

耐震評価のためのハイブリッド試験

兵庫県南部地震では、写真1に示すように高層ビルや高架橋などに多くの被害が発生した。その一部は、倒壊し都市機能をマヒさせる要因となった。新潟県中越沖地震では、柏崎刈羽原子力発電所などにも被害が発生した。また、将来、東海や南海地震が同時発生する可能性が示唆されており、その場合は現行の各種設計基準を上回る過大な地震が発生すると考えられている。



写真1 阪神大震災の被害



技術本部
EM事業部
振動音響技術室
下池 利孝

阪神大震災以降、耐震設計は損傷許容設計（構造物に幾分かの塑性変形を許容するが、機能を保持できる範囲内に抑える）が一般的となったが、さらにそれ以上の地震に備え、免震・制振装置を導入した設計や構造物の一部を破壊して主要な部位の被害を最小限に抑えるフェイルセーフの設計も検討されつつある。

損傷設計を行うためには、構造物の実地震波に対する塑性変形後の挙動を正確に把握することが必要となる。しかし、大型構造物の実加振試験は、E-ディフェンス^{*}の3次元大型振動試験装置などきわめて限られており、費用および期間を考えると簡易に活用することは難しい。その代用として期待される試験法「数値解析と実体試験を組み合わせることにより、擬似的に加振試験を再現するハイブリッド試験」について紹介する。

^{*}E-ディフェンス (E-Defense) は独立行政法人防災科学技術研究所が所管する、大型構造物の震動破壊実験を行う大規模実験施設 (実大3次元震動破壊実験施設)。

F-1 ハイブリッド試験について

1-1 概要

ハイブリッド試験とは、橋梁の橋脚や建物の地震時応答挙動を振動台を用いずに準静的に疑似再現試験を行う手法である。その手法は、数値解析と試験を併用し、動的な慣性力や減衰および構造物の弾塑性挙動を数値解析で算定し、静的な載荷に置き換える方法である。この試験法のメリットは、数値解析では表現しにくい実構造物の非線形特性（接触、ガタや座屈挙動など）や構造物の塑性変形後の剛性変化を実構造物の静的載荷試験で得られる適正な剛性を時々刻々とシミュレーションにフィードバックすることで、より実体に近い地震挙動を再現することである。また、後述する試験のように構造物全体の試験が困難なものに対しては、その構造物の崩壊の主原因となる部位または部材を取り出したハイブリッド試験と全体の数値解析を組み合わせることにより、構造物全体の地震時崩壊挙動を疑似再現できる。

たとえば、原子力発電所に対しては、設備-建屋間の支持構造物^{*1)}や大型振動台と組み合わせたハイブリッド試験による構造物・設備の機能限界の把握^{*2)}などが実施されている。

1-2 ハイブリッド試験システム

ハイブリッド試験システムのフローを第1図に示す。

ハイブリッド試験システムは以下のような流れを繰り返すことにより、構造物を準静的に載荷し、動的な地震時挙動を再現することができる。

- 1) シミュレーション（汎用ソフトやFORTRANプログラムなどによる時刻歴応答解析）により、解析モデルに対する入力地震波の変位応答を算出する。
- 2) 1) で算出した変位または荷重応答を実体試験（部分構造）に負荷する。この負荷したときに発生する実体試験結果（変位入力なら力、荷重入力なら変位）から実体試験の剛性を算出する。
- 3) 2) で算出した剛性を用い、再び1)の次のステップの数値解析を行う。

