桑村 仁氏の討論に対する回答

THE AUTHOR'S ANSWER TO DISCUSSION BY HITOSHI KUWAMURA

(Hitoshi KUWAMURA, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No.476, 67-74, Oct., 1995)

曾 根 彰*, 山 本 鎮 男**, 増 田 新***

Akira SONE, Shizuo YAMAMOTO and Arata MASUDA

The authors thank Dr. Hitoshi Kuwamura for his discussion and the answers are as follows.

- (1) The absolute acceleration response of a SDOF structure with Wen type hysteretic restoring force model having a smoothen hysteresis curve is analyzed using wavelet analysis. From this simulation, it is clear that the proposed method can be used to estimate the point changing from elastic region to plastic region for a structure having a smooth hysteresis curve.
- (2) In this study, the damage generated in several cycles is assumed to be the low-cycle fatigue by referring the papers. It is considered that Miner's fatigue law can be applied for this cumulative damage.

Keywords : wavelet analysis, cumulative damage, low-cycle fatigue.

ウェーブレット解析、累積損傷、低サイクル疲労

この度は貴重なご討論を戴き、御礼申し上げますと共に、以下にその回答を述べます。

1. 履歴復元力特性の滑らかさについて

実際の構造物の履歴復元力カーブは弾性から塑性の移行が滑らかであり、本論文で採用している急激な折れ曲がり点を有するバイリニア型数学モデルとは異なるものご質問ですが、本手法の適用の可否は復元力カーブの滑らかさの程度に依存するもので、それが滑らかであれば、全て適用が不可ではないと思えます。例えば、粘性地盤の応力-歪の関係のように非常に滑らかに塑性変形するものでは、本手法の適用により塑性域の突入を察知することは不可能ですが、骨組構造物の大部分は、粘性地盤と異なり、バイリニア系の形状をなしており、ただご質問のようにコーナー部に数学モデルと異なり丸みのあるものであります。このようなモデルでは、塑性域の突入によって応答加速度は急変し、理想的バイリニア数学モデルと比較すると異常信号の発生は若干低下するが、同じように本手法で検出できます。以下に、コーナー部に丸みをもつ復元力特性（Wenモデル）を用いて解析し、その結果をもって上述の論拠と致します。

図1に、兵庫県南部地震の神戸気象台観測波（NS）を

Wenモデルの復元力特性を有する1質点系に入力した場合のヒステリシス曲線を示します。図2に、加速度応答をウェーブレット解析し、そのウェーブレット係数（ $j=10$ ）を求め、これを図示しました。この図から、バイリニア数学モデルと比べると異常信号発生の発生と頻度は若干、程度は低下するものの、その信号の発生を感知するので、本手法は、この程度の滑らかを有する復元力特性系は適用が可能です。

2. ウェーブレット解析の周波数分解能について

ウェーブレット解析の分解能に関する評価がなされて

図1 Wenモデルを用いた場合のヒステリシス曲線

* 京都工芸繊維大学機械システム工学科
助教授・工博** 京都工芸繊維大学機械システム工学科
教授・工博*** 京都工芸繊維大学機械システム工学科
教務職員Assoc. Prof., Dept. of Mechanical and System Engineering, Kyoto
Institute of Technology, Dr. Eng.Prof., Dept. of Mechanical and System Engineering, Kyoto Institute of
Technology, Dr. Eng.Assistant, Dept. of Mechanical and System Engineering, Kyoto Insti-
tute of Technology

図2 Wenモデルにおける加速度応答の
ウェーブレット係数

いないというご指摘であるが、これについては既発表論文¹⁾で分解能 (S/N比) と使用ウェーブレットとの関係を述べていますので、これをご参照願いたい。さらに、ウェーブレット解析は、時間と周波数の同時解析であり、従来のフーリエ解析と比べると周波数の精度を落として時間の精度を上げた方法である。この周波数分解能については、佐々木らの論文²⁾で述べられているので、本論では特にこれについては触れなかったことでご理解ください。また、系の固有周期が短くなると適用限界はあるのではないかとこの質問については、データのサンプリング周波数を固定するならばご指摘の通りです。しかしながら、系の固有周期が短い場合にはサンプリング周波数を大きくとれば問題ないことがわかっています³⁾。

3. 入力の大きさとウェーブレット係数 (パルス) の大きさの関係について

まず、降伏後の塑性変形が大きくなると、ウェーブレット解析による塑性域突入を検知するパルスが大きくなる理由ですが、塑性変形の大きさに応じて、0塑性域突入時の速度が大きくなりのは容易に推量されます。速度が大きくなれば、これに伴って塑性域突入時に生じる速度の急変も大きくなり、これがウェーブレット解析によって検出されているものと思われます。もちろん、ご指摘の通り、この検出には用いるウェーブレットの周波数分解能と深い関係があり、論文で示したように周波数分解能の高いMeyerウェーブレットが適切であることがわかります。

4. 低サイクル疲労破壊ではなく延性破壊であるという点について

まず、延性破壊の中にも1回の荷重で破壊するものもあれば、数回、あるいは数十回の繰返し荷重で損傷が拡がり破壊するものもあります。数十回の繰返し荷重で破壊するとすれば、建築工学ではこの言葉はあまり使われていませんが、これは低サイクル疲労の現象であろうと著者らは考えております。しかしながら、参考文献を拝見したところ、貴論文では低サイクル破壊と延性破

図3 塑性化回数と累積塑性率の関係

壊の違いを実験的にミクロ的な観点から確かめられておられます。これについては、反論する余地がないと思われますが、例えばミクロ的には延性破壊であったとしても、数回の繰返しで破壊に至らなかった場合には、疲労的現象と考えマイナー則を適用して疲労寿命を推定できるのでないかと思っています。さらに、過去の論文⁴⁾、⁵⁾や従来の耐震工学分野の研究を参照すると、数回、数十回の繰返しによる破壊は、低サイクル疲労と扱っている場合が多く、我々の研究もそこから端を発したわけであります。

5. 塑性化回数と累積塑性率について

この点を明かにするために、実際観測された直下型地震動である兵庫県南部地震の神戸気象台観測波 (NS) を用いて、論文の系に対して累積塑性率と塑性化回数を求めた結果を図3に示します。この図より、 α (履歴特性のパラメータ) によらず、両者にはほぼ比例があることがわかる。したがって、必ずしも全ての地震動について行ったわけではないが、論文で示した塑性化回数と累積塑性率の関係の妥当性が示されたと考えています。

参考文献

- 1) 曾根彰ほか4名：ウェーブレット変換を用いた機械・構造物のヘルスマonitoringシステム (正規直交ウェーブレットの生成と断続的異常信号の検出)、日本機械学会論文集C編、61-586、pp.2340-2346、1995.6
- 2) 佐々木文夫、前田達哉、山田道夫：ウェーブレット変換を用いた時系列データの解析、構造工学論文集、Vol.38B、pp.9-20、1992.3
- 3) 曾根彰、山本鎮男、増田新：常時微動と強震記録のウェーブレット解析による構造物の動特性推定とその変化の推定、日本建築学会構造系論文集、No.490、1996.12、掲載予定
- 4) 玉井宏章、近藤一夫、花井正美：履歴減衰装置の極低サイクル疲労特性と実地震応答下における疲労寿命の予測、日本建築学会構造系論文集、No.462、pp.141-150、1994.8
- 5) 菊川真ほか3名：変動ひずみ条件下の低繰返し数疲れ、日本機械学会誌、70-585、pp.1495-1509、1967.10

(1996年8月22日原稿受理、1996年9月24日採用決定)