

鋼製橋脚に関する簡易非線形動的解析手法の検討

田嶋仁志¹・半野久光¹・○船本浩二¹・松田 宏²・尾山靖史³・矢部正明³

¹正会員 首都高速道路公団 (〒100 東京都千代田区霞ヶ関 1-4-1)

²正会員 日本電子計算株式会社 (〒135 東京都江東区東陽 2-4-24)

³正会員 株式会社長大 (〒305 茨城県つくば市春日 3-22-6)

1. はじめに

鋼製橋脚の非線形動的解析手法および復元力モデルについては、様々な提案がなされている。その中で道路橋示方書では、1自由度系バイリニアモデルが提案されている。しかしながら、特に最大荷重を超えた領域までの挙動を追うことはバイリニアモデルでは困難とされており、その領域まで、応答計算可能な簡易な非線形動的解析手法について検討した。本研究では、簡易的な復元力モデルとして、トリリニアモデル、及びその履歴モデルを一部修正した修正トリリニアモデルを提案し、6者共同研究で行われたハイブリッド実験結果と比較した。

2. トリリニアモデルの概要

(1) モデル開発までの経緯

建設省土木研究所を中心に矩形および円形断面橋脚に対する復元力特性をハイブリッド実験により求める研究が行われており¹⁾、実験結果と複数の復元力モデルによる比較シミュレーションが行われている²⁾。このシミュレーション結果において、最大耐力付近までの範囲であれば、バイリニア型の復元力モデルが比較的地震時の挙動を追えることが確認できた。ただし、実験における最大応答変位が最大荷重時を超えて劣化域に達してしまった場合には、宇佐美らによる2パラメータモデル及び進行性劣化履歴モデル (Damage Index based on Evaluatory-degrading Hysteretic Model) など特殊な復元力モデルを除きシミュレーション結果との差が大きくなり計算精度が低下することが考えられる。

本論文は、以上の点を踏まえて、最大荷重時を越える応答に対して、実験結果と比較しても最大応答変位の計算値が比較的一致すると共に、特殊なパラメータの設定をしなくても簡易な復元力モデルを提案するものである。このモデルには、従来から良く用いられている移動硬化型のトリリニアモデルと鋼板の局部座屈やP-Δ効果の影響を考慮し、トリリニアモデルを一部修正した修正トリリニアモデル（以下修正トリリニアモデルと称す。）の2タイプを用いた。これらのモデルは、各

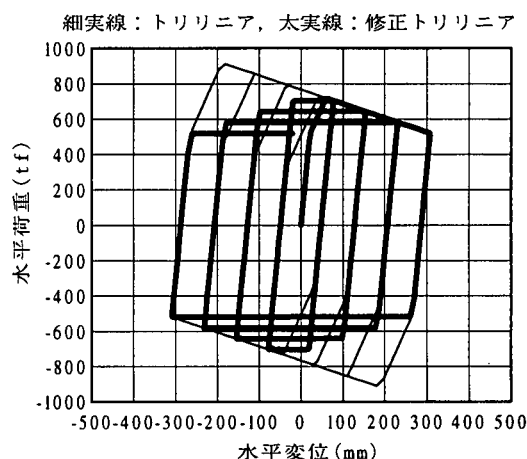


図-1 トリリニアと修正トリリニアモデルの比較

種の2軸繰返し載荷実験やハイブリッド実験結果を参照することにより設定したモデルである。

(2) トリリニアモデルの概要

他のモデル（2パラメータモデル等）と同様、橋脚の頂部のみ集中質量を持つ1自由度系にモデル化し、橋脚頂部位置での水平力Hと水平変位 δ の関係を履歴曲線としてモデル化する。

以下にモデル化にあたっての検討ポイントを示す。

- ①骨格曲線の定義のみで復元力特性を表現できること。
- ②劣化域に入った場合でも、ハイブリッド実験にみられるように耐力が減少する現象を再現できること。また、同時に最大荷重以下においても最大応答変位等の精度を維持できること。
- ③2軸繰返し載荷実験結果とハイブリッド実験結果を参照してルールの決定を行なう。

