

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：15101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14184

研究課題名（和文）線形地震応答スペクトルを援用した機器・配管系の弾塑性応答近似解析法の開発

研究課題名（英文）Approximation of elasto-plastic response of the equipment and piping system based on linear seismic response spectra

研究代表者

谷口 朋代 (TANIGUCHI, Tomoyo)

鳥取大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：90346370

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000 円

研究成果の概要（和文）：多自由度系構造物の部材塑性中の地震応答が、部材塑性時の剛性を用いて計算されるモード諸量で構成されていることを利用して、地震時の多自由度系構造物の弾塑性応答の絶対最大値を、線形地震応答スペクトルを援用して簡便に解析するために必要な理論を構築した。提案手法の解析精度を、第一層、第三層、第五層がそれぞれ降伏する場合の5自由度バネ・質点系を用いて詳細に検討した。その結果、提案手法は、SRSS法（二乗和平方根法）を用いて多自由度系構造物の弾性応答の絶対最大値を求めるのと同程度の解析精度があることが分かったため、今後、機器・配管系の弾塑性応答の近似解析法に容易に発展させられることを示した。

研究成果の概要（英文）：The response of a Multi Degree Of Freedom (MDOF) system while its member exhibits plasticity consists of the modal properties that can be determined by considering the post-yielding stiffness of the being yielded member of the MDOF system. Such characteristics enable to develop a calculation that approximates the absolute maximum elasto-plastic response of the MDOF based on the linear seismic response spectra. Employing a 5 Degree Of Freedom system whose first, third and five storey yields respectively, the analytical accuracy of the proposed method is elaborately examined. The analytical results show that the proposed method can analyze the absolute maximum elasto-plastic response of the MDOF system as the conventional Square Root of Sum of Square (SRSS) method analyses the absolute maximum linear response of the MDOF system. It implies that the proposed method can easily expand to the approximation of the elasto-plastic response of the equipment and piping system.

研究分野：耐震工学

キーワード：弾塑性応答 降伏時モード諸量 二乗和平方根法 絶対最大値 近似解析法 等価線形化法 多自由度系

1. 研究開始当初の背景

(1) 既往の地震に対する原子力発電施設の被災状況から、機器・配管系の耐震基準における許容応力と実際の構造物の破壊には大きな差(多いところで500%~1,000%程度)があることが認識されている。

(2) 近年、設計地震力を上回る地震力に対する残余のリスクの評価が耐震設計審査で求められることから、その定量的な把握に関心が集まっている。

(3) 現状では、構造物の弾塑性応答は時刻歴応答解析でしか求められないが、得られた解の地震波データへの依存性が排除できず、設計で見込むべき最大応答値に相当するかが不明であるという意味で、構造物の耐震安全性評価や耐震裕度が一般性を有していないことが知られている。

2. 研究の目的

(1) 構造物の弾性応答を応答スペクトル法で解析した場合には、線形地震応答スペクトルが有する原理的性質から、耐震安全性評価は一般性を有することが知られている。このことは、応答スペクトル法に基づいて機器・配管系の弾塑性応答が求められれば、機器・配管系の耐震裕度に一般性を付与でき、重要度に応じた適切な余裕を必要な箇所へ組み入れることを可能にする最先端の設計の実現を暗示しているため、その実現に必要な基礎的研究を行う。

(2) これまでに研究代表者らは、コッポリノ法を用いて、多自由度系構造物の部材塑性時の地震応答の性状を詳細に調べ、それらが構造物の質量と部材塑性後の剛性を用いて得られるモード諸量(固有振動数、固有モードベクトル、モード減衰)で形成されていること、各次モードの固有振動数に対する考察から、各次モードの初期剛性と二次剛性が一意的に決定できること、を明らかにしている。そこで本研究では、a)構造物の弾性応答変位と部材降伏変位との比較から、各次モードの降伏変位を一意的に定める手法の開発、b)各次モードの弾塑性応答の最大値を、線形地震応答スペクトルに基づいて求めるために必要な応答解析法の開発、c)各次モードの弾塑性応答の最大値を重ね合わせる時に用いるモード諸量の決定、などについて検討し、多自由度構造物の地震時弾塑性応答の最大値を、SRSS法(二乗和平方根法)などで求めるために必要な理論を構築する。

