振動台実験と時刻歴応答解析による Z 型 NC ブレース付き鋼構造骨組の
一方向変形漸増性能と累積塑性エネルギー吸収量評価EVALUATION OF ONE SIDED DEFORMATION AND HYSTERETIC PLASTIC ENERGY
ABSORPTION OF Z-TYPE STEEL FRAMES WITH AN NC BRACE
BY SHAKING TABLE TEST AND TIME DOMAIN ANALYSIS澤田 樹一郎^{*1}, 高松 隆夫^{*2}, 玉井 宏章^{*3}, 松尾 彰^{*4}
山西 央朗^{*5}, 三好 行則^{*6}, 荊尾 友裕^{*6}*Kiichiro SAWADA, Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI,
Akira MATSUO, Teruaki YAMANISHI, Yukinori MIYOSHI
and Tomohiro KATARAO*

First, this paper shows shaking table test and time domain analysis results for z-type steel frames with an NC brace and normal one subjected to a sine wave input. One sided deformation in frames with an NC brace is observed from time domain analyses as well as shaking table tests. Next, the paper also shows a lot of time domain analysis results for above frames subjected to recorded earthquakes and artificial earthquakes compatible with the design spectrum. Not only one sided deformation but also the effectiveness of methods to predict energy absorption of NC braces are observed from analysis results.

Keywords : One sided deformation, Hysteretic plastic energy, NC braces, Shaking table tests, Time domain analysis

一方向変形, 累積塑性エネルギー, NC ブレース, 振動台実験, 時刻歴応答解析

1. 序

ブレース構造は、経済的に高い耐力と剛性を鋼骨組に付与できる長所を有する反面、スリップ型の履歴特性や圧縮変形時の座屈による履歴特性の劣化などのため、エネルギー吸収能力にはあまり期待できないと考えられている。このような短所を克服するための履歴エネルギー吸収型ブレース材の種々の提案および研究がすでに行われている。望月ら¹⁾は、座屈を防止するために鉄骨ブレースに鉄筋コンクリートを巻き、付着をとったアンボンドブレースを開発し、付着試験、座屈実験等の検討を行った。長尾ら²⁾は、アンボンドブレースの芯部材（角形鋼管）の細長比や幅厚比をパラメータとした一連の実験を行い、芯部材の細長比が 40 から 80 の範囲において大きな塑性変形能力を有することを実験により示している。玉井ら³⁾は、X 型ブレースの中央交叉部に有孔鋼板を設け、有孔鋼板の先行降伏により座屈を防止するとともに、鋼板の塑性変形でエネルギー吸収する制振ブレースを提案し、実験によりその有効性を示している。しかし、これらのブレースは、ブレース材の断面形状に制約があったり、機構がやや複雑となる傾向にある⁴⁾。高松、玉井らにより提案されている「ノンコンプレッションブレース (NC ブレース)」

4)は、ブレース端部に楔機構を設置したものであり、(1)圧縮変形時に曲げ座屈や局部座屈を生じない;(2)繰り返し変形時に履歴特性がスリップ型とならずエネルギー吸収が十分期待できる;(3)降伏耐力や降伏後剛性を容易に設定できる;(4)エネルギー吸収量も容易に把握しうる;という性能を有していることがすでに実験等により確認されている。本研究では、この NC ブレースを Z 型に配置することによって、地震時において片側一方向に変形が漸増する骨組を実現できることを示す。片側一方向の変形漸増性能は、たとえば、隣接する構造物間のクリアランスの問題の解決 (図 1(B)) などの応用の可能性を有する⁵⁾⁶⁾。本論文では、まず、前半で、Z 型 NC ブレース付き門型ラーメンと従来型ブレース付き門型ラーメンの正弦波入力振動台実験と時刻歴応答解析結果を示し、Z 型 NC ブレースの一方向変形漸増性能を実験結果により確認するとともに、同性能が時刻歴応答解析でも再現できることを示す。さらに、後半では、記録地震動および応答スペクトル適合模擬地震動を入力した Z 型 NC ブレース付き門型ラーメンと従来型ブレース付き門型ラーメンの時刻歴応答解析結果を示し、地震動下における Z 型 NC ブレースの一方向変形制御性能を検証する。また、3 種類の累積塑性エネルギー吸収

*1 広島大学 助教・博士(工学)

*2 広島工業大学 教授・Ph. D.

