

第4章 補修した鉄骨骨組の終局耐震限界状態と弾塑性挙動

4.1 はじめに

本章では、3章で提案した鉄骨部材および鉄骨骨組の力学的モデルに基づいて骨組の解析モデルを構築することで骨組の耐力分布を評価し、地震応答時の弾塑性挙動および崩壊モードを検証する。また、損傷した骨組に補修を施すことで変化する耐力分布を評価し、補修後骨組の卓越崩壊モードの変化について解析的に検証を行い、終局限界状態を明らかにする。

4.2 補修した鉄骨骨組の耐力分布と崩壊モードの評価

中低層の鉄骨建物は、塑性変形能力の確保の観点から地震時に全層崩壊モードが卓越するように設計することが望ましい。地震時に全層崩壊モードが卓越する鉄骨骨組の場合、柱梁接合部付近において梁先行降伏型となるように柱梁耐力比が調整され、各層の梁端に塑性ヒンジが形成される。一方で、損傷した骨組を復旧させるため、梁に生じた塑性ヒンジ部に補修を施すと、前章で確認したように補修部位の固定度や耐力が上昇し、補修後骨組では塑性ヒンジ発生部位が変化することがある。塑性ヒンジ発生位置が変化する場合、前章の補修後部材の実験結果で示したように、補修を施した部材で再度塑性ヒンジが形成されるケース（補修部の外側で新たな局部座屈が生じる、補修部の変形が進行する、など）の他に、柱や接合部パネルなどの周辺部材に損傷が移り塑性ヒンジが形成されるケースがある。したがって、元の設計時に全層崩壊モードが卓越するように耐震設計した骨組でも、補修による耐力の分布の変化の影響で、補修後には局所層崩壊モードなどの他の崩壊モードが卓越する可能性が考えられる。

図 4-1 は補修によって骨組の耐力の分布が変化し、補修前後で崩壊モードが変化するケースの概要を示している。同図は、元の状態で梁端に塑性ヒンジが形成される骨組について、塑性ヒンジを補修することで、補修部よりも梁スパン中央側で局部座屈が発生する崩壊モード、補修による耐力の上昇で梁端に作用する応力が上昇し梁端で破壊する崩壊モード、および補修による耐力の上昇により柱（もしくは柱梁接合パネルなど）に塑性ヒンジが移動する崩壊モードを示している。これらの他にも、補修法の選択によっては、母材と補修部材との溶接接合部で破壊する崩壊モード（3章、B-NS150 試験体）や、元の状態で生じた局部座屈変形が進行する崩壊モード（3章、C-NS150 試験体）、なども考えられるが、ここでは代表して、図 4-1 に示した崩壊モードのうちのいずれかが卓越するものと考え、検討を行う。

補修した骨組の補修部周辺において、図 4-1 のどの崩壊モードが発生するかは、耐力の分布と応力分布により判断することができる。補修した部材の耐力については、例えば箱形補修を施した H 形鋼梁について、補修部は補強プレートの分だけ断面が増加し曲げ耐力が増加するとともに、フランジ外端の境界条件が変化することにより局部座屈変形が進行しにくくなる。そのため、元の状態の断面よりも耐力が大きく上昇する。また、補修部付近に新たな局部座屈が発生する場合、部材に生じるモーメント分布の傾きにより、元の状態の断面と同じ耐力であっても、塑性ヒンジ形成位置が移動した分だけ部材としての耐力が上昇する。さらに、補修部の周辺部材への塑性ヒンジの移動も考慮した場合、補修後の崩壊モードの判定は、補修した部材の耐

力と、梁端の耐力、柱や柱梁接合部パネルの耐力とを比較して評価する必要がある。

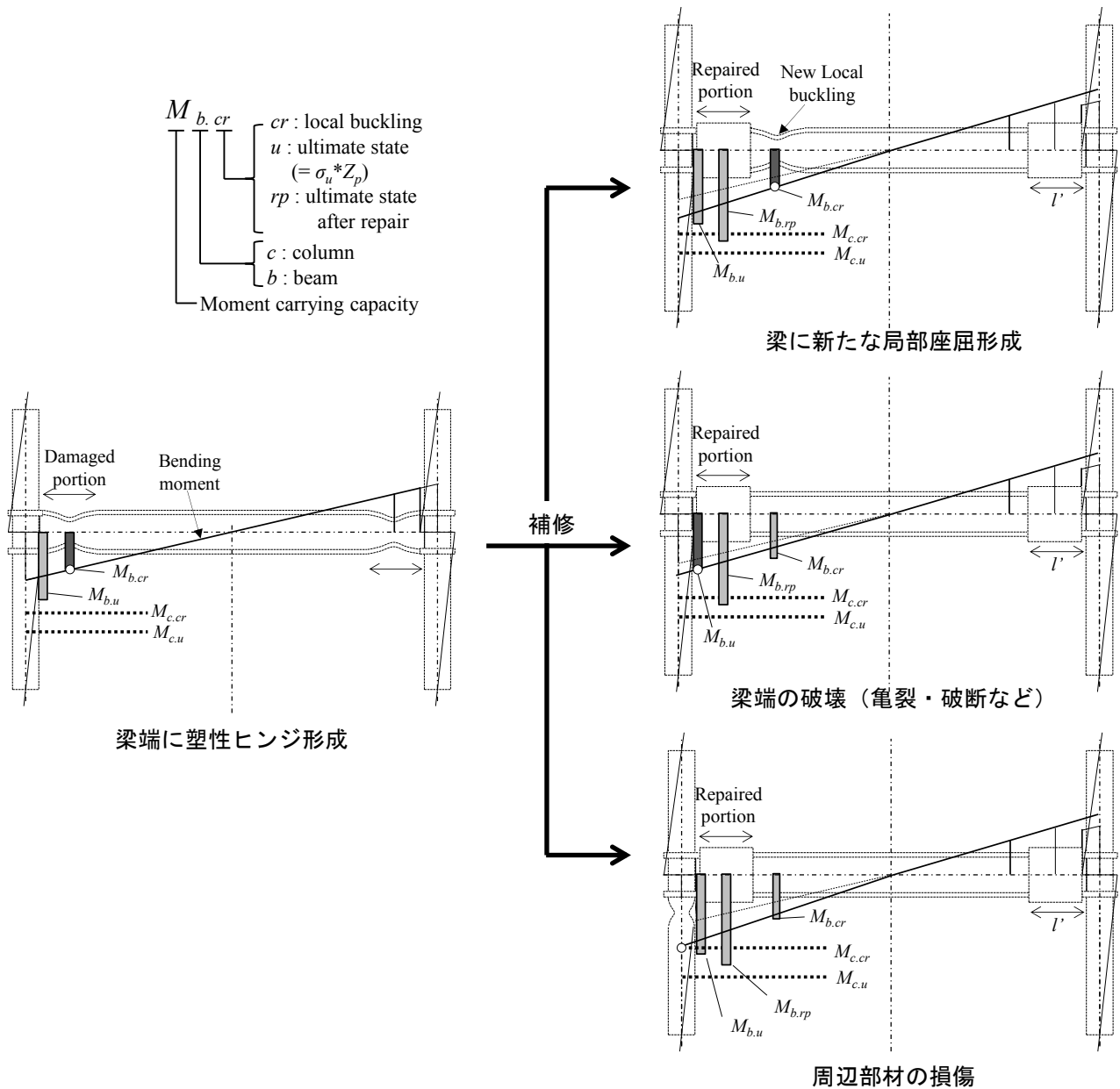


図 4-1 骨組の耐力の分布と崩壊モード

4.3 骨組の耐力分布と解析モデル

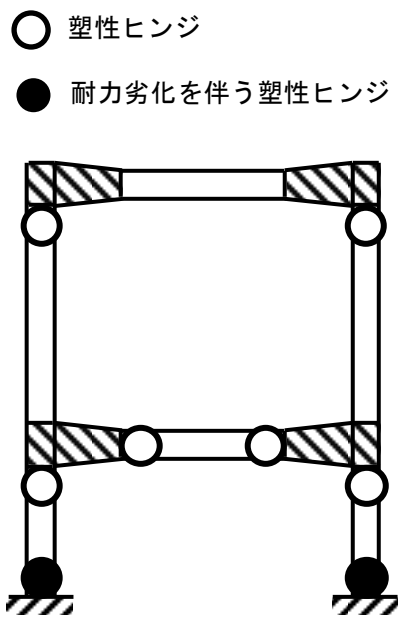
骨組の耐力の分布と応力分布を考慮し、例えば補修後には新たな局部座屈が形成される崩壊モードが発生する場合、元の状態の骨組と補修後の骨組の解析モデルは図 4-2 のように表せる。ここで、図 4-2 における白丸は耐力の分布および応力分布によって塑性ヒンジが形成される可能性がある部位を、回転バネは補修を施した部位を示している。補修を施した部位は耐力が上昇して塑性ヒンジが形成されにくくなるものの、剛体回転を生じるため、梁端部は剛域を設けずに回転バネを設定する。

補修後には補修部よりもスパンの内側、もしくは補修部位の周辺部材に塑性ヒンジが形成され、崩壊機構を形成する。

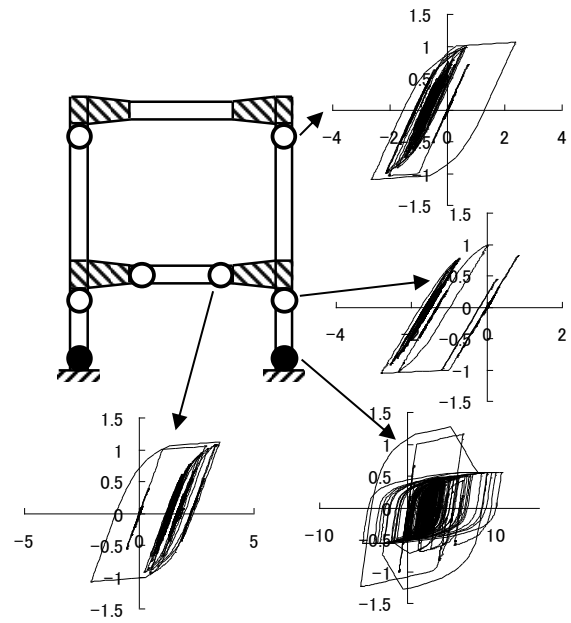
$$\{f\} = [\Phi^T]^{-1} \cdot \{r\} \tag{4-2}$$

ここで、 $\{f\}$ は復元力ベクトル、 $[\Phi^T]^{-1}$ は転置した刺激関数マトリクスの逆行列、 $\{r\}$ は各次振動に基づくモード復元力ベクトルである。

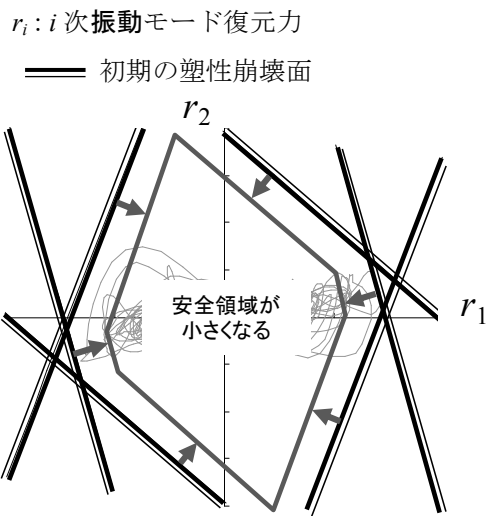
図4-3(a),(b)のように、地震応答中に耐力劣化をともなう塑性ヒンジが生じると、塑性ヒンジの耐力劣化により式(4-1)の右辺の内力仕事項が初期状態よりも小さくなり、外力に対する抵抗力が低下する。骨組の塑性崩壊面について、耐力低下が生じた塑性ヒンジが直接関係する崩壊モードの塑性崩壊面が図4-3(c)のように内側に移動し、外力に対する安全領域が小さくなることで、図4-3(c)のようにその後の地震応答で崩壊機構を形成しやすくなることが考えられる。



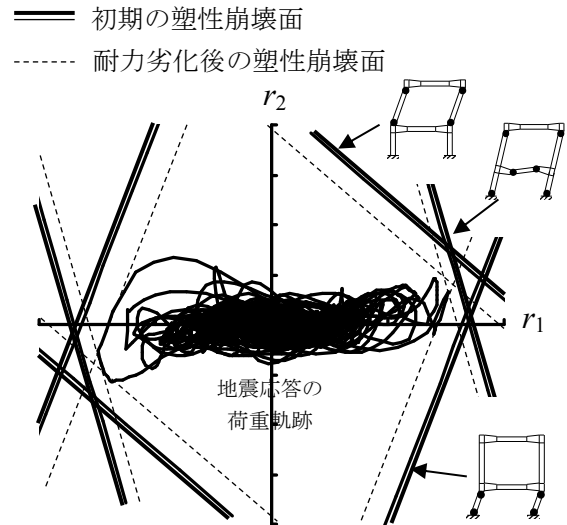
(a) 塑性ヒンジを形成した骨組



(b) 塑性ヒンジの応答履歴の例
(基準化モーメントー塑性率関係)



(c) 安全領域の縮小



(d) 塑性崩壊面と応答挙動 (モード復元力空間)

図4-3 耐力劣化による塑性崩壊面の移動と安全領域の縮小

また、塑性ヒンジが形成される部位によっては各崩壊モードの塑性崩壊面の関係も変化し、例えば図 4-3 (d) のように全層崩壊機構の塑性崩壊面が、他の局所層崩壊機構の塑性崩壊面よりも卓越しにくくなることも考えられる。したがって、損傷した骨組の耐震性能を評価する際には、その後に発生しうる地震に対してどの崩壊モードが卓越しやすいのかを把握することも重要となると考えられる。

現行の耐震設計では、保有水平耐力の確保とともに、塑性変形能力に優れる崩壊モード（例えば全層崩壊機構など）の形成の保証を設計目標とすることがある。図 4-3 (d) の例では、初期状態では全層崩壊モードが比較的卓越しやすいものの、耐力劣化後には 1 層崩壊モードがより卓越しやすくなっている。損傷した建物の持続的な使用を考慮し骨組の復旧計画を立案する際、補修後の骨組にも塑性変形能力に優れる崩壊モードの形成を保証する場合、骨組全体の耐震性能の回復とともに、損傷および補修により塑性崩壊面がどのように変化し、どのような崩壊モードが卓越するかを検証する必要があると考えられる。

損傷した骨組に補修を施す場合、例えば図 4-3 (a) の骨組の塑性ヒンジを図 4-4 のように補修した場合を考えると、補修した部材（1 層柱、2 層柱、2 層床梁）の耐力の上昇により式(4-1)の右辺の内力仕事項が増加し、塑性崩壊面が外側に移動することで外力に対する安全領域が変化することが考えられる。例えば、図 4-4 (b) の全層崩壊モードについて考えると、形成されるすべての塑性ヒンジは補修による部材の耐力の上昇の影響を受ける。一方、1 層崩壊モードおよび 2 層崩壊モードの場合では、それぞれ 1 層柱脚および 2 層柱頭の耐力の上昇の影響のみが作用するため、全層崩壊モードと比較すると耐力の上昇の影響が小さくなる。

これにより、全層崩壊モードの塑性崩壊面が大きく外側に移動し、他の崩壊モードの塑性崩壊面よりも外側に位置することで、外力に対する安全領域は広がるものの、全層崩壊が卓越しなくなることが考えられる。図 4-4 (c) の例では、全層崩壊の塑性崩壊面が他の崩壊モードの塑性崩壊面より完全に外側に移動し、地震応答で全層崩壊が生じなくなり、1 層もしくは 2 層崩壊モードが卓越することを示している。

前述のように塑性変形能力に優れる崩壊モード（ここでは全層崩壊モードとする）の形成を保証する場合には、想定する荷重分布の方向において、全層崩壊モードの塑性崩壊面が他の崩壊モードの塑性崩壊面よりも内側に位置するのが望ましいと考えられる。

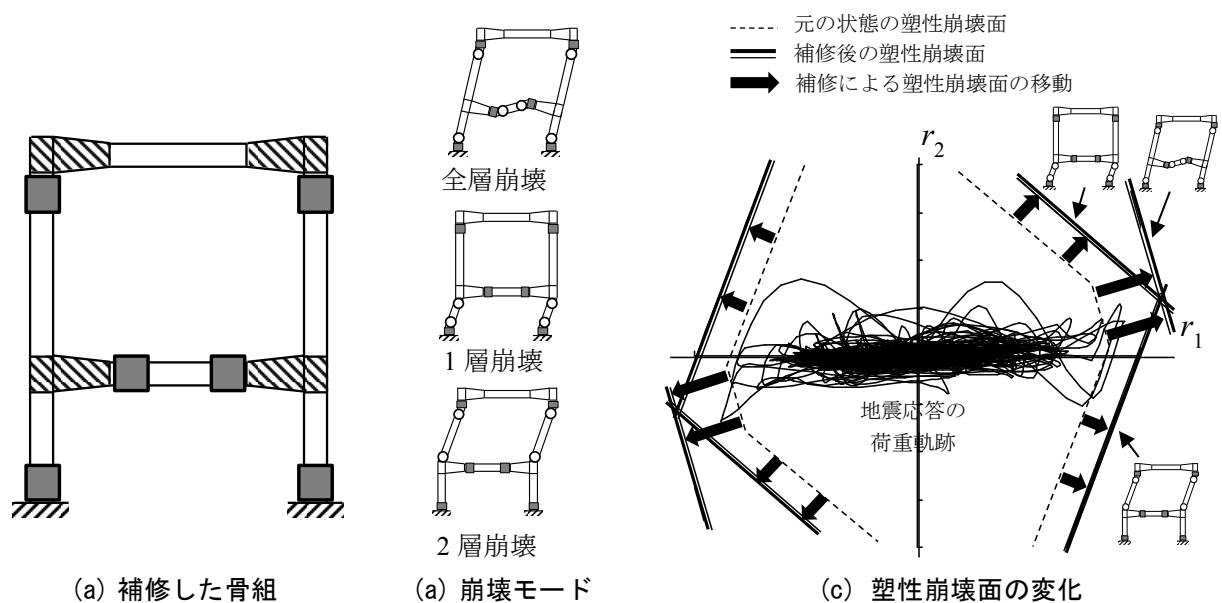


図 4-4 補修による塑性崩壊面の移動と卓越崩壊モードの変化

補修後の骨組においても全層崩壊モードの形成を保証するためには、図4-4 (a)の梁に形成された塑性ヒンジの耐力を大幅に上昇させない補修を行うか、補修後の塑性崩壊面を参照しながら他の崩壊モードの崩壊面をさらに外側に移動させるための補強を行う方法がある。

例えば、図4-4 (c)では、1次振動モード復元力の方向には、最も近い崩壊面として1層崩壊モードの塑性崩壊面が存在する。1次振動モード復元力の荷重分布下で全層崩壊モードの塑性崩壊面を最も近い崩壊面とするためには、1層柱頭部に補強を施し1層崩壊モードの塑性崩壊面を全層崩壊面の外側まで移動させることで、全層崩壊モードを卓越させることが可能となる。

4.5 補修による耐力の分布および剛性の分布の変化が塑性崩壊面に与える影響

前節で概説したように、補修により骨組内の耐力の分布が変化することで塑性崩壊面が変化し、卓越崩壊モードが変化することが考えられる。また、補修部の剛性が元の状態から変化することで骨組の振動特性が変化し、補修後の塑性崩壊面に影響を与える可能性も考えられる。そこで、補修による骨組の耐力の分布に加え、剛性分布と振動特性の変化が、補修した骨組の崩壊モードに与える影響について解析的に検討する。

文献[4-1]では、複数の振動モード成分が複合した荷重状況が生じるケースを想定し、2層1スパン鉄骨骨組のオンライン地震応答実験を行っている。ここでは、文献[4-1]の骨組試験体を参考に、図4-5に示す2層骨組を解析モデルとして、終局耐震挙動に関して解析的に検討を行う。ただし、文献[4-1]では柱梁ともにH形鋼弱軸の骨組であるが、ここでは強軸で使用した骨組としている。塑性ヒンジの復元力特性にはスケルトン・シフト・モデルを用い、骨格曲線は文献[4-2]を参考に、図4-6に示すように局部座屈による耐力劣域までを3折れ線モデルで設定した。ただし、図4-6に示すように、圧縮側フランジの耐力を換算しない場合を限界耐力とし、それ以上は耐力が低下しないものとした。また、地震応答中の荷重軌跡は1次振動モード復元力および2次振動モード復元力の複合的な影響で複雑な挙動を示し、1層や2層での局所層崩壊を引き起こす部位に損傷を生じるものの、元の状態の骨組の解析では全層崩壊モードを形成する部位に共通して損傷が生じるため、これらの部位を補修した骨組を補修後骨組とした。補修部の長さ l_b は文献[4-3]のフランジの局部座屈波の長さの予測式を参考に $l_b = 0.16H$ とし、図4-1、4-2に示す新たな局部座屈の発生による崩壊モードに従って補修した部材の耐力が上昇するものとした。なお、ここでの解析では図4-2に示す補修部を表す回転バネは弾性とした。

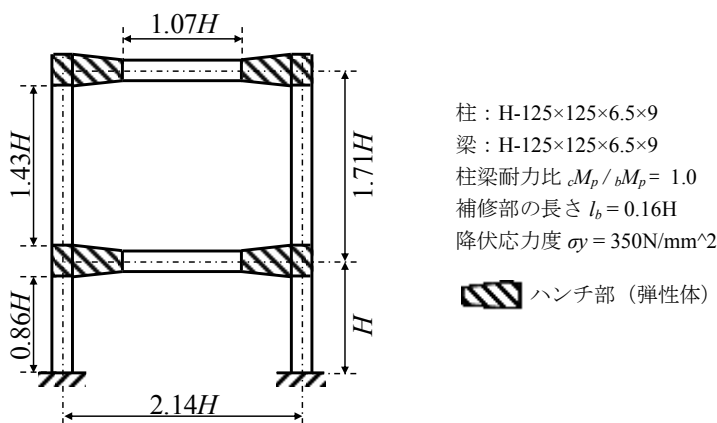


図4-5 骨組解析モデル

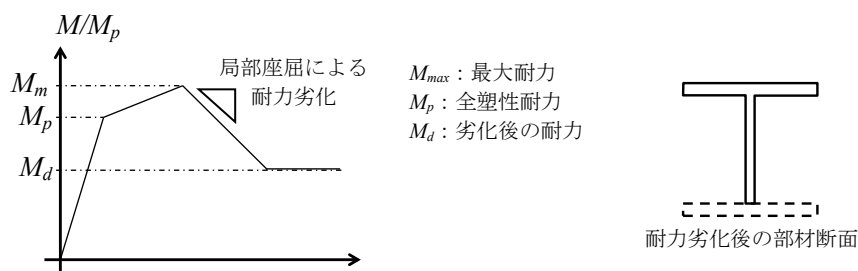


図 4-6 塑性ヒンジの骨格曲線の設定

表 4-1 骨組の振動特性

	M_2 / M_1	M_2^* / M_1^*	T_1^* [s]	T_2^* [s]
Case 1-1	1	0.416	0.244	0.066
Case 1-3	3	0.184	0.295	0.048
Case 3-1	1/3	0.546	0.181	0.077

骨組の全質量は一定とし、表 4-1 に示すように各階の質量比を変化させ、骨組の振動特性を変数とする。ここで、 M_i は i 層の質量、 M_i^* は振動 i 次振動モードの有効質量、 T_i^* は i 次固有周期である。また、補修部の剛性は i) 元の状態と同じ場合、ii) 剛体となる場合を想定して検討を行う。

図 4-7 に元の状態の塑性崩壊面と、地震応答時の荷重軌跡の例として、El Centro NS 波（最大速度 75kine に規準化）入力時の荷重軌跡を示す。同図には応答終了後の骨組の耐力分布に基づいて算出した、部材の耐力劣化の影響により変化した塑性崩壊面を合わせて示している。

Case 1-1 では、応答中にどの崩壊形も形成されないものの、主として全層崩壊モードの形成に関連する 1 層柱脚、2 層柱頭、1 層梁端で塑性化が進行した。さらに 1 層柱脚に損傷が集中し顕著な耐力低下が生じることで、応答後の塑性崩壊面に変化が生じた。

Case 1-3 では、応答中に 2 層柱脚・柱頭とともに 1 層柱脚および 1 層梁端で塑性化が進行し、2 層局所崩壊面に達するものの各部位で顕著な耐力劣化は生じなかったため、応答後の塑性崩壊面にはほぼ変化が生じていない。