3. 研究の方法

(1) 各次モードの降伏変位の一意的な決定方法の導出について

図1に示すように、既往の研究や研究代表者らの研究によって、任意のモード次数の力~変位関係の初期剛性と二次剛性は一意的

に定められることが明らかになっているが、任意のモード次数の降伏変位を定める手法は不明である。そこで、構造物のある特定の部材が降伏する(機器・配管系や免震構造物に相当)或いは全ての部材が同時に降伏する(建築構造物の基本思想に相当)場合を考え、SRSS法を用いて構造物の地震応答変位を求める場合には、第j次モードの降伏変位は、第j次モードの線形応答の最大応答変位を、構造物の任意のi点の線形最大応答変位と既知であるi点の降伏変位との比で除した値になると想像しており、このことを数学的に証明して数値解析で確認する。

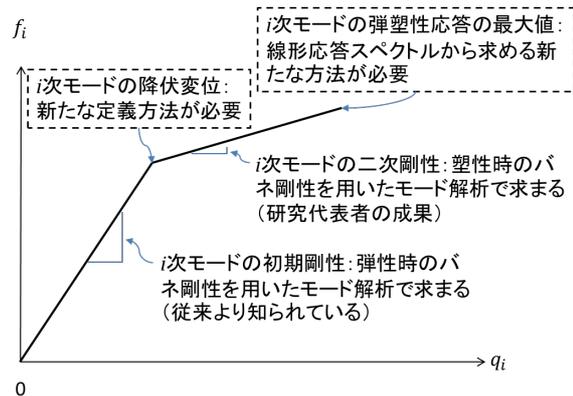


図1 第i次モードの力~変位曲線の模式図 (点線内は本研究で明らかにする内容)

(2) 弾塑性の復元力特性を有するバネ質点系の地震応答を近似する等価線形系の構築について

これまでに研究代表者らは、バイリニア型の復元力特性を有する無減衰1自由度バネ質点系のインパルス応答の半周期を対象に、同系に保存される及び逸散する力学的エネルギーを厳密に求め、かつ応答変位の出現確率がガウス分布に従うとして等価線形化剛性や同減衰を求めた。導出した等価線形系は、1自由度バネ質点系の線形時の固有周期の大小に関わらず、塑性率が1.0程度の無減衰1自由度バネ質点系の弾塑性応答の最大値を比較的良く近似することが分かっている。しかし、当該等価線形系は、バイリニア型の復元力特性が示す履歴の内、言わば往路の過程のみをモデル化したものであるため、履歴全体の過程をモデル化できれば、弾塑性応答の最大値の近似精度を向上させられるのではないかと考えており、弾塑性系の履歴全体の保存される及び逸散する力学的エネルギーの新たな定義式を見出し、それに基づく等価線形系の考案を行う。

(3) モードの重ね合せに基づく多自由度系構造物の弾塑性応答の最大値の近似的解析法の導出について

(1)と(2)より、各次モードの弾塑性応答の最大値を線形地震応答スペクトルに基づいて近似できるようになる。しかし、それをどの

モード形状（線形時または塑性時）を用いて足し合わせて全体応答を求めるかについては不明である。また、刺激係数もモード形状の関数であるため、どの刺激係数（線形時または塑性時）を用いるかも問題となる。そこで、線形時または塑性時のモード形状と刺激係数の組合せを考慮して、多自由度系構造物の弾塑性応答の最大値を求め、目標値となる同構造物の時刻歴応答解析の結果と比較して、近似精度の良い組合せを抽出するとともに、その理由について考察する。尚、簡単のため、検討は5層のバネ 質点系モデルを用いて行う。

4. 研究成果

(1) 各次モードの降伏変位の一意的な決定方法の導出について

多自由度系構造物の弾性応答の最大値は、S R S S法を用いて精度よく近似できることが知られている。多自由度バネ - 質点系構造物を構成する第 i 番質量の弾性応答変位の最大値 $u_{i,max}$ は、次式で求められる。

$$u_{i,max} = \sqrt{\sum_{j=1}^N \{\phi_{ij} \Gamma_j S_D(\omega_j, h_j)\}^2} \quad (1)$$

ここで、 ϕ_{ij} : 第 i 番質量の第 j 次モードのモード形状の値、 Γ_j : 第 j 次モードの刺激係数、 $S_D(\omega_j, h_j)$: 第 j 次モードの弾性応答変位スペクトルの値 (= 第 j 次モードの最大弾性応答変位) ω_j : 第 j 次モードの固有振動数、 h_j : 第 j 次モードの減衰定数である。