*3 広島工業大学 准教授・博士(工学)

*4 広島大学 教授・工博

*5 広島工業大学 ポストドクター・博士(工学)

*6 広島工業大学 大学院生

Assistant Prof., Hiroshima Univ., Dr. Eng.

Prof., Hiroshima Institute of Technology, Ph. D.

Assoc. Prof., Hiroshima Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., Hiroshima Univ., Dr. Eng.

Postdoctoral Fellow, Hiroshima Institute of Technology, Dr. Eng.

Graduate Student, Hiroshima Institute of Technology

量予測式を用いて、楔貫入量の予測を行い、時刻歴応答解析結果と比較する。

図1 Z型 NC ブレースの応用の可能性

2. NC ブレースの作動概念

図2および図3は、NC ブレースの材端部詳細図と作動概念および従来型ブレースと NC ブレースの復元力特性を示している。NC ブレースは、ブレース端部が移動することで生じた間隙にあらかじめ設置してある楔がばねの復元力により貫入するため、ブレースにはゆるみが生じない。そのため、地震時において、架構がいかなる変形状態であってもブレースに引張変形が作用するとスリップ現象は生じず、直ちに引張抵抗し、地震エネルギーを吸収する。また、圧縮変形に対しては、ブレース端部のナットと楔受けが離間し、圧縮力は作用せず座屈しない。図3からも確認されるように、NC ブレースの塑性域における復元力特性は、むしろバイリニア型に類似のものとなっている。

図3 復元力特性モデル

3. 正弦波入力振動台実験の実験計画概要

3.1 試験体

表1に試験体の素材特性を示す。また、図4に試験体形状、図5(A),(B)にブレース・塑性化部位詳細を、それぞれ、示す。試験体は従来型ブレースを Z 型に配置したもの（弾性加振用の S・E モデルおよび弾塑性加振用の S・P モデル）と、NC ブレースを Z 型に配置したもの（弾性加振用の NC・E モデルおよび弾塑性加振用の NC・P

モデル）が用意された。尚、本実験では、ブレース以外の部位は各実験時に弾性範囲に留まる素材特性・断面特性が採用された。鉄骨架構の柱には、PL-140x9 (SS400) を、梁には H-100x100x6x8 (SS400) が使用され、柱と梁およびガセットプレートとリブは、隅肉溶接接合されている。試験体の桁に錘 (PL-200x1000x25 を 26 枚) を約 10kN 積載し、質点としての質量 m を試験体中央上部の合計質量約 1.15t とする。また、ブレース全長の 1/3 の箇所にブレース軸耐力を調整するための塑性化部位が取り付けられている。本実験で使用する振動台で加力できる荷重は比較的小さいので、ブレース断面を小さく設計する必要がある。しかしながら、楔デバイスの機構を導入するには、ネジ部が付いた丸鋼を用いるのが簡便なので、耐力調整のための塑性化部位を設けて、試験体の耐力を低めに設定している。

表1 素材試験結果

	E	σ_y	σ_u	ϵ_f
丸鋼棒 (ブレース)	205,000	318	453	26.0
塑性化部位 (ブレース)	205,000	318	436	29.0
柱	205,000	318	433	27.0
単位	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%

