

鋼製橋脚のハイブリッド実験法の開発

Development of New-Type Hybrid Test for Steel Bridge Piers

新木崇功†, 青木徹彦††, 鈴木森晶††

Takanori Araki, Tetsuhiko Aoki, Moriaki Suzuki

Abstract Since the Hyougoken-nanbu Earthquake in 1995, many researchers have been performed experimental studies on the steel bridge piers. But many of these are conducted under quasi-dynamic repeated loading. On the other hand, as a alternative manner, hybrid test is used to know the structural behavior for the specific seismic wave. However, this method requires large amount test specimens because there are many earthquake waves. If these two methods are combined effectively, bridge pier behavior using less test specimens can be obtained for many earthquake wave data. This study demonstrates the trial research on constructional such new type hybrid experiment system.

1. はじめに

兵庫県南部地震では、高速道路の倒壊により地震直後の救急支援の遅れや、その後の物流機能停止を及ぼし、我が国の経済的損失は極めて大きかった。上部に大きな重量を有する高架高速道路は、地震時に特に大きな被害を受けやすく、橋脚の耐震安全性の向上は重要な研究課題である。

今日まで、鋼製橋脚の耐震性能を明らかにし、その性能向上を図るため、本大学も含め多くの研究機関および大学で鋼製橋脚の静的繰り返し載荷実験(静的実験)が大量に行われてきた¹⁾²⁾。しかし、静的繰り返し実験では、基準変位の整数倍を順に与える繰り返し載荷により、基礎的で一般性がある耐震特性が得られるが、実際の地震動を受けたときの鋼製橋脚の挙動についての情報を得ることが困難である。例えば、供試体が破壊するまで非常に大きな変位を与え、繰り返し載荷を行うが、実際の地震動で果たしてそのような極限状態に達するかどうかは不明である³⁾。

これに対してハイブリッド実験がある。この実験は実験装置と計算機(解析用コンピュータ)をオンラインで結び、大地震力によって生じる構造物の複雑な非線形特性を実験によって取り入れ、順次計算機で数値解析し、構造物の応答を求める実験である⁴⁾⁵⁾⁶⁾。これにより、ある

1つの実地震波に対する挙動をほぼ正確に明らかにすることができる。しかし、ハイブリッド実験では1つの供試体に対して1つの地震波の応答しか得られないため、ばらつきがある多くの地震波に対する挙動は明らかではない。

ハイブリッド実験では、多くの地震波に対する挙動を調べるためには、大量の実験と膨大な費用が必要となる。しかし、もし静的実験から得られた単純な水平荷重-水平変位履歴曲線から非線形復元力モデルを作成することができれば、基本特性から複数の地震波の応答を知ることができる。これを本研究では疑似ハイブリッド実験と呼ぶ。

本研究では、図-1に示すプロセスで実地震動に対する鋼製橋脚の挙動に関する研究を進める。はじめの段階として図-1の①に示す鋼製橋脚の静的繰り返し載荷実験を行う。これは、ハイブリッド実験結果からは得ることができない基礎的で一般性がある耐震特性を把握するためである。

次に、②に示す大型構造実験ができる本学耐震実験センターに大型載荷システムを用いたハイブリッド実験システムを構築する。現在、このハイブリッド実験システムは開発段階にあり、はじめにシステムの安定性を検証するために予備実験を行う。そして、③に示すように、鋼製橋脚を1自由度モデル化し、兵庫県南部地震で観測されたJR鷹取駅観測地震動N-S成分(Type2, 2種地盤)が入力された場合のハイブリッド実験を行う。

④の疑似ハイブリッド実験手法の提案は将来の課題で

† 愛知工業大学大学院 建設システム工学専攻

†† 愛知工業大学 都市環境学科土木工学専攻(豊田市)

ある。本研究では、その第 1 段階として、静的繰り返し
 載荷実験の水平荷重 - 水平変位履歴曲線を用いて、非線
 形復元力モデル作成を提案する。

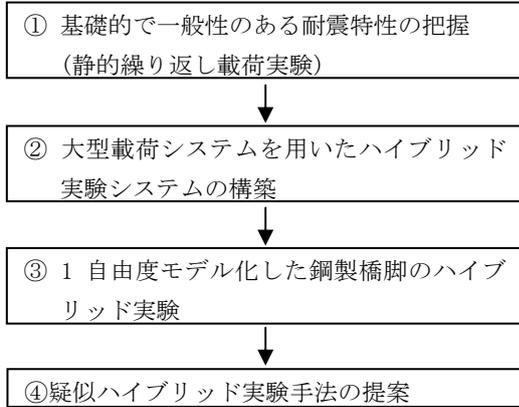


図-1 鋼製橋脚の地震挙動に関する研究プロセス

2. 実験計画および方法

2.1 相似率

橋梁のハイブリッド実験では、構造全体は実寸法で数
 値モデル化し、橋脚を縮小モデル化した供試体に載荷す
 るため、相似率の設定が重要である⁷⁾⁸⁾。ここでは、実構
 造物と縮小モデルに同じ材料を用いると、両者の降伏応
 力が等しいことから、相似比を計算すると下の表-1 のよ
 うになる。

