

関西大学大学院 学生員 ○山本優也 富士車輛(株) 正会員 松本 聡
香川大学工学部 正会員 白木 渡 関西大学工学部 正会員 堂垣正博

1. はじめに

都市高速道路の高架橋橋脚として、鋼製のラーメン橋脚の使用実績が多い。建設用地の条件により、その形状は多種多様である。兵庫県南部地震以降、これらの橋脚に対して、地震時保有水平耐力照査が義務づけられたが、依然として橋脚の設計は従来の許容応力度設計法に基づき行われている。ところが、近年では許容応力度設計法に対する批判も少なくはない。

本研究では、許容応力度設計法に基づき断面が決定された鋼製ラーメン橋脚の弾塑性有限変位解析を行い、その崩壊メカニズムを明らかにする。また、確率論的手法に基づいた信頼性解析を行い、構造系全体の耐震安全性を検討する。

2. 解析手法

2.1 解析対象 図1に示すような鋼製の1層門形ラーメン橋脚を対象に、鉛直荷重 P ならびに水平力 H が作用するもとの崩壊メカニズムと耐震信頼性を明らかにする。

対象とする構造物のはり一柱部材の断面は無補剛の溶接集成箱形断面とする。断面の板厚は道路橋示方書に提示されている照査式を用いて決定した。表1に数値解析に用いるモデルの諸元を示す。なお、用いた鋼材はSM490Yで、その降伏点強度は $\sigma_y=353\text{MPa}$ 、縦弾性係数は $E=206\text{GPa}$ である。また、図中の○印と数値は塑性ヒンジの発生する場所を示す。ただし、

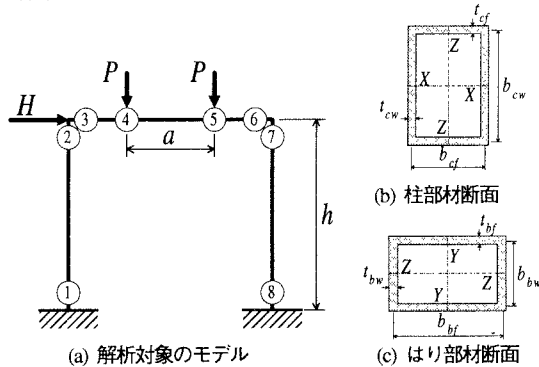


図1 解析対象の構造物

表1 解析対象モデルの諸元 (mm)

Model	1	2	3	4
H	10,000	10,000	20,000	20,000
W	20,000	30,000	20,000	30,000
$b_{cf}b_{bf}$	2,000	2,000	2,000	2,000
b_{cw}	1,500	2,000	2,000	2,500
b_{bw}	1,670	2,500	2,670	2,500
$t_{cf}t_{cw}$	31.6	43.3	20.3	29.3
$t_{bf}t_{bw}$	24.5	31.7	20.2	26.2

鋼製ラーメン橋脚の隅角部は十分に補強され、はりと柱よりも先に崩壊することはないものとする。

2.2 弾塑性有限変位解析 鋼製ラーメン橋脚の崩壊メカニズム、および保有水平耐力を有限要素法によって明らかにするため、その定式化を行う。そこで、はりと柱を離散化し、平面骨組の弾塑性有限変位理論に基づき、Up-dated Lagrangian 手法に、則って定式化すれば、

$$[K]\{\Delta\delta\} = \{\Delta F\} + \{F_n\} - \{R_n\} \quad (1)$$

を得る。ここに、 $[K]$ は構造全体の剛性マトリックス、 $\{\Delta\delta\}$ は増分変位ベクトル、 $\{\Delta F\}$ は増分節点力ベクトル、 $\{F_n\} - \{R_n\}$ は不平衡節点力ベクトルである。

式(1)は多元連立の非線形代数方程式で、その解を Newton-Raphson 法で求める。

2.3 耐震信頼性の評価法 本研究では、死荷重を確定量、活荷重および地震荷重を確率量とし、B-C 荷重モデルを用いてモデル化する。Turkstra の荷重組合せ規則を適用した際の構造物の信頼性を Hasofer-Lind 型の信頼性指標で評価する。以下、信頼性指標 β の算定式を示す。

$$\beta = \left(P_a - \sum_{i=1}^n A_{X_i} \mu'_{X_i} \right) / \sqrt{\sum_{i=1}^n A_{X_i}^2 \sigma_{X_i}^2} \quad (2)$$

$$\alpha_i = A_{X_i} \sigma'_{X_i} / k \quad (3)$$

$$k = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_{X_i}^2 \sigma_{X_i}^2} \quad (4)$$

ここに、 X_i は作用荷重の確率変数、 μ'_{X_i} 、 σ'_{X_i} はそれぞれ X_i の平均値、標準偏差であり、 A_{X_i} は X_i の変換係数である。また P_a は地震時保有水平耐力を表す。