E : ヤング係数、 σ_y : 降伏強さ、 σ_u : 引張強さ、 ϵ_f : 伸び

立面図

側面図

図4 試験体形状

図2 NC ブレースの材端詳細および作動概念

図 5(A) ブレース詳細

図 5(B) 塑性化部位詳細

図 6 楔・楔受けの詳細

図 7 従来型ブレース立面図とブレースの挙動

断面の設定については、加工性および設置作業性を考慮して決定している（最小断面 3×2 (mm) 程度）。また、塑性化部位は本振動台実験の耐力調整用の工夫であるため、実用レベルでの実際の架構には導入しない。実際の NC ブレースの設計では、後述する楔貫入量の予測式を用いてブレースの破断を防止する設計を行う必要があると考

えられる。図 6 に NC ブレースにおける楔・楔受けの詳細図を示す。楔および楔受けは、ブレースから伝達される圧縮力の接触面方向分力に対して、接触面における摩擦力により抵抗し、滑らないようにする必要がある。このため、楔と楔受けの接触面には、発錆処理（塩分濃度 5% 程度の食塩水により、1 週間ほど湿潤状態を保つ）を施して、静止摩擦係数 μ を増大させている。本実験で用いた楔デバイスは、静止摩擦係数 $\mu=0.73$ であり、楔が滑らないように貫入角度を 30° としている。ブレースの初期導入軸力に関しては、ナットを軽く締める程度に留める。従来型ブレースにおいては、圧縮力が作用して座屈現象が生じることで、応答が複雑になることを回避するために、図 7 のようにブレース下端部の内側のナットを除去している。座屈現象を回避することで、従来型ブレースは理想的なスリップ型履歴を示し、評価が容易となる。

3.2 载荷装置と加振プログラム

図 8 に本実験で用いる振動台を示す。振動台に試験体のベースプレートに緊結して、試験体を設置する。加振としては、振動台を水平方向に加速度加振する。振動数と振動台直下に設置した加速度計より得られた加速度を制御値とする。弾性加振試験および弾塑性加振試験の前後には、固有振動数を求めるための弾性 SWEEP 試験を行う。尚、SWEEP 試験は、1Hz から 20Hz まで、1 秒に 1Hz ずつ振動数を上昇させるものである。また、正弦波入力加振試験では、入力する振動数を SWEEP 試験より得られた試験体の固有振動数 (S 型 10.2Hz、NC 型 10.1Hz) とし、入力加速度を、S 型と NC 型の頂部平均加速度（次節で定義する絶対加速度）が同程度となるように载荷した。これは、両試験体の降伏後における一方変形漸増性能の有無を比較するために、両試験体ともある程度の塑性変形を生じさせるための処置である。5 節で示すように、NC ブレースをある程度塑性化させるのに要する入力加速度の最大値が 80gal 程度である一方、従来型ブレースは、スリップ現象による長周期化のために、正弦波の周期とずれが生じていき、ある程度塑性化させるのに要する入力加速度の最大値が 1000gal 程度となっている。

3.3 計測方法

図 9 に計測位置を示す。変位としては、図 3 に示す計測用柱に設置した変位計により、変位 Δ_1 、 Δ_2 を計測し、平均値を試験体層間

図 8 加振装置

変位 Δ としている。加速度としては、振動台中心位置の加速度 α_b 、錘上面の加速度 α_{s1} 、 α_c 、 α_{s2} を計測する。試験体の頂部の加速度としては α_{s1} 、 α_c 、 α_{s2} の平均値を用いる、絶対加速度とする。なお、振動台実験結果は、次節で時刻歴応答解析結果とあわせて示されるが、さらに詳しい実験結果については、文献 5)6)に示されている。

4. 正弦波入力時刻歴応答解析の解析条件等

4.1 解析プログラム

時刻歴応答解析には、CLAP.f⁷⁾をスリップ型およびノンコンプレッション型復元力特性を有するブレース要素が利用できるようにコード修正したものを用いる。プログラムでは、幾何学的非線形性を考慮可能であるが、ここでは、これを考慮しない。数値積分には、ニューマーク β 法が用いられている。