Case 3-1 では、1 層柱頭、2 層柱頭、1 層梁端に若干の塑性化が生じるものの、1 層柱脚に損傷が集中した。ただし、最大塑性率が小さい範囲に収まったため、耐力の低下は Case 1-1 よりも顕著ではなかった。

図 4-7 より、元の状態の骨組において、Case 1-1 では全層崩壊、Case 1-3 では 2 層局所崩壊、Case 3-1 では 1 層局所崩壊が卓越する骨組であることが確認できる。

元の状態と補修後の骨組のモード復元力空間における塑性崩壊面の比較を図 4-8 に、補修後の骨組の振動特性を表 4-2 に示す。

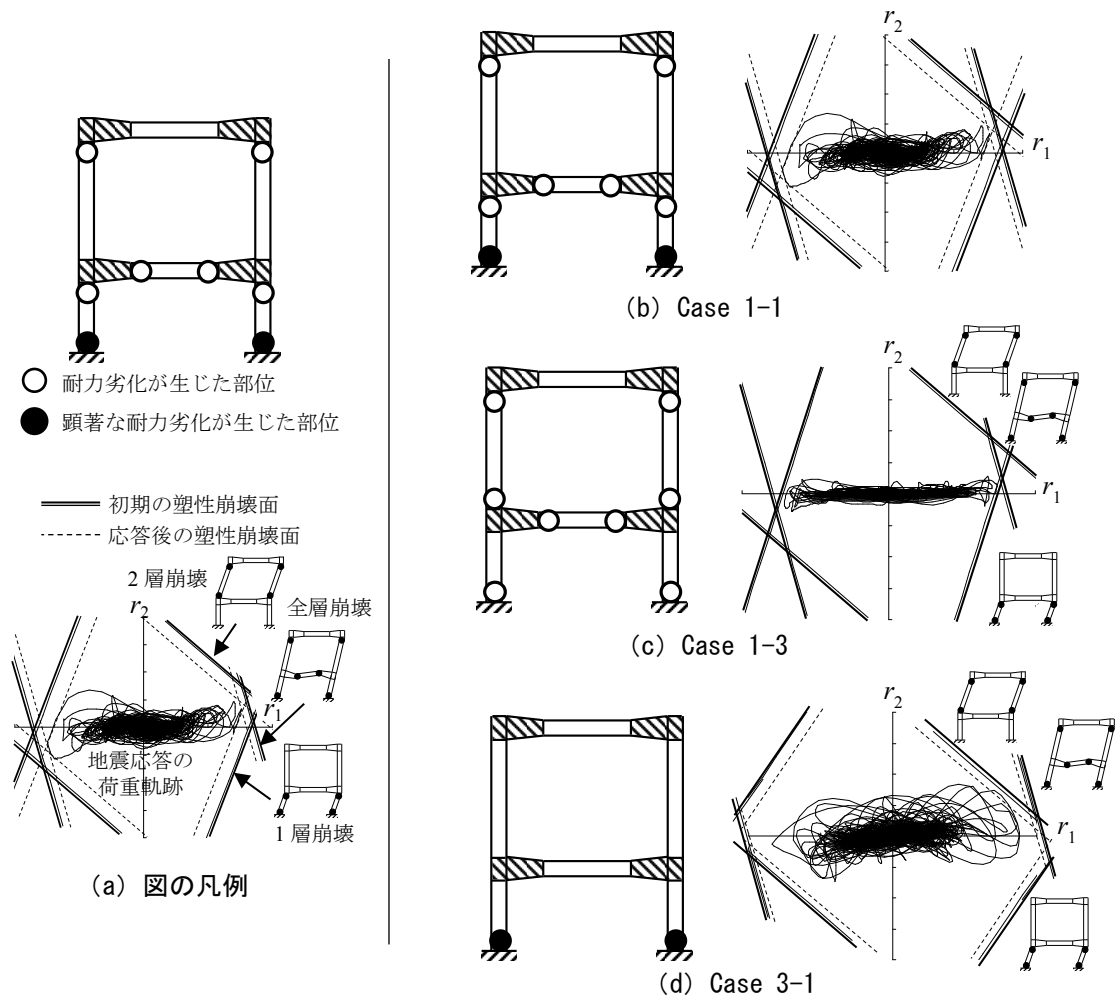
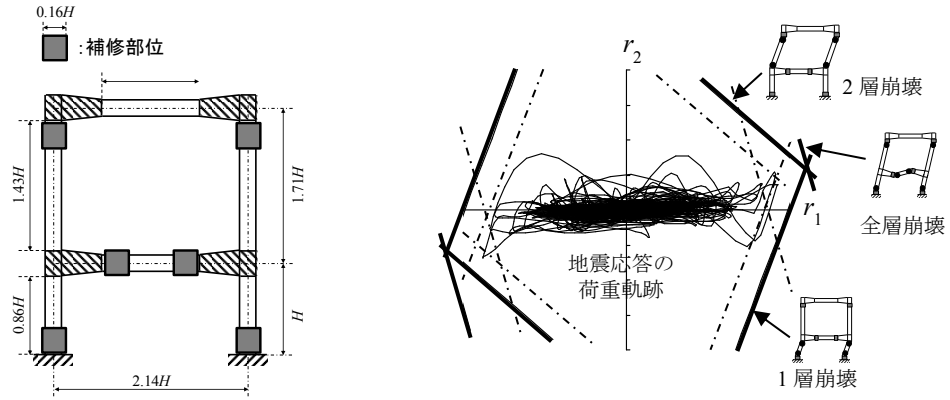


図 4-7 元の状態の骨組の塑性崩壊面と荷重軌跡（モード復元力空間）

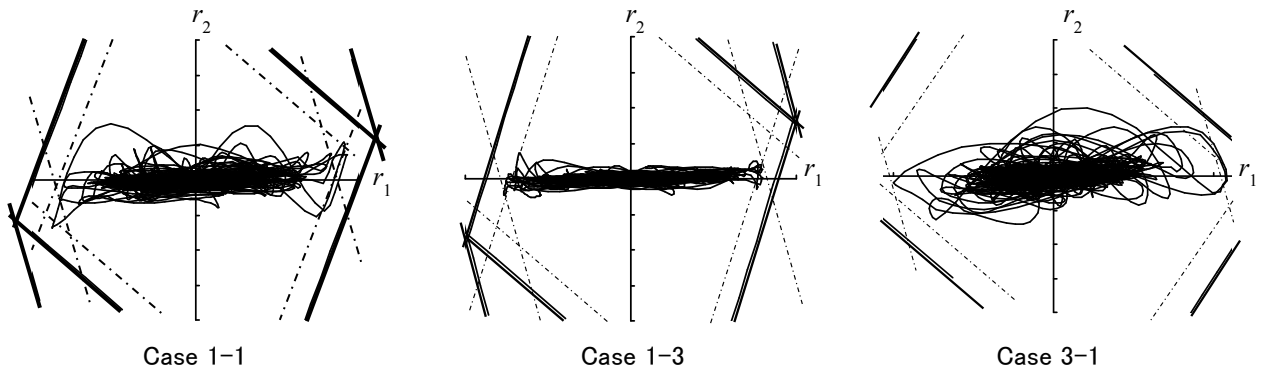
表 4-2 補修後の骨組の振動特性

		M_2^* / M_1^*	T_1^* [s]	T_2^* [s]
Case 1-1	ii) 補修部が剛体	0.503	0.220	0.055
	元の状態との比	1.21	0.90	0.83
Case 1-3	ii) 補修部が剛体	0.210	0.267	0.039
	元の状態との比	1.14	0.91	0.91
Case 3-1	ii) 補修部が剛体	0.779	0.160	0.064
	元の状態との比	1.42	0.88	0.83

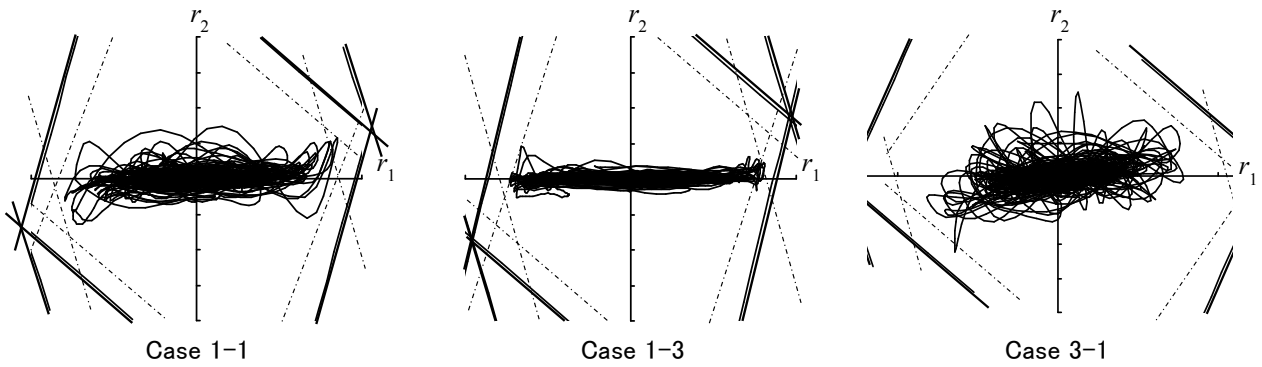
※補修部の剛性が i) 元の状態と同じ場合は振動特性は変化しないため省略



(a) 補修後骨組の概要と図の凡例



(b) 補修部の剛性が元の状態と同じ i)



(c) 補修部が剛体 ii)

図 4-8 補修による塑性崩壊面の変化と荷重軌跡 (モード復元力空間)

図 4-8 より、補修後の骨組では、各ケースの i)において、塑性崩壊面が外側に平行移動し、応答領域が広がっていることが確認できる。また、El Centro NS 波による地震応答中は各ケースで 1 層柱脚などに塑性化が生じたが、どの部位でも耐力劣化が生じることはなく、応答収束まで安全領域内での荷重軌跡を示している。また、部材の耐力劣化が生じていないため、応答後も安全領域が小さくなることはなかった。一方で、塑性崩壊面の移動により補修後の骨組に全層崩壊モード生じなくなることも確認できる。このため、元の状態と同程度のレベルの地震荷重に対しては崩壊機構を形成しにくくなり、保有水平耐力の観点からは補修効果は

得られているものの、それ以上の荷重レベルについて塑性変形能力の観点から考えると、元の状態より不利な崩壊モードが卓越する可能性がある。

ii)では塑性崩壊面の移動とともに、塑性崩壊面が元の状態に対して若干傾いていることが確認できる。これは、骨組の剛性の分布が変化し、刺激関数マトリクス $[\Phi]$ 、すなわちモード基底ベクトルが変化したためである。従って、剛性の分布の変化は主としては塑性崩壊面ではなく、各次振動モードの荷重効果に影響を与えているものと考えられる。表 4-2 には、補修後の骨組の振動特性と元の状態に対する各値の比を合わせて示している。ただし、i)の場合は元の骨組の振動特性から変化しないため省略している。表 4-2 より、元の骨組で2次振動モード成分が大きいケースほど、補修後の有効質量の比が大きくなっていることが確認できる。したがって、元の骨組で高次振動モードの影響が無視できない骨組では、補修後にはさらに高次振動モードの応答が大きくなるものと考えられる。i)およびii)の Case 3-1 (図 4-8 (b), (c)) の結果を見ると、ii)の応答はi)の応答よりも振動2次振動モード側に励起しており、高次振動モード側の応答が大きくなっていることがわかる。

これらのことから、高次振動モード成分の影響が無視できない骨組の場合、補修の方法によっては塑性崩壊面や応答挙動の変化が大きく、元の骨組では想定していない崩壊モードが卓越する可能性が高くなり、修復計画や補修方法の選択がより重要になるものと考えられる。

4.6 結び

本章では、3章で提案した鉄骨部材および鉄骨骨組の力学的モデルに基づいて、解析に供する骨組のモデルを構築した。実験結果に基づいて骨組の耐力分布を評価し、前章で提示した補修後の力学的モデルから構築した骨組の解析モデルを用いて、地震応答時の弾塑性挙動および崩壊モードについて検証を行った。

また、損傷した骨組に補修を施すことで変化する骨組内の耐力分布を評価し、補修後骨組の卓越崩壊モードの変化について解析的に検証を行い、補修による骨組内の耐力分布の変化や剛性の分布の変化が補修後の終局限界状態に与える影響について検討を行った。

その結果、補修後の骨組の塑性崩壊面に基づき、補修後骨組の卓越崩壊モードを評価する方法を提示した。

参考文献

- [4-1] 伊藤拓海, 大井謙一, 森洋一, 方沛宇: 骨組構造物の崩壊機構形成に関するハイブリッド設計点探索, 日本建築学会構造系論文集, 第 567 号, pp.125-132, 2003.5
- [4-2] 加藤勉, 秋山宏, 帯洋一: 局部座屈を伴う H 形断面部材の変形, 日本建築学会論文報告集, 第 257 号, pp.49-58, 1977.3
- [4-3] Victor Gioncu, Dana Petecu: Available Rotation Capacity of Wide-Flange Beams and Bea-Columns, Part 1. Theoretical Approaches, Journal of Constructional Steel Research, Vol.43, pp.161-217, 1997.7-1997.9

第5章 被災した鉄骨骨組の補修法と終局耐震限界状態時の卓越崩壊モードの評価法

5.1 はじめに

震災建築物全体の復旧計画の立案にあたっては、損傷した部位を補修するだけでなく、損傷した部位を含む層の残存耐震性能や、他の層の復旧が当該層に与える影響を考慮する必要がある。復旧技術指針[5-1]では、構造体の被災状況に応じて、復旧が不要な場合、最小限の復旧を行う場合、より大きな復旧を行う場合、大規模な復旧が必要な場合、それぞれの復旧方針立案の手順が示されている。

復旧が不要な場合を除き、いずれの震災状況においても、復旧後の恒久使用を可能とするためには「特定建築物の耐震診断及び耐震改修に関する指針」（平成7年建設省告示第2089号）に準じ、各層の被災状況に対する耐震性能を診断し、当該層が構造耐震指標 $I_s \geq 0.6$ かつ保有水平耐力に係る指標 $q \geq 1.0$ を満足するように復旧設計・工事を行う必要があるとされている。

しかし、以上の復旧方針に対して、所要の耐震性能を確保し、かつ経済的な復旧設計のための具体的な手順や方法は確立されていない。補修後骨組の持続的な使用を考慮する場合、その後に発生する地震動に対し、十分な塑性変形能力を確保するように修復を施し、塑性変形能力に優れた崩壊機構形成を保証することが重要となる。そこで本章では、終局耐震限界状態設計に基づき、補修後骨組の終局耐震状態を検証する方法を示す。

ここでは、補修した鉄骨骨組の力学的な評価から骨組の限界状態関数を定義し、近似信頼性解析により補修した骨組の卓越崩壊モードを確率論的に評価する方法を検討する。本検討では、損傷部位の補修により部材の剛性や耐力が変化することで補修した骨組全体の終局限界状態に与える影響を検討し、補修後の終局挙動を検証するための近似信頼性解析による耐震安全性の照査点（設計点）の評価法を検討する。

5.2 骨組の終局耐震限界状態関数と設計点

5.2.1 骨組の終局耐震限界状態と近似信頼性解析

骨組の終局耐震限界状態設計では、設計点に基づいて安全性を照査することが求められる。設計点は、崩壊モード、地震荷重とその荷重効果の組合せで評価される[5-2][5-3]。本節では、一般的な近似信頼性解析による骨組の設計点の評価法に関して、限界状態関数、地震動の等価静的荷重モデルと、その荷重効果について示す。

5.2.2 骨組の終局耐震限界状態関数

骨組が崩壊機構を形成した場合、仮想仕事法により限界状態関数（性能関数）は次式で表される。

$$G(r) = \sum_{i=1}^m M_{pi} \cdot |\theta_{pi}| - \sum_{j=1}^n q_{pj} \cdot r_j \quad (5-1)$$

ただし、 M_{pi} ：全塑性モーメント、 θ_{pi} ：塑性ヒンジの塑性回転（速度）、 q_{pj} ： j 次のモード塑性変位（速度）

成分で、骨組の変位 $\{x\}$ に対して $\{x\} = [\Phi] \cdot \{q\}$ ($[\Phi]$ は刺激関数マトリクス) で表される古典的規準モード座標における変位 $\{q\}$ で表されるモード変位の塑性成分, r_i : モード荷重乗数, m : 骨組の塑性化部位の数, n : 振動モード数, である。式(4-2)より, モード荷重乗数 $\{r\}$ は地震動によるランダム水平力 $\{f\}$ を転置した刺激関数マトリクス $[\Phi^T]$ を用いて以下の式で変換される。

$$\{r\} = [\Phi^T] \cdot \{f\} \tag{5-2}$$

5.2.3 地震動による荷重効果と確率過程

骨組の近似信頼性解析では, 確率変数として骨組と地震動の諸変数, ならびに荷重効果 (応答) が対象となる。骨組に関わる確率変数として, 質量, 骨組の剛性や耐力などのばらつき, 地震動に関わる確率変数として, 地盤, 位相・振幅等のスペクトル, 卓越周波数, などが考えられる。また, これらの入力条件と振動特性の組合せに対して, 出力としての荷重効果も確率変数となる。例えば, 荷重効果がある確率分布に従うとすると, その統合確率密度関数 $pdf(r_i)$ に対して, 破壊確率 P_f は破壊領域にわたって次式で評価される。

$$P_f = \iint \dots \iint_{G \leq 0} pdf(r_i) dr_i \tag{5-3}$$

文献[5-3]では, 地震動により骨組に作用するランダム水平力 $\{f\}$ などの時間 t とともに不規則に変動する値を, ある確率分布に従う確率変数と考え, 等価な静的水平力へモデル化する方法を示している。本論文では, 文献[5-3]に準じて地震動による荷重効果を等価静的水平力にモデル化し, 限界状態関数を評価する。

ランダム水平力 $\{f\}$ は時間 t を変数に持つ確率変数であり, $\{f\}$ の各次振動モード成分 $\{r\}$ も実際には時間とともに変化する非定常確率過程であるが, ここでは, 図 5-1 のように一定の範囲内の地震応答を定常ランダム振動の極値分布の平均値として評価し, 地震応答の振幅 (最大値) $r_{i.Amp}$ は平均値 $r_{i.Ave}$ と変動値 (標準偏差) $r_{i.RMS}$ の和として以下の式で表現している。

$$r_{i.Amp} = r_{i.Ave} + U \cdot r_{i.RMS} \tag{5-4}$$

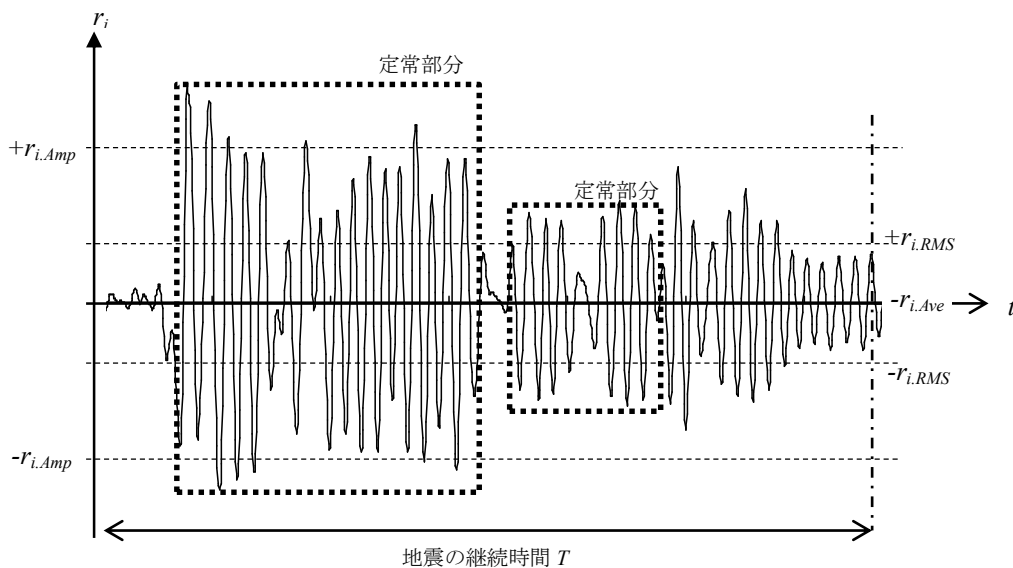


図 5-1 地震応答が継続時間内に一定値を超える状況 [5-3]

ここでは、地震時の荷重効果を定常確率過程の図 5-2 のような標準正規分布に従う確率変数とし、その各次振動モード成分の平均値 0、互いに独立の無相関な変数として以下のようにモデル化する。

$$\text{確率過程：平均値} \quad E(r_j) = \bar{r}_j = 0 \quad (5-5)$$

$$\text{平均値} \quad E(r_j \cdot r_i) = 0 \quad (i \neq j) \quad (5-6)$$

$$\text{標準偏差} \quad \sigma_{rj} = c_i m_j^* S_{A_j} \quad (5-7)$$

ここで、 $\{\phi_i\} : [\psi] = [\Phi^T]^{-1}$ の列ベクトルで与えられる荷重基底ベクトル、 σ_{rj} : 各次振動モード荷重乗数の標準偏差、 c_j : 確率過程の任意時点における標準偏差とある継続時間内の平均最大値との関係から導かれる係数、 m_j^* : j 次の有効質量、 S_{A_j} : j 次の加速度応答スペクトル、である。ランダム荷重モデルの標準偏差に関わる係数 c_j は、厳密には地震動の継続時間と固有周期などに依存するが[5-8][5-9]、一般的な中高層建物などの卓越固有周期の範囲を考慮すると変動の幅が非常に小さくなるため、ここでは各次で共通の定数 ($c_j = 1/3$) とする。

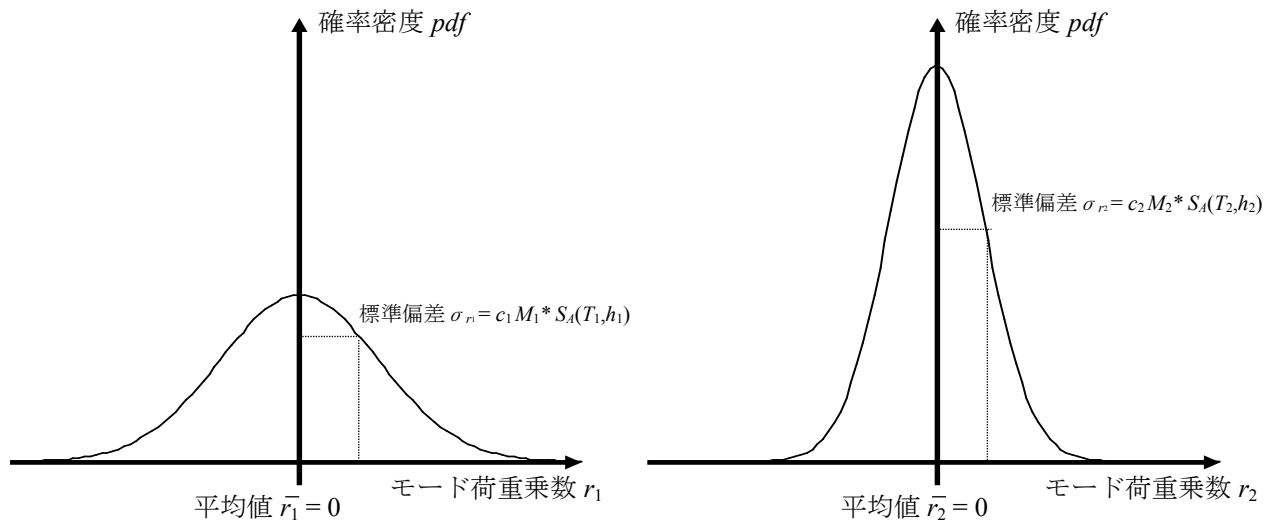


図 5-2 地震動に対するランダム荷重のモデル [5-3]

5.2.4 近似信頼性解析 (FOSM)

以上より、骨組の崩壊機構形成に関わる性能関数 G の平均値と標準偏差は次式で与えられる。

$$G \text{ の平均値} : \mu_G = \sum_{i=1}^m \bar{M}_{pi} \cdot |\theta_{pi}| - \sum_{j=1}^n q_{pj} \cdot \bar{r}_j \quad (5-8)$$

$$G \text{ の標準偏差} : \sigma_G = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_{mpi}^2 \cdot \theta_{pi}^2 + \sum_{j=1}^n (\sigma_{rj})^2 \cdot (q_{pj})^2} \quad (5-9)$$