表-1 各物理量の相似比

項目	倍率	項目	倍率	項目	倍率
長さ	S	応力	1	時間	S
面積	S ²	力	S ²	速度	1
体積	S ³	質量	S ³	加速度	S ⁻¹

2.2 実験供試体

実験に用いる供試体は、材質 SM490、板幅 450mm、板厚
 6mm の正方形補剛箱型断面とし、断面を構成する各面は 2
 本のリブ(6×55mm)と高さ方向に 450mm 間隔のダイア
 フラムで補剛されている。供試体概要図を図-2 に、供試体
 寸法および各パラメータを表-2 に示す。なお、幅厚比パ
 ラメータ R_R 、 R_F 、細長比パラメータ λ は式(1)~(5)によ
 って与えられる⁹⁾¹⁰⁾。

$$R_R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k_R}} \quad (1)$$

$$R_F = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k_F}} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{2h}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (3)$$

$$k_F = \frac{(1+\alpha^2)^2 + n\gamma_l}{\alpha^2(1+n\delta_l)} \quad (\alpha \leq \alpha_0) \quad (4)$$

$$k_F = \frac{2(1+\sqrt{1+n\gamma_l})}{1+n\delta_l} \quad (\alpha > \alpha_0) \quad (5)$$

ここで、 α : 補剛板の縦横寸法比、 α_0 : 限界縦横寸法比、
 γ_l : 縦方向補剛材の剛比、 δ_l : 縦方向補剛材 1 個の断
 面積比、 b : 板幅、 t : 板厚、 σ_y : フランジ板パネルの降
 伏応力、 E : 弾性係数、 ν : ポアソン比、 n : 補剛板のサ
 ブパネル数、 r : 断面 2 次半径、 h : 供試体の高さ、 k_R :
 座屈係数 ($=4n^2$)、 k_F : 座屈係数(式(4),(5))である。

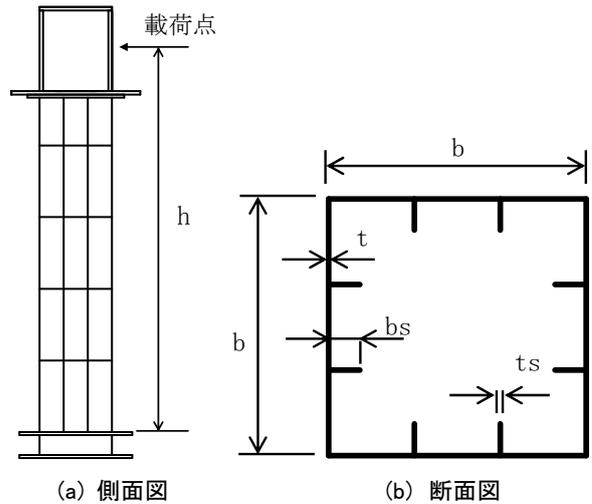


図-2 供試体概要図

表-2 供試体寸法および各パラメータ⁵⁾

供試体有効高さ	h (mm)	2400
断面積	A (mm ²)	1.330×10 ⁴
断面2次モーメント	I (mm ⁴)	4.063×10 ⁸
幅厚比パラメータ	R_R	0.522
幅厚比パラメータ	R_F	0.339
細長比パラメータ	λ	0.35
補剛材細長比パラメータ	λ_s	0.372
補剛材剛比	γ / γ^*	2.5

2.3 実橋梁の想定

本研究では、基礎的な供試体を先に用意し、その供試体に対して実橋梁を想定した。また、実橋梁の固有周期は一般的に0.2秒～1.2秒が多い。そこで、一般的な固有周期内にあたる0.7秒になるように供試体と実橋脚の相似比をS=3とした。表-3に構造パラメータを示す。

表-3 構造パラメータ

	実橋脚	供試体
縮尺	1	1/3
高さ (mm)	7200	2400
質量 (t)	594.7	22.0
剛性 (kN/mm)	54.45	18.15
減衰係数 (kN・s/mm)	1.138×10^{-2}	0.126×10^{-2}
固有周期 (s)	0.6566	0.2188

2.4 入力地震波

ハイブリッド実験に使用する入力地震波は、道路橋立方書に規定されている18波形のうち、2種地盤のJR鷹取駅観測地震動(N-S成分)を選んだ¹¹⁾。この地震波は、これらの中で最も振幅が大きく、他の解析例でもよく取り上げられる代表的な地震波である。入力した地震波の加速度波形を図-3に示す。

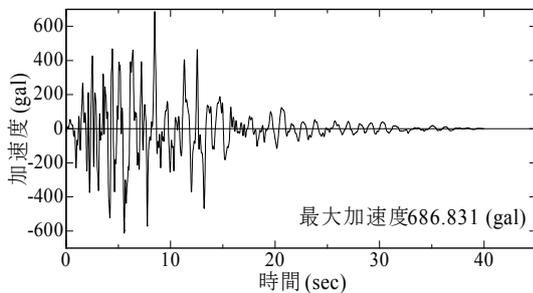


図-3 JR 鷹取駅観測地震動(N-S 成分)

2.5 ハイブリッド実験法

2.5.1 実験の仮定

ハイブリッド実験は、式(6)に示す運動方程式、

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = f \quad (6)$$

による仮想的実験である。上式の構造物の質量Mと減衰Cは不変量であり、剛性Kの変化規則が分かれば、振動解析が可能となる。そこで、構造物の変位と変力の関係として、未知量である剛性を実験から得る。ハイブリッド実験では供試体から構造物の構成則を求める。

