼製ラーメン橋脚)

地震時保有水平耐力の照査	タイプⅠ	タイプⅡ
終局水平耐力 P_u (tf)	7554.3	7554.3
降伏水平耐力 P_y (tf)	5017.1	5017.1
終局変位 δ_u (m)	0.327	0.327
降伏変位 δ_y (m)	0.056	0.056
許容塑性率 μ_a	2.24	3.18
設計水平震度 K_{hc}	1.00	1.500
等価水平震度 K_{he}	0.54	0.65
$K_{he} \cdot W$ (tf)	1372.4	1662.3
地震時保有水平耐力 P_a (tf)	5862.8	6708.6

残留変位の照査	タイプⅠ	タイプⅡ
橋脚の応答塑性率 μ_R	0.417	0.465
残留変位 δ_R (m)	0.000	0.000
許容残留変位 δ_{Ra} (m)	0.160	0.160

照査結果より鋼製ラーメン橋脚に関しても面内方向には著しく耐力を有する結果となった。

5. まとめ

(1) 本設計で対象とした多柱式のRCおよび鋼製ラーメン橋脚に関しては、曲げ破壊型とした場合、面内方向に著しく耐力を有する結果となった。しかし、せん断の照査によりせん断破壊型または曲げ損傷からせん断破壊移行型となる場合があることに設計上注意が必要である。

(2) 本設計においては全体系終局の定義として「不静定次数+1個の塑性ヒンジが終局」を提案した。しかし、上記は多柱式ラーメン橋脚の終局の定義として確立されたものではない。今回の設計事例では上記(1)より、終局の定義が橋脚自体の耐震性を評価する上では大きな問題とならなかったが、全体系終局の定義は地震時保有水平耐力の設計上最も重要な要素であるため今後確立した定義が求められる。

(3) 鋼製ラーメン橋脚面内方向の解析を行う上で以下の取り扱いが確立されておらず、本設計では安全側の考慮等で対処したが、今後の課題となる。

- じん性補強されたコンクリート非充填断面に対する非線形静解析上の評価法。
- 塑性ヒンジ長の考え方。
- 隅角部のモデル化および照査方法。
- 鋼製橋脚のように変位の大きい構造物の解析に対する微小変形理論の適応性。

参考文献

- (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) (財) 土木研究センター：耐震設計ソフトウェアに関する研究委員会報告書，平成9年5月
- (社) 日本道路協会：道路橋耐震設計に関する資料，平成9年3月