ここで、 \bar{M}_{pi} : 全塑性モーメントの平均値、 \bar{r}_j : モード荷重乗数の平均値、 σ_{Mpi} : 全塑性モーメントの標準差、 σ_{rj} : モード荷重乗数の標準偏差、である。

前項 5.2.3 の仮定より、各次振動モードのモード荷重乗数の平均値 $\bar{r}_j = 0$ となるため、崩壊モードごとに信頼性指標が次式で与えられる。

$$\text{信頼性指標} : \beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{M}_{pi} \cdot |\theta_{pi}|}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_{mpi}^2 \cdot \theta_{pi}^2 + \sum_{j=1}^n (\sigma_{rj})^2 \cdot (q_{pj})^2}} \quad (5-10)$$

信頼性指標値 β が小さいほど、その崩壊モードが生起しやすいことになる。

5.3 補修した骨組の解析モデルと終局耐震限界状態関数

5.3.1 補修した骨組の終局耐震限界状態

損傷した骨組の修復性や、補修後の終局耐震性能を検証する場合、崩壊モードや耐力・剛性・変形能力が重要となる[5-4]。損傷した震災鉄骨骨組の補修法が提案されているが、補修部位の固定度や拘束度が過度に上昇することで、例えば梁崩壊型の崩壊モードが生起しにくくなり、柱崩壊や接合部仕口、パネルゾーンの損傷が生起しやすくなることが懸念される。そこでここでは、補修後骨組の設計点を近似信頼性解析により求め、塑性変形能力に富んだ崩壊機構形成を保証するように、補修・補強計画を検討するための解析手法を示す。前節では、骨組の終局限界状態に関する設計点について、終局限界状態関数と近似信頼性解析について示した。本節では、元の状態の骨組と、補修した骨組の設計点の評価法について、限界状態関数、荷重効果などについて整理する。

5.3.2 補修した骨組の終局耐震限界状態関数

震災建築物の補修法について、例えば復旧技術指針には構造種別や崩壊モードごとの具体的な補修工法が示されている。また、3章では、損傷した鉄骨ラーメン骨組の柱や梁の補修法と、補修後性能ならびに補修後骨組の解析手法について検討している。

復旧指針等の方法で補修した骨組に関して、その限界状態関数 $G'(r')$ は次式で与えられる。

補修後骨組の限界状態関数：

$$G'(r') = \sum_{i=1}^m M'_{pi} \cdot |\theta'_{pi}| - \sum_{j=1}^n q'_{pj} \cdot r'_j \quad (5-11)$$

ただし、各変数のカンマは、補修後の骨組と荷重効果を表す。

補修後骨組では、損傷部材の補修により耐力や剛性が回復または上昇し、各変数が変化する。したがって、補修による部材の耐力や剛性の上昇率が、骨組の限界状態関数に影響を与えると考えられる。また、補修後骨組の塑性崩壊機構は、これらの影響に加えて、補修する部材と周辺部材の耐力比などの影響も考えられる。よって、補修後骨組の終局耐震限界状態を検証するためには、これらの影響を考慮し、関連する変数・指標 (M' , θ' , q'_{pj} , r'_j) を反映することが必要になる。

5.3.3 補修した骨組の荷重効果と確率過程

補修した骨組の振動特性や、複数回の地震動入力（本震や余震、将来発生する地震など）を考慮すると、

元の状態の骨組に対して地震動の特性や荷重効果が異なることが考えられる。このとき、補修した骨組に関わる確率変数として、質量、骨組の剛性や耐力などのばらつき、地震動に関わる確率変数として、地盤（震源特性、伝播経路特性、地点特性、深層地盤による増幅と浅層地盤の応答）、位相・振幅等のスペクトル、卓越周波数、などが考えられる。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震など、近傍で複数回の地震動を経験した地震記録に関して、フーリエ振幅スペクトルの比較を図5-2に示す。

2011年3月11日、および4月7日に東北地方太平洋沖で発生した地震によるK-NET 築館における観測波（図5-2(a)）では、卓越周期は0.11sec程度で概ね同じであるが、2016年4月14日、および4月16日に熊本で発生した地震によるK-NET 熊本における観測波（図5-2(b)）では、卓越周期は0.32sec, 0.44secと約0.1秒の差異が生じている。これらより、発生時期が近く、同一地域の地震波であっても、入力地震動の特性が異なり、前震・本震・余震などの一連の地震動下で、荷重モデルや荷重効果に関わる確率変数に影響を与えることが考えられる。

そこで、補修した骨組の荷重効果に関わる確率過程の等価水平力モデルは、以下のように表される。

$$\text{ランダム水平力} : \{r^i\} = \sum_{j=1}^n r'_j \{\phi'_j\} \quad (5-12)$$

$$\text{確率過程} : \text{平均値 } E(r'_j) = \bar{r}'_j = 0 \quad (5-13)$$

$$\text{相関係数 } E(r'_j \cdot r'_i) = 0 \quad (i \neq j) \quad (5-14)$$

$$\text{標準偏差 } \sigma'_{ij} = c_i m_j^* S'_{A_j} \quad (5-15)$$

ただし、各変数のカンマは、補修後骨組の荷重効果や有効質量、加速度応答スペクトルなどを表す。

ここで、元の状態の骨組と補修後骨組の、モード復元力空間における塑性崩壊面と荷重効果の等確率密度面を図5-3に示す。補修後骨組では、補修部位の耐力上昇によって塑性崩壊面が移動する。これに伴い、荷重効果の分布に関わらず設計点が変わることが考えられ、修復計画によっては、図5-3のように卓越崩壊モードが変化することが考えられる。補修後骨組に高い塑性変形能力を期待する場合、卓越崩壊モードの変化を考慮した修復計画を立案することが望ましい。

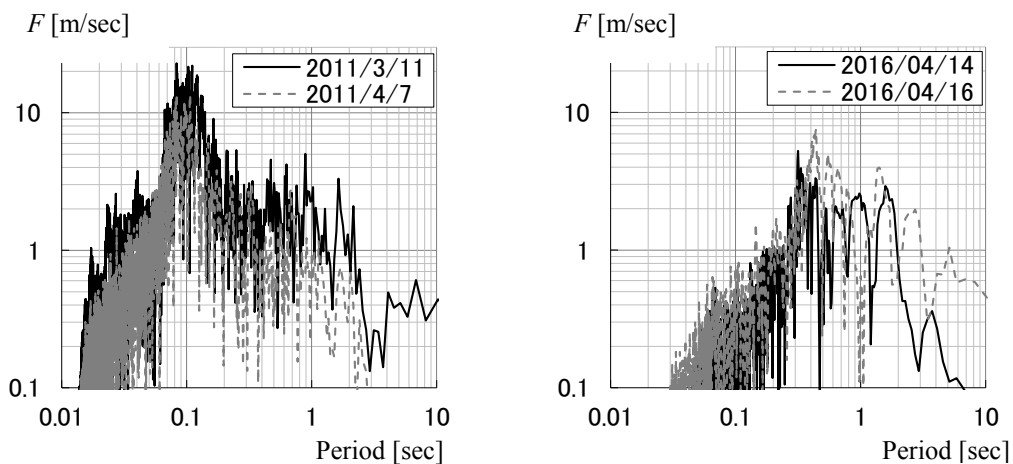


図5-3 既往観測波のフーリエ振幅スペクトル

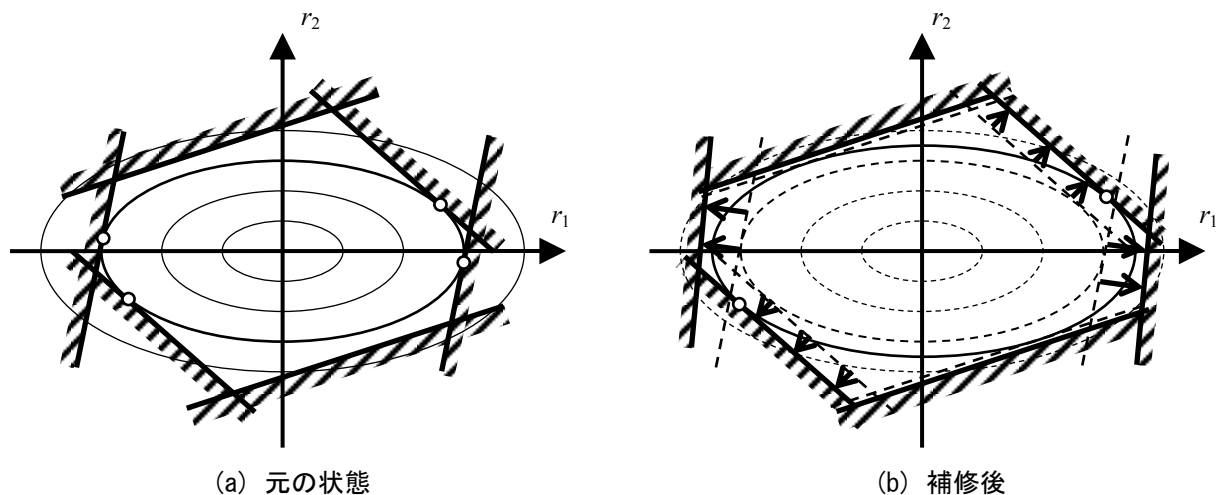


図 5-4 塑性崩壊面と荷重効果

5.3.4 補修した骨組の近似信頼性解析

以上より、補修した骨組の崩壊機構形成に関わる性能関数 G' の平均値 μ_G' と標準偏差 σ_G' 、また信頼性指標 β' は、前節同様に以下の式により求めることができる。

$$G' \text{ の平均値 : } \mu'_G = \sum_{i=1}^m \bar{M}'_{pi} \cdot |\theta'_{pi}| - \sum_{j=1}^n q'_{pj} \cdot \bar{r}'_j \quad (5-16)$$

$$G' \text{ の標準偏差 : } \sigma'_G = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_{mpi}^2 \cdot \theta_{pi}^2 + \sum_{j=1}^n (\sigma'_{rj})^2 \cdot (q'_{pj})^2} \quad (5-17)$$

$$\text{信頼性指標 : } \beta' = \frac{\mu'_G}{\sigma'_G} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{M}'_{pi} \cdot |\theta'_{pi}|}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_{mpi}^2 \cdot \theta_{pi}^2 + \sum_{j=1}^n (\sigma'_{rj})^2 \cdot (q'_{pj})^2}} \quad (5-18)$$

ただし、各変数のカンマは、補修後の骨組と荷重効果を表す。

補修後骨組の耐力や剛性の分布については、元の状態の骨組の損傷状況（損傷箇所、損傷度）、および損傷した骨組をどのように補修・補強するかによって決定されると考えられる。従って、損傷した骨組や補修した骨組の信頼性解析では、元の状態で考慮した条件に加え、損傷した骨組の各部材の耐力・剛性の低下や、損傷部の補修による耐力や剛性の変化が、信頼性指標にどのような影響を与えるかを考慮する必要がある。

5.4 結び

本章では、4 章までの検討で明らかにした補修した鉄骨骨組の力学的な評価から骨組の限界状態関数を定義した。また、近似信頼性解析により補修した骨組の卓越崩壊モードを確率論的に評価する方法を提示した。

また、4 章で示した、補修により部材の剛性や耐力が変化することで補修した骨組全体の終局限界状態に与える影響を検討し、補修後の終局挙動を検討するための近似信頼性解析による耐震安全性の照査点（設計点）の評価法を提示し、補修後の卓越崩壊モードについて定量的に評価すること手法を提示した。

参考文献

- [5-1] 財団法人日本建築防災協会：震災建物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2016.3
- [5-2] 伊藤拓海，大井謙一，森洋一，方沛宇：骨組構造物の崩壊機構形成に関するハイブリッド設計点探索，日本建築学会構造系論文集，Vol.567，pp.125-132，2003.5
- [5-3] 伊藤拓海，大井謙一：鋼構造多層ラーメン骨組の簡略化塑性崩壊面モデルによる非線形動的応答解析，日本建築学会構造系論文集，Vol.561，pp.219-226，2002.11
- [5-4] 財団法人日本建築防災協会：震災建物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2016.3
- [5-5] 松本健，森健士郎，伊藤拓海，崔彰訓：局部座屈と亀裂が生じた H 形鋼部材の補修方法と補修後の構造性能に関する実験的研究，日本建築学会技術報告集，第 20 巻，第 44 号，pp.139-142，2014.2
- [5-6] Kenjiro Mori, [5-6] Takumi Ito, Hanako Sato, Hiroka Munemura, Takshi Matsumoto, Choi Changhoon: Repairability Performance and Restoring Force Characteristics of Damaged H-shaped Steel Members after Repair, International Journal of High-Rise Building, Vol.4, No.1, pp.57-64, 2015.3
- [5-7] 森健士郎，伊藤拓海，宗村大翔，布施拓，崔彰訓：局部座屈が生じた角形鋼管部材の補修方法と補修後性能に関する実験的研究，日本建築学会技術報告集，第 22 巻，第 52 号，pp.971-976，2016.10
- [5-8] Davenport, A. G.: Note on the Distribution of the Largest Value of a Random Function with Application on Gust Loading, Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Vol.28, pp.187-196, 1964
- [5-9] 柴田明德：最新耐震構造解析 第 2 版，森北出版，2003

第6章 近似信頼性解析による被災した鉄骨骨組の修復計画法

6.1 はじめに

震災骨組の修復計画を検討する場合、骨組の損傷状況に基づく残存耐震性能評価により、補修後骨組の目標性能を設定し、補修・補強する部材を決定することになる。一方、震災後の実地調査による損傷箇所の特特定や残存耐震性能評価が困難な場合や、設計時に修復性（修復のしやすさ、性能回復性など）を考慮する場合、元の状態の骨組の崩壊モードや損傷レベルを推定した上で、修復計画を立案・評価する必要があると考えられる。

本章では、5章で提案した近似信頼性解析を用いた補修後の卓越崩壊モードの推定法を用いて被災した骨組の修復計画を検証し、適切な修復計画を立案するための手法について検討を行う。

6.2 修復計画の立案手順の概要

図 6-1 は、近似信頼性解析により補修後骨組の修復計画を検討するためのフローを示している。なお、震災骨組の損傷状況・残存耐震性能が実地調査によって明らかとなる場合、元の状態の骨組の信頼性指標 β_G による評価の項目までは省略可能となる

図 6-2 の柱や梁に塑性ヒンジを形成して塑性崩壊する柱梁ラーメン骨組の修復計画を検討する場合、梁に対する柱の部材耐力比 χ 、補修による部材の耐力上昇率 τ 、剛性の上昇率 γ を用いて、元の状態および補修した骨組の限界状態関数（式(5-1)、(5-9)）を評価できる。一方、荷重効果に関する変数は、補修による骨組の振動特性や補修後の地震動が変化する場合、ランダム水平力に関する諸項目を評価する必要がある。

復旧技術指針では、例えば鉄骨ラーメン骨組の損傷部材の補修法は、主として耐力および塑性変形能力の回復・向上を目的としているため、補修後部材・骨組の剛性についての具体的な指針はない。また、文献 8)、12)~14)のように、柱や梁の損傷部位を鋼板で補修する方法などでは、補修部位の部材断面は増加するものの、スパン全体で考えた場合、剛性は大幅に上昇しないと考えられる。そこで、本稿では、補修による部材の剛性の上昇率 γ は考慮せず、ランダム水平力による荷重効果は地震動の諸変数のみ考慮する。

6.3 柱梁ラーメン骨組の終局耐震限界状態と修復計画

ここで、図 6-2 の柱梁ラーメン骨組に対し、表 6-1 のように骨組条件および元の状態の限界状態関数に関する変数 χ 、補修後の限界状態関数に関する変数 τ 、 γ を設定する。なお、図 6-2 の骨組は、文献[6-1]の鉄骨骨組実験を参考にしている。表 1 中の M_2/M_1 は 1 層に対する 2 層の質量比である。

骨組に形成される崩壊メカニズムは、①全層崩壊モード、②1層局所層崩壊モード、③2層局所層崩壊モードであり、①・③については柱と梁の部材耐力比 χ によって梁先行降伏型（①_b、③_b）および柱先行降伏型（①_c、③_c）が考えられる（図 6-2 (b)）。

表 6-2 は、同じ観測点で強震が記録された過去の地震例を、図 6-3、図 6-4 はそれぞれの地震波の時刻歴波形[6-2]と加速度応答スペクトルを示す。ただし、地震波は最大加速度となる部分を含む主要な部分を取り出して採用している。地震波 i)の東北地方太平洋沖地震の本震については 81.92 秒分（地震波 i)は K-net の元デー

タにおける47秒～)を、地震動 iii), iv)は40.69秒分((地震波 i)はK-netの元データにおける15秒～), 地震動 v), vi)は新潟県中越地震および新潟県中越沖地震については、40.69秒分(K-netの元データにおける15秒～)を採用した。

骨組の1次固有周期が0.2秒前後となるように質量を設定し($M_1+M_2=100$ ton), 減衰定数 $h=0.02$ とした場合, 式(5-5)のランダム水平力の1次振動モード成分に対する2次振動モード成分の標準偏差の比は, Frame1では $|\sigma_2/\sigma_1|=0.15\sim 0.33$, Frame2では $|\sigma_2/\sigma_1|=0.33\sim 1.98$ となる。元の状態の骨組が全層崩壊モード①_bで塑性崩壊した後, 塑性ヒンジを補修した場合の補修後骨組の塑性崩壊面と, 地震荷重の等確率密度線を図6-5に示す。ただし, 骨組1, 2ともに $\chi=1.5$ の場合を代表して示しており, 等確率密度線は $|\sigma_2/\sigma_1|=0.15, 1.0, 2.0$ の場合を示している。また, 補修後骨組に対して $|\sigma_2/\sigma_1|=0\sim 2$ のランダム水平力が作用する場合の各崩壊モードの信頼性指標 β を図6-7, 6-5に, 示す。なお, 図6-7は横軸を部材の耐力上昇率 τ で $\chi=1.0, 1.3, 1.5, 1.7, 2.0$, および $|\sigma_2/\sigma_1|=0, 1.0, 2.0$ のケースを代表して示し, 図6-8は横軸をランダム水平力の標準偏差の比 $|\sigma_2/\sigma_1|$ で $\chi=1.0, 1.3, 1.5, 1.7, 2.0$, および $\tau=1.0, 1.5, 2.0$ のケースを代表して示している。また, 両図ともに全層崩壊モードの信頼性指標 $\beta=1$ となるように基準化して示しており, β が小さいほど崩壊モードが生じやすいことを示す。また, 図6-6に図6-7, 6-5の解説図を示す。図6-6のように, 横軸 $\tau, |\sigma_2/\sigma_1|$ の値によって各崩壊モードの信頼性指標の評価値 β が変化し, その相対関係により最も生じやすい崩壊モード(卓越崩壊モード)が判断できる。また, 図6-7, 6-5の縦軸は全層崩壊モードの $\beta=1$ となるように基準化しているため, 全層崩壊モードと比較して生じやすいかどうかを $\beta=1$ を境界として示している。

図6-7では, 横軸が補修による部材の耐力上昇率 τ を表すため, 値が大きいほど補修によって耐力が大きくなり上昇し, 図6-5(c), (f)のように全層崩壊面が外側に移動して補修後に全層崩壊モードが他の崩壊モードと比較して相対的に生じづらくなる。なお, 同図は右に行くほどランダム水平力の標準偏差の比 $|\sigma_2/\sigma_1|$ が大きいケースを示し, 下に行くほど梁に対する柱の部材耐力比 χ が大きい(柱の耐力が梁に対し大きい)ケースを示す。図6-8では, 横軸がモデル化したランダム水平力(モード復元力)の標準偏差の比 $|\sigma_2/\sigma_1|$ を表すため, 値が大きいほど1次振動モードに対して2次振動モード成分の水平力が大きく作用し, 同じ補修を施した骨組に対して作用する水平力の特性により生じやすい崩壊モードが変化することをしめしている。

図6-7より, 部材耐力比 χ が大きい骨組では, 梁先行降伏型の崩壊モードが生じやすくなるが, 補修により部材の耐力が上昇し, τ が χ を上回ると梁先行降伏型の全層崩壊機構の形成を保証しにくくなり, さらに τ が大きくなると柱が元の状態の骨組とは大きく異なる耐力分布となって柱が塑性化し, 局所層崩壊モードが卓越しやすくなることが確認できる。

図6-8より, ランダム水平力の標準偏差 $|\sigma_2/\sigma_1|$ が小さい場合($|\sigma_2/\sigma_1|=0$)と比較し, $|\sigma_2/\sigma_1|$ が大きい場合($|\sigma_2/\sigma_1|=2.0$)には2次振動モード成分の塑性変位が大きくなることで, 柱先行降伏型の崩壊モードが生じやすくなる。図6-8では, $|\sigma_2/\sigma_1|$ が大きくなると1層崩壊モードの信頼性指標 β が急激に小さくなり, $|\sigma_2/\sigma_1|=2$ 付近では最も信頼性指標が小さくなっていることから, 骨組に作用する荷重分布が卓越崩壊モードに大きな影響を与えることが確認できる。そのため, 補修を施す際にはどのような荷重が作用するかを適切に設定することが重要になる。

以上のように, 補修による部材耐力の上昇や骨組に作用する荷重分布形により, 補修後骨組の卓越崩壊モードが変化し, 目標崩壊機構の形成を保証できなくなることが考えられる。これは, 図6-5に示すように, 補修によって骨組の耐力が上昇して限界状態関数で表される塑性崩壊に対する安全領域が広がるものの, 元の骨組の安全領域と異なる形状となり, 荷重効果の等確率密度線との関係から, 異なる崩壊モードが生起する可能性を示している。

そこで、補修により耐力が上昇した骨組に対して、目標崩壊機構の形成を保証するためには、補修後骨組の限界状態関数と荷重効果を適切に考慮して補修方法を選択するとともに、塑性ヒンジを形成していない部位も補強することで、骨組の耐力分布、すなわち限界状態関数を調整することも必要になる。

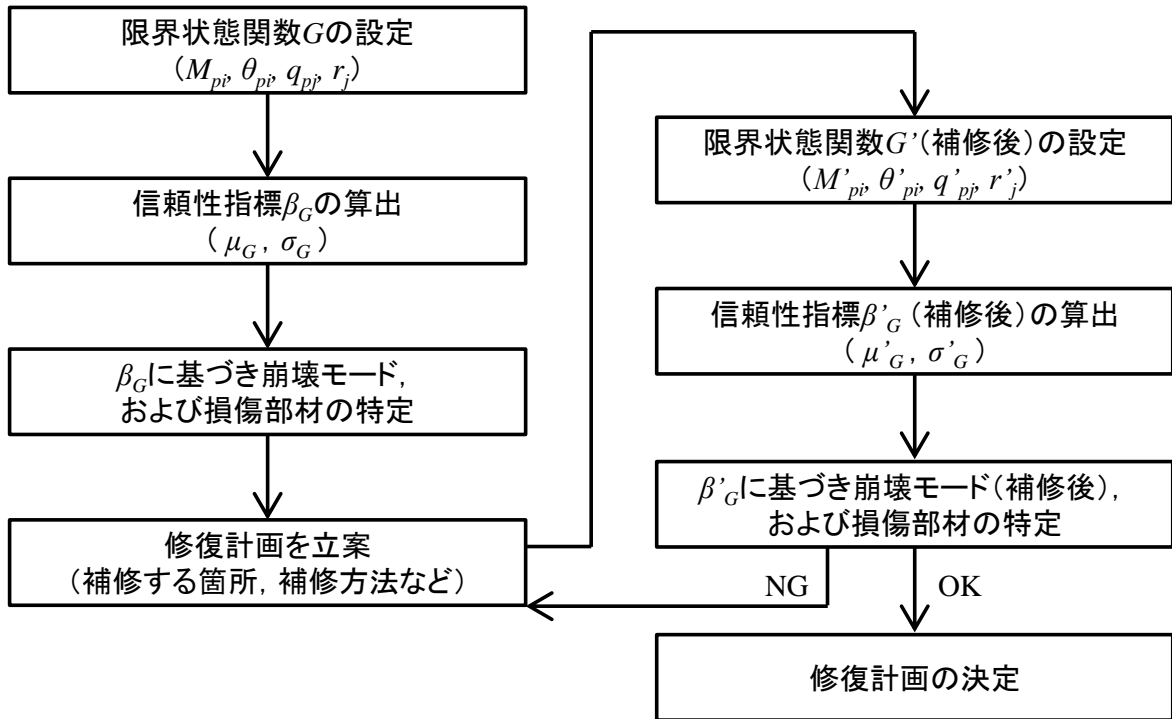
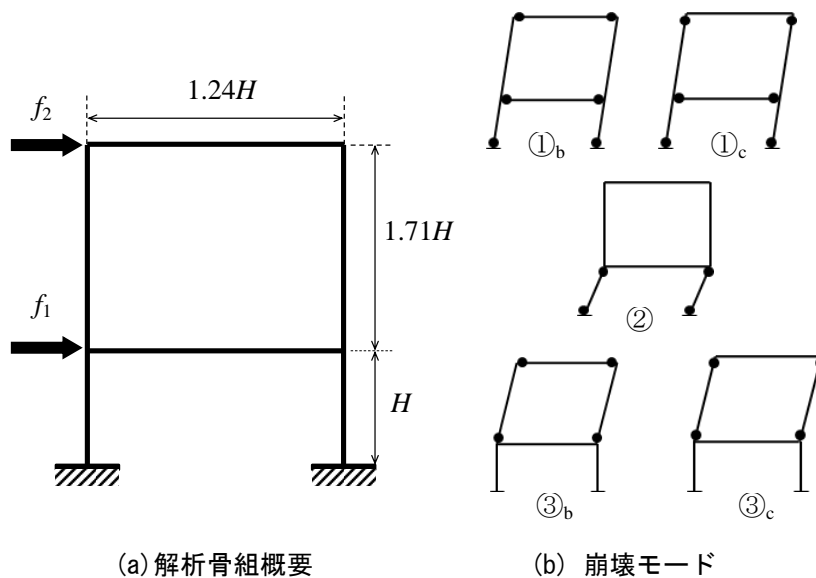