そこで、S R S S法で求めた第 i 番質量の弾性応答変位の最大値 $u_{i,max}$ と、同質量を支持するバネ部材の降伏変位 u_{yi} との比を $\alpha = u_{i,max}/u_{yi}$ として(1)式に代入して次式を得る。

$$u_{yi} = \frac{1}{\alpha} \sqrt{\sum_{j=1}^N \{\phi_{ij} \Gamma_j S_D(\omega_j, h_j)\}^2} \quad (2)$$

このことから、当該バネ部材の降伏による第 j 次モードの降伏変位 u_{yij} は、次式で近似できることが分かる。

$$u_{yij} = \frac{S_D(\omega_j, h_j)}{\alpha} \quad (3)$$

(2) 弾塑性の復元力特性を有するバネ 質点系の地震応答を近似する等価線形系の構築について

これまでに研究代表者らが行ってきた手法を踏襲して、バイリニア型の復元力特性を有する無減衰 1 自由度バネ 質点系のインパルス応答の半周期を対象に、同系に保存され

る及び逸散する力学的エネルギーを厳密に求め、かつ応答変位の出現確率がガウス分布に従うとして等価線形化剛性や同減衰を求めた。ここで、復路を考慮することは、力学モデルとして相応しくないことが分かり取りやめた。一方、系に保存される及び逸散する力学的エネルギーの定義について再度見直し、次の様に等価線形化剛性と同減衰を定義した。

図 2 は、バネ降伏前のバネ 質点系の力学的エネルギーを示しており、 W_0 は同系に保存されるエネルギーである。一方、図 3 は、バネ降伏後のバネ 質点系の力学的エネルギーを示しており、 W_1 は同系に保存されるエネルギー、 W_{p1} は同系から逸散するエネルギーと考えた。

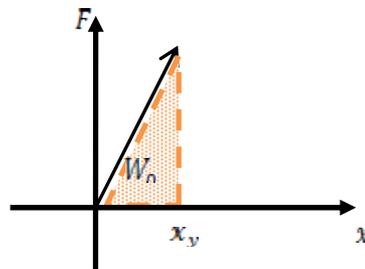


図 2 弾塑性系の力学的エネルギー (バネ降伏前)

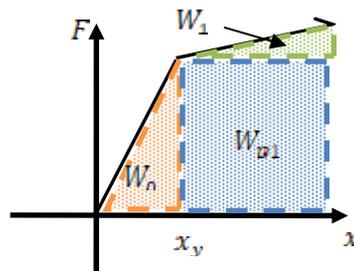


図 3 弾塑性系の力学的エネルギー (バネ降伏後)

これらより、同系に保存される力学エネルギー W_e は、次式で与えられる。

$$W_e = \frac{1}{2} kx^2 \quad (0 < x \leq x_y)$$

$$W_e = \frac{1}{2} kx_y^2 + \frac{1}{2} \mu k (x - x_y)^2 \quad (x_y < x), \quad (4)$$

一方、同系から逸散する力学エネルギー W_p は、次式で与えられる。

$$W_p = 0 \quad (0 < x \leq x_y)$$

$$W_p = kx_y (x - x_y) \quad (x_y < x) \quad (5)$$

ここで、地震動を受ける無減衰 1 自由度バネ 質点系の弾塑性応答変位の出現確率が、ガウス分布で与えられるとする。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

これより、同系に保存される力学エネルギーのアンサンブル平均が直ちに求められる。

$$\begin{aligned} \langle W_e \rangle &= \int_0^{x_y} \frac{1}{2} k x^2 p(x) dx \\ &+ \int_{x_y}^{\infty} \left\{ \frac{1}{2} k x_y^2 + \frac{1}{2} \mu k (x - x_y)^2 \right\} p(x) dx \\ &= \frac{k}{2\sqrt{2\pi}} \left[-x_y \sigma (1 + \mu) e^{-\frac{x_y^2}{2\sigma^2}} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} (x_y^2 + \mu x_y^2 + \mu \sigma^2) + \right. \\ &\quad \left. \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left\{ (1 - \mu) \sigma^2 - (1 + \mu) x_y^2 \right\} \operatorname{erf} \left(\frac{x_y}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

