

論文 逆L字型RC橋脚模型ハイブリッド載荷実験のFEM3次元解析

大内 一^{*1}・米澤健次^{*1}・長沼一洋^{*1}

要旨: 逆L字型RC橋脚模型のハイブリッド載荷実験結果に対して, FEM3次元非線形解析を行い, 非定常載荷に対する適用性を検討した。さらに, 橋軸方向入力を受ける同形式橋脚の橋軸直角方向への応答について動的応答解析により影響を検討した。その結果, 実験結果の解析では履歴性状全体に渡って概ね良好な予測を与えること, 動的応答解析では橋軸方向のみの入力でその方向の1/5程度の橋軸直角方向水平力が作用することを示した。

キーワード: 逆L字型橋脚, ハイブリッド載荷, FEM3次元非線形解析, 動的応答

1. はじめに

鉄筋コンクリートを対象としたFEM非線形解析手法は近年長足の進歩を遂げたが, ソリッド要素をベースとする3次元解析は, 特に正負繰返し載荷及び動的載荷に関しては実験の少ないこともあり解析例が極めて少ない。川島等は, 上部構造自重が偏心して作用する逆L字型橋脚を対象に, 偏心量と載荷方向(1方向および2方向)をパラメータとした繰返し水平載荷実験を行っている¹⁾。さらに, 地震応答性状を明らかにする目的でハイブリッド載荷実験も行っている²⁾。前者については, 著者らが構築してきたFEM3次元非線形解析プログラム“FINAL”を用いて解析を行い, その手法の適用性を既に報告した³⁾。本報告は後者に対して同様の解析を行い, さらに非定常載荷に対する適用性を検討するものである。

ところで上記のような橋脚は橋軸方向のみの入力であっても偏心軸力を受けており橋軸直角方向の剛性が変化するためその方向にも応答することが予想される。そこで, 同プログラムを用いて動的応答解析を行いこの影響も検討した。

2. ハイブリッド載荷実験の解析

2.1 試験体

解析対象とする試験体を表-1に示す。パラメータは鉛直軸力(160kN, 橋脚基部軸応力度1MPaに相当)の偏心量 $e=0.5D, 1.0D$ (D :柱断

面高さ)と載荷方向である。実験では, 橋軸方向(Y方向)を対象にした1方向載荷と橋軸および橋軸直角方向(X方向)同時入力を対象に

表-1 解析対象試験体

| 偏心量 | Y方向入力 (橋軸直角方向) 神戸海洋気象台 観測波NS成分 | 2方向入力 神戸海洋気象台 観測波NS成分 +EW成分 |
|----------|---|--------------------------------------|
| $e=0.5D$ | H-2試験体 | H-5試験体 |
| $e=1.0D$ | H-3試験体 | H-6試験体 |

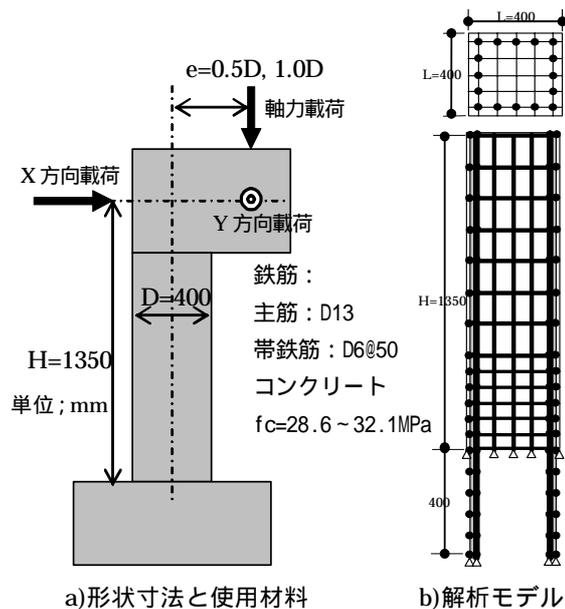


図-1 試験体

*1 (株)大林組 技術研究所 工博(正会員)