図-1にトリリニアモデルと修正トリリニアモデルの復元力モデルの概念図を示す。復元力モデルの概要としては、以下のものを挙げることできる。

1) 最大応答変位が最大荷重時変位以下の場合

最大応答変位が最大荷重作用時の変位以下である場合には、降伏荷重より2次剛性を持つ移動硬化バイリニア型の復元力モデルを用いる。

2) 最大応答変位が最大荷重時変位を超える場合

トリリニアモデルは移動硬化型と同様の復元力特性曲線であるのに対し、修正トリリニアモデルでは過去の最大変位点での耐力以上の値とならないように設定している。トリリニアモデルには、劣化域剛性、剛性低下、強度低下に対し、以下の特定のルールを設定した。

a. 劣化域剛性

繰返し載荷実験データから劣化域剛性を設定することとした。ただし、実地震動の応答に対しては、劣化域剛性は繰返し載荷実験の包絡線勾配よりも小さい傾向にあるため、設定の仕方に対して検討が必要である。

b. 剛性低下

片振り、両振り載荷時に、振幅が大きくなるに連れ、除荷開始点の変位が大きくなると、初期剛性 k_0 に対して除荷時平均剛性 k_d が低下する現象がみられるが、本モデルはあくまでも簡易化を目指すものであること、除荷開始点の剛性が初期剛性と比べてさほど変化しないことから考え、第一段階としては、初期(降伏)剛性を一定値として使用することとした。

c. 強度低下

強度の低下の度合いは、劣化域剛性が設定されれば水平変位の関数として自動的に設定される。ただし、変位の増大に伴う耐力の低減に併せて交番繰返し荷重を受ける場合、修正トリリニアモデルの耐力は最大変位時での耐力の絶対値の範囲でのみ変化できることとした。これは、有限要素用構成則として開発された修正2曲面モデルなどと類似の考え方である。

3. ハイブリッド実験結果との比較

(1) 解析ケース

建設省土木研究所、鋼材クラブ等で実施されたハイブリッド実験を対象に、2. で提案したトリリニアモデルによってどの程度実験結果を再現できるかを検討した。

検討方法は、トリリニアモデルを用いた非線形動的解析を行い、実験と解析より得られる慣性力作用位置の水平荷重—水平変位関係を比較した。表-1に、検討を行った実験ケースを示す。供試体A1RおよびP1は基本供試体であり、供試体P3はP1供試体にコーナー部補強を行ったものである。

各試体の概要を表-2に示す。各供試体は、実地震波を用いたハイブリッド実験の他に、繰返し回数1回の準静的繰返し載荷実験を行っている。

(2) 解析モデル

解析モデルは、トリリニアモデルおよび修正トリリニアモデルの復元力特性を有する1質点系の振動モデルとした。慣性力

表-1 実験ケース

供試体	地盤種別	入力地震動
A1R	I種	神戸海洋気象台記録 N-S成分
P1	II種	標準波形(タイプI, I-II-1)
P3	II種	標準波形(タイプII, II-II-1)

表-2 各供試体の概要

	A1R	P1	P3
断面(mm×mm)	583×583	900×900	900×900
板厚(mm)	7	9	9
縦リブ断面(mm×mm)	3.9×41	6×80	6×80
ダイヤフラム間隔(mm)	364	840	840
幅厚比パラメータ R_f	0.472	0.497	0.497
載荷高さ(m)	3.3	5	5
軸力	$0.16 \sigma_y \cdot A$	$0.15 \sigma_y \cdot A$	$0.15 \sigma_y \cdot A$

(注) σ_y : 降伏応力, A : 断面積

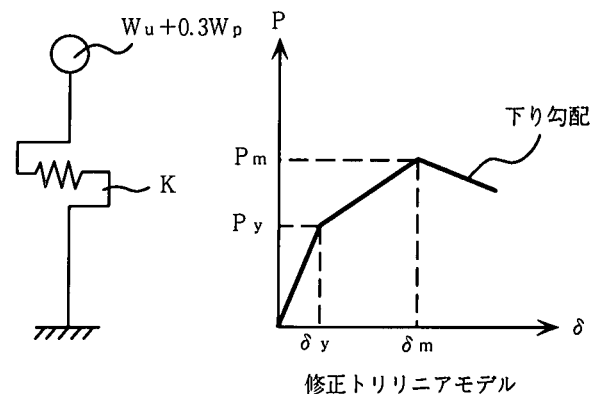


図-2 非線形動的解析モデル

作用位置の質量は、固有周期が等価となるように上部構造質量 W_u と橋脚質量 W_p の30%より成る等価質量とした。また、解析モデルの降伏耐力、最大力作用位置の質量は質量とした。また、解析モデルの降伏耐力、最大耐力および最大耐力以後の下り勾配は、各供試体の準静的繰返し載荷実験より求める。図-2に非線形動的解析モデルを示す。