同様に、同系から逸散する力学エネルギーのアンサンブル平均も直ちに求められる。

$$\begin{aligned} \langle W_p \rangle &= \int_{x_y}^{\infty} k x_y (x - x_y) p(x) dx \\ &= \frac{k x_y}{\sqrt{2\pi}} \left[\sigma e^{-\frac{x_y^2}{2\sigma^2}} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} x_y \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_y}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $\langle \cdot \rangle$: アンサンブル平均を表し、 $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-z^2} dz$: 誤差関数である。

一方、バネ定数が k_{eq} である等価線形系に保存される力学エネルギーのアンサンブル平均は、次式で直ちに求められる。

$$\langle W_{eq} \rangle = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} k_{eq} x^2 p(x) dx = \frac{k_{eq}}{4} \sigma^2 \quad (9)$$

(7)式と(9)式の比較により、等価線形系のバネ定数 k_{eq} の値が次のように求められる。

$$\begin{aligned} k_{eq} &= \frac{2k}{\sqrt{2\pi}} \left[-\frac{1}{\gamma} (1 + \mu) e^{-\frac{1}{2\gamma^2}} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left\{ (1 + \mu) \frac{1}{\gamma^2} + \mu \right\} + \right. \\ &\quad \left. \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left\{ (1 - \mu) - (1 + \mu) \frac{1}{\gamma^2} \right\} \operatorname{erf} \left(\frac{1}{\sqrt{2}\gamma} \right) \right] = k\eta \end{aligned} \quad (10a)$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \left[-\frac{1}{\gamma} (1 + \mu) e^{-\frac{1}{2\gamma^2}} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left\{ (1 + \mu) \frac{1}{\gamma^2} + \mu \right\} + \right. \\ &\quad \left. \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left\{ (1 - \mu) - (1 + \mu) \frac{1}{\gamma^2} \right\} \operatorname{erf} \left(\frac{1}{\sqrt{2}\gamma} \right) \right] \end{aligned} \quad (10b)$$

ここで、 $\gamma = \sigma/x_y$: 等価線形系の地震応答のrms応答変位とバネの降伏変位の比から成る塑性率である。同様に、(8)式と(9)式の比較に

より、等価線形系が有すべき減衰定数 h_{eq} の値が次のように求められる。

$$\begin{aligned} h_{eq} &= \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\langle W_p \rangle}{\langle W_{eq} \rangle} \right) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\int_{x_y}^{\infty} k x_y (x - x_y) p(x) dx}{\int_0^{\infty} \frac{1}{2} k_{eq} x^2 p(x) dx} \\ &= \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\frac{k x_y}{\sqrt{2\pi}} \left[\sigma e^{-\frac{x_y^2}{2\sigma^2}} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} x_y \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_y}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\} \right]}{\frac{k_{eq} \sigma^2}{4}} \\ &= \frac{1}{\pi \sqrt{2\pi}} \left[\frac{x_y}{\sigma} e^{-\frac{x_y^2}{2\sigma^2}} - \frac{x_y^2}{\sigma^2} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_y}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\} \right] \cdot \frac{1}{\pi} = \frac{\delta}{\pi} \end{aligned} \quad (11a)$$

$$\delta = \frac{1}{\pi \sqrt{2\pi}} \left[\frac{1}{\gamma} e^{-\frac{1}{2\gamma^2}} - \frac{1}{\gamma^2} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{1}{\sqrt{2}\gamma} \right) \right\} \right] \quad (11b)$$

ここで、本提案法に従って弾塑性応答の最大値を近似する場合、 k_{eq} や h_{eq} に等価線形系の応答のrms値 σ が含まれるので、繰返し計算が必要になる。まず、対象とする1自由度バネ質点系の弾性応答の最大値を応答スペクトルから求め、それを 3σ と見なす。このことは、弾性応答の最大値がこの値を超過する確率 0.27% を許容することを意味する。そして、次の計算に使用する k_{eq} と h_{eq} の値を求め、等価線形系の弾性応答の最大値を応答スペクトルから求め、それを 3σ と見なす。このように、等価線形系の最大応答が収束するまで計算を繰り返す。