した2方向荷荷が行われている。水平2方向にそれぞれ1自由度系を仮定し、試験体頂部に取付けた2台のアクチュエータでハイブリッド制御されている。なお、入力波は表-1に示す兵庫県南部地震での神戸海洋気象台観測波の加速度振幅を30%に縮小して用いている。解析では、実験で与えられた頂部加力点変位をそのまま同位置に変位制御で与える静的解析を行った。なお、試験体形状寸法や材料の概略を図-1に示す。柱部は以下の要素でモデル化する³⁾。コンクリート：ソリッド要素，主鉄筋：トラス要素+接合要素(付着特性考慮)，帯鉄筋：トラス要素(完全付着)，基部主鉄筋の抜出しはトラス要

素+接合要素(付着特性考慮)でモデル化する。

2.2 H-2試験体

荷重-水平変位の履歴曲線を実験結果と比較して図-2に示す。考察結果を以下に箇条書きで示す。

- ・初期剛性：解析では乾燥収縮など初期応力の影響を考慮していないため、初期ループでの剛性が高くなる。
- ・復元力特性：解析は比較的大きな紡錘型の履歴特性を示す。実験は初期応力の影響に加え弾性固定条件にある。これに対し解析はスタブ内定着鉄筋の抜出しのみ考慮し、他は完全固定条件である。曲げ降伏型の試

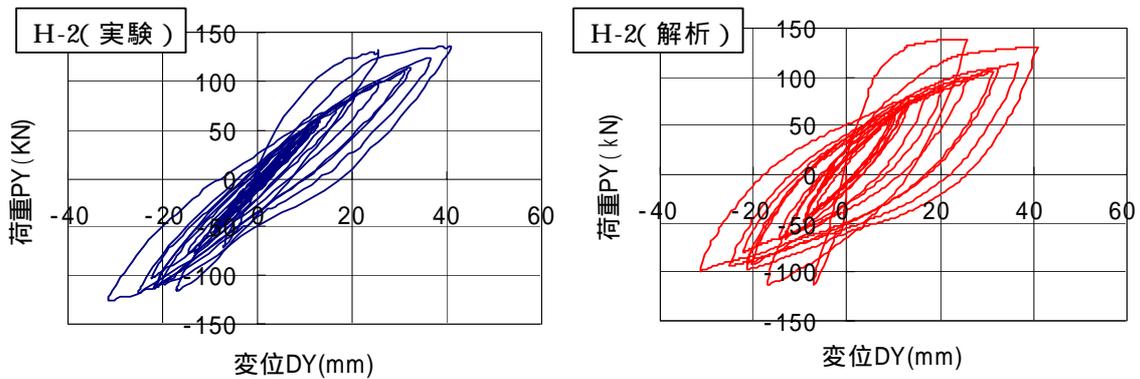


図-2 荷重-変位履歴関係(H-2試験体)