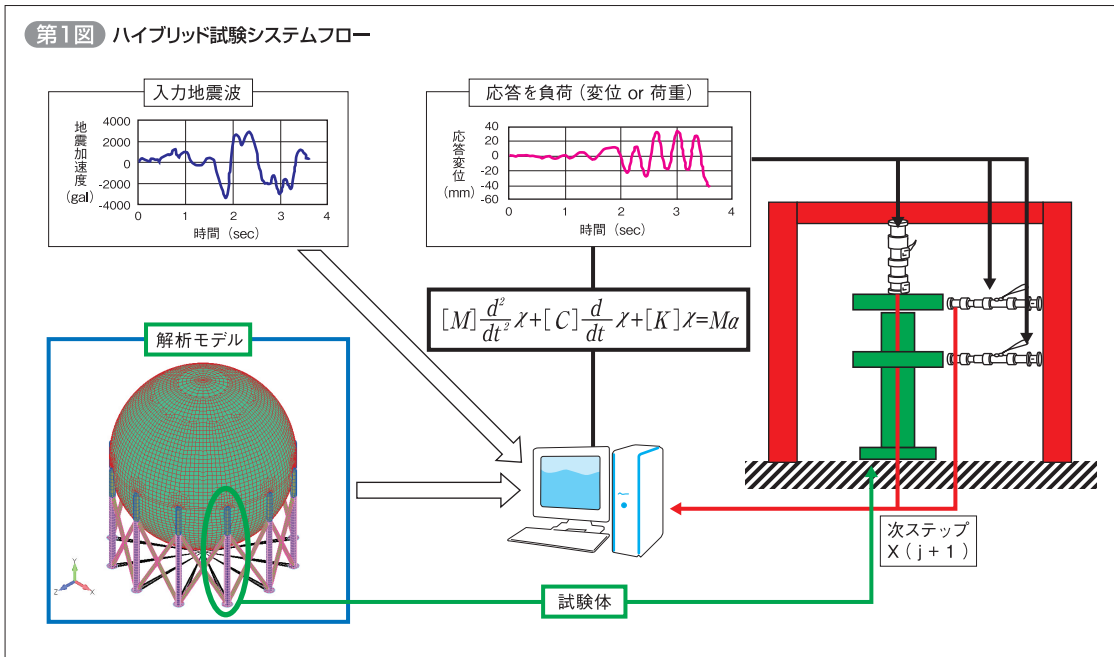
本システムにより、実際の地震はただか数秒の高速な挙動のため、構造物の応答挙動を目視で詳細に観察することが困難であるが、地震時の崩壊挙動をゆっくりと再現することができる。また、大型振動台も必要なく、既存の動的なアクチュエータがあれば、簡単に試験が可能となる。

参考文献

*1) 独立行政法人 科学技術復興機構 原子力開発事業「原子力プラント全容解析のための接合部連成モデリングの研究開発」（平成20年度成果報告）
(2) ハイブリッドに関する研究開発
<http://www.jst.go.jp/nrd/result/h20/k3-h18-12.html>

*2) 独立行政法人 原子力安全基盤機構 蛭沢勝三「耐震健全性評価に関する研究」（安全研究フォーラム2008）
(4) ハイブリッド試験を考慮した機能限界試験
<http://www.nsc.go.jp/forum/2008/siryo/10.pdf#search=耐震健全性評価に関する研究>

第1図 ハイブリッド試験システムフロー



1-3 試験例

実際のハイブリッド試験状況を写真2および写真3に示す。写真2は道路橋の橋脚の1/6スケールモデル、写真3は100Aの鋼管1mのモデルを対象とした。ここでは、後者の試験結果の一例を紹介する。

本試験の試験条件を以下に示す。

入力波形：阪神大震災で計測された地震加速度（第2図参照）
 （試験体が塑性域になるように入力地震波形を3倍まで増幅）

試験の制御：変位制御

応答変位の試験結果を第3図に示す。本結果より、第2図の入力地震波形に示したように地震加速度は2秒直前から大きくなっているが、これに対応して第3図の指令変位も大きくなっていることがわかる。本試験では時間ステップ0.02秒ごとに数値解析と载荷試験を行い構造体の剛性の変化

を適切に数値解析に反映させた。このような試験では、応答変位の正負反転時のガタや微小変位を与えるアクチュエータの制御などの難しい課題に対しては、制御ソフトを工夫することにより解決した。（ガタの部分には小さい仮定の剛性を考慮。微小変位に対しては下限値を決め、下限値以下の場合には前ステップの剛性により解析を実施する。）その結果、第3図に示すように指令変位と応答変位は十分一致している。