(3) モードの重ね合せに基づく多自由度系構造物の弾塑性応答の最大値の近似的解析法の導出について

兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で観測された加速度記録を入力に用いて、図4に示す5自由度バネ-質点系の第一層、第三層、第五層のバネがそれぞれ降伏する場合を対象に、本提案手法による弾塑性最大応答変位の近似解析結果と商用解析ソフト TDAP による時刻歴応答解析結果を比較することで、提案手法の解析精度を検証した。尚、本提案手法で弾塑性最大応答変位を計算する場合には、弾性状態のモード形状、同刺激係数、塑性状態のモード形状、同刺激係数を組合せて用い、組合せに用いるモード諸量が解析精度に及ぼす影響も考察した。また、検討に用いた5自由度-バネ質点系の物理量を表1に示す。

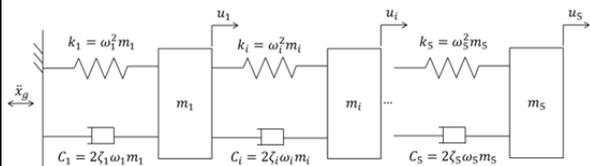


図4 検証に用いた5自由度-バネ質点系

表1 5自由度 - バネ質点系の物理量

Story i	k_i (N/m)	m_i (kg)
1	500	10
2	500	10
3	500	10
4	500	10
5	500	10

まず、SRSS法が、当該5自由度 - バネ質点系の弾性応答の最大値を近似する精度について検討した。これが、本提案手法の解析精度を検証する目安となるからである。図5は、当該5自由度 - バネ質点系の弾性応答の最大値を、時刻歴応答解析(TDAPIII Linear THA)で求めた場合とSRSS法(nlresp Linear SRSS)で求めた場合の比較を示す。これによれば、本解析条件下では、SRSS法は、弾性応答の最大値を約0.07m過大に、或いは過少に計算することがあることが分かる。

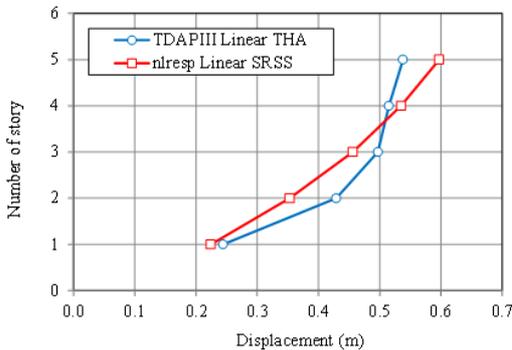


図5 5自由度 - バネ質点系の弾性応答の最大値の比較

次に、本提案手法で、当該5自由度 - バネ質点系の第一層が塑性化する場合の弾塑性応答の最大値を近似する場合の精度について検討した。バネ塑性後のバネ定数は、元のバネ定数の1%になるとした。図6は、当該5自由度 - バネ質点系の弾塑性応答の最大値を、時刻歴応答解析(TDAPIII Non-Linear THA)で求めた場合と本提案手法(nlresp)で求めた場合の比較を示す。

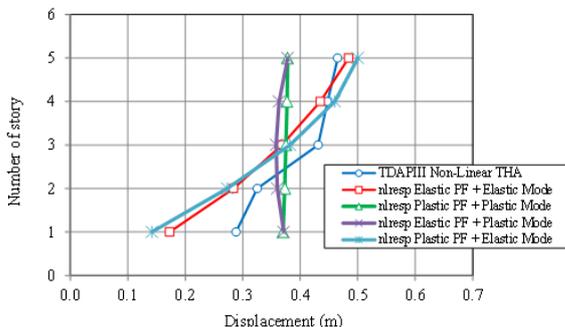


図6 5自由度 - バネ質点系の弾性応答の最大値の比較 (第一層が塑性化する場合)

図中の凡例は、Elastic PF:弾性状態の刺激係数、Elastic Mode:弾性状態のモード形状、Plastic PF:塑性状態の刺激係数、Plastic Mode:塑性状態の刺激係数をそれぞれ表しており、+は本提案手法を用いる際に組み合わせたモード諸量を示している。図6より、本提案手法に用いるモード形状の選択は、弾塑性応答変位の最大値の近似結果に非常に大きな影響を及ぼすことが分かる一方、刺激係数の選択による影響は、然程大きくないことが分かる。また、本提案手法に、塑性状態のモード形状、同刺激係数を組合せて用いた場合、第一層の変位を0.07m過大に、第五層の変位を0.08m過少に近似していることから、当該5自由度 - バネ質点系の弾塑性応答の最大値を、SRSS法による弾性応答の最大値の近似と同程度に近似できていることが分かる。