(3) 下り勾配(劣化域剛性)の特性

近年、鋼製橋脚の最大耐力および変形性能を確認するために、鋼製橋脚の単調載荷実験および繰返し載荷実験が行われている。その実験結果によると、最大耐力までは荷重条件の違いによる影響は小さく、最大耐力以後はその影響が大きくなることが報告されている。

最大耐力以後の下り勾配は、その評価方法が難しく、単調載荷実験や繰返し載荷実験の包絡線を用いることが多く、その

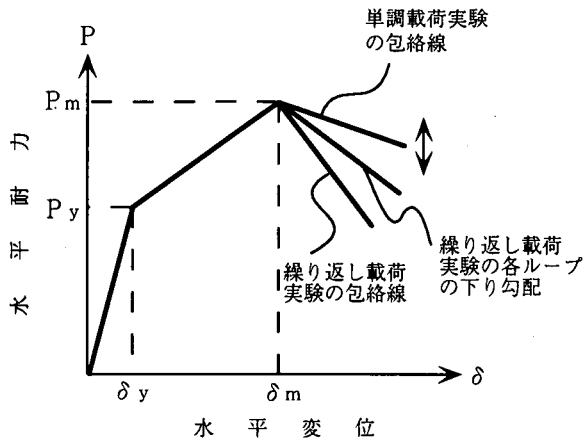


図-3 各種載荷実験より得られる下り勾配

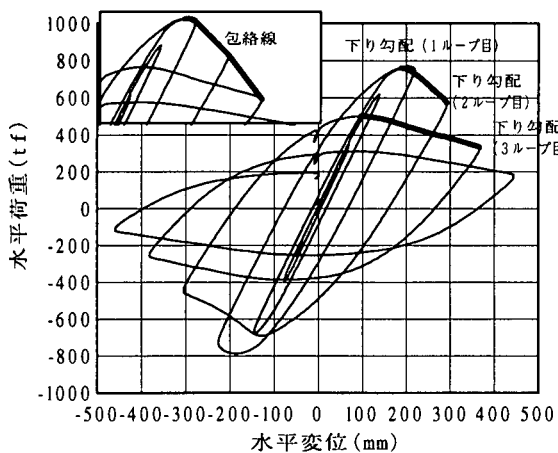


図-4 履歴ループと下り勾配の関係
(P3 供試体の場合)

包絡線も繰返し載荷回数による影響がかなり大きいことが指摘されている (図-3 参照)。

ここでは、各供試体のトリリニアモデルの骨格曲線を定めるために、前述の繰返し回数1回の準静的繰返し載荷実験結果の降伏点、最大耐力点および各グループにおける下り勾配に着目した。図-4に準静的繰返し載荷実験による履歴ループと下り勾配の関係を示した。図より、各グループの下り勾配は、第1ループの勾配が一番大きく、ループの回数に比例して、その勾配が小さくなる傾向にある。包絡線は、各グループの最大変位点を結んでいるため、その勾配は、各グループの勾配に比べて大きい。また、包絡線の勾配は、応答変位が大きくなるに従い、その勾配の傾きが大きく変化することがわかる。これより、どの領域の勾配を用いるかが問題となる。