図 6-1 近似信頼性解析を利用した修復計画の検討フロー



(a) 解析骨組概要

(b) 崩壊モード

図 6-2 2層1スパン解析骨組と崩壊モード

表 6-1 解析変数

Frame ID	層質量比 M_2/M_1	柱・梁の部材耐力比 X	部材の耐力上昇率 τ	剛性の上昇率 γ
1	1	1.0 ~ 2.0 (0.1 刻み)	1.0 ~ 2.0 (0.1 刻み)	1.0
2	1/3			

表 6-2 観測地震波とランダム水平力の標準偏差

Earthquake	観測日	$ \sigma_{r2}/\sigma_{r1} $		ID
		Frame 1	Frame 2	
The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (MYG004 NS)	2011 年 3 月 11 日 (本震)	0.15	1.98	(i)
	2011 年 4 月 7 日 (余震)	0.17	0.54	(ii)
The 2016 Kumamoto Earthquake (KMM006 NS)	2016 年 4 月 14 日 (本震)	0.24	1.06	(iii)
	2016 年 4 月 16 日 (余震)	0.33	0.99	(iv)
The Mid Niigata prefecture Earthquake in 2004 (NIG019 EW)	2004 年 10 月 23 日	0.25	0.50	(v)
The Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007 (NIG019 EW)	2007 年 7 月 16 日	0.16	0.33	(vi)

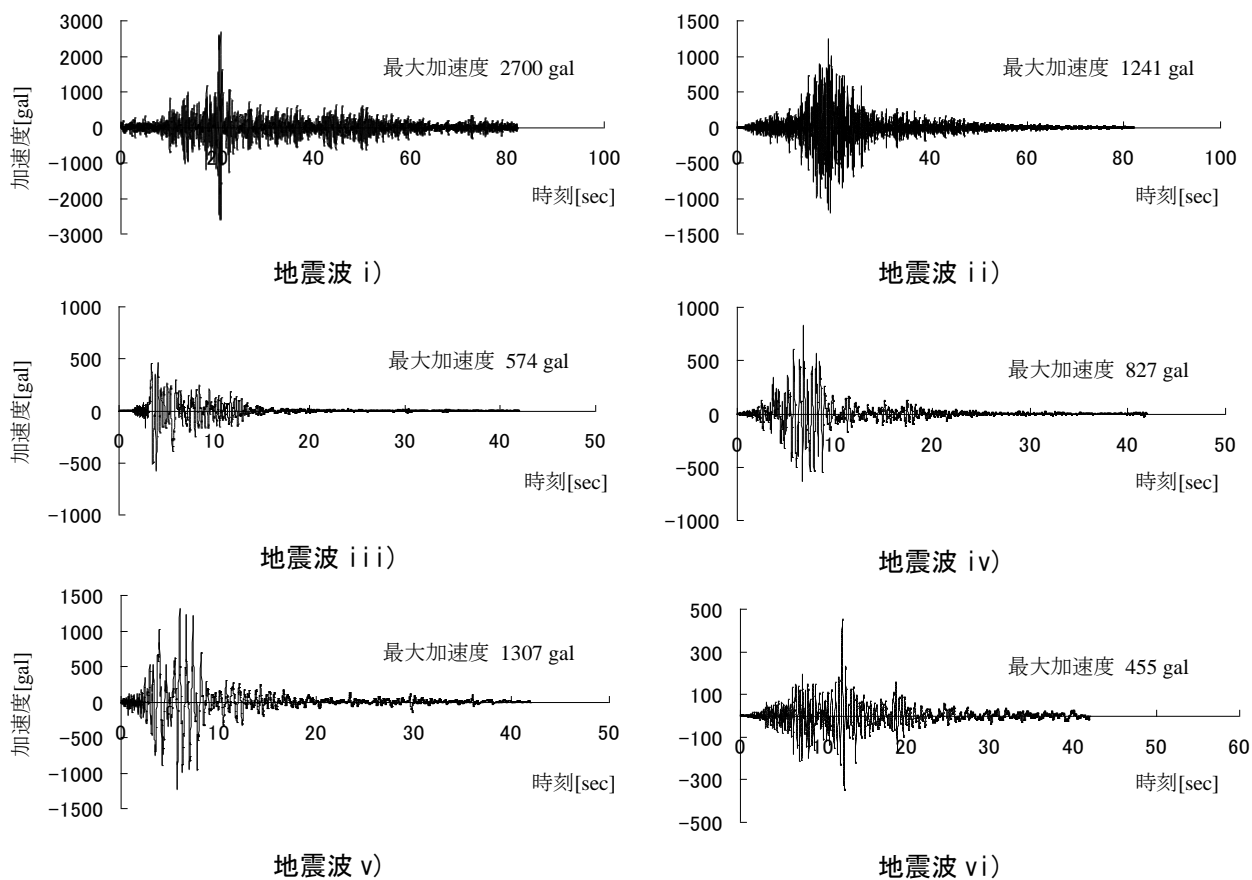


図 6-3 地震波の時刻歴波形

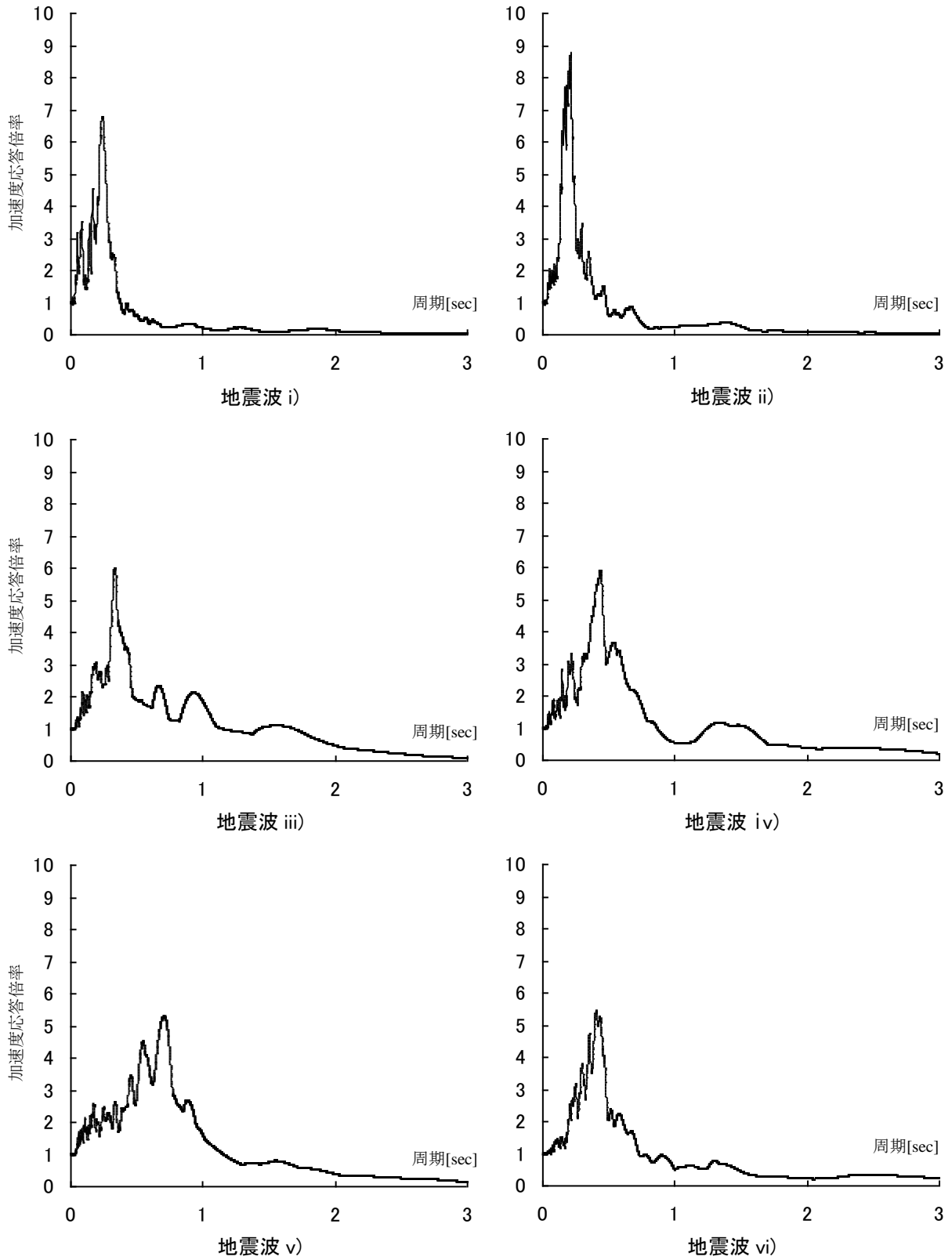


図 6-4 加速度応答倍率 ($h=0.02$)

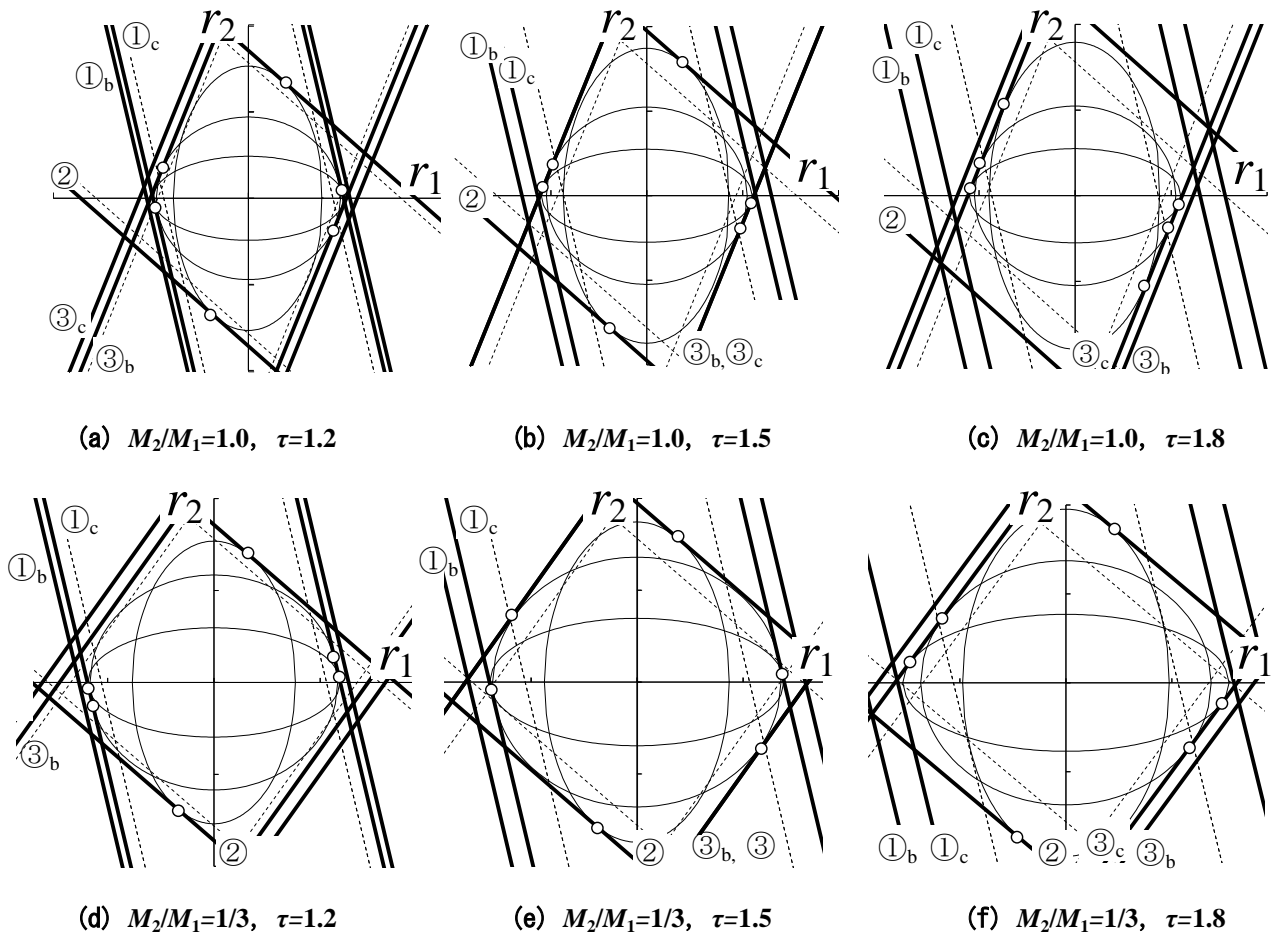


図 6-5 補修後の2層1スパン骨組の塑性崩壊面と崩壊モード ($\chi=1.5$ のケース)

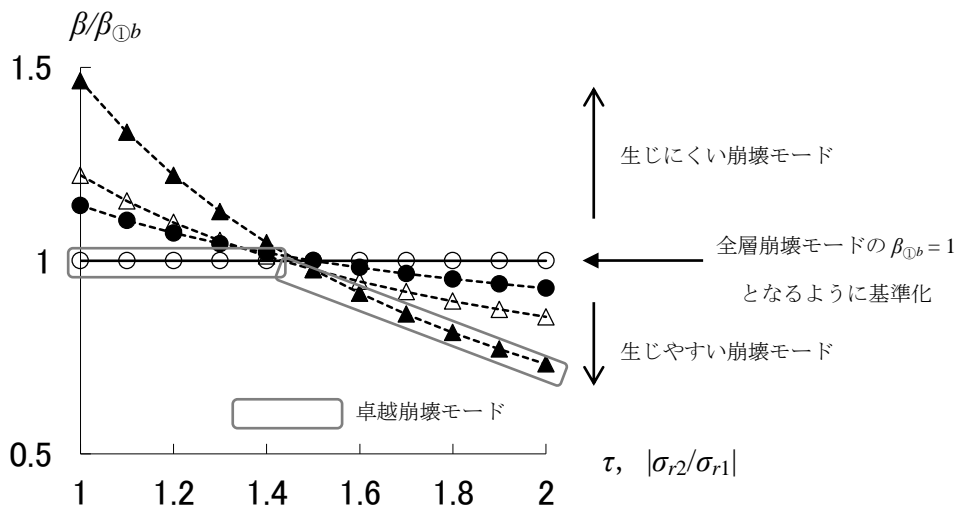


図 6-6 各崩壊モードの信頼性指標の評価値の相対関係と卓越崩壊モードの対応

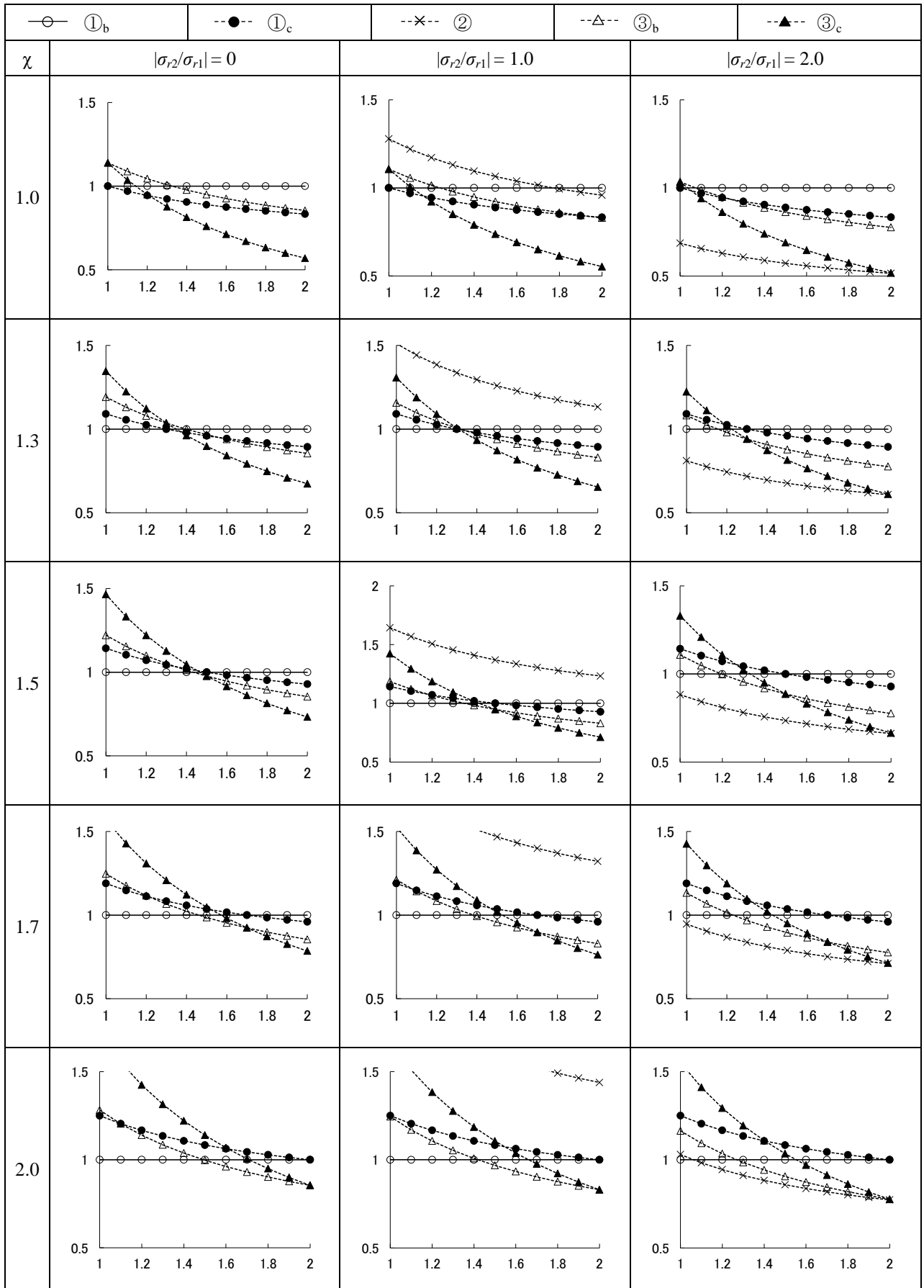


図 6-7 補修による耐力上昇率 τ と信頼性指標 β

(横軸：耐力上昇率 τ , 縦軸：信頼性指標 β/β_{D_b} , 全層崩壊モードの β_{D_b} で基準化)

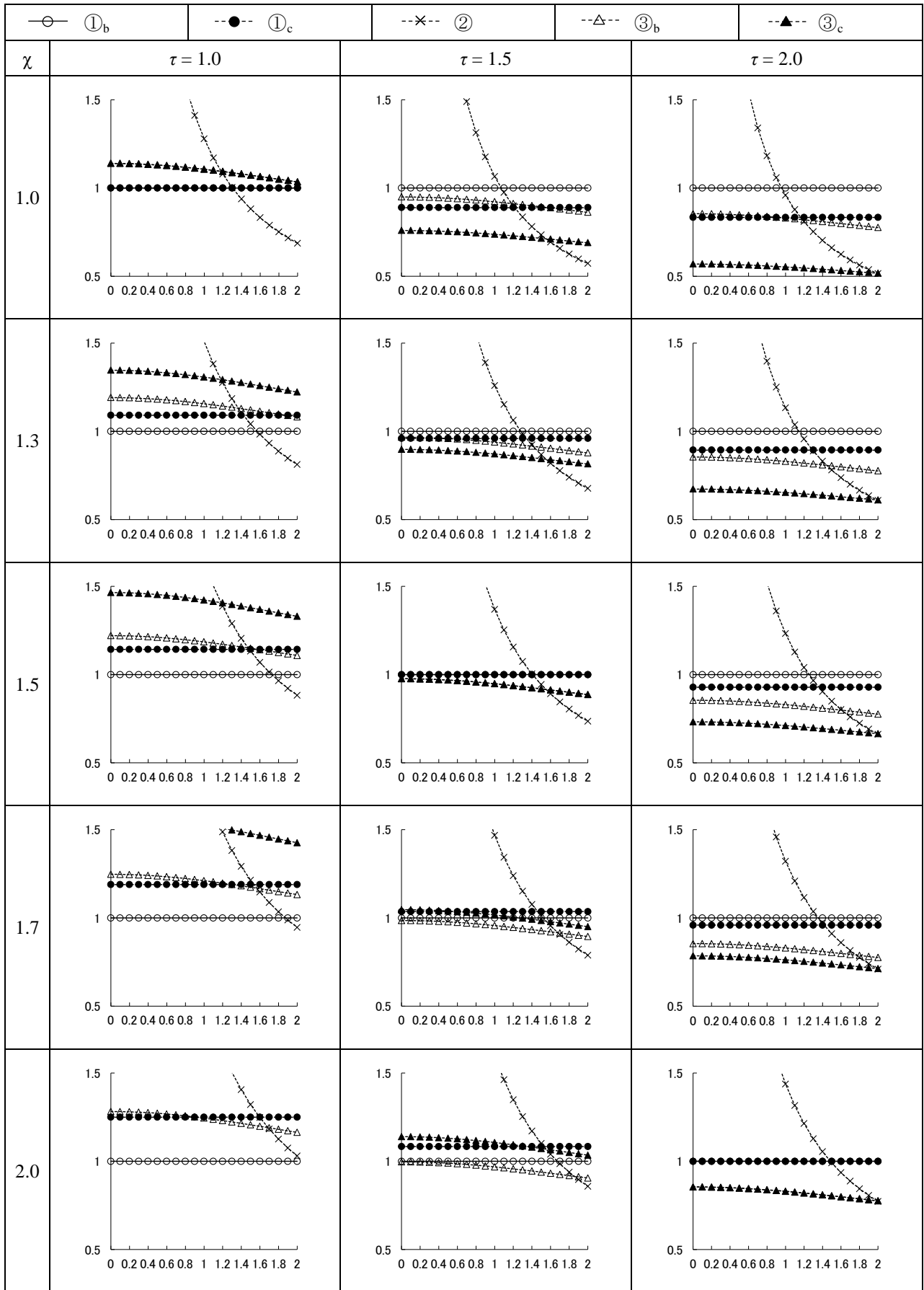


図 6-8 ランダム水平力の標準偏差 $|\sigma_{r2}/\sigma_{r1}|$ と信頼性指標

(横軸：ランダム水平力の標準偏差 $|\sigma_{r2}/\sigma_{r1}|$ ，縦軸：信頼性指標 β/β_{0b} ，全層崩壊モードの β_{0b} で基準化)

6.4 解析例

ここでは、低層・中層鉄骨骨組の例題を通して、修復後骨組の終局耐震挙動と卓越崩壊モードに関する検討を行う。

■解析骨組の概要

低層鉄骨骨組の例題として、図 6-9 の 3 層 2 スパン鉄骨ラーメン骨組、および中層鉄骨骨組の例題として図 6-10 の 9 層 3 スパン鉄骨ラーメン骨組の平面骨組解析モデルを対象とし、元の状態と補修した骨組の終局限界状態に関する検討を行う。両骨組は「鋼構造限界状態設計 設計例」[6-3]の例題骨組を参考に設定している。