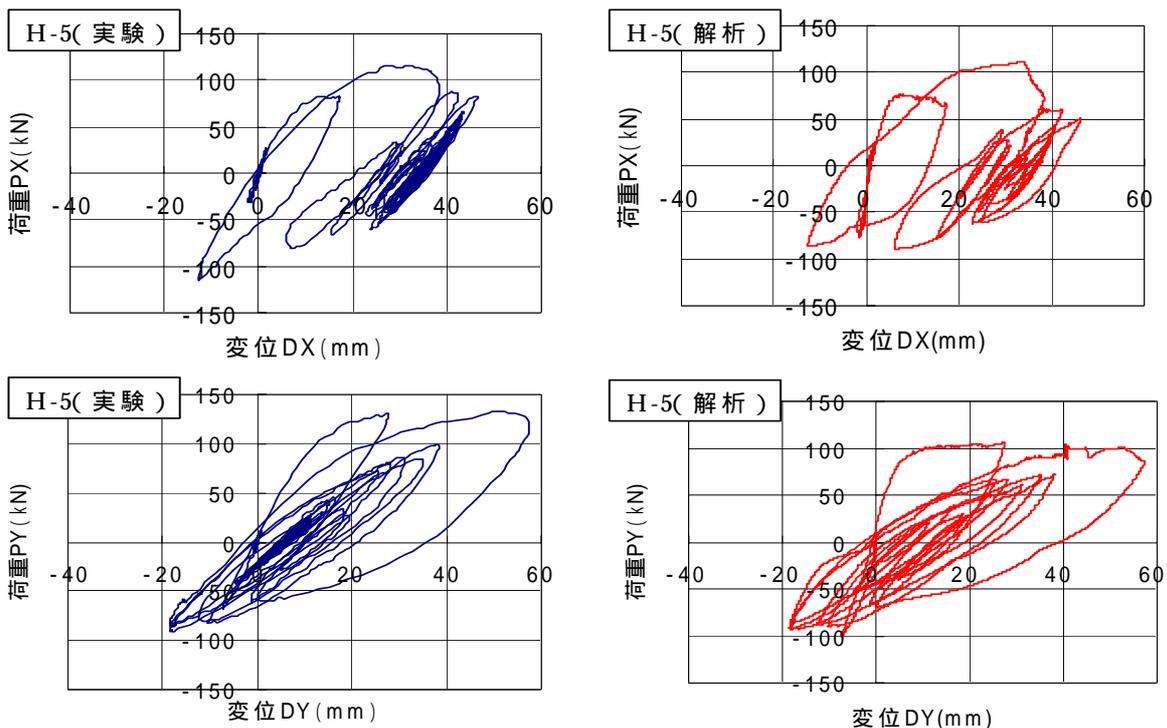


図-3 荷重-変位履歴関係(H-5試験体)

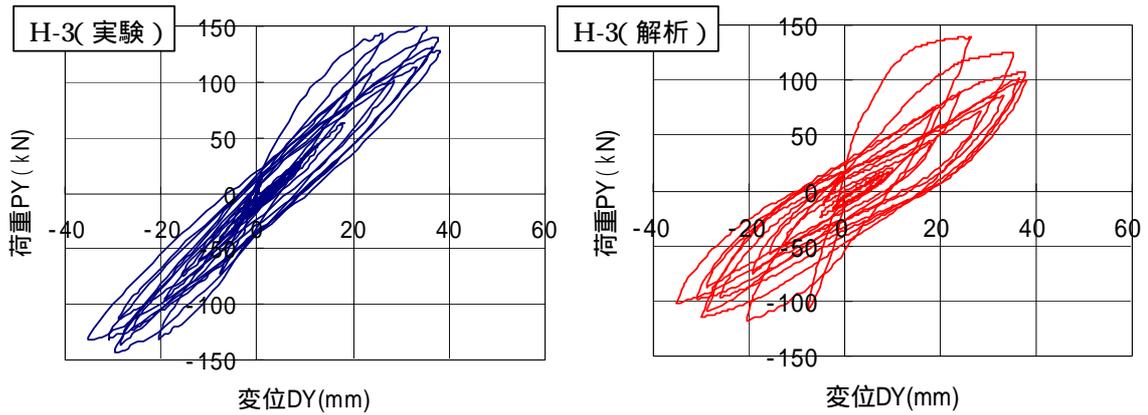


図 - 4 荷重 - 変位履歴関係 (H - 3 試験体)