更に、本提案手法で、当該5自由度 - バネ質点系の第三層が塑性化する場合の弾塑性応答の最大値を近似する場合の精度について検討した。図7は、当該5自由度 - バネ質点系の弾塑性応答の最大値を、時刻歴応答解析(TDAPIII Non-Linear THA)で求めた場合と本提案手法(nlresp)で求めた場合の比較を示す。

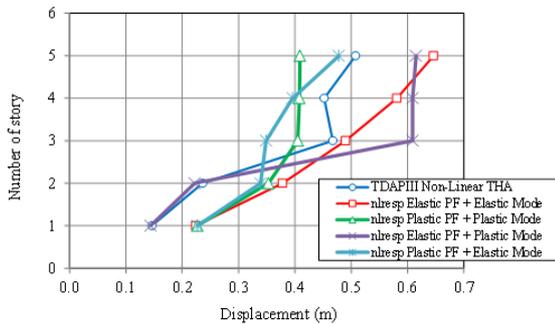


図7 5自由度 - バネ質点系の弾性応答の最大値の比較 (第三層が塑性化する場合)

図7より、本提案手法に、塑性状態のモード形状、同刺激係数を組合せて用いた場合、第一層の変位を0.07m過大に、第五層の変位を0.1m過少に近似していることから、当該5自由度 - バネ質点系の弾塑性応答の最大値を、SRSS法による弾性応答の最大値の近似よりやや劣る程度に近似できていることが分かる。

最後に、本提案手法で、当該5自由度 - バネ質点系の第五層が塑性化する場合の弾塑性応答の最大値を近似する場合の精度について検討した。図8は、当該5自由度 - バネ質点系の弾塑性応答の最大値を、時刻歴応答解析(TDAPIII Non-Linear THA)で求めた場合と本提案手法(nlresp)で求めた場合の比較を示す。

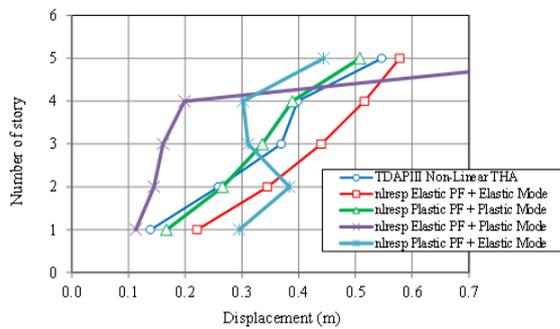


図8 5自由度 - バネ質点系の弾性応答の最大値の比較 (第五層が塑性化する場合)

図8より、本提案手法に、塑性状態のモード形状、同刺激係数を組合せて用いれば、本提案手法は、当該5自由度 - バネ質点系の弾塑性応答の最大値を、精度良く近似できることが分かった。

以上のことから、本提案手法は、実用に供し得る解析精度を有していることから、機器・配管系等の複雑な形状を有する実構造物の弾塑性応答の最大値を、応答スペクトルを援用して近似する解析方法に容易に発展させられることが示された。

<引用文献>

Coppolino, R., "A Simultaneous Frequency Domain Technique for Estimation of Modal Parameters from Measured Data," SAE Technical Paper 811046, 1981, doi:10.4271/811046.
 山口将太, 谷口朋代: モード解析法を用いた2自由度弾塑性系の時刻歴地震応答解析に関する研究, 第62回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, -22, 2010.
 西樂大輝, 谷口朋代, 小野祐輔: 1自由度弾塑性系における塑性後の弾塑性歪エネルギーの定式化に基づく等価線形化, 第65回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, -15, 2013.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

T. Taniguchi, Y. Toda, Y. Ono, K. Mukaibo, Estimation accuracy of absolute maximum elasto-plastic displacements of MDOF oscillators based on a modal combination rule with post-yielding modal properties and linear response spectrum values, ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference, 査読有り、印刷中
T. Taniguchi, H. Nishiraku, Y. Ono, Analysis of Maximum Elasto-Plastic Response of Multi-Degree-of-Freedom

Oscillators Based on a Modal Combination of Equivalently Linearized Response of Each Mode, ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, 査読有り, Vol. 8, Paper No. PVP2016-63865, 2016, pp. V008T08A010-10
 doi:10.1115/PVP2016-63865

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷口 朋代 (TANIGUCHI, Tomoyo)
 鳥取大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号: 90346370