本研究で行ったハイブリッド実験手法は以下の仮定に基づき行った。

- (1) $n \sim n+1$ ステップ間での変位が小さく、変位と復元力の関係は1次式で近似できる。
- (2) 変位の変化に伴い、剛性が線形的に変化する。
- (3) $n \sim n+1$ ステップ間での剛性は等しく、式(7)で表される。

$$K_{n+1} = \frac{r_{n+1} - r_n}{X_{n+1} - X_n} \quad (7)$$

2.5.2 実験手順

ハイブリッド実験法の手順を示す。図-4に実験手法の概要図を示す。

- ① 実橋梁構造を一自由度系にモデル化し、実構造物のM: 質量, C: 減衰係数, K: 剛性を定める。
- ② このモデルに式(6)を適用し、地震波の加速度データを入力する。
- ③ n ステップ目の既知変位 X_n から、増分変位 ΔX ($\Delta X = X_{n+1} - X_n$) を予測する。実際のプログラムの中では、式(8)に示す運動方程式により求める。

$$\hat{k}_{n+1} \Delta X = \hat{F}_{n+1} + \Delta H \quad (8)$$

$$\hat{k}_{n+1} = \left(\frac{1}{2\beta\Delta t} C + \frac{1}{\beta\Delta t^2} M \right)$$

$$\hat{F}_{n+1} = -M\Delta\ddot{X}_{g,n} + M \left(\frac{1}{\beta\Delta t} \dot{X}_n + \frac{1}{2\beta} \ddot{X}_n \right) + C \left(\frac{1}{2\beta} \dot{X}_n + \Delta t \left(\frac{1}{4}\beta - 1 \right) \ddot{X}_n \right)$$

ここで、 \dot{X} : 応答速度, \ddot{X} : 応答加速度, $\Delta\ddot{X}_g$: 入力地震波の増分加速度, $\Delta t=0.01$, $\beta=1/6$ である。

- ④ 求めた応答変位 X_{n+1} に相似比を乗じて、供試体の変位に変換して供試体に与え、同時に供試体から復元力 r_{n+1} を得る。
(実際に供試体へ与えられた変位 X_{n+1} を外部変位計で計測する。)
- ⑤ 得られた復元力増分 Δr と変位増分 ΔX により剛性を修正する。この剛性を再び式(8)に代入し、 $n+1$ での応答変位 X_{n+1} , 速度 \dot{X}_{n+1} , 加速度 \ddot{X}_{n+1} を式(9)～(11)より再計算する。以上のことを繰り返し計算する。

$$X_{n+1} = X_n + \Delta X \quad (9)$$

$$\dot{X}_{n+1} = \left(\frac{1}{\beta\Delta t} \right) X_{n+1} - \left[\left(\frac{1}{2\beta} \right) X_n + \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \dot{X}_n + \Delta t \left(\frac{1}{4}\beta - 1 \right) \ddot{X}_n \right] \quad (10)$$

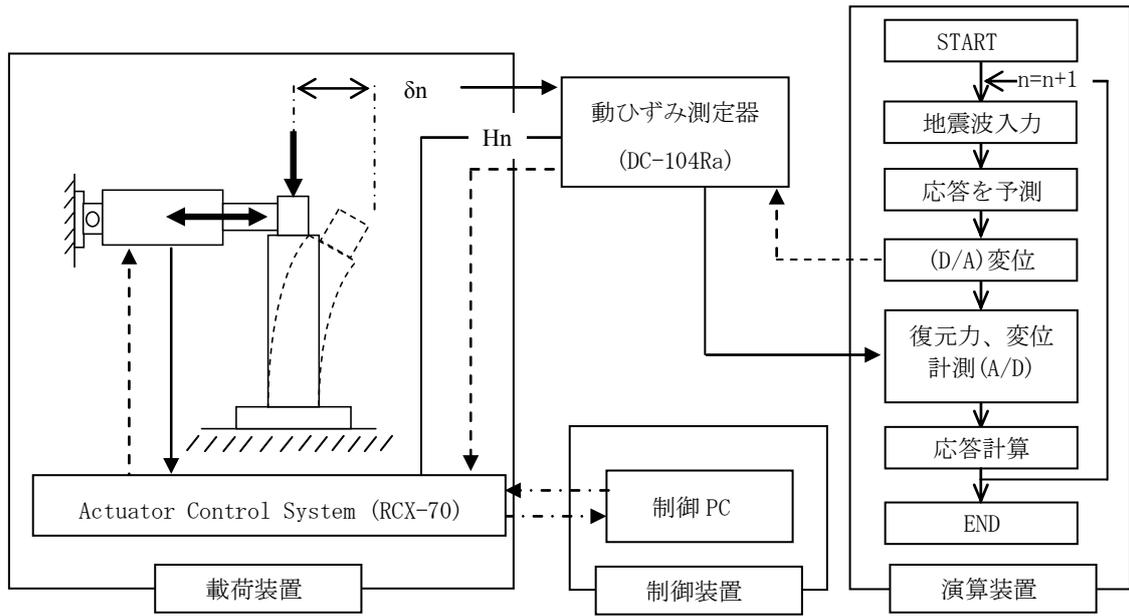


図-5 実験システム概要図

$$\ddot{X}_{n+1} = \left(\frac{1}{\beta \Delta t^2} \right) X_{n+1} - \left(\left(\frac{1}{\beta \Delta t^2} \right) X_n + \left(\frac{1}{\beta \Delta t} \right) \dot{X}_n + \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{X}_n \right) \quad (11)$$

- ⑥ 供試体の破壊判断条件により, 供試体に作用する水平荷重が最大荷重の 7 割程度に低下した時点で供試体が終局状態に達したとみなす.

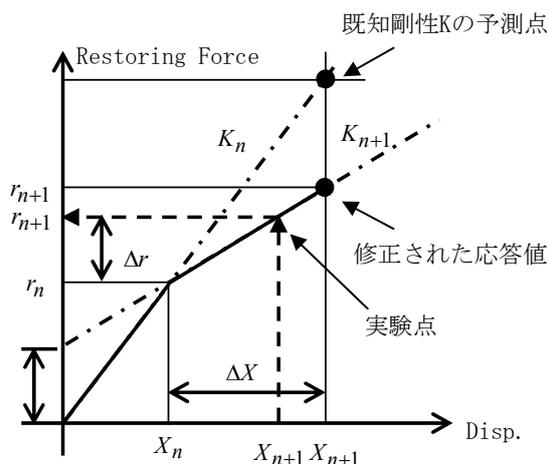


図-4 ハイブリッド実験手法

2.6 実験システム

2.6.1 制御および演算システム

ハイブリッド実験システムは, アクチュエータ制御シ

ステム (RCX-70), AD/DA 変換機, 動ひずみ測定器, 制御用コンピュータおよび演算コンピュータを使用した実験システムからなる. この実験システムは, 载荷装置, 制御装置および演算装置の 3 つで構成されている.