験体であり，フーチング内主筋の抜出しの影響が大きく，その付着特性の相違に起因するところが多い。

- ・ ねじりモーメントの影響：偏心量が小さいためその影響は少ない。その結果曲げ破壊が卓越するため紡錘型の履歴特性を示す。

2.3 H - 5 試験体

荷重 - 水平変位の履歴曲線を実験結果と比較して図 - 3 に示す。考察結果を以下に箇条書きで示す。

- ・ 初期剛性：H - 2 試験体同様，乾燥収縮など初期応力の影響を考慮していないため，初期ループでの剛性が高くなる。
- ・ 耐力：X 方向は実験結果とほぼ同様である。初期段階の大入力時に程度の差はあるものの実験・解析ともに $DX=35\text{mm}$ で耐力低下を示す。Y 方向正側耐力については実験よりやや低い結果を示す。なお，同様の試験体を用いた繰返し載荷実験の解析結果³⁾とほぼ同様である。
- ・ 復元力特性：偏心量が小さいためねじりモーメントの復元力特性に対する影響は少ない。

2.4 H - 3 試験体

荷重 - 水平変位の履歴曲線を実験結果と比較して図 - 4 に示す。また，解析値について，水平変位を構成する曲げ成分 DY_f とねじり成分 DY_T に分解した結果，および両者の関係を図 - 5 に示す。考察結果を以下に箇条書きで示す。

- ・ 初期剛性：H - 2，H - 5 試験体同様初期

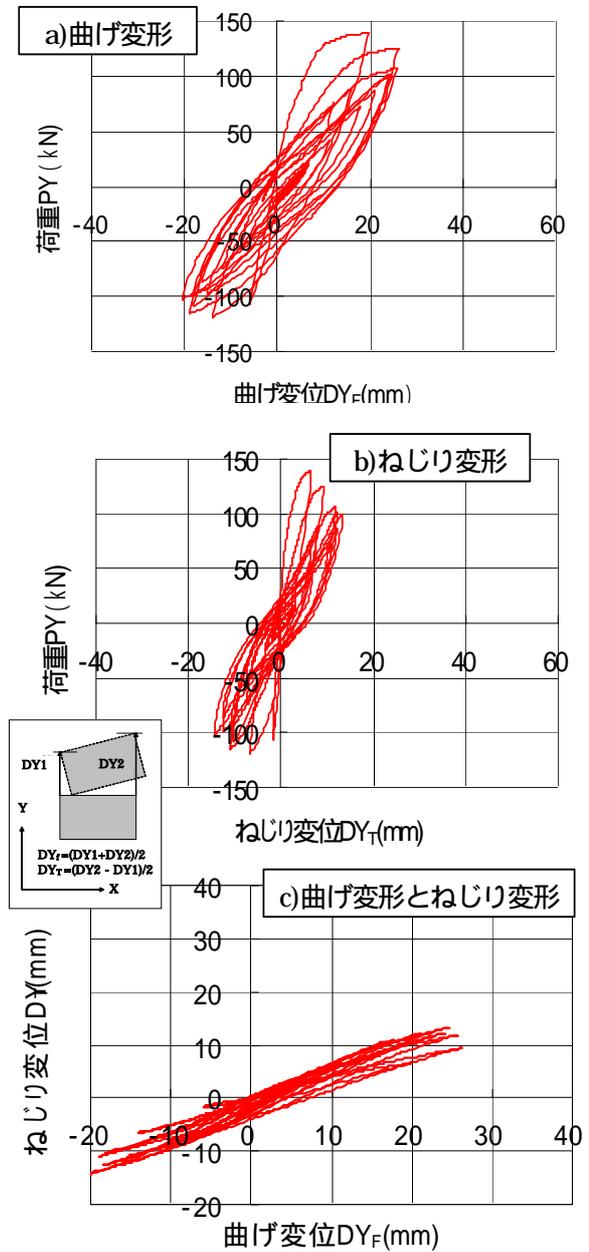


図 - 5 曲げ変形とねじり変形成分 (H - 3 試験体)