(4) ハイブリッド実験結果と動的解析結果の比較³⁾

図-5に供試体A1Rのハイブリッド実験結果と非線形動的解析結果の比較を示す。図中、細実線が実験結果、太実線が非線形動的解析結果を示している。

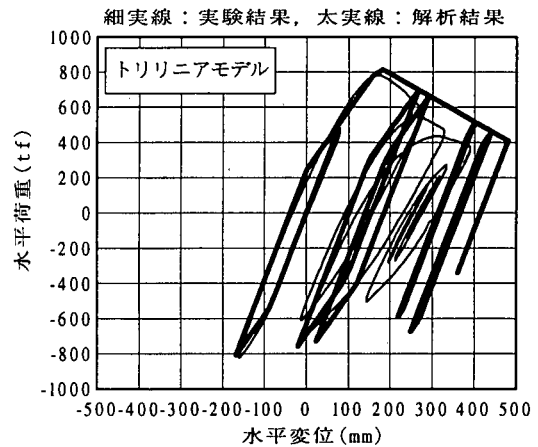


図-5 実験結果と解析結果の比較 (A1R)
(トリリニアモデルを用いた場合)

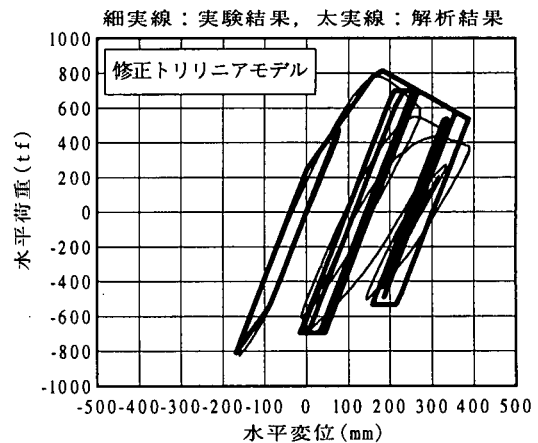


図-6 実験結果と解析結果の比較 (A1R)
(修正トリリニアモデルを用いた場合)

解析モデルの復元力特性は、トリリニアモデルを用いた。また、解析モデルの最大耐力以後の下り勾配は、準静的繰返し載荷実験の3ループ (第1, 2, 3ループ) の下り勾配の平均値を用いた。ここで、3ループの下り勾配の平均値を用いた理由は、平均化することにより繰返しによる下り勾配の変化の影響を考慮するためである。

供試体A1Rのハイブリッド実験結果に着目すると、橋脚は、初期に数回降伏領域と最大耐力の間を往復した後、すぐに最大耐力点に達して、最大耐力以後の下り勾配の領域に至っている。その後、反対側の位置に戻ることもなく、片側のみで履歴ループを描いている。その履歴ループは、ループの回数が増すにつれて残留変位を伴うようになり、各グループの勾配も小さくなっている。

図-5より、トリリニアモデルを用いた場合の最大応答変位は、実験結果に比べてかなり大きくなっている。トリリニアモデルは、最大耐力以後の応答変位が大きくなる傾向にある。一方、解析モデルの下り勾配に包絡線の勾配を用いた場合の応答