図 6-9 の 3 層 2 スパン鉄骨骨組について、柱および梁は H 形断面とし、柱は H-414×405×18×28、梁は H-600×200×11×17 としている。

図 6-10 の 9 層 3 スパン鉄骨骨組について、柱は角形断面□-400×400× t_c 、梁は H 形断面 H-500×200×12× t_{fb} とし、1 層柱は $t_c=28$ mm、2～3 層柱は $t_c=25$ mm、4～6 層柱は $t_c=22$ mm、7～9 層柱は $t_c=19$ mm、2～4 層床梁は $t_{fb}=22$ mm、5～7 層床梁は $t_{fb}=19$ mm、8～9 層床梁および屋根梁は $t_{fb}=16$ mm としている。

すべての部材はヤング係数 $E=205,000$ N/mm²、降伏応力度 $\sigma_y=235$ N/mm²、引張強さ $\sigma_u=400$ N/mm² とする。骨組の耐力は各部材の全塑性モーメントを用いて算出した。両骨組は減衰定数 $h=0.02$ として検討を行っている。

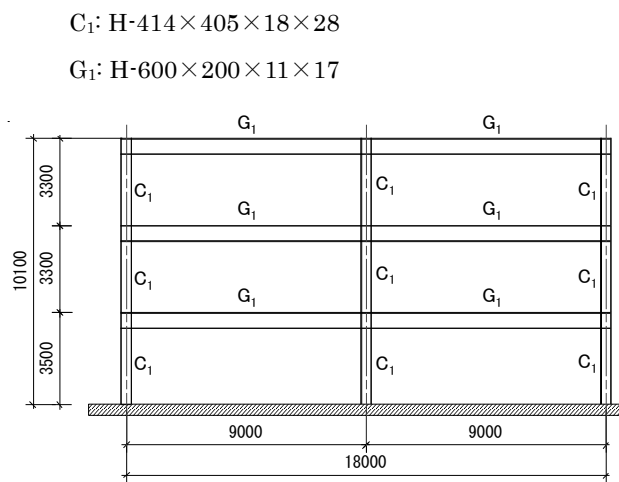


図 6-9 3 層 2 スパン鉄骨骨組

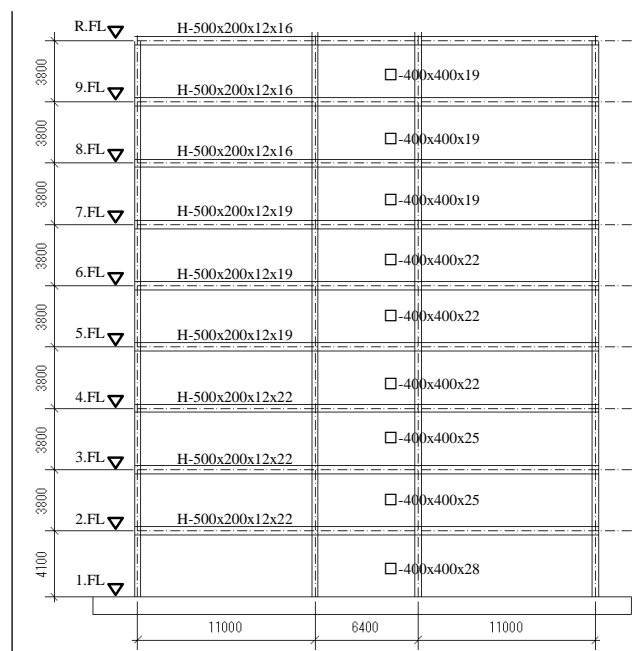


図 6-10 9 層 3 スパン鉄骨骨組

■ランダム水平力

ここでは、Table.2 に示す地震波の中で、2011 年東北地方太平洋沖地震の i) 本震および ii) 余震、2016 年熊本地震の iii) 本震および iv) 余震、v) 2004 年新潟県中越地震および vi) 2007 年新潟県中越沖地震を、式(5-5)、(5-13)によりモデル化して検討を行う。

■ 近似信頼性解析

3 層 2 スパン鉄骨ラーメン骨組

表 6-3 に解析骨組の層質量, 表 6-4 に骨組の振動特性を示す。なお, 3 層解析骨組の略算による設計用 1 次固有周期 T_1 は $T_1=0.03 \times 10.1=0.303 \text{ sec}$ (骨組の高さ $H=10.1 \text{ m}$) であるが, 表 6-4 は固有値解析による各次振動モードの固有周期を示している。表 6-4 の 1 次固有周期は 0.4 sec 程度と略算による T_1 より大きくなっている。固有値解析に用いた骨組モデルは柱梁ラーメン骨組を線材でモデル化し, 柱梁仕口部の接合部パネルの大きさは考慮しているものの, 床スラブなど影響については考慮していない。そのため, 1 次固有周期が略算によるものよりも大きくなっているものと考えられる (参考までに, 床スラブにより梁の曲げ剛性が 1.4 倍となると仮定した場合は $T_1=0.364 \text{ sec}$ となる)。上記のように略算と固有解析による固有周期に違いがあるが, 解析用のモデルとして表 6-4 の振動特性を用いて検討を行う。

表 6-5 に等価水平力モデルごとの σ_H の一覧を, 図 6-11 に生起しうる崩壊モードの概要を, 表 6-6 に信頼性指標の計算値の一覧を, 図 6-12 に各崩壊モードと信頼性指標の対応を示す。なお, 表 6-6 (a)の結果より元の状態の骨組では全層崩壊モードが卓越することから, 表 6-6 (b)および図 6-12 の補修後骨組の結果は全層崩壊した解析骨組の塑性ヒンジを補修した場合の信頼性指標を示している。なお, 補修後の部材の耐力は図 3-64 で提案した力学モデルに従い変化するものとする。本骨組の場合, L/L' は梁で 1.2, 柱で 1.5 となる。また, 表 6-6 および図 6-12 中の i) ~ vi) はそれぞれ表 6-2 の地震動を示している。

表 6-6 より, 3 層解析骨組の場合, 補修後の骨組の振動特性が変化することで等価水平力の大きさが変化する可能性があるが, 各次振動モード成分の比率の変化は小さく, 各崩壊モードの信頼性指標の相対的な関係は大きく変化していないことが確認できる (表 6-6, ()内の数値)。これは, 実際の骨組では梁スパンの長さに対して損傷・補修する領域が短く, L/L' が比較的小さい値となることが影響しているものと考えられる。

また, 骨組を確定とし, 加速度応答スペクトルの形状が同一の条件下では, 任意の崩壊モード i の信頼性指標 β_i の値は地震入力大きさなどにより変化するものの, 崩壊モード j の信頼性指標 β_j との比率 $\beta_j : \beta_i$ は地震入力大きさに依存せず, 一定の値となる。したがって, ある崩壊モード (例えば全層崩壊モードなど) を設計目標とする場合, 目標崩壊モードとその他の崩壊モードの信頼性指標の相対関係が重要となる。つまり, 同一の荷重分布形の下で, 元の状態の骨組と補修後骨組で各崩壊モードの信頼性指標 β の比率が大きく変化する場合は, 卓越する崩壊モードが変化する可能性が高くなり, 修復計画の検討に注意を要する。

図 6-12 は最も生起しやすい崩壊モード (β_{min}) に対し, $\beta = \beta_{min} + \Delta\beta$ (ここでは $\Delta\beta = 1.0$) の範囲をあわせて示している。図 6-12 (a), (b)より, 信頼性指標 β の値が変化する場合でも, $\beta_{min} + \Delta\beta$ の範囲に存在する崩壊モードは大きく変化していないことが確認できる。

表 6-3 層質量

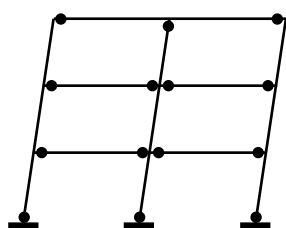
層	慣性質量 [ton]
1	43.0
2	43.0
3	55.1

表 6-4 振動特性

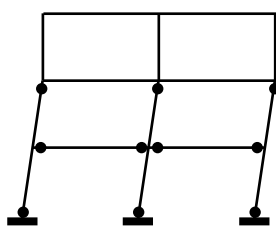
振動 モード	有効質量[ton]		固有周期[sec]	
	元の状態	補修後	元の状態	補修後
1	118	118	0.41	0.39
2	18	18	0.11	0.10
3	5	5	0.05	0.05

表 6-5 等価水平力モデルごとの σ_{ri} [kN]

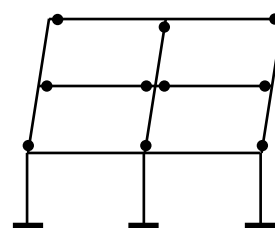
		i)	ii)	iii)	iv)	v)	vi)
元の状態 の骨組	σ_{r1}	276	564	552	1261	897	670
	σ_{r2}	135	209	44	60	120	27
	σ_{r3}	26	102	9	12	21	6
補修後 の骨組	σ_{r1}	425	816	870	1569	1273	829
	σ_{r2}	173	249	50	75	137	38
	σ_{r3}	37	144	13	17	29	8



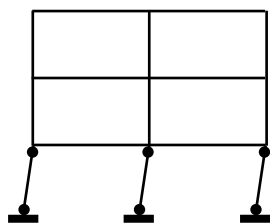
①全層崩壊



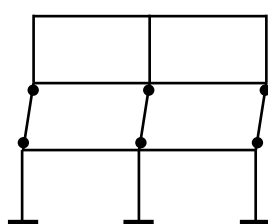
②1~2層崩壊



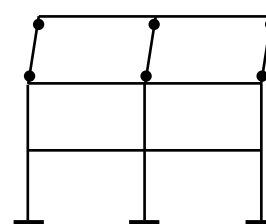
③2~3層崩壊



④1層崩壊



⑤2層崩壊



⑥3層崩壊

図 6-11 3層骨組の崩壊モード一覧

表 6-6 崩壊モードごとの信頼性指標の一覧

(a) 元の状態の骨組

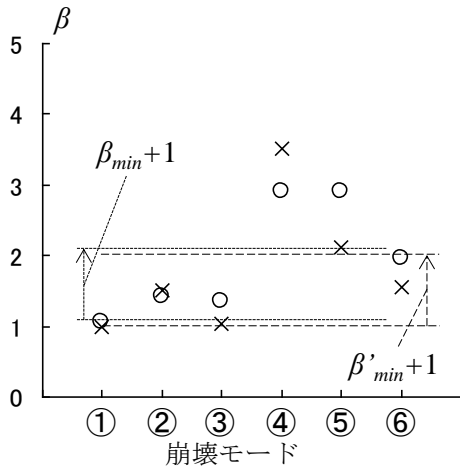
	$ \sigma_{r2}/\sigma_{r1} $	$ \sigma_{r3}/\sigma_{r1} $	崩壊モードごとの β					
			①	②	③	④	⑤	⑥
i)	0.48	0.10	5.04	6.67	6.39	13.7	13.74	9.26
			(1)	(1.3)	(1.3)	(2.7)	(2.7)	(1.8)
ii)	0.37	0.18	2.47	3.92	3.18	6.52	6.75	4.87
			(1)	(1.6)	(1.3)	(2.7)	(2.7)	(2.0)
iii)	0.08	0.02	2.52	6.79	3.33	24.5	12.35	5.79
			(1)	(2.7)	(1.3)	(9.7)	(4.9)	(2.3)
iv)	0.05	0.01	1.10	3.06	1.46	12.1	5.52	2.55
			(1)	(2.8)	(1.3)	(11.0)	(5.0)	(2.3)
v)	0.13	0.02	1.55	3.89	2.05	12.2	7.24	3.52
			(1)	(2.5)	(1.3)	(7.8)	(4.7)	(2.3)
vi)	0.04	0.09	2.08	5.79	2.75	23.30	10.43	4.80
			(1)	(2.8)	(1.3)	(11.2)	(5.0)	(2.3)

(b) 補修後の骨組

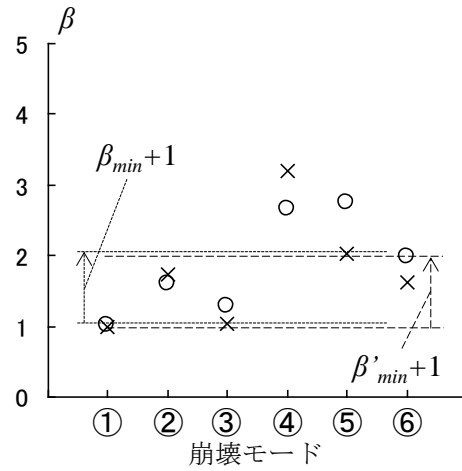
	$ \sigma_{r2}/\sigma_{r1} $	$ \sigma_{r3}/\sigma_{r1} $	崩壊モードごとの β'					
			①	②	③	④	⑤	⑥
i)	0.41	0.09	4.72	7.08	4.84	16.5	9.99	7.28
			(1)	(1.5)	(1.0)	(3.5)	(2.1)	(1.5)
ii)	0.31	0.18	2.46	4.29	2.55	7.85	5.00	4.00
			(1)	(1.8)	(1.0)	(3.2)	(2.0)	(1.6s)
iii)	0.06	0.02	2.30	6.20	2.43	26.7	7.94	4.21
			(1)	(2.7)	(1.1)	(11.6)	(3.5)	(1.8)
iv)	0.05	0.01	1.28	3.46	1.35	15.4	4.43	2.34
			(1)	(2.7)	(1.1)	(12.1)	(3.5)	(1.8)
v)	0.11	0.02	1.58	4.02	1.66	15.0	5.22	2.85
			(1)	(2.6)	(1.1)	(9.5)	(3.3)	(1.8)
vi)	0.05	0.01	2.42	6.57	2.56	29.4	8.40	4.43
			(1)	(2.7)	(1.1)	(12.2)	(3.5)	(1.8)

※()内の数値は $\beta_{\text{①}}$ (全層崩壊モード) に対する比を示す

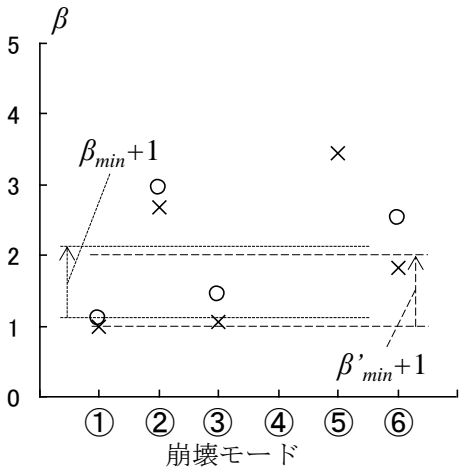
○ 元の状態 (β) × 補修後 (β')



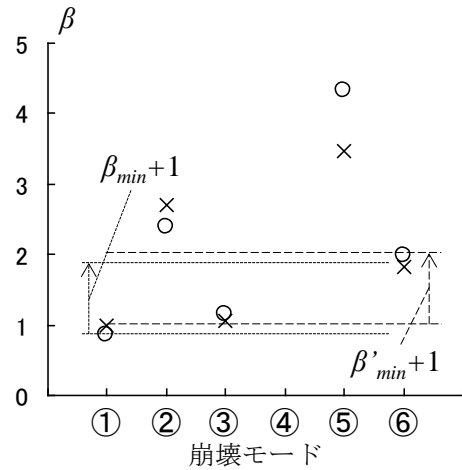
(a) 等価水平力 i)



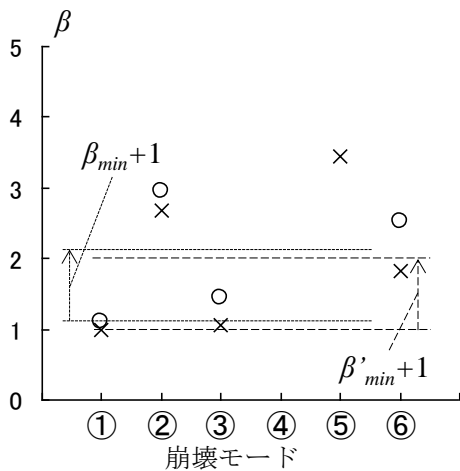
(a) 等価水平力 ii)



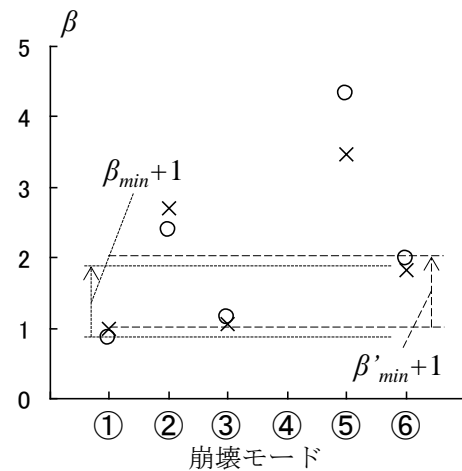
(c) 等価水平力 iii)



(d) 等価水平力 iv)



(e) 等価水平力 v)



(f) 等価水平力 vi)

図 6-12 信頼性指標と等価水平力モデル

9 層 3 スパン鉄骨ラーメン骨組

表 6-7 に 9 層 3 スパン骨組の層質量を、表 6-8 に骨組の振動特性を示す。なお、3 層骨組と同様に、表 6-4 は固有値解析による各次振動モードの固有周期を示している。略算による設計用 1 次固有周期は $T_1 = 1.0$ 秒程度となり、固有値解析による 1 次固有周期は 2 倍程度の値となっているが、参考とした骨組[6-x3]とは、固有周期は参考骨組と同程度となっている（参考骨組の固有周期 $T_1 = 1.94$ sec, $T_2 = 0.67$ sec, $T_3 = 0.41$ sec）。ここではあくまで検討用の骨組モデルとして、3 層骨組と同様に表 6-8 の振動特性を採用する。

また、表 6-9 に等価水平力モデルごとの σ_{ri} の一覧を、図 6-13 には 3 層 2 スパン骨組の場合と同様に、崩壊モードと信頼性指標の対応、および $\beta = \beta_{min} + \Delta\beta$ ($\Delta\beta = 1.0$) の範囲を示している。なお、図 6-13 の横軸は、生起しうる崩壊モードの番号を示しており、1 から順に全層崩壊、1~8 層崩壊、2~9 層崩壊、・・・、8 層局所層崩壊、9 層局所層崩壊を示している。したがって、番号が大きいほど局所的な崩壊モードを表している。また、図 6-13 (b)は全層崩壊した解析骨組の塑性ヒンジを補修した場合の信頼性指標を示している。なお、補修後の部材の耐力は図 3-64 で提案した力学モデルに従い変化するものとする。本骨組の場合、 L/L' は梁で約 1.2、柱で 2.1~2.5 となる。また、図 6-13 中の i) ~ vi)はそれぞれ表 6-2 の地震動を示している。

図 6-13 より、同じ地震動を経験する場合でも補修により骨組の限界状態関数が増加し、補修後には元の状態と異なる崩壊モードが卓越することも考えられる。特に、補修部位と塑性ヒンジ形成位置が直接関係する崩壊モードの場合、例えば今回の場合では全層崩壊モード全てのケースで補修前後の信頼性指標 β が変化している。一方で、補修部位と塑性ヒンジ形成位置が直接は関係しない崩壊モードの場合、それぞれの崩壊モードの信頼性指標の傾向は大きく変化していないと考えられる。

ただし、等価水平力 iii)下における全層崩壊モード（図 6-13 の横軸 1 番）のように、補修によって生起確率が他の崩壊モードと比べて大きく変化する場合、目標崩壊機構の形成を保証するためには、修復計画を検討し直し、補修や補強を施す部位を追加・変更する必要がある。

表 6-7 層質量

層	慣性質量 [ton]
1	87.3
2	86.1
3	86.1
4	86.1
5	86.1
6	86.1
7	86.1
8	86.1
9	121.4

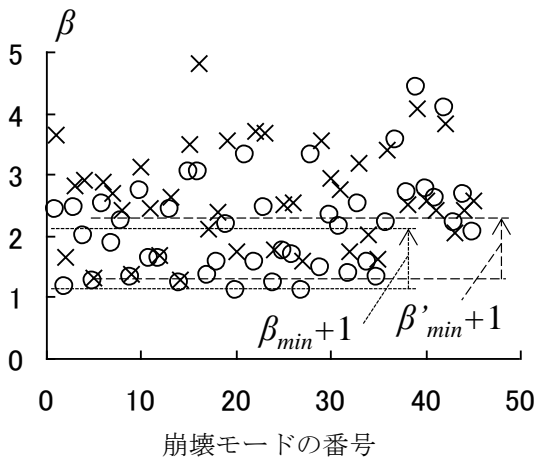
表 6-8 振動特性

振動モード	有効質量 [ton]		固有周期 [sec]	
	元の状態	補修後	元の状態	補修後
1	646	643	2.21	2.16
2	85	87	0.73	0.71
3	34	34	0.41	0.40
4	18	18	0.26	0.26
5	12	12	0.19	0.19
6	8	8	0.14	0.14
7	5	5	0.11	0.11
8	3	3	0.10	0.10
9	2	2	0.09	0.09

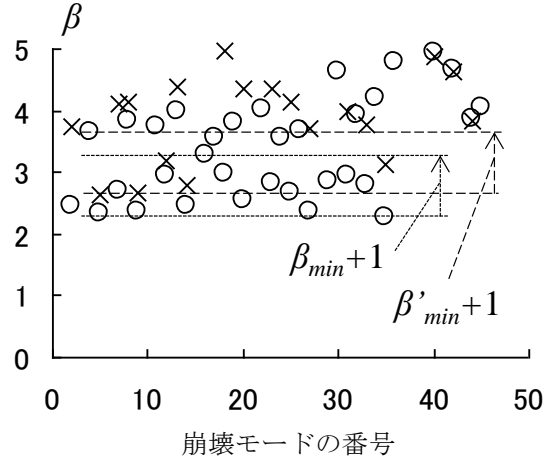
表 6-9 等価水平力モデルごとの σ_{ri} [kN]

		i)	ii)	iii)	iv)	v)	vi)
元の状態 の骨組	σ_{r1}	595	278	430	709	947	250
	σ_{r2}	176	167	249	451	1859	126
	σ_{r3}	224	169	227	514	365	276
	σ_{r4}	792	224	96	105	165	60
	σ_{r5}	316	345	67	92	97	35
	σ_{r6}	220	142	28	51	56	17
	σ_{r7}	59	43	13	24	32	9
	σ_{r8}	41	20	9	10	22	5
	σ_{r9}	45	12	6	7	11	3
補修後 の骨組	σ_{r1}	623	284	456	688	960	238
	σ_{r2}	193	199	301	486	1993	152
	σ_{r3}	209	158	241	500	358	280
	σ_{r4}	850	208	84	96	167	58
	σ_{r5}	348	351	70	86	91	32
	σ_{r6}	245	146	26	45	60	18
	σ_{r7}	63	45	14	25	34	10
	σ_{r8}	46	22	10	11	24	6
	σ_{r9}	50	13	7	8	13	3

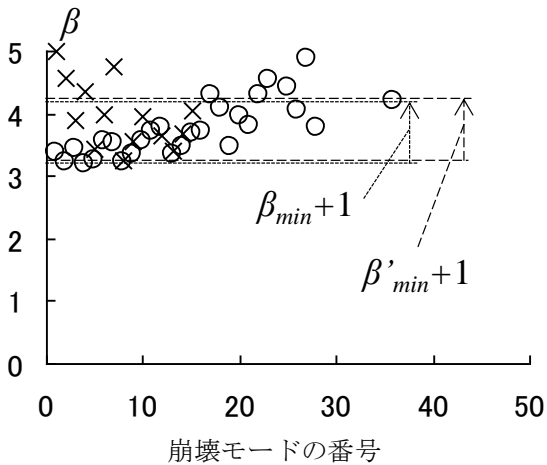
○ 元の状態 (β) × 補修後 (β')