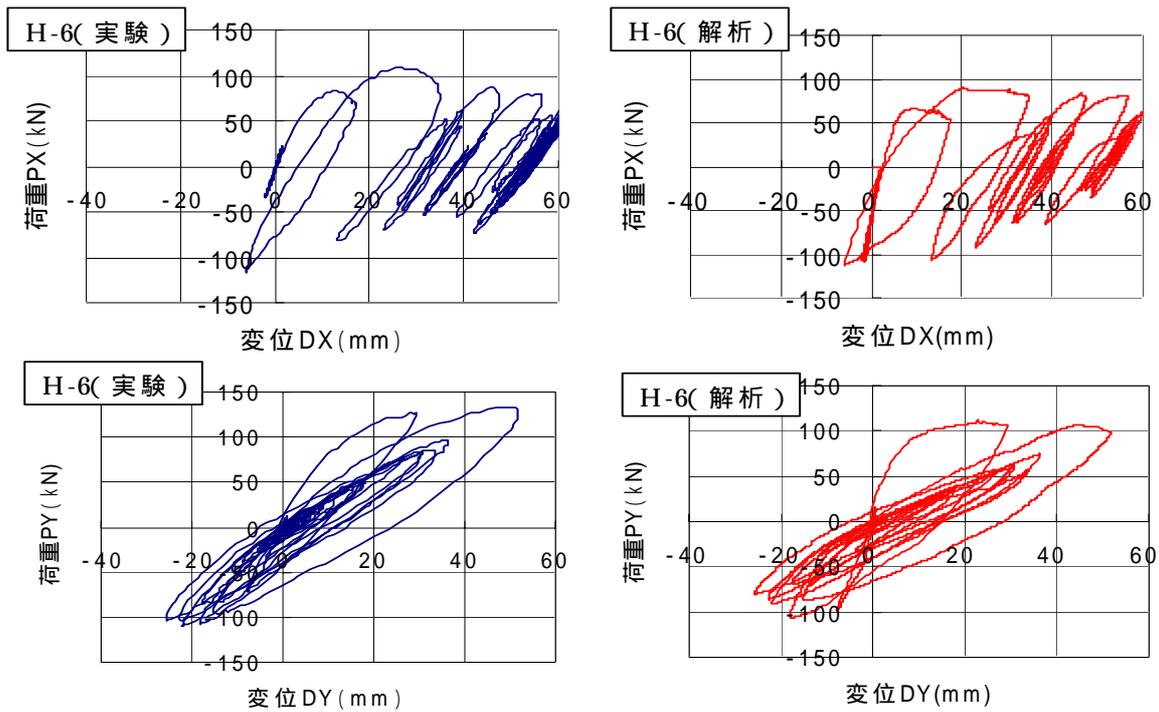


図 - 6 荷重 - 変位履歴関係 (H - 6 試験体)

ループでの剛性が高くなる。

- ・ 復元力特性：偏心量が大きいためねじりモーメントが復元力特性に影響を与える。H - 2 試験体に比較し、実験・解析ともにループ形状が細る。
- ・ 耐力：正側はほぼ実験結果と同様であるが、最大荷重以降繰返しによる耐力低下は実験結果より大きくなる。基部曲げ圧縮部分損傷へのねじりの影響が大きく主にその差異によると考えられる。また、解析ではコンクリートの引張にテンションカットオフを仮定していること、実験でのねじりせん断損傷の再現性なども差異の要因と考えられる。
- ・ 曲げ変形とねじり変形：ねじり変形成分が相対的に大きくなり、その逆 S 字型の履歴特性が全体履歴に影響を及ぼす。耐力低下とともにねじり変形は増大し、破壊へのねじりモーメントの影響が推察できる。

2.5 H - 6 試験体

荷重 - 水平変位の履歴曲線を実験結果と比較して図 - 6 に示す。また、解析値は水平変位を構成する曲げ成分 DY_f とねじり成分 DY_T に分解した結果および両者の関係を図 - 7 に示す。