4.2 解析モデルと解析条件

図10に示す3質点の解析モデルを仮定する。柱梁の断面性能等を表2(A)に示す。本解析では、ガセットプレートやブレースの構成を厳密にモデル化するのではなく、あらかじめ行ったラーメン架構のみの実験結果で得られたラーメン架構剛性と解析モデルにおけるラーメン架構剛性が等しくなるように、解析モデルの階高を476mmに設定している⁸⁾。また、ブレースの軸方向剛性および降伏

耐力は、あらかじめ行ったブレース引張試験(図11、図12)から算出し(表2(B))、ブレースを軸方向バネとしてモデル化した。ただし、実験での初期張力の影響を考慮するため、ブレース降伏耐力は、引張側3.0kN、圧縮側-0.6kNとしている。減衰は初期剛性比例減衰を仮定する。1次減衰定数は、S-EおよびNC-E試験体のSWEEP試験の共振曲線からハーフパワー法により算出し、従来型ブレース付き架構で14%、NCブレース付き架構で6%を得た。Newmark β 法の β 値は、0.25、積分時間間隔は、1/500としている。

5. 実験結果と解析結果

図13および図14は、従来型ブレースS-Pモデルの入力波形、層せん断力-層間変位関係の解析結果および振動台実験結果を示している。なお、実験結果における層せん断力は、柱およびブレースのひずみ計測値より算定したものであり、2構面の合計である。また、実験結果における層間変位は、2構面の平均を示している。

表2(A) 柱梁部材の断面性能と降伏応力度、ヤング係数

	A	I	Z_p	σ_y	E
柱 PL-140*9	1260	8510	2835	318	205000
梁 H100*100*6*8	2159	3780000	86400	318	205000
単位	mm ²	mm ⁴	mm ³	N/mm ²	N/mm ²

A :断面積, I :断面二次モーメント, Z_p :塑性断面係数, σ_y :降伏強さ, E :ヤング率

表2(B) ブレース部材の剛性と耐力

	K	N_{By+}	N_{By-}
ブレース	3.11	3.0	-0.6
単位	kN/mm	kN	kN

K :軸方向初期剛性, N_{By+} :引張側降伏軸力, N_{By-} :圧縮側降伏軸力

図 13 入力波形時刻歴 (解析:上段、実験:下段)
(従来型ブレース S-P モデル)

図 14 層せん断力-層間変位(解析:上段、実験:下段)
(従来型ブレース S-P モデル)

図 15 入力波形時刻歴 (解析:上段、実験:下段)
(NC ブレース NC-P モデル)

図 15 および図 16 は、NC ブレース NC-P モデルの入力波形、層せん断力-層間変位関係の解析結果および振動台実験結果を示している。図 17 は、楔貫入量（材軸方向）の時刻歴を示している。従来型および NC ブレースの解析結果は、両方とも振動台実験とおおむね対応している。従来型ブレースが正負とも変形が進行する一方、NC ブレースでは、一方向（負方向）に変形が漸増していることが確認される。

図 16 層せん断力-層間変位(解析:上段、実験:下段)
(NC ブレース NC-P モデル)

図 17 材軸方向楔貫入量(NC ブレース NC-P モデル)

5. 地震応答解析

5.1 解析モデルと入力地震動

4 節の解析モデルを基本として質量およびブレース降伏耐力を変更した、表 3 に示す 8 通りの解析モデルに対して、エルセントロ波（記号 el）、八戸波（記号 ha）、神戸波（記号 kb）、応答スペクトル適合模擬地震動 5 波（記号 j1 から j5）を入力した。エルセントロ波、八戸波、神戸波は、2%減衰速度応答スペクトルの最大値が