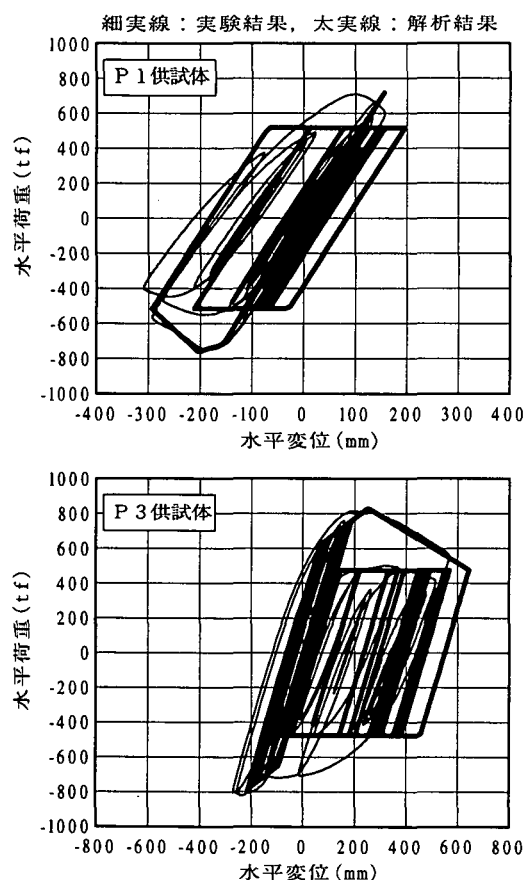


図-7 実験結果と解析結果の比較

変位も、3ループの下り勾配の平均値と同様に、実験の最大応答変位より大きくなる傾向であった。

次に、同解析モデルの復元力特性として、修正トリリニアモデルを用いた場合を、図-6に示す。なお、解析モデルの最大耐力以後の下り勾配は、3ループの下り勾配の平均値を用いている。図より、修正トリリニアを用いた場合は、実験の最大応答変位を良く表現しているが、最大耐力以後の荷重の低下は実験結果に比べてやや小さい。また、解析モデルの下り勾配に包絡線を用いた場合は、トリリニアモデルと同様に実験の最大応答変位より大きくなる傾向であった。

ここでは、最大応答変位を良く近似している修正トリリニアモデルの復元力特性と3ループの下り勾配の平均値を以後の解析モデルに用いた。図-7にP1供試体とP3供試体の実験結果と解析結果の比較を示す。P1供試体は実験と解析の最大応答変位がほぼ等しく、P3供試体は、実験と解析の最大応答変位がやや異なる。

P1供試体とP3供試体の実験に用いた入力地震動は、標準波のタイプIとタイプIIであることから、いずれもその特性は異なる。実験供試体の最大耐力以後の挙動は、入力地震動の特性より、P1橋脚は最大耐力以後の繰り返しによる下り勾配の変化の影響が大きく、P3橋脚はその影響は小さいと考えられるが、タイプI地震動を入力した場合においても比較的最大応答変位は整合している。表-3に、実験と解析の最大応答変位の値を示す。

表-3 最大応答変位の比較

復元力モデル	トリリニアモデル	修正トリリニアモデル		
供試体	A1R	A1R	P1	P3
実験結果	39.0cm	39.0cm	30.9cm	56.7cm
解析結果	48.1cm	38.8cm	29.3cm	64.5cm
解/実	1.23	0.99	0.95	1.14

供試体A1R, P1, P3の実験結果と動的解析結果を比べて、修正トリリニアモデルの妥当性の検討および下り勾配の評価方法を試みた。その結果、修正トリリニアの復元力特性および3ループの下り勾配の平均値を用いることにより、実験の最大応答変位を解析で概ね得ることができた。しかし、最大耐力以後の履歴ループの追跡は、必ずしも一致しているとはいえない。また、実際の橋脚の挙動は複雑で、橋脚の耐力特性のみならず、入力地震動の特性が、最大耐力以後の挙動に大きく影響を与える。そのため、このような、簡易的な解析モデルにより、より精度良く最大耐力以後の応答を追跡するためには、入力地震動の特性を良く理解して、復元力モデルの設定をする必要があると考えられる。

4. まとめ

鋼製橋脚の地震時共同を計算するために、繰り返し載荷実験結果を用いた簡易な非線形動的解析モデルを提案し、ハイブリッド実験結果と比較した。その結果、修正トリリニアモデルは、最大耐力を超えた領域の応答に対し、実験の最大応答変位をある程度精度良く再現することが可能であると考えられる。また、本手法では基本的には共同研究等の実験供試体数の多い1回繰り返し載荷実験の結果をベースに復元力モデルを設定している。そのため、本手法を用いることにより、各種のパラメータ（幅厚比など）を持つ鋼製橋脚に対し、パラメータと関連づけた復元力モデルの設定が可能になると考えられる⁴⁾。

最後に、これらの研究にあたって、「首都高速道路の橋梁に関する調査研究委員会」の藤野委員長（東京大学工学部教授）をはじめ各委員のみなさまのご指導をいただいたことに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所他：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) 高久達将、池田茂、岡本隆、松田宏等：鋼製橋脚のハイブリッド実験と非線形動的応答解析の比較、鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集 pp301～pp306、平成9年5月
- 3) Terada, M., and Yasunami, H., et al, "Pseudo-Dynamic Testing of Steel Bridge Piers", Stability and Ductility of Steel Structures, SDSS, Vol.1, pp.297-302, 1997
- 4) 例えば、田嶋、半野：矩形鋼製橋脚の変形性能に関する載荷実験、第52回土木学会年次講演会、I-B, pp208-209