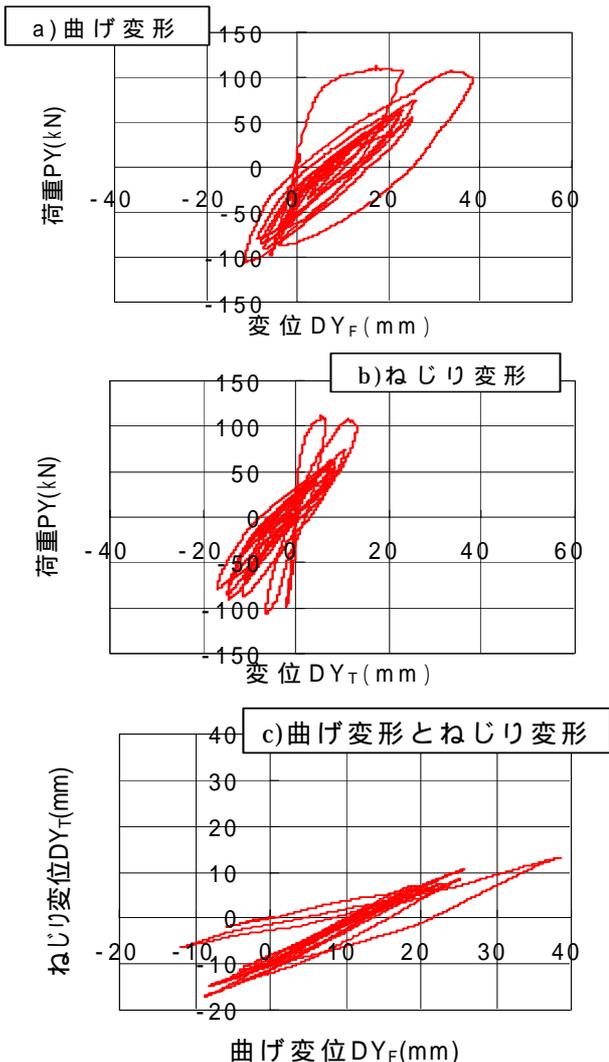


図 - 7 曲げ変形とねじり変形成分 (H - 6 試験体)

考察結果を以下箇条書きで示す。

- ・ 初期剛性：H - 2 , H - 3 , H - 5 試験体と同様である。
- ・ 耐力：正側は実験結果よりやや低い。しかし、同様の試験体を用いた2方向繰返し実験の解析結果とほぼ同様である³⁾。また解析では加振後半の定常振幅域において、特にY方向の耐力低下がやや大きい、H - 3 試験体同様ねじりによる破壊性状への影響に差違を生じたものと考えられる。
- ・ 復元力特性：偏心量が大きいためねじりモーメントの影響が復元力特性に影響を与える点はH - 3 試験体と同様である。
- ・ 曲げ変形成分とねじり変形成分：図 - 7 (a) , (b) から分るように、ねじり変形成分が相対的に大きくなり、その結果全体復元力特性に影響を及ぼす。
- ・ 負側ねじり変形成分：H - 3 試験体の場合（図 - 5）と異なり、正側へのより大きな変位振幅を経験した後、負側でねじり変形が増大する傾向がある。すなわち図 - 7 (c) に示すように、最初の正側への大変位履歴を受けた後、負側荷重段階でねじり変形成分が増大する（図 - 5 (c) との違いに留意）。正負繰返し荷重でひび割れが発生し且つ正側でより大きな変位振幅を経験後、負側に戻るときねじり剛性の低下はより大きくなると考えられる。

3. 橋軸方向加振を受ける逆L字型橋脚の動的応答

2章では非定常変位振幅を受ける同橋脚模型のハイブリッド実験を概ね予測できた。

ところで、上記ハイブリッド実験は1自由度系での解析によっている。実際には、橋軸方向加振ではあっても、偏心軸力の作用下では剛性低下に伴い、橋軸直角方向（X方向）にも応答することが予測される。さらに梁部の曲げ振動による回転慣性も予測される。