150kine となるよう増幅率が調整されている。

文献 14)を参考に作成した模擬地震波の応答スペクトルを次式に示す。

$$SA(T_0, \xi) = \begin{cases} \alpha(\xi) \cdot A \cdot (1 + 6T_0) & (0 \leq T_0 \leq 0.25) \\ 2.5 \cdot \alpha(\xi) \cdot A & (0.25 \leq T_0 \leq 0.5) \\ 1.25 \cdot \alpha(\xi) \cdot A / T_0 & (0.5 \leq T_0) \end{cases} \quad (1)$$

$$SV(T_0, \xi) = SA(T_0, \xi) \cdot T_0 / (2\pi) \quad (2)$$

$$\alpha(\xi) = R(\xi) / R(0.02) \quad (3)$$

$$R(\xi) = \sqrt{\frac{1 - e^{-4\pi\xi TD/T}}{4\pi\xi TD/T} \{0.424 + \ln(4\pi\xi TD/T + 1.78)\}} \quad (4)$$

ここで、 S_d : 設計用加速度応答スペクトル、 $A=750$ (gal)、 TD : 地震継続時間、 $\alpha(\xi)$: Rosenblueth ら⁹⁾による(4)式に基づく応答低減係数、 ξ : 減衰定数

各地震波および式(2)の速度応答スペクトルを図 18 に示す。

図 18 各地震波の速度応答スペクトル

表 3 解析モデル

解析モデル	質量	ブレース形式	ブレース降伏耐力
NC-h00	4 節の 1/2	NC ブレース	4 節の 1/2
NC-h01	4 節の 1/2	NC ブレース	4 節に同じ
NC-h02	4 節の 1/2	NC ブレース	4 節の 1.5 倍
NC-h11	4 節に同じ	NC ブレース	4 節に同じ
NC-h12	4 節に同じ	NC ブレース	4 節の 1.5 倍
S-h00	4 節の 1/2	従来ブレース	4 節の 1/2
S-h01	4 節の 1/2	従来ブレース	4 節に同じ
S-h02	4 節の 1/2	従来ブレース	4 節の 1.5 倍
S-h11	4 節に同じ	従来ブレース	4 節に同じ
S-h12	4 節に同じ	従来ブレース	4 節の 1.5 倍

5.2 Z 型 NC ブレース付き骨組の一方変形漸増性能

図 19、図 20 は、従来型ブレースおよび NC ブレースモデルに対する各地震波入力の前側及び後側の層間変位を示している。この図から、従来型ブレースでは、弾性範囲内の S-h01, S-h02 を除き正負両方向に変形が進行するのに対して、NC ブレースでは、正側の変

形がほとんど生じない傾向が確認される。

正側・負側の最大層間変位(mm)

図 19 正側・負側の最大層間変位 (従来型ブレース)

正側・負側の最大層間変位(mm)

図 20 正側・負側の最大層間変位 (NC ブレース)

5.3 Z 型 NC ブレース付き骨組の損傷予測

文献 10)11)では、2%減衰一質点バイリニア弾塑性系構造物の累積塑性エネルギー入力等の等価速度を予測する式が示され、その有効性が数値解析により示されている。この節では、文献 10)11)に基づく VD (損傷に寄与するエネルギー ED の等価速度) の予測式が、6%減衰 NC ブレース付き門型骨組に適用できるかを検証する。ここでは、損傷に寄与するエネルギー ED の大部分が、楔の貫入に寄与するものと考え、次式のように、 ED をブレースの塑性変形による ED_B とブレース引張力が作用しない負方向のラーメン部分の弾性変形による ED_R の和とする。

$$ED = ED_B + ED_R \quad (5)$$

$$ED_B = \left(1 - \frac{Q_{By}}{mSA(T_0, \xi)}\right) \cdot \frac{1}{2} m \cdot VE^2 \quad (10)11) \quad (6)$$

$$ED_R = \frac{1}{2} \cdot \frac{(mSA(T_0, \xi))^2}{K_R} \quad (7)$$

(5)式を速度換算すると、次式が得られる。

$$VD = \sqrt{\left(1 - \frac{Q_{By}}{mSA(T_0, \xi)}\right) \cdot VE^2 + \frac{m \cdot (SA(T_0, \xi))^2}{K_R}} \quad (8)$$