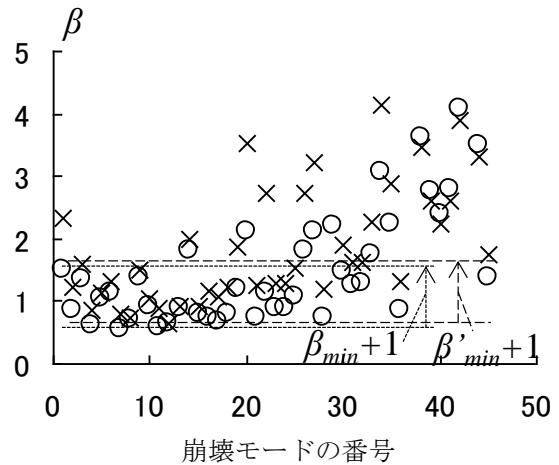
(a) 等価水平力 i)



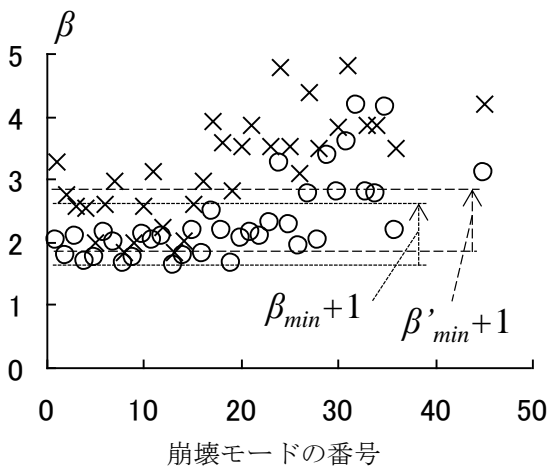
(a) 等価水平力 ii)



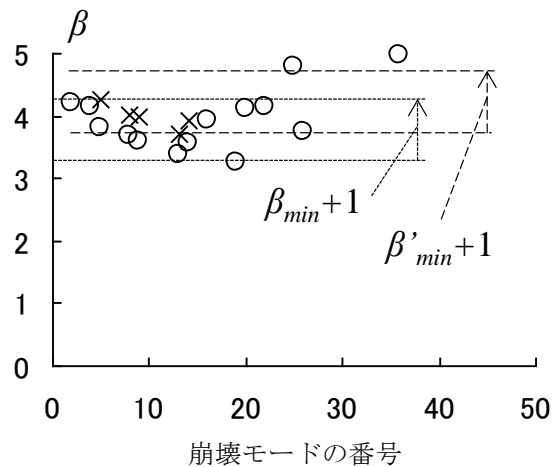
(c) 等価水平力 iii)



(d) 等価水平力 iv)



(e) 等価水平力 v)



(f) 等価水平力 vi)

図 6-13 信頼性指標と等価水平力モデル

■信頼性解析結果に基づく修復計画の検討

9層骨組について、例えば等価水平力 iii)による卓越崩壊モードは、信頼性指標 β' が小さい順に、2～7層崩壊($\beta'=3.26$)、3～7層崩壊($\beta'=3.40$)、2～8層崩壊($\beta'=3.45$)、3～8層崩壊($\beta'=3.56$)、2～6層崩壊($\beta'=3.67$)、4～8層崩壊($\beta'=3.69$)、2～9層崩壊($\beta'=3.88$)、4～9層崩壊($\beta'=3.97$)、3～9層崩壊($\beta'=3.98$)、5～9層崩壊($\beta'=4.06$)となる。

一方、全層崩壊は $\beta'=4.99$ であり、全層崩壊を目標崩壊機構として $\beta' = \beta'_{\min} + 1.0$ の範囲にするためには、上記の各崩壊モードの塑性ヒンジ部位を補強する必要がある。

そこで、2, 3, 4層の柱脚部と7, 8層の柱頭部を補強した骨組について、終局限界状態を検討する。図 6-14 は、上述の補修と補強を施した骨組の信頼性指標を示している。図 6-14 より、補修とともに補強も施した修復後骨組は、全層崩壊モードの信頼性指標 β' が $\beta' = \beta'_{\min} + 1.0$ の範囲におさまり、信頼性指標に基づいた修復計画を立案することで、目標崩壊機構の形成を保証していくことが可能になると考えられる。

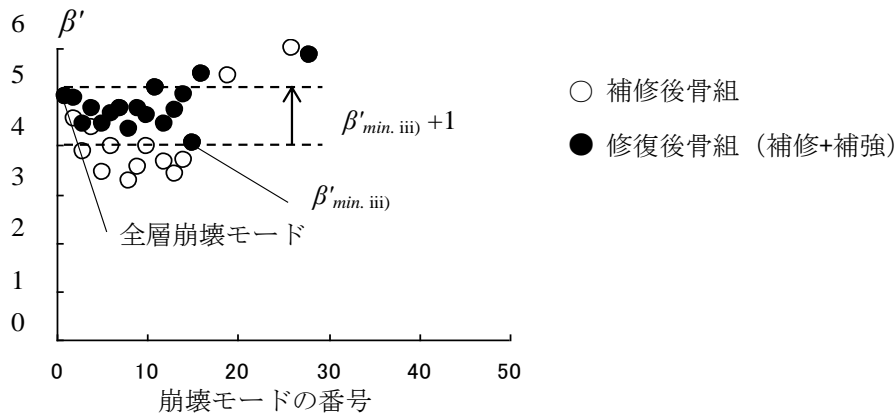


図 6-14 修復後 9 層骨組の等価水平力 iii) 下の信頼性指標

6.5 結び

本章では、5章で提案した近似信頼性解析を用いた補修後骨組の卓越崩壊モードの評価法により、補修後の終局限界状態の評価の有効性について検討を行った。また、9層鉄骨骨組について算出した信頼性指標に基づいて、修復計画を検討した。以下に結論を示す。

- 1) 補修後骨組の限界状態関数に影響を与える主たる変数を検討した。結果として、柱と梁の部材耐力比 χ や補修・補強による部材耐力上昇率 τ と卓越崩壊モードの関係を示した。
- 2) 中低層の鉄骨ラーメン骨組の終局限界状態を評価し、補修後骨組の終局限界状態と耐震挙動について検討した。その結果として、補修後骨組は、補修や補強による耐力分布や振動特性の変化により、元の状態の骨組とは卓越崩壊モードが変化する可能性があるものの、本稿の例題骨組の範囲では、各崩壊モード信頼性指標の相対関係の傾向は、大きく変化しないことを確認した。
- 3) また、全層崩壊モードなど、目標崩壊機構の形成を設計目標とする場合は、提案手法に基づいて修復計画を再考し、損傷部位の補修に加えて、その他の部位も補強することで、目標崩壊機構の形成を保証することが可能であることを確認した。

参考文献

- [6-1] 伊藤拓海，大井謙一，森洋一，方沛宇：骨組構造物の崩壊機構形成に関するハイブリッド設計点探索，日本建築学会構造系論文集，Vol.567，pp.125-132，2003.5
- [6-2] 国立研究開発法人防災科学技術研究所，強震観測網（K-net）
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- [6-3] 日本建築学会：鋼構造限界状態設計 設計例，2002

第7章 結論

7.1 本研究の結論

近年、巨大地震により損傷を生じた鉄骨造建物が数多く報告されている。鉄骨骨組に関する代表的な地震被害としては、1994年に米国ロサンゼルス近郊で発生したノースリッジ地震や1995年に発生した兵庫県南部地震で報告されている。両地震で柱梁接合部の破断により鉄骨部材の塑性変形能力が十分に発揮されず、結果として骨組の塑性変形能力に顕著な低下が生じた。その後、地震時の安全性を確保するための耐震設計では、柱梁接合部の耐力を十分に確保することで部材の塑性変形能力の発揮することが基本となっている。そのため、その後の鉄骨骨組では柱や梁の塑性化や局部座屈が代表的な損傷となり、これらによって塑性ヒンジを形成することで骨組の塑性変形能力が確保されるものと考えられる。

本論文では、巨大地震により損傷した鉄骨ラーメン骨組を対象に修復性を指向した性能設計の確立に向けて、骨組を構成する部材に生じる損傷を評価し残存性能を予測する手法、局部座屈により損傷した部材に対する補修法と構造性能や力学的特性の関係性の解明、部材の補修後性能・力学的特性に基づく骨組の構造性能の回復性の評価、補修後骨組の終局限界状態時の崩壊モードの評価に基づく修復計画の立案、について検討を行った。これらは、以下の方針を基本として検討を行っている。

- ・ランダム荷重下において鉄骨部材は主として局部座屈による損傷を生じる
- ・損傷した部材に対する既出の補修法を対象として構造性能の回復性に力学的な根拠付けを行う
- ・骨組の構造性能は部材の構造性能に依存する
- ・塑性変形能力に優れる崩壊モードの形成を保証することで骨組の安全性の確保することを目標とする

以下に、各章で得られた知見をまとめ、本論文の結論を示す。

第2章“繰返し塑性振幅を受ける鉄骨部材の累積損傷評価法”では、地震動などによるランダム応答下においては履歴変数が影響することで力学的な展開が難しいとされていた繰返し塑性振幅下における鉄骨部材（H形鋼梁・角形鋼管柱）の保有性能について、実験データベースに基づく分析を行うことで履歴変数の影響を反映したエネルギー吸収能力の回帰予測式を提案した。さらに提案した回帰予測式を変形することで、応答中の任意の時点における累積損傷を評価する指標の構築を試みた。

はじめに、繰返し塑性振幅を受ける鉄骨部材を対象に、先行研究において既往の実験結果を収集して構築したデータベースを用いて繰返し載荷下における保有性能を分析した。データベースで対象とした鉄骨部材は、繰返し曲げを受け、最大耐力が座屈で決まるH形鋼梁と角形鋼管柱であり、ここでは最大耐力、および各種変形能力（最大耐力時の骨格曲線部における塑性率、最大耐力に至るまでの累積塑性率、最大耐力時の骨格曲線部における累積塑性変形倍率、累積変形曲線部における累積塑性変形倍率）について分析を行った。最大耐力や各種変形能力について影響変数を分析し、H形鋼梁においては等価幅厚比が、角形鋼管柱においては一般化幅厚比が最も支配的な影響変数となることが確認した。これらは、データベースが対象とする実験データの最大耐力が“座屈”により決定されることによるものであり、単調載荷下においても耐力・変形能力に与える主要な影響変数となる。また、H形鋼部材は、最大耐力が横座屈により決まる試験体にお

いても横座屈細長比と保有性能の間に明確な相関は確認されず、角形鋼管柱は一般化細長比と変形能力との相関は確認されなかった。これらは、载荷条件や実験で生じた崩壊モードの影響が大きいものと考えられる。また、両部材において、それぞれの変形能力の相互関係を分析し、骨格曲線部の塑性率と累積塑性変形倍率、累積変形曲線部における累積塑性変形倍率と累積塑性率、骨格曲線部の塑性率と最大塑性振幅、累積変形曲線部における累積塑性変形倍率と骨格曲線部の塑性率・累積塑性率の積を最大塑性振幅で割った値がそれぞれ両対数軸上でほぼ直線関係となることが確認された。これらのことから、相関のある各変数を回帰曲線の形で整理し、相互関係を定式化した。

次に、単調载荷下と繰返し载荷下における最大耐力時のエネルギー吸収能力の関係を明確にするため、累積変形曲線部における累積塑性変形倍率と骨格曲線部の累積塑性変形倍率の比率について、履歴変数である変位振幅の偏りと有効半サイクル数による分析を行い、両対数軸上で相関が得られたことからこれらを定式化し回帰予測式を提案した。提案式による繰返し塑性振幅下における部材のエネルギー吸収能力の予測精度は、データベースにより検証しその有効性を示した。これにより、H形鋼梁および角形鋼管柱の繰返し载荷下における最大耐力時のエネルギー吸収能力は履歴情報が得られれば評価可能とした。

さらに、提案したエネルギー吸収能力の回帰予測式を変形し、最大耐力に至るまでの任意半サイクル時における部材の累積損傷を評価するための累積損傷評価指標を構築した。本指標により任意半サイクル時における塑性吸収エネルギー量と最大耐力時のエネルギー吸収能力の予測を比較することにより、部材の累積損傷を最大耐力時の値を1として段階的に評価することが可能となった。また、提案した累積損傷評価式は、実験における最大耐力の到達を精度良く評価可能であることを確認した。なお、提案指標は、様々な振幅履歴を受ける実験データから構築したものであるため、一般的な塑性ヒンジを形成する部材に幅広く適用可能である。したがって、パルス的な入力となる直下型の地震から多数回の繰返し塑性振幅を経験する海洋型の地震まで広く適用が可能である。

本章で提案した累積損傷評価指標により、巨大地震下における鉄骨骨組の各部材の損傷を評価可能とした。これにより、地震応答後の部材の残存性能（エネルギー吸収能力）は履歴情報が決定すれば定量的に評価することが可能となった。これにより、損傷した鉄骨骨組の修復計画を立案する際に時刻歴応答解析などと併用することで各部材の残存性能を評価し骨組が限界状態に達しているのかどうかを評価することが可能となる。また、各部材の残存性能の評価から補修を施す部位や適用する補修法を検討することができ、修復性を指向した設計フロー案（1章、図1.5）における修復の必要性の検討が可能となる。

第3章“局部座屈で耐力劣化した鉄骨骨組の補修法と補修後の力学特性と復元力特性”では、これまで研究報告が限られていた局部座屈で損傷した鉄骨骨組の補修法と補修後性能について、柱や梁部材を対象として実験的に検討することにより、暫定的に決定されていた補修後の性能回復性について力学的な根拠付けを行った。また、終局限界状態における変形状況や崩壊モードから補修により部材としての最大耐力が上昇するメカニズムを明らかにし、補修した鉄骨部材の力学モデルを提案した。提案力学モデルにより、補修後部材の耐力評価を可能とし、さらに増分解析において補修後部材の弾塑性挙動の再現を試みた。また、骨組の構造性能は骨組を構成する各部材構造性能に依存する関係性から、補修後部材の力学モデルを拡張して補修した鉄骨骨組の力学モデルを構築した。これにより、骨組の補修後の構造性能の回復性の評価や弾塑性挙動のシミュレーションを可能とした。

本章では、局部座屈により損傷した鉄骨骨組を対象とし、損傷を生じた鉄骨部材（H形鋼部材、角形鋼管部材）に対する既出の補修法と補修後性能の関係について実験的に検証した。部材に生じた損傷に対しては

復旧技術指針を参考に箱形補修（H 形鋼）およびカバープレート補強（角形鋼管）を施し、水平載荷実験により補修後性能や挙動について検証を行うことで、補修による部材の性能の回復に力学的な根拠付けを行っている。

H 形鋼部材試験体については、耐力劣化をとまなう局部座屈により損傷した部材を対象に、箱形補修による補修効果を静的載荷実験により検証した。箱形補修では部材端部に生じた局部座屈部に補強プレートを溶接することで補修後には補修した部位の局部座屈変形が拘束され、この補修部の耐力が上昇することで、部材としての最大耐力が上昇することを確認した。この最大耐力の上昇は、補修後に局部座屈を生じる部位が移動することにより生じる。つまり、水平荷重によって部材に生じる三角形応力分布であることと、局部座屈を生じる部位が補修部よりも作用応力の小さい位置に移動することで、新たに生じる局部座屈の耐力（曲げモーメント）が元の部材から変化していないものの、部材として負担できる水平荷重が上昇する、したがって部材のみかけの耐力が上昇することになる。ただし、補修部の耐力の上昇や塑性ヒンジの形成位置の移動によるみかけの耐力の上昇により、補修後には部材端のフランジが破断して終局限界状態に至るケースも確認されたため、補修を施す際には耐力を大幅に上昇させないよう検討する必要がある。

H 形鋼試験体の実験変数としては、部材の幅厚比、スカラップの有無、および補修方法の詳細について若干の変更を行った。部材の幅厚比の違いについては、補修後の部材の終局限界状態に与える影響は確認されず、幅厚比の大小に関わらず補修後は同様の終局限界状態を示した。スカラップの有無について、スカラップは兵庫県南部地震の以前に多く用いられていたスカラップ形状としたため、スカラップを有する試験体は元の状態では局部座屈の発生とともにスカラップ底を起点とする亀裂が生じた。そこでこれらの試験体については箱形補修とともに亀裂部を溶接で補修した。その結果、補修後には箱形補修による局部座屈変形を拘束する効果が確認されたものの、複数の試験体で再度スカラップ底を起点とした亀裂が生じて終局限界状態に至り、上述の損傷部位の移動による耐力上昇の効果が十分に得られなかった。

箱形補修に用いる補強プレートによる局部座屈変形の拘束度を検証するための補強プレートの溶接方法や板厚を実験変数とした検討について、これらの実験変数は補強プレートによる局部座屈変形の拘束度を低下させた場合の影響を確認するとともに、補修部位の耐力の過度な上昇を抑えることで補修後に生じる損傷制御し、部材のみかけの耐力上昇率を調節可能かどうかについて検証している。フランジと補強プレートの溶接方法を断続溶接とし溶接長さを変化させた場合、溶接長さが短い試験体では補修部の局部座屈変形が進行することで終局限界状態に至り、部材のみかけの耐力の上昇を調整できる可能性を示したものの、しかしながら、溶接部の有効長さによっては溶接部自体の耐力が低下し作用する応力に抵抗できずに溶接部の破断が生じることで十分な補修効果が得られず、溶接部の破断による不安定な挙動を示した。補強プレートの板厚を通常の箱形補修よりも小さくした場合、補修部の耐力を回復させながらも局部座屈変形を拘束しきらず、かつ補強プレート自体も塑性変形することで、補修部で再度塑性ヒンジを形成した。これにより、通常の箱形補修の局部座屈を生じる部位が移動による部材のみかけの耐力上昇とは異なり、補修部位の耐力調節により部材としての耐力の上昇率を調節できる可能性を示した。ただしこの場合は、補強プレートが面外変形を生じることもあり、補修部位の詳細な耐力評価には課題が残った。

角形鋼管部材についても、耐力劣化をとまなう局部座屈により損傷した部材を対象とし、カバープレート補強による補修効果を静的載荷実験により検証した。部材端部に生じた局部座屈部にカバープレートを溶接することにより、箱形補修と同様に補修部の局部座屈変形が拘束され、耐力が上昇することを確認するとともに、塑性ヒンジの形成位置が変化することで補修後の部材のみかけの耐力が回復・上昇することを明らかにした。

さらに、部材レベルで明らかにした補修効果や補修後の挙動について、骨組レベルで適用可能か検証するため、角形鋼管柱、H形鋼梁、および柱梁接合部パネルで構成される十字形部分鉄骨骨組を対象とした実験を行い、補修効果や終局挙動について検討を行った。その結果、部材レベルでの補修効果は骨組レベルでも保証されるものの、補修後には骨組の耐力の分布が変化することにより他の部材に損傷が移動、集中することがあり、元の状態の骨組では想定していない崩壊モードが生じる可能性があることを明らかにした。

これらのことから、部材レベルでの検討課題に加えて、周辺部材との耐力の比や、接合部と部材の耐力の比など、骨組の耐力の分布を考慮して修復計画を立てる必要があると考えられる。特に、通常の耐震設計では梁に塑性ヒンジを形成させる梁崩壊型の設計がされるため、補修による梁の過度な耐力上昇は周辺の部材との耐力比を変化させることでその後生じる損傷が周辺部材に移り、元の状態では想定していなかった崩壊モードが生じる可能性がある。そのため梁を補修する場合、補修後の耐力を調節可能な補修を施すか、他の部位に補強を施すことで十分な耐力比を確保するのが望ましいと考えられる。

また、補修後の骨組の耐震性能や挙動について検討するための力学的モデルを構築するため、部材レベルの実験結果に基づき、それぞれの補修後部材の性能や力学的挙動について考察を行い、力学的モデルを提案した。さらに、部材レベルの力学的モデルを用いて、弾塑性解析に供する補修後の骨組の力学的モデルを構築した。これらの力学モデルを用いて、4章以降で骨組の卓越崩壊モードの評価法に関する検証を行った。

第4章“補修した鉄骨骨組の終局耐震限界状態と弾塑性挙動”では、3章で提案した鉄骨部材および鉄骨骨組の力学的モデルに基づいて、解析に供する骨組のモデルを構築した。構築した骨組の解析モデルにより、骨組を構成する各部材の耐力分布を評価し、地震応答時の弾塑性挙動および崩壊モードについて解析的に検証を行った。

ここでは、損傷した骨組に補修を施すことで生じる影響を定性的に把握するため、簡易な2層1スパン骨組を例として解析的な検討を行った。まず、補修による骨組の耐力分布の変化が骨組の卓越崩壊モードに与える影響を検証するため、骨組の塑性崩壊面の変化に着目しその影響を分析した。その結果、補修による耐力の上昇の効果で骨組の塑性崩壊面が移動し、外力に対する安全領域が広がることを示した。しかし、各崩壊モードの塑性崩壊面の移動はどの部材を補修するか依存するため、塑性崩壊面の移動量は崩壊モードごとに異なる傾向を示し、補修後には元の骨組では想定していない崩壊が生じる可能性があることを確認した。

さらに、骨組の振動特性に基づきモード復元力空間で塑性崩壊面を表示した場合、地震により骨組に作用する荷重効果の1次振動モード成分と2次振動モード成分の大きさの比率にも影響を受けることを確認した。

これらの検討により、補修による骨組内の耐力分布の変化が補修後の終局限界状態に与える影響について定性的に明らかにし、その結果、補修した骨組の塑性崩壊面に基づき、補修後の卓越崩壊モードを評価する方法を提示した。

第5章“被災した鉄骨骨組の補修法と終局耐震限界状態時の卓越崩壊モードの評価法”では、補修した鉄骨骨組の力学的な評価から骨組の限界状態関数を定義し、近似信頼性解析により補修した骨組の終局限界状態時の卓越崩壊モードを確率論的に評価する方法を提示した。本章では、4章で定性的に明らかにした、補修により部材の剛性や耐力が変化することで補修した骨組全体の終局限界状態に与える影響を検討し、補修後の終局挙動を検討するための近似信頼性解析による耐震安全性の照査点（設計点）の評価法を提示し、補修後の卓越崩壊モードについて定量的に評価することを可能とした。

第6章“近似信頼性解析による被災した鉄骨骨組の修復計画法”では、5章で提案した近似信頼性解析を用いた補修後骨組の崩壊モードの評価法により、補修後の終局限界状態時の卓越崩壊モードを評価することで修復計画を検討する手法を提示し、その有効性について検討を行った。

なお、本手法では修復後の骨組の塑性変形能力を直接的に保証しているものではない。目標崩壊機構と塑性変形能力の関係については、次のような方針で検討を行った。地震により骨組に入力されるエネルギーは骨組に形成される塑性ヒンジの累積塑性変形により消費されるため、崩壊機構形成時の塑性ヒンジの数が多いほど、塑性ヒンジの耐力が大きいくほど、塑性ヒンジの塑性変形能力が大きいくほどエネルギー吸収能力が大きくなりやすいことがわかる。したがって、全層崩壊モードなどのエネルギー吸収能力が大きいく塑性崩壊機構を保証することを目標とする。

はじめに、補修後骨組の限界状態関数に影響を与える主たる変数について検討を行った。結果として、柱と梁の部材耐力比 χ や補修・補強による部材耐力上昇率 τ 、地震時に作用する荷重効果の1次振動モード成分に対する2次振動モード成分の比 $|\sigma_2/\sigma_1|$ が信頼性指標 β に与える影響を示し、さらに、各崩壊モードの信頼性指標 β の相対関係から、上記の主たる変数が卓越崩壊モードに与える影響を示した。これらの検討により、信頼性指標 β から卓越崩壊モードを制御するための手法を提示した。さらに、中低層鉄骨ラーメン骨組を対象として3層および9層の骨組について補修後の骨組に塑性変形能力に優れる崩壊モードの形成を保証することを目標とした修復計画の立案手法を提示し、検討を行った。

それぞれの骨組について元の状態と補修後の終局限界状態時の卓越崩壊モードの信頼性指標 β を評価した。その結果、補修後の骨組の卓越崩壊モードは元の状態の骨組とは卓越崩壊モードが変化する可能性があるものの、今回の例題骨組の範囲では、各崩壊モード信頼性指標の相対関係の傾向は、大きく変化しないことを確認した。これは、一般的な鉄骨骨組の部材、特に梁では、各部材の長さ L に対して補修部の長さの比がそれほど大きくなることに関係しているものと考えられる。つまり、本章で対象としている補修による部材の耐力上昇が3章で提案した力学モデルに基づくものであり、補修部の長さが部材の長さに対して短いことで部材の耐力上昇率が小さくなり、結果として限界状態関数、および卓越崩壊モードに与える影響が小さく抑えられることとなる。