制御装置はアクチュエータを制御用コンピュータにより自動制御に設定するシステムである. 演算装置のハイブリッド実験変位制御プログラムは, Visual Basic6.0 を用いて作製した. 本プログラムは, 演算用コンピュータで使用し, 応答計算によって算出された応答変位を D/A 変換してアクチュエータへ出力するプログラムと供試体の実変位およびアクチュエータの荷重を A/D 変換して取得するプログラムで構成されている. また, 制御装置と演算装置はオンラインで接続されている.

供試体の変位と荷重は動ひずみ測定器 (レーザ変位計, アクチュエータの荷重計) によって計測される.

図-5 に実験システムの概要図を示す.

2.6.2 実験载荷装置

本研究の载荷装置には, 水平荷重载荷用に 2000kN アクチュエータを 1 基用い, 上部構造重量を想定した鉛直荷重载荷には, 静的 4400kN アクチュエータを 2 基用いる. 図-6 に実験装置の概要を示す.

水平荷重载荷は, 演算コンピュータによって算出された変位を正確に与えるため, 制御コンピュータによる自動制御とした.

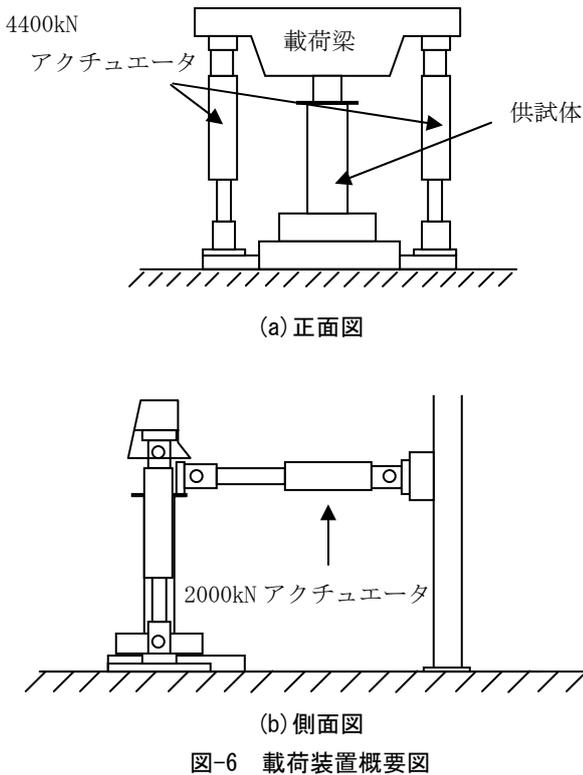


図-6 載荷装置概要図

2.7 載荷方法

上部構造重量に相当する鉛直荷重 P は、供試体の全断面降伏軸力 $P_y = 4321\text{kN}$ の 15% である 648kN を載荷する。ただし、 P_y は供試体設計時の断面寸法と公称降伏応力を用いている。降伏水平荷重 H_y は式 (12)、(13) で求めた値の小さい方を採用し、降伏水平変位 δ_y はせん断変形を考慮した式 (14) により算出した¹²⁾。

本研究で用いた降伏水平変位 δ_y は 12.0mm 、降伏水平荷重 H_y は 245kN である。

$$H_y = \frac{M_y}{h} \left(1 - \frac{P}{P_y} \right) \quad (12)$$

$$H_y = \frac{M_y}{0.85h} \left(1 - \frac{P}{P_E} \right) \left(1 - \frac{P}{P_u} \right) \quad (13)$$

$$\delta_y = \frac{H_0 h^3}{3EI} + \frac{H_0 h}{GA_w} \quad (14)$$

ここで、 M_y ：降伏モーメント、 h ：供試体高さ、 E ：弾性係数、 I ：断面 2 次モーメント、 P_E ：オイラーの座屈強度、 P_u ：道路橋示方書に示される局部座屈の影響を考慮した中心軸圧縮強度、 G ：せん断弾性係数、 A_w ：ウェブ断面積である。

2.8 静的繰り返し載荷実験

ハイブリッド実験に先立ち、初期剛性や基本的な載荷特性を得るために静的繰り返し載荷実験を行う。載荷方法は上部工重量を想定し一定鉛直荷重 P のもと、水平荷重 H を同時に載荷する。繰り返し水平荷重は降伏変位 δ_y を基準とし、 $\pm \delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ 、 \dots と漸増させながら載荷する。また、水平荷重が最大荷重の 7 割程度に低下した時点で終了とする。実験装置はハイブリッド実験と同様の装置を使用する。水平荷重はアクチュエータを手動制御で与える。

2.9 ハイブリッド実験システムの検証

2.9.1 予備実験の目的

本研究で開発したハイブリッド実験システムの性能を以下の項目について検証するため、予備実験を行った。

- (1) アクチュエータの自動制御システムの精度の検証
- (2) ハイブリッド実験の変位制御プログラムの検証、およびアクチュエータ自動制御システムとオンラインで接続した場合のシステムの動作確認
- (3) n ステップの剛性 K_n を用いて算出した予測変位と供試体から得られた変位、復元力によって修正された変位の誤差の影響を確認