3. 数値解析結果とその考察

3.1 鋼製橋脚の履歴挙動と崩壊メカニズム 骨組の弾塑性

有限変位解析によって、形状の相違による鋼製橋脚の履歴強度と崩壊メカニズムを追究する。ここでは、はり部材上の支承間の距離 $a=10.8(\text{m})$ と一律に与え、上部工からの反力に相当する 2 つの鉛直荷重と地震動に相当する漸増の水平荷重のもとで数値計算を行う。

鋼製ラーメン隅角部における水平力－水平変位関係を求めれば、図 2 を得る。図中、縦軸と横軸はそれぞれラーメン橋脚の水平耐力 $H(\text{MN})$ と柱頂の水平変位 δ を示す。また、曲線上の○印は塑性ヒンジが形成された時点を示す。その数値は塑性ヒンジの形成点（図 1 参照）を表す。

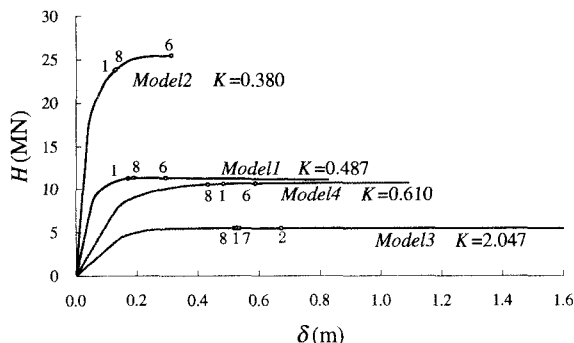


図 2 鋼製ラーメン橋脚の水平耐力と水平変位の関係

図から明らかなように、橋脚形状によって、構造系全体の保有水平耐力および崩壊モードが異なる。また、表 2 から柱部材に対するはり部材の曲げ剛比 $K=(I_b/I)/(I_c/h)$ が小さくなるに従い、橋脚の地震時保有水平耐力が増大する。

したがって、鋼製ラーメン橋脚の履歴挙動は部材の曲げ剛比に支配され、設計する際には部材単位のみではなく、崩壊メカニズムを勘案した構造系全体の安全性に対する配慮が必要である。部材単位での安全性照査に基づく許容応力度設計法では、設計する際に安全性の分布が不規則になり、その安全性が変動する。

表 2 鋼製橋脚の曲げ剛比と地震時保有水平耐力

Model	1	2	3	4
K	0.487	0.380	2.047	0.610
P_a (MN)	11.32	25.40	5.43	10.70

3.2 耐震信頼性 鋼製ラーメン橋脚の地震時における安全性を Hasofer-Lind による信頼性指標 β で評価する。ここでは、前述した理論に従い、弾塑性有限変位解析の結果に対して信頼性解析を行う。数値解析に用いた活荷重および地震荷重の確率モデルは、

1) 活荷重 (単位: MN)

$$F_L(x) = 1 - \exp\left[-(x/56.49)^{2.432}\right] \quad (5)$$

2) 地震荷重 (単位: gal) : $T < 0.5 \text{ sec}$

$$F_E(x) = 1 - \exp\left[-\{(x - 41.28)/34.24\}^{0.913}\right] \quad (6)$$

である。式(5)と(6)は阪神高速道路公団設計荷重委員会による実態調査に基づき作成されたものである。得られた結果を表3に示す。

表 3 鋼製橋脚の耐震信頼性

Model	1	2	3	4
T (sec)	0.307	0.225	0.851	0.330
β	5.15	8.87	3.38	4.87

信頼性指標 β は塑性限界状態に対するもので、構造系全体の安全性の余裕を表すものである。前節で求めた保有水平耐力と同様に、橋脚の形状の相違による耐震信頼性、すなわち安全性の余裕に大きな変動が認められた。したがって、部材単位での強度に関わらず鋼製橋脚の信頼性はその形状に左右されると言える。

現在、諸外国で整備が進められている限界状態設計法を用いれば、ある限界状態に対する構造物の信頼性指標 β を一律に与えることができる。

したがって、部材単位での安全性照査に基づく許容応力度設計法よりも、構造系全体での安全性に基づく限界状態設計法が、耐震設計上、優れていると結論づけられる。

4. おわりに

形状の異なる鋼製ラーメン橋脚が一定の鉛直荷重と漸増の水平荷重を受ける場合、その崩壊メカニズムと保有水平耐力を求めた。また、その結果に対して信頼性解析を行い、鋼製橋脚の安全性について検討した。その結果、鋼製ラーメン橋脚の保有水平耐力と崩壊メカニズム、さらに耐震信頼性は、その形状および柱とはりの曲げ剛比の影響を受け、大きく変動することがわかった。したがって、許容応力度設計法と比較して限界状態設計法が、耐震設計上、より優れていることを明らかにした。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編・同解説、丸善、1996-12。
- 2) 中井・河井・吉川・北田・酒造：鋼製ラーメン橋脚の実績調査 (上)，Vol.82, No.6, pp.35-40, 1982-6。
- 3) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、丸善、1997-3。