一方で、全層崩壊モードなどの塑性変形能力に優れる崩壊機構の形成を設計目標とする場合について、9層骨組を一例として、提案手法に基づいて修復計画を再考した。その結果、損傷部位の補修に加えて、その他の部位も信頼性指標 β に基づいて補強する修復計画とすることで、目標崩壊機構の形成を一定の範囲で保証することが可能であることを確認した。

以上、各章の検討により、本論文では鉄骨ラーメン骨組の修復性に関連して、既往研究で十分に解明がなされていなかった、被災した鉄骨骨組の補修の要否判断の一つの目安となる柱・梁部材が耐力劣化域に達したかどうか（最大耐力に至ったかどうか）の判定法を提案し、実験結果に基づき解析に供する補修後部材の力学モデルを構築することで限界状態関数を評価し、卓越崩壊モードに基づいて補修した骨組の構造的回復性の評価法を提案した。すなわち本論文の主目的である、修復後の目標性能に基づく修復計画法を提示するための、塑性変形能力に優れる塑性崩壊機構を目標崩壊機構とし、骨組の保有水平耐力の回復とともに目標崩壊機構の形成を保証するための修復計画を検討する方法について整備した。

本手法により、一般的な耐震設計において必須となる保有水平耐力の確保を信頼性指標の値により検証するとともに、崩壊モードごとの信頼性指標の相対的な関係から卓越崩壊モードを保証するための評価が可能となった。

7.2 今後の課題

■累積損傷評価指標に関する今後の課題

2章で提示した累積損傷評価指標は、“座屈”により最大耐力が決定するH形鋼梁と角形鋼管柱について、最大耐力到達時を限界状態として分析を行い定式化している。そのため、応答中に最大耐力に到達したかどうかの判定や、最大耐力に至っていない部材の応答後の残存性能（エネルギー吸収能力）を定量的に評価できる。一方で、最大耐力以降の領域、つまり耐力劣化域での損傷の評価については適用範囲外である。巨大地震で損傷した骨組には、3章で対象としたような耐力劣化した部材も含まれるため、これらの部材の残存性能を評価することは、修復計画立案時、どのような補修を施すべきかを検討する上で重要になってくると考えられる。そのため、累積損傷評価指標に基づいて補修の要否、補修方法の選択を行う場合には、累積損傷評価を耐力劣化域まで拡張し、耐力劣化中の残存性能（特に残存耐力）を評価可能な指標が必要になってくる。現状の実験データベースでは耐力劣化域に関する情報が不足しているため、今後も実験データを収集し分析を行っていく必要がある。

■損傷した部材の補修法と補修後性能の関係性に関する今後の課題

3章では、補修の対象とする損傷として柱や梁に生じる局部座屈を対象とした。しかし、実際の骨組では梁母材や柱脚の亀裂・破断、パネルゾーンのせん断座屈など、本論文と異なる損傷が生じる場合がある。これらの損傷については、適用する補修法と補修後の力学的特性が異なる。また、柱や梁に生じる局部座屈を補修の対象とする場合でも、本論文とは異なる力学的特性となる補修を施した場合には、補修後の構造性能の回復性や弾塑性挙動が変化するため、これらを含めた修復計画を立案する場合には、別途検証が必要である。

また、3章における試験体は1/2～1/3程度のスケールの縮小試験体として実験を行った。中低層鉄骨骨組の実大サイズの部材を対象とする場合、部材断面や材料特性などに関するスケールの影響は小さいものと考えられる。一方で、本論文と同様の補修を行う際の（補強プレートと部材の）溶接接合部については、被災した現場での溶接の施工性や精度に加え、溶接のサイズやパス数などについてスケールの影響により発生する差異は考慮できていないため、今後検討する必要があるものと考えられる。

さらに、実験は鉄骨部材単体および鉄骨部材のみの組み合わせによる平面骨組を対象としたが、実際の建物は①直交方向にも部材が存在する立体骨組であることから直交方向の構面から与えられる影響や直交方向の構面に与える影響などの検討、②梁の上フランジには床スラブが接合されていることから梁の上フランジには局部座屈が生じにくいとともに梁に作用する応力が大きくなりやすいことによる影響、③柱梁ラーメン骨組には耐震要素であるブレース材や制振ダンパーなどが取り付くことがあるためそれらによる影響、については今後検討を行い、構造性能の回復性や補修後の挙動について明らかにする必要がある。

■骨組の卓越崩壊モードと修復計画立案に関する今後の課題

4～6章では、補修した骨組の終局限界状態時の卓越崩壊モードを対象とした検討を行い、卓越崩壊モードの評価に基づく修復計画を立案する手法を提案した。本手法による修復計画立案では、具体的な課題として以下の点が挙げられる。

- ・目標崩壊機構の形成を保証するためには、他の崩壊モードの信頼性指標との相対的な関係はどのようにすべきか（崩壊モードごとの信頼性指標の値のクライテリアの設定）

- ・目標崩壊機構の形成を保証するために、信頼性指標の値が大きくなりすぎることがある（構造性能が過度に回復し、必要以上の保有水平耐力を確保する可能性）
- ・補修した骨組の塑性変形能力，エネルギー吸収能力を評価する方法
- ・実際の地震応答時などにおける動的な影響が，卓越崩壊モードの評価精度に与える影響（本提案評価法は地震時のランダム水平力を等価静的水平力としてモデル化して評価しているため）

これらの課題について，修復後性能を任意に制御可能な補修工法の開発に向けた検討や，本論文で提案した骨組の力学モデルを使用した時刻歴応答解析によって動的な荷重効果が修復後の骨組や構造性能・終局挙動に与える影響を検証することにより解決していく必要がある。

謝辞

本論文は著者が東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。

著者の指導教官である東京理科大学工学部建築学科 伊藤拓海准教授には、本研究に取り組む貴重な機会を与えていただき、研究実施にあたっては、学部4年次の1年間と修士課程2年間を含む7年間にわたり終始懇切なご指導・ご鞭撻を賜りました。先生は「塑性論」「振動論」「信頼性理論」といった建築構造工学上で重要な理論を学ぶ機会や、「修復性」や「レジリエンス」などの最先端の課題に取り組む機会を与えてくださり、さらに分野を超えた研究の可能性を模索し常に新しい道を示してくれました。先生の先端的かつ独創的な発想には常に深い感銘を受けました。研究室に在籍した7年間では、研究に対する姿勢や論文の進め方、研究者としてのあり方を学び、他の研究者と協力して研究を進めるコミュニケーション能力を培いました。ここに深甚なる謝意を表します。

本研究は、平成28～29年度日本学術振興会科学研究費助成事業(特別研究員奨励費, JSPS 科研費 16J07079)の助成を受け実施されました。ここに記して謝意を示します。

東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻教授 栗田哲先生、伊藤裕久先生、倉渕隆先生、高橋治先生、今本啓一先生、東京理科大学大学院国際火災科学研究科火災科学専攻教授 河野守先生、東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻教授 永野正行先生、東京大学大学院工学系研究科建築学専攻教授 高田毅士先生には、著者の学位論文の審査をお引き受けいただき、貴重なご意見をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科建築学専攻准教授 荒木慶一先生には、2016年度に行った実験に関連して、多大なるご協力いただき、また、京都大学 聲高裕治先生、吉田亘利様、野村昌弘様より、貴重なご助言とご協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

東京理科大学工学部建築学科伊藤(拓)研究室 崔彰訓助教には、博士課程での研究生活や就職活動、論文執筆などに関して様々なご助言を賜りました。ご迷惑をお掛けしたこともありましたが、常に温かく見守っていただきました。崔助教の多大なるご協力に心から感謝いたします。

著者が伊藤(拓)研究室に在籍した7年間、学生の皆様には研究遂行にあたり多大なるご協力、ご助言をいただき、充実した研究生活を送ることができました。公私問わず皆様の温かいご支援・ご助力のおかげで楽しい研究生活を過ごすことができました。ここに厚く御礼申し上げます。

最後に、博士後期課程に進学する機会を与え、今日に至るまで常に私を支え続けてくれた父、母に心から感謝申し上げます。

2018年2月
森 健士郎

Appendix A 繰返し塑性振幅を受ける鋼部材のデータベース

A.1 繰返し塑性振幅を受ける H 形鋼梁のデータベース

2章で検討した繰返し塑性振幅を受ける H 形鋼梁に関する既往実験のデータベースについて、各実験データから格納したデータを表 A-1 に、各試験体の荷重変形関係を図 A-1 に示す。なお、荷重変形関係は縦軸を M/M_p で、横軸を θ/θ_p で示している。

用語や記号の説明

試験体 ID	データベース上の試験体 ID
試験体名	既往の文献における試験体名
試験体形状	H : 断面せい, B : 断面の幅, t_w : ウェブ板厚, t_f : フランジ板厚 L : せん断スパン
材料特性	σ_y : 降伏強さ, σ_u : 引張強度, E : 初期ヤング係数
右添え字	m : 最大耐力点
左添え字	s : 骨格曲線, c : 累積変形曲線
M/M_p	耐力 (M : 荷重, M_p : 軸力を考慮した全塑性モーメント)
θ/θ_p	変形 (θ : 回転角, θ_p : 弾性勾配を仮定したときの M_p 時の回転角)
${}_s\mu$	骨格曲線部における累積塑性率
${}_s\eta$	骨格曲線部における累積塑性変形倍率
η^*	累積変形曲線における各サイクルの塑性率の総和
${}_c\mu$	累積変形曲線における累積塑性率
${}_c\eta$	累積変形曲線における累積塑性変形倍率
N	半サイクル数
N_e	有効半サイクル数
γ	変位振幅の偏り

表 A-1 繰返し塑性振幅を受ける H 形鋼梁のデータベース (1/3) [A-1]

文献 番号	試験体名	試験体断面寸法				せん断 スパン [m]	材料特性			実験結果							崩壊形式	載荷バ ターン	
		H	B	t_w	t_f		鋼材種	σ_y	σ_u	E	M_m/M_p	μ_m	η_m^*	$\epsilon\eta_m$	$c\eta_m$	N_{em}			γ_m
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]			[-]
19	G1WN-12	300	120	4.5	9.0	1.00	SM490A	399	425	205000	1.15	3.64	12.91	3.62	12.0	6	0.56	Lo.Bu	(2)
	G1WN-14	300	120	4.5	9.0	1.00	SM490A	399	425	205000	1.13	4.15	18.72	4.11	16.6	10	0.56	Lo.Bu	(2)
	G4WN-12	300	120	4.5	12.0	1.00	SM490A	354	433	205000	1.19	3.30	9.90	3.63	9.5	5	0.66	Lo.Bu	(2)
	G4WN-14	300	120	4.5	12.0	1.00	SM490A	354	433	205000	1.18	2.98	15.75	3.32	14.5	9	0.60	Lo.Bu	(2)
	G5WN-12	350	120	4.5	9.0	1.00	SM490A	372	377	205000	1.13	2.38	9.13	2.45	8.3	5	0.62	Lo.Bu	(2)
	G5WN-14	350	120	4.5	9.0	1.00	SM490A	372	377	205000	1.14	2.43	15.19	2.55	13.8	9	0.59	Lo.Bu	(2)
	G6WN-12	250	120	4.5	9.0	1.00	SM490A	380	435	205000	1.22	4.57	19.73	4.95	19.1	7	0.58	Lo.Bu	(2)
G6WN-14	250	120	4.5	9.0	1.00	SM490A	380	435	205000	1.24	2.68	15.46	2.96	14.1	9	0.60	Lo.Bu	(2)	
20	AA-2	224	270	5.6	8.9	1.00	SS41	270	445	201684	1.07	1.36	2.77	1.27	2.4	7	0.88	Lo.Bf	(3)
	AA-3	223	270	5.7	8.9	1.00	SS41	270	445	201684	1.08	1.43	1.87	1.32	1.7	4	1.00	Lo.Bf	(3)
	AA-4	224	270	5.8	8.9	1.00	SS41	270	445	201684	1.08	2.04	4.38	1.99	3.9	3	0.72	Lo.Bf	(2)
	AA-5	223	270	5.8	8.8	1.00	SS41	270	445	201684	1.07	1.41	1.41	1.31	1.31	1	1.00	Lo.Bf	(2)
	A-2	224	288	8.8	12.0	1.00	SS41	262	458	203448	1.22	5.51	36.06	5.97	29.2	42	0.82	Lo.Bu	(3)
	A-3	224	288	8.9	12.1	1.00	SS41	262	458	203448	1.19	4.05	5.11	4.28	6.4	14	1.00	Lo.Bu	(3)
	A-4	224	288	8.9	11.9	1.00	SS41	257	438	203448	1.17	7.58	23.42	8.25	22.7	7	0.63	Lo.Bu	(2)
	A-5	225	288	8.9	11.9	1.00	SS41	257	438	203448	1.21	8.02	17.58	8.72	18.0	3	0.60	Lo.Bu	(2)
	B-2	223	241	8.8	11.9	1.00	SS41	262	458	203448	1.26	6.90	35.20	7.64	29.9	43	0.82	Lo.Bu	(3)
	B-3	224	240	9.1	12.1	1.00	SS41	262	458	203448	1.26	6.31	10.37	7.23	12.2	18	1.00	Lo.Bu	(3)
	B-4	225	240	8.9	12.0	1.00	SS41	257	438	203448	1.29	7.37	25.35	8.15	25.6	7	0.62	Lo.Bu	(2)
	B-5	224	240	8.8	11.9	1.00	SS41	257	438	203448	1.32	8.63	48.75	10.22	53.0	9	0.55	Lo.Bu	(2)
	C-2	225	192	9.1	11.9	1.00	SS41	262	458	203448	1.31	7.49	35.38	8.34	30.2	35	0.87	Lo.Bu	(3)
C-3	224	191	8.8	11.7	1.00	SS41	262	458	203448	1.34	7.56	12.45	8.51	15.5	20	1.00	Lo.Bu	(3)	
C-4	224	192	8.7	12.0	1.00	SS41	257	438	203448	1.39	10.10	57.60	12.25	63.4	11	0.58	Lo.Bu	(2)	
C-5	225	192	8.9	11.9	1.00	SS41	257	438	203448	1.43	13.74	58.54	17.09	66.5	9	0.56	Lo.Bu	(2)	
21	A1I	400	200	9.0	12.0	2.50	HT590	478	632	205604	1.30	4.19	24.06	4.63	22.5	7	0.57	Lo.Bf	(2)
	A1C	400	200	9.0	12.0	2.50	HT590	478	632	205604	1.24	2.32	6.34	2.28	5.9	3	0.62	Lo.Bf	(1)
	A2I	300	150	9.0	12.0	1.88	HT590	478	632	205604	1.35	4.42	19.28	5.03	17.8	6	0.59	Lo.Bf	(2)
	A2C	300	150	9.0	12.0	1.88	HT590	478	632	205604	1.37	6.67	9.77	6.80	10.4	2	0.66	Lo.Bf	(1)
	A2C'	300	150	9.0	12.0	1.88	HT590	478	632	205604	1.45	5.83	16.29	6.35	17.1	4	0.57	Lo.Bf	(1)
	B1I	400	200	9.0	12.0	2.50	HT590	554	633	207074	1.22	3.28	8.69	3.19	8.3	4	0.58	Lo.Bf	(2)
	B1C	400	200	9.0	12.0	2.50	HT590	554	633	207074	1.31	1.48	4.90	1.92	5.3	3	0.61	Lo.Bf	(1)
	B2I	300	150	9.0	12.0	1.88	HT590	554	633	207074	1.27	6.91	22.68	8.00	23.4	6	0.58	Lo.Bf	(2)
B2C	300	150	9.0	12.0	1.88	HT590	554	633	207074	1.39	5.48	8.28	6.50	9.7	2	0.67	Lo.Bf	(1)	
22	DG-130-4	200	100	5.5	8.0	1.30	SS41	274	448	205000	1.23	1.06	30.74	1.10	28.2	21	0.52	La.B,LoBu	(2)
	DG-130-16	200	100	5.5	8.0	1.30	SS41	265	444	205000	1.24	2.46	73.26	2.28	67.7	32	0.52	La.B,LoBu	(2)
	DG-130-17	200	100	5.5	8.0	1.30	SS41	265	444	205000	1.20	2.81	32.64	2.96	28.2	32	0.61	La.B,LoBu	(3)
	DG-130-18	200	100	5.5	8.0	1.30	SS41	265	444	205000	1.19	2.03	17.58	2.13	13.0	33	0.98	La.B,LoBu	(3)
	DG-130-19	200	100	5.5	8.0	1.30	SS41	265	444	205000	1.28	4.55	56.08	4.67	52.4	22	0.53	La.B,LoBu	-
	DG-130-20	200	100	5.5	8.0	1.30	SS41	265	444	205000	1.23	1.91	31.01	1.91	28.1	21	0.57	La.B,LoBu	(2)
	DGC-120-2	100	100	6.0	8.0	1.20	SS41	282	445	205000	1.41	3.45	209.18	4.44	228.2	64	0.51	La.B,LoBu	-
DGH-130-2	200	100	5.5	8.0	1.30	SM50	437	579	205000	1.19	0.80	18.21	0.84	15.9	40	0.53	La.B,LoBu	(2)	
23	S-4.5-12	300	100	4.5	12.0	1.20	SM490A	362	533	205408	1.54	8.21	44.42	11.57	53.0	10	0.57	Lo.Bw	(2)
	NS-9-9	300	100	9.0	9.0	1.20	SM490A	384	546	207074	1.46	6.75	42.96	9.16	49.2	10	0.53	Lo.Bf	(2)
	S-6-6	300	100	6.0	6.0	1.20	SM490A	387	540	208642	1.43	1.85	20.29	2.73	22.8	9	0.53	Lo.Bf	(2)
24	RS	500	253	12.0	22.0	1.80	SM490A	363	519	205000	1.53	10.64	154.83	14.99	183.4	55	0.57	Lo.Bf	(2)
	RNS	500	253	12.0	22.0	1.80	SM490A	363	519	205000	1.52	10.48	159.53	14.45	173.8	55	0.54	Lo.Bf	(2)
	RNS-D	500	253	12.0	22.0	1.80	SM490A	363	519	205000	1.45	12.23	164.19	15.88	169.2	55	0.54	Lo.Bf	(2)
	NS-1	500	200	16.0	25.0	1.80	SM490A	343	530	205000	1.59	20.17	198.40	28.81	216.5	54	0.56	Lo.Bf	(2)
	NS-1D	500	200	16.0	25.0	1.80	SM490A	343	530	205000	1.71	23.72	197.17	35.86	215.7	54	0.58	Lo.Bf	(2)
	T2-NS1	500	200	16.0	25.0	1.80	SM490A	345	547	205000	1.73	18.84	179.42	29.40	207.4	54	0.57	Lo.Bf	(2)
	T2-NS2	500	200	16.0	25.0	1.80	SM490A	345	547	205000	1.68	17.62	175.43	26.70	201.1	54	0.56	Lo.Bf	(2)
	T2-NS3	500	200	16.0	25.0	1.80	SM490A	345	547	205000	1.64	18.35	177.56	27.42	199.4	54	0.56	Lo.Bf	(2)
TC-NS1	500	200	16.0	25.0	1.80	SM490A	345	547	205000	1.71	19.11	184.22	29.26	207.4	54	0.56	Lo.Bf	(2)	
25	NS-3	500	200	16.0	25.0	1.80	SM490A	343	530	205000	1.63	20.05	190.32	29.04	203.1	54	0.56	Lo.Bf	(2)
26	P21-HD	500	200	10.0	16.0	3.15	SN490B	354	527	205000	1.30	4.78	19.95	5.60	19.6	6	0.56	Lo.Bu	(2)
	P21-VS	500	200	10.0	16.0	3.15	SN490B	354	527	205000	1.27	4.79	21.54	5.33	21.0	7	0.55	Lo.Bu	(2)
	P21-HD-S	500	200	10.0	16.0	3.15	SN490B	354	527	205000	1.27	4.72	22.91	5.22	22.4	7	0.55	Lo.Bu	(2)
	R25-VS	500	200	10.0	16.0	3.15	SM490A	407	549	205000	1.15	3.50	16.67	3.65	15.8	6	0.58	Lo.Bu	(2)
27	OB	250	125	6.0	9.0	1.50	不明	313	-	205000	1.43	9.72	41.84	12.47	48.5	10	0.56	Lo.Bf	(2)
	HB-N	250	125	6.0	9.0	1.50	不明	313	-	205000	1.51	6.05	31.51	8.56	38.7	9	0.58	Lo.Bf	(2)
	HB-R	250	125	6.0	9.0	1.50	不明	313	-	205000	1.61	8.60	40.78	12.65	53.3	10	0.55	Lo.Bf	(2)
	HB-SC	250	125	6.0	9.0	1.50	不明	313	-	205000	1.63	6.58	38.19	9.91	50.9	10	0.53	Lo.Bf	(2)
28	C	500	200	10.0	16.0	2.40	SS400	277	450	211200	1.34	7.63	60.59	8.95	62.3	13	0.55	Lo.Bf	(2)
29	SCB4	500	250	9.0	19.0	2.17	SM490A	426	544	205000	1.23	4.08	83.81	4.11	73.6	52	0.52	Lo.Bf	(2)
30	BI22-N	434	200	10.0	15.0	1.20	SS400	277	470	205000	1.42	7.23	72.73	8.55	79.8	13	0.53	Lo.Bf	(1)

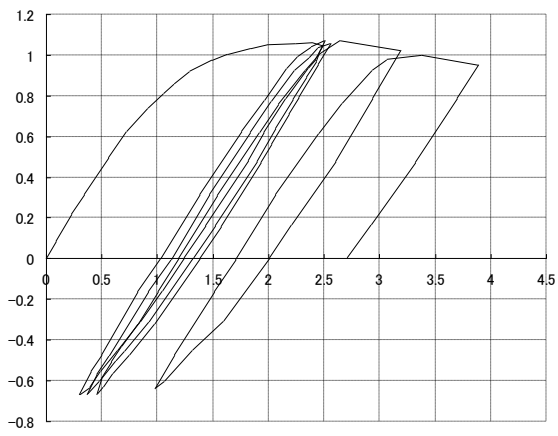
表 A-1 繰返し塑性振幅を受ける H 形鋼梁のデータベース (2/3) [A-1]