2.9.2 システムの検証方法

予備実験では、実際のハイブリッド実験と同様に初期条件として、表-3 に示す質量、剛性、減衰係数、および図-1 に示す地震波を入力する。ただし、供試体にアクチュエータを接続しないため、復元力は荷重計の情報ではなく、プログラムの中で想定した完全弾塑性モデル(図-7)によって計算された荷重値を用いる。また、プログラムによって計算された応答変位値は、実際にアクチュエータに送られる。

図-8 に予備実験装置の概要図を示す。

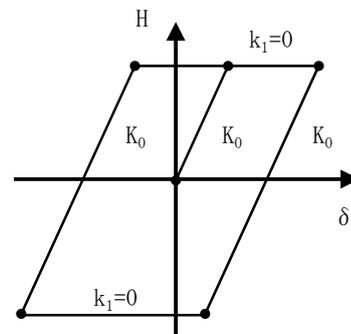


図-7 完全弾塑性復元力モデル

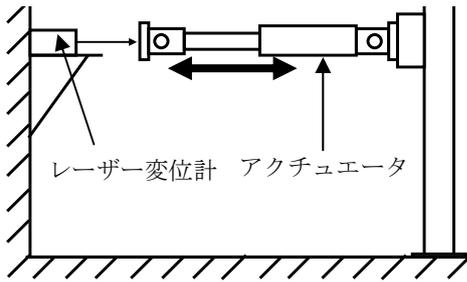


図-8 予備実験概要図

3. 実験結果

3.1 静的繰り返し載荷実験結果

(1) 水平荷重—水平変位履歴曲線

実験結果による水平荷重—水平変位履歴曲線を図-9に示す。縦軸は水平荷重、横軸は水平変位である。この結果は地震時の挙動を示してはいない。しかし、鋼製橋脚の基礎的な特性を示しており、この結果を利用して地震時の挙動が解明されると非常に便利になる。

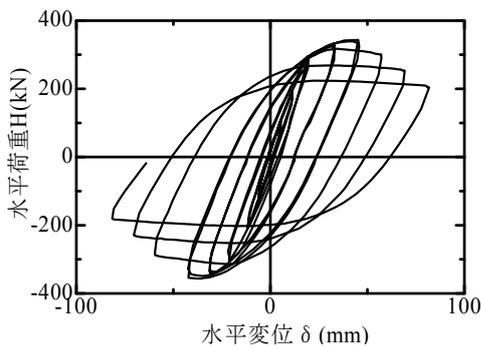


図-9 水平荷重—水平変位履歴曲線

(2) 包絡線

引張側および圧縮側の履歴曲線は同等の履歴を示すため、両ピーク値の平均値を取り包絡線を求めた。図-10に示す包絡線では、 $3\delta_y$ で最大荷重 340kN となり、その後、徐々に荷重の低下がわかる。

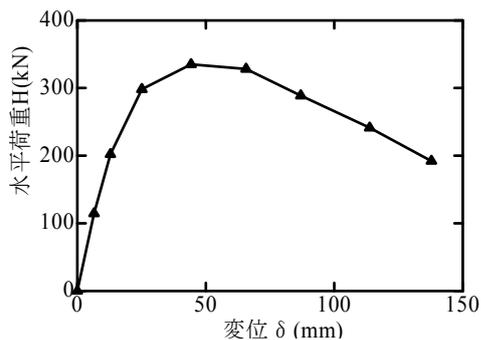


図-10 包絡線

(3) 塑性率

塑性率は構造物の変形性能を評価する指標の 1 つであり、式(15)によって求められる。

$$\mu_{90} = \frac{\delta_{90}}{\delta_y} \quad (15)$$

ここに δ_{90} は水平荷重が最大荷重に達した後 90%まで低下したときの水平変位で、 δ_y は降伏水平変位である。本供試体の塑性率は 4.66 であった。

(4) 吸収量

エネルギー吸収量は、地震時に構造物が地震外力をどの程度吸収するかという性能を示す。エネルギー吸収量が少ないと地震外力が上部構造に直接作用し、その結果、応答変位が過大に生じ、急激な強度変化をまねき危険である。よって、耐震性能を評価する上で特に重要な指標となる。図-11 にエネルギー吸収量を示す。

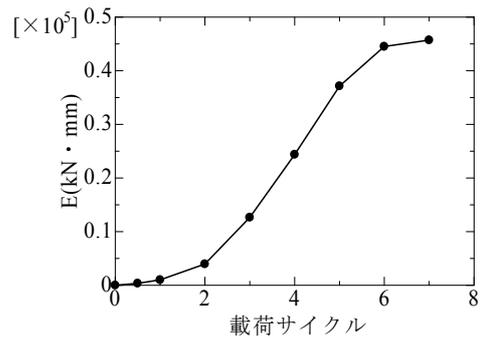


図-11 エネルギー吸収量

(5) 除荷域剛性

繰り返し載荷が進むにつれ、除荷開始点の変位が大きくなると、図-12 に示すように初期剛性 k_0 より除荷域剛性 k が低下する。

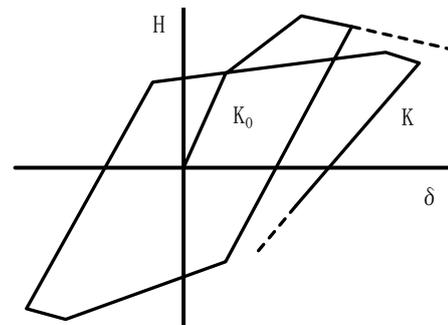


図-12 繰り返し載荷モデル

降伏変位に対する剛性低下を図-13 に示す。縦軸は除荷域剛性 k を初期剛性 k_0 で無次元化し、横軸は変位を降伏変位 δ_y で無次元化した。また、引張側および圧縮側の履歴曲線は同等の履歴を示すため、除荷域剛性は引張側と圧縮側の平均値とした。同図より、初期から $7\delta_y$ にかけて約 57% 低下がみられた。