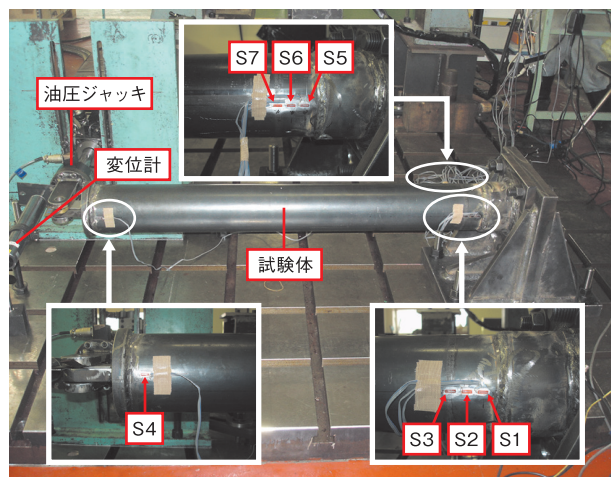
また、写真3に示すように、ひずみゲージを貼り付けることにより、第4図に示す地震応答変位に対する応力の把握を行うことも可能である。

現状のシステムは地震応答変位に対する応力の把握を行うことは可能であるが、入力地震波形と応力結果の時間軸の同期ができていない。今後は本システムと詳細な汎用シミュレーションソフトをリンクし、時々刻々と変化する応力コンターを示すことにより、点でしか得られない応力を面情報としてビジュアル化することも検討していく。

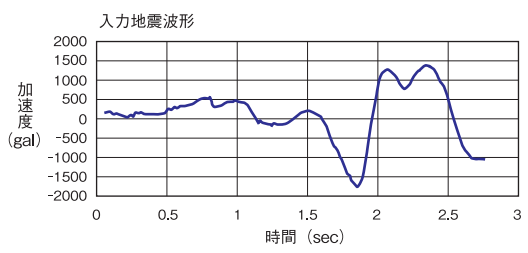
写真2 ハイブリッド試験状況
 (橋脚の1/6スケールモデル)



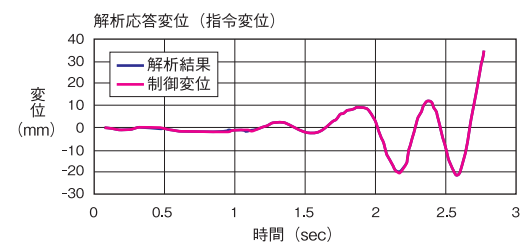
写真3 ハイブリッド試験状況
 (100Aの鋼管)



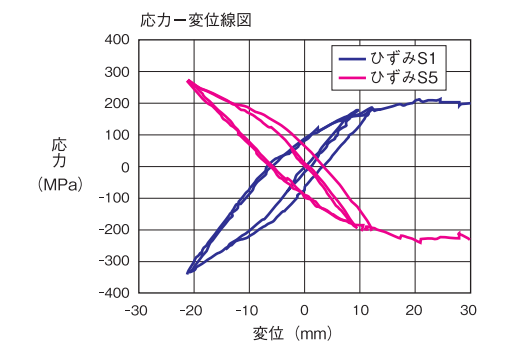
第2図 入力地震波形



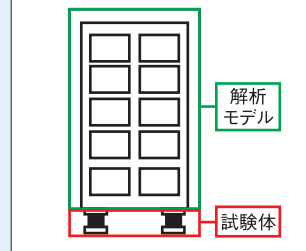
第3図 ハイブリッド試験結果(応答変位)



第4図 ハイブリッド試験結果(応力結果)



第5図 免震支承のハイブリッド試験イメージ図



当社は、大型テストベッドと10kN～2MNのアクチュエータや振動台を保有し、これまで免震支承や粘弾性ダンパーなどの制振部材の特性試験、建物の壁パネルなどの耐荷力試験など耐震に関連した試験では豊富な実績を有している。

今後は、これらの部材や装置が構造物に組み込まれ、3次元的大型実地震に対して、その機能を確保できるかの確認試験が重要となる。たとえば免震支承であれば第5図に示すように建物をシミュレーション、免震支承を試験体とし数値解析と実験を併用した多軸ハイブリッド試験によって、実地震波に対する支承部の挙動を把握することが可能となる。

原子力安全基盤機構などでは、上述のようにハイブリッド試験による耐震評価技術の開発を進めている^{*2)}。また、橋梁分野では、橋脚の水平2方向の多軸ハイブリッド試験による耐震性評価の研究が進められている^{*3)}。