そこで、これらの影響を調査する目的で上記

の解析プログラムを用い同橋脚模型の動的応答解析を行なった。その際、減衰は $\eta=1\%$ 、質量はその重心位置が偏心量に一致するよう頂部の要素に分布させた。なお、入力波は2章と同様の地震波を用いた。このうち偏心の大きいH - 3 試験体についての結果を以下に示す。

変位、水平力、基部曲げモーメント、ねじりモーメント、および回転慣性モーメントの時刻歴応答波形を図 - 8 に示す。また荷重 - 変位履歴およびX、Y方向変位履歴を図 - 9 に示す。

考察結果を以下に示す。

- ・ 残留変位：Y方向の加振に伴いX方向に残留変位が蓄積するが、ハイブリッド載荷実験結果と同様に10~15秒で定常値に達する。なお、残留変位についてはY方向繰返し荷重のもと剛性低下に伴い偏心曲げにより蓄積されるメカニズムを前報³⁾で報告した。
- ・ X方向水平力：Y方向のみの加振にも関わらずX方向にも応答する。これは、既に述べたように偏心軸力による曲げを受けており、Y方向加振に伴うX方向の剛性低下によって応答する。最大でY方向の1/5程度の水平力が発生する。
- ・ 基部作用モーメント：上記の結果、常時偏心モーメント（ $160\text{ kN}\times 0.4\text{ m}=64\text{ kN}\cdot\text{m}$ ）の $\pm 50\%$ 程度のモーメントが発生する。その結果全作用モーメントは最大で、終局時モーメントの50%程度の値となる（終局時モーメントは、2方向載荷となるH - 6 試験体基部への最大作用モーメントとする）。これらは履歴に若干の影響を与えるが、図 - 4 と図 - 9 の荷重 - 変位履歴の比較から分かるように耐力への影響は小さい。
- ・ 回転慣性モーメント：頂部マス重心点の鉛直方向加速度とマスの積から求めた回転慣性モーメントは他に比較し極めて小さい。
- ・ ねじりモーメント：偏心に伴うねじりモーメントは最大、Y方向基部作用モーメントの1/3程度に達する。
- ・ 位相特性：X方向および回転慣性モーメント

は Y 方向とは別の位相で振動する。X 方向は橋脚としてのその方向の振動特性、回転慣性は梁の曲げ振動特性によりそれぞれ応答する。

4. まとめ

川島等のハイブリッド载荷実験結果の FEM 3 次元非線形解析、および橋軸方向加振を受ける逆 L 字型橋脚の橋軸直角方向動的応答解析による結果を以下に箇条書きで示す。

- 1) 偏心が少なく曲げ破壊の卓越する試験体: 解析はより大きな紡錘型の復元力特性を与える。これは、影響の大きいフーチング部主鉄筋の抜出しのみをモデル化していること、そして抜け出しの影響の大きい実験との付着特性の差違に起因すると思われる³⁾。
- 2) 偏心が大きくねじりモーメントの影響の大きな試験体: 実験結果同様エネルギー吸収の細った復元力特性を与える。最大荷重後の耐力低下は実験より大きくなる傾向があり、特にねじりによる基部曲げ圧縮部の損傷程度の差違と考えられる。しかし、これを除き履歴性状全体に渡って解析は良好な予測を与える。
- 3) 橋軸方向加振を受ける逆 L 字型橋脚の動的応答解析: 橋軸直角方向には橋軸方向の 1/5 程度の水平力が作用する。偏心量の大きな H - 3 試験体を対象にした場合、橋脚基部には全モーメントとして終局時モーメントの 50% 程度が作用する。しかし、履歴性状に若干影響するものの耐力にまで影響を及ぼすものではない。