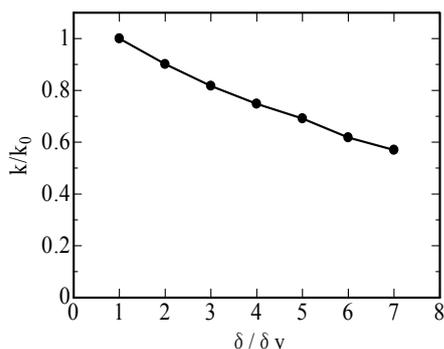


図-13 除荷域剛性低下

3.2 予備実験結果

システムの検証結果を図-14 に示す。同図中の指令変位とは、演算コンピュータのハイブリッド実験変位制御プログラムによって算出された応答変位である。この変位値をアクチュエータが取得し、実際に可動した変位を計測変位とする。また、図中の Simulation とは解析によって算出された応答変位である。

この図で、指令変位と Simulation の線は重なっているため、両者は区別できない。計測変位では初期に約 1.0mm 程度の誤差が生じた。この誤差は手動制御から自動制御へと切り換えた際に生じたもので、初期微動の後には一定の誤差を維持していることから、本研究で開発したシステムは安定して動作しているといえる。

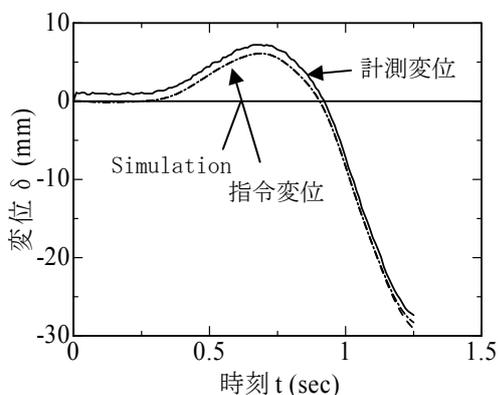


図-14 時刻歴応答変位の比較

3.3 ハイブリッド実験結果

(1) 水平荷重-応答変位履歴曲線

図-15 にハイブリッド実験(実線)および硬化型復元力モデル(破線)で得られた実橋脚の水平荷重-応答変位の履歴曲線を示す。縦軸は水平荷重、横軸は応答変位を表している。硬化型復元力モデルを図-16 に示す。

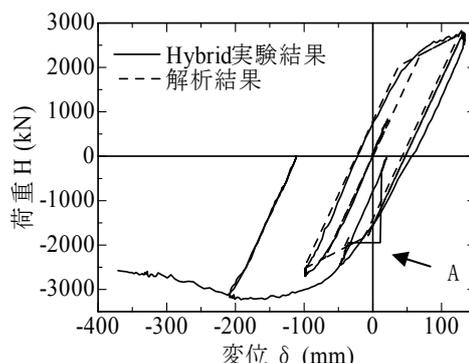


図-15 実橋脚の水平荷重-応答変位履歴曲線

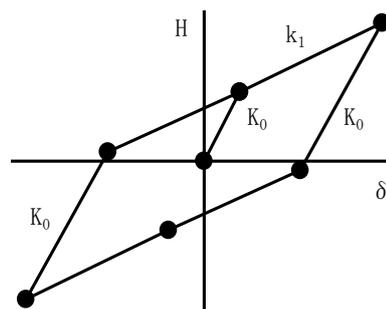


図-16 硬化型復元力モデル

図-15 より、ハイブリッド実験と解析で求められた履歴曲線がよく一致していることがわかる。しかし、図中に示す A 点付近では実験の履歴曲線に乱れがみられる。これは、実験中に装置の不具合により、実験が一時中断したために生じた。すなわち、本研究で開発したプログラムは 1 ステップごとにボタンをクリックして変位を進めていく方法であったため、アクチュエータに一定時間、指令を中断していたことで自動制御が突然手動制御に変わりアクチュエータの変位がずれたことが原因である。この問題は現在のプログラム中では改良された。

(2) 応答変位(δ / δ_y)

実橋脚の時刻歴応答変位を降伏水平変位 δ_y で除し、無次元化したものを図-17 に示す。横軸は、時刻 t を表している。この図より、時刻 4.7 秒のとき最大変位 $10\delta / \delta_y$ (約 120mm) が生じている。また、同図の B 点で応答変位に不連続点が見られる。これは、前項 3.3.1 の中で述べたように、装置の不具合の影響と考えられる。

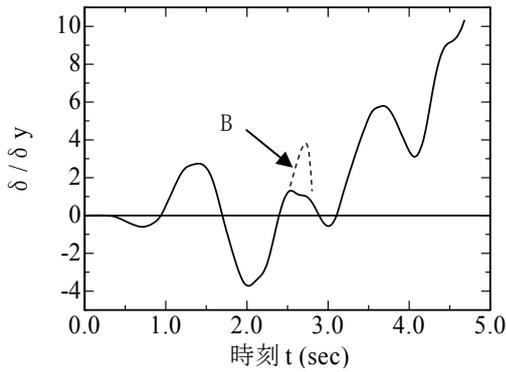


図-17 時刻歴実橋脚の応答変位

(3) 実験精度の誤差

ハイブリッド実験における供試体変位の計測結果と応答計算より求めた応答変位の比較を図-18 に示す. 縦軸は応答変位, 横軸は時刻 t である. 点線は計測変位を表しており, 実線は指令変位を表している. この図からわかるように, 装置不具合の影響はあるものの, 計測変位と指令変位がほとんど一致していることがわかる.