ここで、 Q_{By} : NC ブレース降伏時層せん断力、 m : 質量、 $SA(T_0, \xi)$: 弾性加速度応答スペクトル値、 K_R : ラーメン部分の弾

性水平剛性

なお、 VE は、総エネルギー入力等の価速度であり、次式より予測可能である¹⁰⁾¹¹⁾。

$$VE = (T_e / 2\pi) \cdot \{0.3SA(T_e, \xi) + 0.7SA(T_e, 0.0)\} \quad (9)$$

$$T_e = \frac{T_m + T_0}{2}, T_m = T_0 \cdot (1 + \bar{\mu} / 8) \quad (10)$$

上式の T_e および T_m は、塑性化を考慮した見かけの有効周期および最大周期である¹²⁾。 $\bar{\mu}$ は、最大塑性変形倍率であり、次式で予測可能である。

$$\bar{\mu} = \left(\frac{mSA(T_0, \xi)}{Q_{By}} - 1 \right) \cdot \frac{K_{RB}}{K_R} \quad (11)$$

K_{RB} : ラーメン部分とブレース部分の弾性水平剛性の和

NC ブレースの復元力特性は、弾性範囲では、図 16 にみられるように特異なものとなっているが、塑性域での復元力特性は、2 節で述べたようにバイリニア型に類似している。バイリニア型での適用が確認されている(6)式や(9),(10)式は、NC ブレース構造においても有効であることが期待される。

図 21 は、総エネルギー入力等の速度換算値 VE の解析値(模擬波 5 波平均)、式(9)による VE の予測値、損傷に寄与するエネルギー入力等の速度換算値 VD の解析値(模擬波 5 波平均、総エネルギー入力から減衰エネルギーを差し引いたもの)、式(8)による VD の予測値、秋山式¹²⁾による VD の予測値(ただし、 VE は、式(9)による。)、式(10)による有効周期 T_e を代入した 6%減衰速度応答スペクトル値 $SV(T_e, 0.06)$ を示している。式(9)による VE の予測値は、解析値と概ね対応している。 $SV(T_e, 0.06)$ は、文献 13) で示されている適用範囲を大きく逸脱しており、解析値とあまり対応していない。秋山式は、解析値とおおむね対応しているが、塑性化の比較的大きい範囲をターゲットとしている式であるため、NC-h01, NC-h02 など入力量の少ないケースで過大評価となっている。一方、式(8)は、他式と比べ、解析値とよく対応している。

図 21 VD または VE の解析値 (模擬波 5 波平均) と予測値

式 (8) の VD 予測式より、次式の材軸方向楔貫入量予測式が得られる。

$$\delta_D = \frac{1}{2} mVE^2 \cdot \left(1 - \frac{Q_{By}}{mSA(T_0, \xi)} \right) / N_{By} + \frac{mSA(T_0, \xi)}{K_R} \quad (12)$$

ここで、 δ_D は、材軸方向楔貫入量、 N_{By} は、NC ブレースの降伏耐力である。

図 22 は、式(12)による材軸方向楔貫入量予測値 (記号□) と解析値 (模擬波 5 波平均) を示している。比較のため、秋山式による VD および $SV(T_e, 0.06)$ の仕事量をブレース降伏耐力で除した予測値 (記号は、それぞれ×、+) も示している。図より、式(12)が他式と比較してよい対応を示していることが確認される。