謝辞: 貴重な実験データを快く提供頂いた東京工業大学川島一彦教授、ご協力頂いた同大学院後期博士課程永田聖二さんに深謝致します。

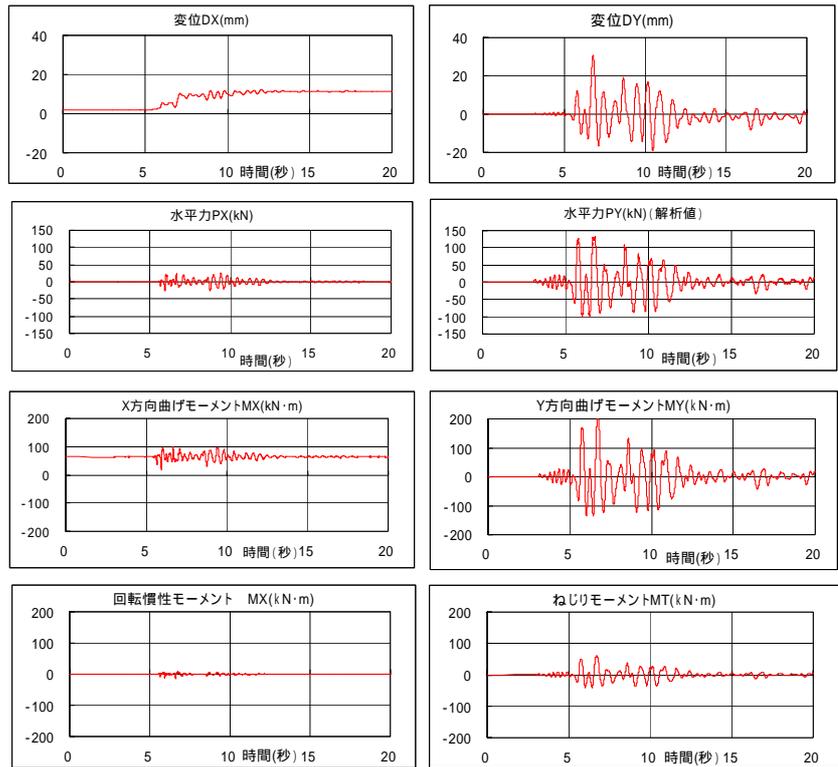


図 - 8 時刻層応答波形 (動的応答解析)

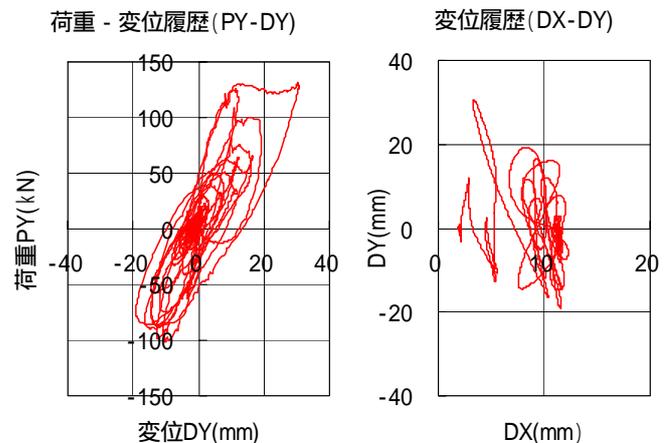


図 - 9 荷重 - 変位と変位履歴 (動的応答解析)

参考文献

- 1) 川島一彦他: 逆 L 字型鉄筋コンクリート橋脚の耐震性に関する実験的研究, 土木学会論文集 No.745/ -65, pp.171-189, 2003.10
- 2) 永田聖二他: ハイブリッド载荷実験に基づく RC 逆 L 字型橋脚の耐震性, 第 7 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.101-108, 2004 年 1 月
- 3) 大内一他: 2 方向繰返し水平荷重を受ける逆 L 字型 RC 橋脚模型実験の FEM 3 次元解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.883-888, 2005 年