図-18 に示した計測変位と指令変位の変位差を図-19 のようになる. 縦軸は誤差 ΔX_{n+1} , 横軸は時刻 t であり, 装置不具合の影響を受ける前の誤差を示す. 誤差は平均 0.73 mm で, 最大変位 120mm に対する誤差は約 0.6%と微小であり, 問題ないことがわかった.

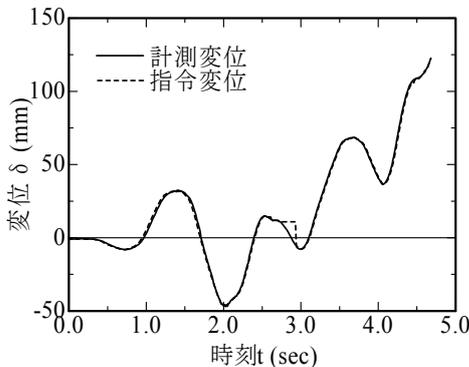


図-18 供試体の計測変位と指令変位の比較

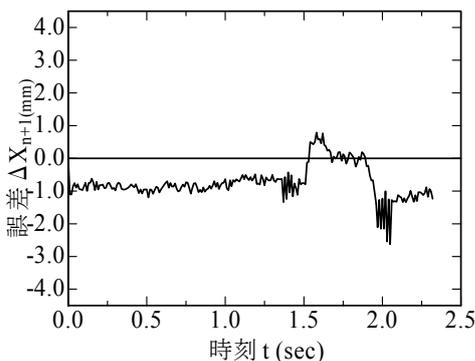


図-19 供試体での実験誤差

4. 疑似ハイブリッド実験手法の提案

4.1 提案の背景

第 1 章で述べたように, ハイブリッド実験のデメリットは, 材料の降伏域を超える大きな地震動を入力した場合, その地震波に対して 1 つの供試体しか使用できないことである. しかし, 静的実験は地震時の慣性力を想定した載荷方法であり, この実験から得られた単純な水平荷重 - 水平変位履歴曲線を用いて非線形復元力モデルを作成することができれば, 様々な地震波を入力した場合の複雑な応答計算が低コストで可能となる¹³⁾.

そこで, 本章では, 本研究で行った静的実験の水平荷重 - 水平変位履歴曲線を用いて, 非線形復元力モデル作成の基本的な考え方を述べる.

4.2 非線形復元力モデルの作成

復元力モデルを作成する場合, まず復元力モデルの基本となる骨格曲線の決定が重要である. これまで骨格曲線を決定するため, 多くの実験データに基づいた経験式が定められてきた¹⁴⁾. 経験式を用いると実験データがなくても, 橋脚のパラメータから容易に骨格曲線を決定することができる. しかし, 経験式は必ずしもすべての鋼製橋脚に適用できるとは限らない.

疑似ハイブリッド実験の大きな特徴は, 鋼製橋脚を縮小した供試体の繰り返し特性から骨格曲線を決定することである. これにより, ハイブリッド実験に近い方法で応答解析が可能となる.

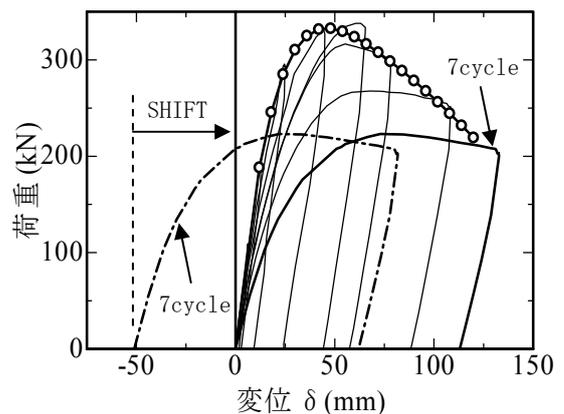


図-20 非線形骨格曲線の作成

図-20 は水平荷重 - 水平変位履歴曲線による非線形骨格曲線の作成過程である. 図-9 からわかるように, 例えば 7 サイクルでは, 従来の履歴ループは図-20 の一点破線のような位置にあるが, この変位を原点にシフトさせ

ると、太い実線のように表すことができる。他のサイクルも同様に移動させる。図中の丸印の曲線は、重ね合わせた履歴ループをもとに近似骨格曲線を求めた結果である。本研究では、近似骨格曲線が変位軸に対して対称であると仮定すると、図-21 に示す骨格曲線を作成することができる。

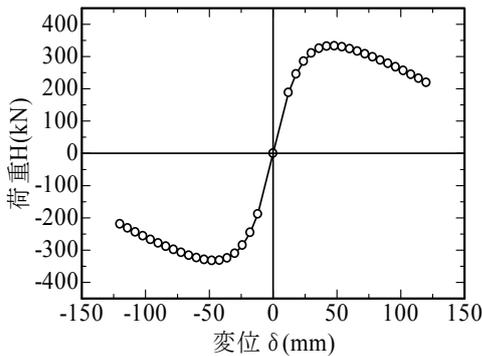


図-21 非線形骨格曲線

4.3 除荷経路

剛性 $K \sim K+1$ 間での逆進処理は図-22 のように行う。鋼製橋脚の履歴特性では、繰り返し载荷が進むにつれ、除荷開始点の変位が大きくなると、初期剛性 $K=1$ よりも剛性が低下する傾向を示す。本研究では、簡単に行うため、逆進した場合の剛性を初期剛性 $K=1$ と仮定し、負の荷重域での解析では、骨格曲線を変位 δ までシフトする。