図 22 材軸方向楔貫入量の解析値 (模擬波 5 波平均) と予測値

6. まとめ

本論文では、まず、前半で、Z 型 NC ブレース付き門型ラーメンと従来型ブレース付き門型ラーメンの正弦波入力振動台実験と時刻歴応答解析結果を示し、Z 型 NC ブレースの一方方向変形漸増性能を確認した。さらに、後半では、記録地震動および応答スペクトル適合模擬地震動を入力した Z 型 NC ブレース付き門型ラーメンと従来型ブレース付き門型ラーメンの時刻歴応答解析結果を示し、地震動下における Z 型 NC ブレースの一方方向変形漸増性能を検証した。また、3 種類の累積塑性エネルギー吸収量予測式を用いて、楔貫入量の予測を行い、時刻歴応答解析結果と比較した。

得られた知見を以下に示す。

- [1] Z 型 NC ブレース門型骨組の正弦波入力振動台実験と時刻歴応答解析の履歴曲線は、概ね対応し、実験、解析とも正方向層間変形はほとんど生じていない。
- [2] 地震応答解析によれば、Z 型 NC ブレース付き骨組の正方向層間変形は、ほとんど生じていない。
- [3] 式(8)による損傷に寄与するエネルギー入力等の予測値は、他式よりも、解析値 (模擬波 5 波平均) とよく対応する。
- [4] 式(12)による楔貫入量予測値は、他式よりも、地震応答解析値 (模擬波 5 波平均) とよく対応する。

上記の知見は、1 層骨組におけるものである。今後の課題として、

層方向の損傷分布が問題となる多層骨組への展開、楔貫入量予測式を用いた NC プレースの耐震設計法の整備、楔デバイスのすべり面の維持管理法の検討などが考えられる。

参考文献

- 1) 望月重、村田義男、安藤信好、高橋春蘭：中心圧縮力を受けるアンボンドプレースの座屈に関する実験的研究(1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、pp.1623-1624、1979.9
- 2) 長尾直治、高橋茂治：角鋼管を鉄筋コンクリートで被覆したアンボンドプレースの弾塑性性状、日本建築学会構造系論文報告集、No.415、pp.105-115、1990.9
- 3) 玉井宏章、近藤一夫、花井正実：プレース付き架構の制振装置に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、No.387、pp.24-34、1988.5
- 4) 玉井宏章、高松隆夫、松尾彰：ノンコンプレッションプレースの耐震性能向上について、日本建築学会構造系論文集、No. 595、pp.131-138、2005.9
- 5) 高松隆夫、玉井宏章、山西央朗、澤田樹一郎、松尾彰：Z型プレース付門型ラーメン架構の振動台実験、広島工業大学紀要研究編、第 43 巻、pp.213-220、2009
- 6) 荊尾友裕、高松隆夫、玉井宏章、山西央朗、澤田樹一郎、松尾彰：Z型ブ

レース付門型ラーメン架構の振動応答性状について、日本建築学会中国支部研究報告、第 32 巻、2009.3 (CD-ROM)

- 7) 小川厚治、多田元英：柱・はり接合部変形を考慮した静的・動的応答解析プログラムの開発、第 17 回情報・システム・利用技術シンポジウム論文集、pp.79-84、1994.12
- 8) 多田元英：CLAP.f 利用説明書・解析方法説明書、鋼材倶楽部
- 9) E.Rosenblueth, J.I.Bastamante：Distribution of Structural Response to Earthquakes, J. of Engineering Mechanics Div., ASCE, Vol.88, EM3, 1962.6
- 10) 澤田樹一郎、松尾彰：一質点系構造物の設計用加速度スペクトルからの累積塑性エネルギー入力予測に関する研究、構造工学論文集、Vol.51B、pp.181-187、2005.4
- 11) 澤田樹一郎：設計用加速度スペクトルからの多質点系構造物の累積塑性エネルギー入力予測に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.621、pp.149-154、2007.11
- 12) 秋山宏：建築物の耐震極限設計、東京大学出版会、1987
- 13) 小川厚治、井上一朗、中島正愛：損傷に寄与する地震入力エネルギーに関する考察、日本建築学会構造系論文集、No.530、pp.177-184、2000.4
- 14) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、1993

(2010年2月10日原稿受理、2010年7月5日採用決定)