このような橋梁、建築物、原子力設備などに対しては、より高精度の検証試験が要求されている。当社は、現在もハイブリッド試験技術の高度化の開発を進めており、各分野のお客さまのニーズに応じていきたいと考えている。

参考文献

- *3)
- たとえば、
- 小畑誠・後藤芳顕:
- 土木学会論文集No.752
- 「橋脚や柱などを対象とした3次元擬似的実験装置の開発」(2004.1)
- P.253-266
- 中村太郎:
- 土木学会第64回年次学術講演会「鋼製橋脚の水平2方向ハイブリッド実験」(2009.9) P.1181-1182

コベルコ科研社員の学協会発表記録

投稿論文

- 液晶配線用Al合金による単層配線技術
釘宮敏洋¹⁾
○テクノタイムズ社 月刊ディスプレイ8月号 (2009年8月)
- Formation of Deformation Twins and Related Shear Bands in a Copper Single Crystal Deformed by Equal-Channel Angular Pressing for One Pass at Room Temperature
宮本博之¹⁶⁾、Alexei Vinogradov¹⁷⁾、橋本敏¹⁷⁾、与田利花¹⁾
○日本金属学会 Materials Transactions, Vol.50, No.8 (2009年8月)
- 新機能付きエッジプロファイルモニタ
赤松勝¹⁾
○(株)工業調査会「電子材料」誌 (2009年9月号)
- コベルコ科研のソリューションビジネスの紹介
柳川政洋¹⁾
○軽金属溶接(軽金属溶接構造協会誌) (2009年11月号)
- プレス成形性評価における非接触式3次元歪測定技術の適用
金丸信夫¹⁾、頭根怜史¹⁾
○日刊工業新聞社「型技術」(2009年11月)
- デジタル画像相関法による電子デバイスとはんだ接合部の熱変形評価
鈴木康平¹⁾、荒木俊二¹⁾、池田健一¹⁾、三宅修吾¹⁾
○(社)エレクトロニクス実装学会「エレクトロニクス実装学会誌」(2009年11月号特集)
- 「鋳鋼品の溶接補修技術」第3回
久保晴義²⁾、寺沢優一¹⁾
○日本鋳鋼協会 機関誌「鋳鋼と鍛鋼」(2009年12月号)

- Analysis of thermoreflectance signals and characterization of thermal conductivity of metal thin films
三宅修吾¹⁸⁾、喜多隆¹⁸⁾、三宅綾¹⁾、池田健一¹⁾、高森弘行²⁾
○American Institute of Physics, Review of Scientific Instruments 80, 124901 (2009年12月7日)
- Hemoglobin encapsulation in vesicles retards NO-and-CO-binding and O2-release when perfused through narrow gas-permeable tubes
酒井宏水¹⁹⁾、奥田直人¹⁹⁾、佐藤敦¹⁹⁾、山上達也¹⁾、武岡真司¹⁹⁾、土田英俊¹⁹⁾
○American Journal of Physiology - Heart and Circulatory Physiology, Volume 298, Issue 3, H956-H965 (2010) (2010年3月号)
- 大気非開放下でのLiイオン電池電極部材の物理解析
森本啓之¹⁾
○電子ジャーナル 2010年3月号 特集「故障解析・分析アウトソーシング」(2010年3月15日)
- LC/MS/MSによるピリジン、2,4-ジニトロトルエンの微量分析法の確立
宇野美奈子¹⁾、池田和枝¹⁾、小縄幸司¹⁾
○(社)日本環境測定分析協会 月刊誌「環境と測定技術」(2010年4月号以降)
- Thermal Runaway Analysis for Safety Design of Lithium-ion Batteries
山上達也¹⁾
○COMSOL News, World Wide 2010 (COMSOL社 発行) (2010年5月予定)
- マルテンサイト鋼の伸びフランジ性に及ぼす焼戻し温度の影響
大谷茂生⁹⁾、森川龍哉⁹⁾、東田賢二⁹⁾、橋本俊一¹⁾、波連寛之¹⁾
○(社)日本鉄鋼協会「鉄と鋼」(掲載予定号: Vol.96 (2010), No.6 (6月号))