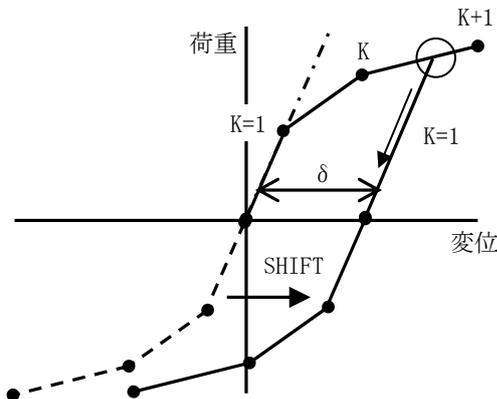


図-22 逆進処理

4.4 疑似ハイブリッド実験の課題

鋼製橋脚の静的繰り返し载荷実験における水平荷重—水平変位を曲線近似する簡単な手法を提案した。今後は、提案した手法を用いて非線形復元力モデルを作成し、多くの実験データによる検証が必要である。

本研究で提案した手法では、除荷経路における剛性を初期剛性と等しいと仮定した。しかし、第3章静的繰り返し载荷実験結果の中で述べたように、繰り返し载荷を

与えた鋼製橋脚では、除荷開始点の変位が大きくなると、初期剛性 k_0 より除荷域剛性 k が低下する傾向を示す。今後、本研究で提案した手法に、除荷域剛性の低下の影響を盛り込んでいけば、さらに精度の良い非線形復元力モデルの開発が可能となり、ハイブリッド実験への応用が期待できる。

5. 結論

本研究では、大型载荷システムを用いたハイブリッド実験装置を開発し、システムの試運転を重ね、最終的に1種類の地震波に対する応答変位の履歴結果を得た。また、静的繰り返し特性を用いた非線形復元力モデルを作成した。本研究で得られた結論を以下のようにまとめる。

- 1) ハイブリッド実験では、外部変位計で計測された変位とアクチュエータに指令した変位との差は、平均1mm程度であり、開発したハイブリッド実験装置の精度は、十分良いと言える。しかし、本研究で開発したシステムでは、供試体の変位を応答計算に取り込むときに剛体補正を行わなかったため、今後はこれを行う必要がある。
- 2) 兵庫県南部地震で観測された JR 鷹取駅観測地震動 (N-S 成分) を入力した場合、本研究で想定した橋脚の応答変位はわずか1秒で降伏変位に達することがわかった。また、システムの不具合が発生する前の結果では、約2秒で降伏変位の3.7倍に相当する130mmの応答変位が得られた。
- 3) 本研究で開発したシステムは、1ステップごとにボタンをクリックして時刻 Δt を進めていく方法であったため、本システムでは供試体モデルの時間は考慮されていない。今後は供試体モデルの時間を考慮した実験手法に対応できるようなシステムの開発が必要である。
- 4) 本研究では、供試体に正方形断面橋脚を使用し、1種類の地震動に対して結果を得たが、今後、システムの改善を進め、より信頼性の高い実験データの蓄積のため、多様なケースについて実験を行う必要があると思われる。
- 5) 本研究では、疑似ハイブリッド実験手法において重要な非線形骨格曲線の作成についてまとめた。今後、この手法を開発し、ハイブリッド実験結果と比較する必要がある。

謝辞：本研究は、愛知工業大学耐震実験センターで行なわれ、耐震実験センター研究費を使用して行いました。博士課程の党紀氏、学部 4 年生、鈴木博技術員他ご協力頂いた方に深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 宇佐美勉, 今井康幸, 青木徹彦, 伊藤義人：繰り返して荷重を受ける鋼圧縮部材の強度と変形能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 37A, 1991, pp. 121-134
- 2) 鈴木森晶, 宇佐美勉, 竹本潔史：鋼製橋脚モデルの静的および準静的挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 507/I-30, pp. 99-108, 1995. 1
- 3) 宇佐美勉, 才塚邦宏, 木曾英滋, 伊藤義人：ハイブリッド地震応答実験による鋼製橋脚の強震時挙動, 土木学会論文集, No. 519/I-32, 101-113, 1995. 7
- 4) 家村浩和：ハイブリッド実験の発展と将来, 土木学会論文集, 第 356 号/I-3, pp. 1-10, 1985 年 4 月
- 5) 伊藤義人, 木曾英滋, 才塚邦宏, 宇佐美勉：ハイブリッド地震応答実験手法に関する考察, 土木学会第 49 回年次学術講演会, 1994 年 9 月
- 6) 伯野元彦, 四俵正俊, 原 司：計算機により制御された、はりの動的破壊実験, 土木学会論文報告集, No. 171, pp. 1-9, 1969 年 11 月
- 7) 才塚邦宏, 伊藤義人, 木曾英滋, 宇佐美勉：相似則を考慮したハイブリッド地震応答実験手法に関する考察, 土木学会論文集, No. 507/I-30, pp. 179-190, 1995. 1
- 8) Satish, K., Itoh, Y., Saizuka, K. and Usami, T. : Pseudodynamic Testing of Scaled Models , J. Structural Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 4, pp. 524-526, 1997
- 9) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編, 丸善, 2002. 4
- 10) 宇佐美勉：ハイダクティリティー鋼製橋脚, 橋梁と基礎, Vol. 31, No. 6, pp. 30-36, 1997. 6
- 11) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 1996 年 12 月
- 12) 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指針案と耐震設計のための新技術, 平成 8 年 7 月
- 13) 青木徹彦, 鈴木森晶, 田中智宏：多曲線近似履歴モデル, 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, 1998 年
- 14) 鈴木森晶, 宇佐美勉：鋼製橋脚の激震時挙動に関する基礎的研究, 名古屋大学学位論文, No. 9702, 1997 年 3 月

(受理 平成 20 年 3 月 19 日)