文献番号	試験体名	試験体断面寸法				せん断スパン	材料特性				実験結果							崩壊形式	載荷パターン
		H	B	t _w	t _f		鋼材種	σ _y	σ _u	E	M _m /M _p	μ _m	η _m *	εη _m	cη _m	N _{em}	γ _m		
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
31	T10-NN04	450	200	9.0	12.0	2.00	SS400	305	457	205000	1.37	1.63	18.62	1.99	19.4	13	0.56	Lo.Bu	(2)
32	BT22-MBRT	434	200	10.0	15.0	1.20	SS400	305	449	205000	1.13	7.82	78.27	7.50	68.6	13	0.54	Lo.Bf	(1)
	BT22-MS	434	200	10.0	15.0	1.20	SS400	305	449	205000	1.28	10.07	79.35	10.95	75.9	13	0.55	Lo.Bf	(1)
33	H-1	506	201	11.0	19.0	1.80	SM490A	357	548	205000	1.36	4.89	42.47	6.14	46.9	11	0.54	Lo.Bf	(2)
34	B-1・D	300	130	6.0	12.0	1.20	不明	358	535	205000	1.52	8.50	40.60	11.17	47.7	7	0.58	Lo.Bf	(2)
	B-2	300	130	6.0	12.0	1.20	不明	358	535	205000	1.46	9.32	42.65	11.88	47.9	7	0.59	Lo.Bf	(2)
	B-3	300	130	6.0	12.0	1.20	不明	358	535	205000	1.45	8.97	42.96	11.50	48.6	7	0.59	Lo.Bf	(2)
	B-4	300	130	6.0	12.0	1.20	不明	358	535	205000	1.48	9.30	41.16	12.06	47.9	7	0.59	Lo.Bf	(2)
35	B4-SN-T	400	200	8.0	13.0	2.97	SM490A	375	532	205000	1.33	3.80	31.67	4.42	32.2	14	0.54	Lo.Bf	(2)
	B4-NS-C	400	200	8.0	13.0	2.97	SM490A	375	532	205000	1.31	3.41	39.64	3.63	38.1	16	0.52	Lo.Bf	(2)
	B4-NS-T	400	200	8.0	13.0	2.97	SM490A	375	532	205000	1.28	1.86	28.94	2.14	28.2	13	0.54	Lo.Bf	(2)
36	NBHF	500	250	9.0	19.0	2.17	SM490A	325	533	205000	1.39	4.57	89.23	4.91	82.5	52	0.52	Lo.Bu	(2)
37	NCBRM	488	300	11.0	18.0	2.15	SM490A	387	532	205000	1.53	5.83	64.52	7.63	73.1	17	0.55	Lo.Bu	(2)
38	T1	600	300	12.0	25.0	3.85	SM490A	402	559	205000	1.26	6.82	39.66	7.48	39.7	10	0.55	Lo.Bf	(2)
	T2	600	300	12.0	25.0	3.85	SM490A	402	559	205000	1.25	4.16	14.70	4.51	14.3	6	0.58	Lo.Bf	(2)
39	S-3	248	124	5.0	8.0	2.15	SM490	345	522	205000	1.11	4.26	21.58	4.18	19.2	7	0.54	Lo.Bf	(1)
	A-3	248	124	5.0	8.0	2.15	SM490	345	522	205000	1.09	3.03	14.71	2.91	12.5	5	0.57	Lo.Bf	(1)
	NS-3	248	124	5.0	8.0	2.15	SM490	345	522	205000	1.09	4.59	18.30	3.95	14.8	6	0.59	Lo.Bf	(1)
	S-4	248	124	5.0	8.0	2.15	SM490	345	522	205000	1.23	6.11	18.11	6.19	17.8	4	0.58	Lo.Bf	(1)
	NS-4	248	124	5.0	8.0	2.15	SM490	345	522	205000	1.27	5.37	23.49	6.08	23.5	5	0.57	Lo.Bf	(1)
40	SS400-C	250	125	6.0	9.0	0.25	SS400	314	442	205000	0.92	40.88	-	31.56	-	-	-	Lo.Bw	(2)
	SM570Q-C	250	125	6.0	9.0	0.25	SM570	577	671	205000	0.67	10.51	-	6.04	-	-	-	Lo.Bw	(2)
41	SS400-C-4	250	125	6.0	9.0	0.50	SS400	314	442	205000	1.44	31.26	-	36.77	-	-	-	Lo.Bw	(2)
42	SMA-2	218	216	6.1	9.1	1.00	SM58	536	638	219520	1.05	1.56	1.56	1.27	1.27	1	1.00	Lo.Bf	(3)
	SMA-3	217	216	6.2	8.9	1.00	SM58	536	638	219520	1.08	1.55	1.55	1.24	1.24	1	1.00	Lo.Bf	(2)
	SMB-2	218	162	6.2	9.2	1.00	SM58	536	638	219520	1.08	2.44	3.58	2.21	3.0	3	0.93	Lo.Bf	(3)
	SMB-3	223	162	6.2	9.2	1.00	SM58	536	638	219520	1.07	2.83	8.06	2.51	6.9	3	0.64	Lo.Bf	(2)
	SMC-2	218	108	6.2	9.2	1.00	SM58	536	638	219520	1.09	2.00	5.94	1.88	5.0	7	0.86	Lo.Bf	(3)
43	A-130-1	200	100	5.5	8.0	1.33	SS41	305	-	205000	1.23	3.62	49.19	3.80	45.7	22	0.51	La.B	(2)
	A-130-0.5	200	100	5.5	8.0	1.33	SS41	305	-	205000	1.28	5.33	105.66	6.04	105.7	33	0.54	La.B	(2)
	A-130-0	200	100	5.5	8.0	1.33	SS41	305	-	205000	1.30	5.39	100.25	6.14	99.3	36	0.57	La.B	(3)
44	G1-2	220	80	6.0	9.0	0.90	HT60	476	639	205000	1.19	1.73	30.36	1.55	26.1	19	0.53	La.B	(2)
	G2-2	220	80	6.0	9.0	1.10	HT60	485	635	205000	1.18	1.67	24.31	1.62	19.5	19	0.53	La.B	(2)
	G3-2	220	80	6.0	9.0	1.30	HT60	485	635	205000	1.09	1.60	2.39	1.29	2.0	2	0.65	La.B	(2)
45	S800-S2	800	200	16.0	25.0	4.00	SM50A	357	537	205000	1.50	5.86	23.80	7.55	26.1	7	0.57	Lo.Bu	(2)
46	W39-HD	500	200	10.0	16.0	3.18	SS400	297	421	205000	1.21	8.60	24.01	9.38	23.6	7	0.61	Lo.Bu	(2)
	W39-VS	500	200	10.0	16.0	3.18	SS400	297	421	205000	1.27	7.24	23.35	8.24	23.6	6	0.58	Lo.Bu	(2)
	W29-HD	500	200	10.0	16.0	3.18	SS400	297	421	205000	1.27	7.48	23.75	8.24	23.6	6	0.57	Lo.Bu	(2)
	W29-VS	500	200	10.0	16.0	3.18	SS400	297	421	205000	1.37	6.71	25.80	7.85	26.5	6	0.57	Lo.Bu	(2)
	B29-HD	500	200	10.0	16.0	3.18	SN400B	287	437	205000	1.33	11.19	35.71	13.43	37.6	7	0.63	Lo.Bu	(2)
	B29-VS	500	200	10.0	16.0	3.18	SN400B	287	437	205000	1.37	6.71	25.80	7.85	26.5	6	0.57	Lo.Bu	(2)
	W22-N	500	200	10.0	16.0	3.18	SN400B	287	437	205000	1.23	10.84	-	10.41	-	-	-	Lo.Bu	(2)
	W22-HD-R	500	200	10.0	16.0	3.18	SS400	297	421	205000	1.24	4.80	7.22	4.96	7.4	2	0.67	Lo.Bu	(1)
	W22-VS-R	500	200	10.0	16.0	3.18	SS400	297	421	205000	1.23	4.78	7.67	4.85	7.6	2	0.65	Lo.Bu	(1)
	B22-VS-R	500	200	10.0	16.0	3.18	SN400B	287	437	205000	1.30	7.80	15.81	9.06	16.6	3	0.70	Lo.Bu	(1)
47	F41-70-4*	331	150	4.6	8.6	1.26	SS41	272	-	205000	1.29	1.88	28.11	2.12	27.7	22	0.52	Lo.Bf	(2)
	F41-70-2(12)*	339	151	4.4	12.2	0.63	SS41	293	-	205000	1.06	0.64	6.77	0.57	5.4	11	0.55	Lo.Bw	(2)
48	F41-50-6.7	240	151	4.5	9.0	1.50	SS41	282	-	205000	1.25	2.04	14.76	2.34	14.1	10	0.56	Lo.Bf	(2)
	F41-50-6.7(12)	250	150	4.5	12.0	1.49	SS41	309	-	205000	1.28	2.00	42.03	2.39	43.4	17	0.53	Lo.Bf	(2)
	F50-50-6.7	244	150	4.4	8.7	1.50	SM50	368	-	205000	1.30	2.09	15.44	2.45	14.7	10	0.57	Lo.Bu	(2)
	F58-50-6.7	244	150	4.4	8.8	1.50	SM58	547	-	205000	1.08	1.68	5.29	1.67	4.6	10	0.59	Lo.Bw	(2)
49	A-1-2	270	109	4.2	5.6	1.20	SS41	304	450	206780	1.16	1.78	1.78	1.89	1.89	1	1.00	Lo.Bf	(1)
	A-3-2	360	108	4.2	5.6	1.70	SS41	304	450	206780	1.13	0.97	0.97	0.92	0.92	1	1.00	Lo.Bf	(1)
	A-5-2	449	108	4.2	5.6	2.20	SS41	304	450	206780	1.02	0.63	0.63	0.56	0.56	1	1.00	Lo.Bf	(1)
	B-1-2	270	145	4.2	5.6	1.50	SS41	304	450	206780	1.08	1.34	1.34	1.29	1.29	1	1.00	Lo.Bf	(1)
	B-3-2	360	144	4.2	5.6	2.05	SS41	304	450	206780	1.09	0.87	0.87	0.82	0.82	1	1.00	Lo.Bf	(1)
	B-5-2	451	144	4.2	5.6	2.65	SS41	304	450	206780	1.01	0.82	0.82	0.75	0.75	1	1.00	Lo.Bf	(1)
	C-1-2	271	180	4.2	5.6	1.65	SS41	304	450	206780	1.07	0.57	0.57	0.54	0.54	1	1.00	Lo.Bf	(1)
	C-3-2	360	179	4.2	5.6	2.30	SS41	304	450	206780	0.95	0.83	0.83	0.74	0.74	1	1.00	Lo.Bf	(1)
	C-5-2	450	180	4.2	5.6	2.95	SS41	304	450	206780	0.91	0.52	0.52	0.42	0.42	1	1.00	Lo.Bf	(1)
50	No.1	478	150	9.0	14.0	1.68	SM490A	325	511	205000	1.41	5.19	30.54	6.20	32.7	8	0.54	Lo.Bf	(2)
	No.4	478	150	6.0	14.0	1.68	SM490A	325	511	205000	1.27	3.03	24.05	3.56	25.0	8	0.55	Lo.Bf	(2)
	No.5	478																	

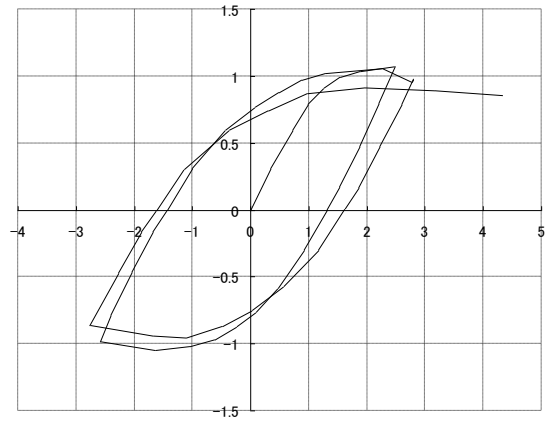
表 A-1 繰返し塑性振幅を受ける H 形鋼梁のデータベース (3/3) [A-1]

文献 番号	試験体名	試験体断面寸法				せん断 スパン [m]	材料特性				実験結果							崩壊形式	載荷バ ターン
		H	B	t_w	t_f		鋼材種	σ_y	σ_u	E	M_m/M_p	μ_m	η_m^*	$s\eta_m$	$c\eta_m$	N_{em}	γ_m		
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
52	FD-40-2	475	175	6.0	19.0	3.30	SM50A	358	526	205000	1.34	5.07	33.26	6.17	34.2	9	0.57	Lo.Bw	(2)
	FD-40-2-H	475	175	6.0	19.0	3.30	SM50A	358	526	205000	1.48	4.93	26.39	6.77	29.3	7	0.59	Lo.Bw	(2)
53	H31_5.2	300	125	9.0	12.0	1.20	H-SA700	784	840	208000	1.19	1.53	11.02	1.59	9.8	7	0.59	Lo.Bu	(2)
	H46_5.2	300	125	6.0	12.0	1.20	H-SA700	784	840	208000	1.17	1.08	10.61	1.13	10.1	7	0.59	Lo.Bu	(2)
	H47_8.3	300	150	6.0	9.0	1.20	H-SA700	788	849	198000	1.19	0.80	1.16	0.76	1.4	3	0.61	Lo.Bf	(2)
	M35_5.5	350	175	9.0	16.0	1.40	SM490	340	510	210000	1.41	5.36	135.51	6.88	149.6	31	0.51	Lo.Bu	(2)
	M36_7.3	350	175	9.0	12.0	1.40	SM490	349	490	208000	1.29	4.90	58.10	5.64	57.7	20	0.53	Lo.Bu	(2)
	M37_9.7	350	175	9.0	9.0	1.40	SM490	390	542	209000	1.21	2.41	34.54	2.69	32.4	14	0.52	Lo.Bu	(2)
	M54_7.3	350	175	6.0	12.0	1.40	SM490	349	490	208000	1.21	3.12	32.32	3.40	29.6	14	0.54	Lo.Bu	(2)
	M55_9.7	350	175	6.0	9.0	1.40	SM490	390	542	209000	1.17	1.67	11.32	1.82	9.8	7	0.58	Lo.Bu	(2)
54	No.1	190	72	2.3	9.0	1.20	不明	272	421	209000	1.26	3.59	35.05	3.95	33.8	14	0.56	Lo.Bw	(2)
	No.2	190	72	2.3	9.0	2.00	不明	272	421	209000	1.26	1.92	26.35	2.26	26.1	13	0.54	La.B,Lo.Bw	(2)
	No.3	190	72	3.2	6.0	1.20	不明	292	428	205000	1.27	3.97	37.43	4.54	35.7	14	0.58	Lo.Bf	(2)
	No.4	190	72	3.2	6.0	2.00	不明	292	428	205000	1.29	1.79	11.35	2.19	11.3	7	0.59	La.B	(2)
	No.5	190	80	4.5	9.0	2.00	不明	272	421	209000	1.32	3.54	31.24	4.29	32.0	15	0.55	La.B	(2)
	No.6	190	90	2.3	9.0	2.00	不明	272	421	209000	1.26	2.14	25.05	2.52	25.1	11	0.57	La.B,Lo.Bw	(2)
	No.7	190	120	4.5	9.0	2.00	不明	272	421	209000	1.36	4.39	54.35	5.51	58.1	17	0.55	La.B,Lo.Bf	(2)
	No.8	240	90	2.3	9.0	2.00	不明	272	421	209000	1.23	2.47	16.93	2.86	16.6	9	0.58	La.B,Lo.Bw	(2)
	No.9	240	90	4.5	6.0	2.00	不明	292	428	205000	1.27	1.95	10.86	2.26	10.8	7	0.59	La.B,Lo.Bf	(2)

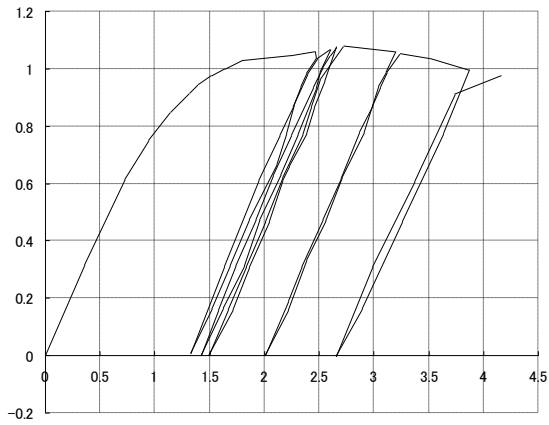
試験体名	ID	試験体名	ID	試験体名	ID	試験体名	ID
AA-2	1	P21-HD	47	S800-S2	93	M36_7.3	139
AA-3	2	P21-VS	48	W39-HD	94	M37_9.7	140
AA-4	3	P21-HD-S	49	W39-VS	95	M54_7.3	141
AA-5	4	R25-VS	50	W29-HD	96	M55_9.7	142
A-2	5	OB	51	W29-VS	97	No.1	143
A-3	6	HB-N	52	B29-HD	98	No.2	144
A-4	7	HB-R	53	B29-VS	99	No.3	145
A-5	8	HB-SC	54	W22-N	100	No.4	146
B-2	9	C	55	W22-HD-R	101	No.5	147
B-3	10	SCB4	56	W22-VS-R	102	No.6	148
B-4	11	BI22-N	57	B22-VS-R	103	No.7	149
B-5	12	T10-NN04	58	F41-70-4*	104	No.8	150
C-2	13	BT22-MBRT	59	F41-70-2(12)*	105	No.9	151
C-3	14	BT22-MS	60	F41-50-6.7	106		
C-4	15	H-I	61	F41-50-6.7(12)	107		
C-5	16	B-1・D	62	F50-50-6.7	108		
A1I	17	B-2	63	F58-50-6.7	109		
A1C	18	B-3	64	A-1-2	110		
A2I	19	B-4	65	A-3-2	111		
A2C	20	B4-SN-T	66	A-5-2	112		
A2C'	21	B4-NS-C	67	B-1-2	113		
B1I	22	B4-NS-T	68	B-3-2	114		
B1C	23	NBHF	69	B-5-2	115		
B2I	24	NCBRM	70	C-1-2	116		
B2C	25	T1	71	C-3-2	117		
DG-130-4	26	T2	72	C-5-2	118		
DG-130-16	27	S-3	73	G1WN-I2	119		
DG-130-17	28	A-3	74	G1WN-I4	120		
DG-130-18	29	NS-3	75	G4WN-I2	121		
DG-130-19	30	S-4	76	G4WN-I4	122		
DG-130-20	31	NS-4	77	G5WN-I2	123		
DGC-120-2	32	SS400-C	78	G5WN-I4	124		
DGH-130-2	33	SM570Q-C	79	G6WN-I2	125		
S-4.5-12	34	SS400-C-4	80	G6WN-I4	126		
NS-9-9	35	SMA-2	81	No.1	127		
S-6-6	36	SMA-3	82	No.4	128		
RS	37	SMB-2	83	No.5	129		
RNS	38	SMB-3	84	No.7	130		
RNS-D	39	SMC-2	85	No.9	131		
NS-1	40	SMC-3	86	No.2	132		
NS-1D	41	A-130-1	87	FD-40-2	133		
T2-NS1	42	A-130-0.5	88	FD-40-2-H	134		
T2-NS2	43	A-130-0	89	H31_5.2	135		
T2-NS3	44	G1-2	90	H46_5.2	136		
TC-NS1	45	G2-2	91	H47_8.3	137		
NS-3	46	G3-2	92	M35_5.5	138		
						※ID=78,79,80の図はない	



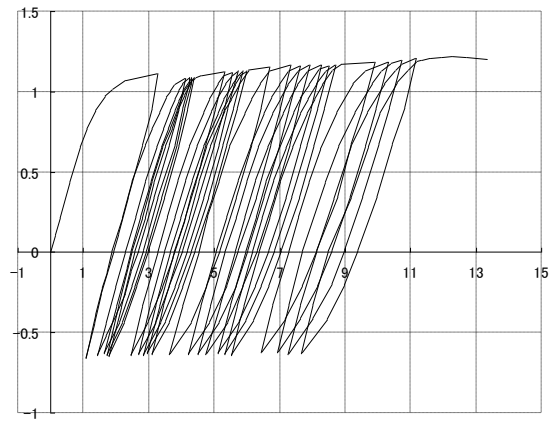
ID=1



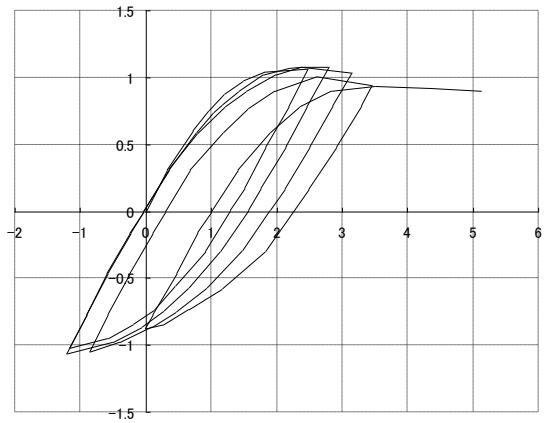
ID=4



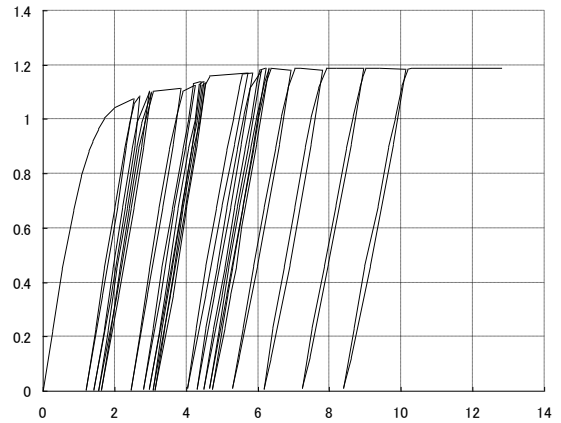
ID=2



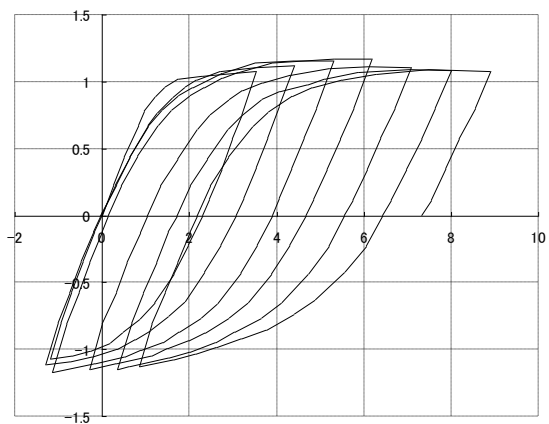
ID=5



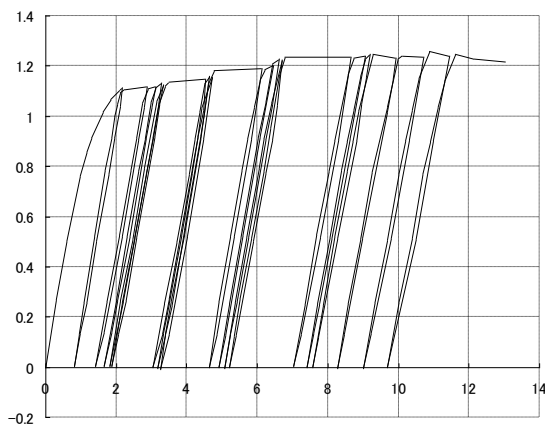
ID=3



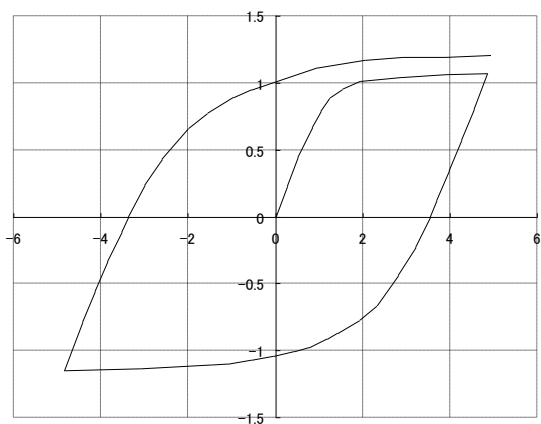
ID=6



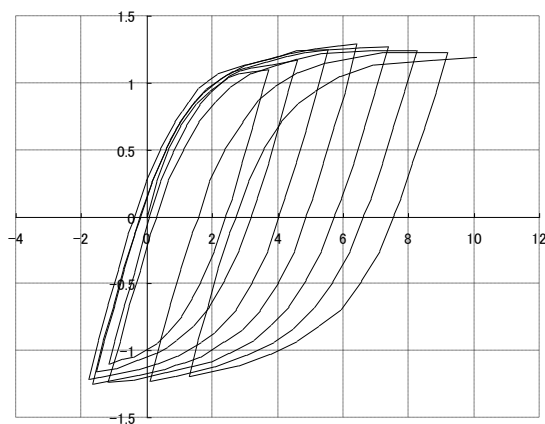
ID=7



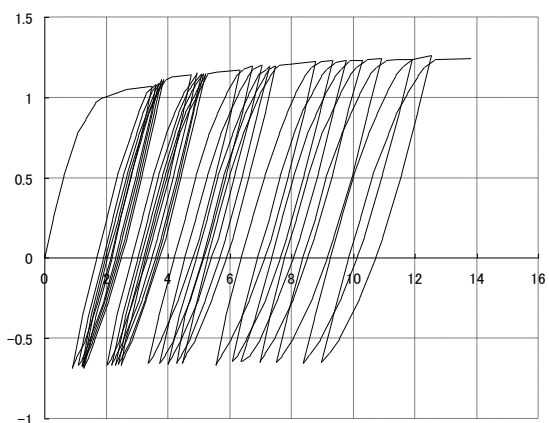
ID=10



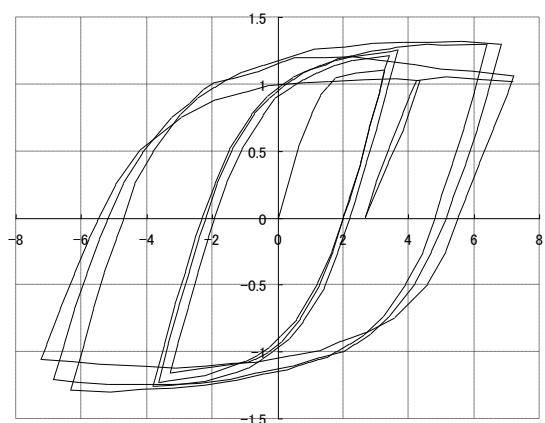
ID=8



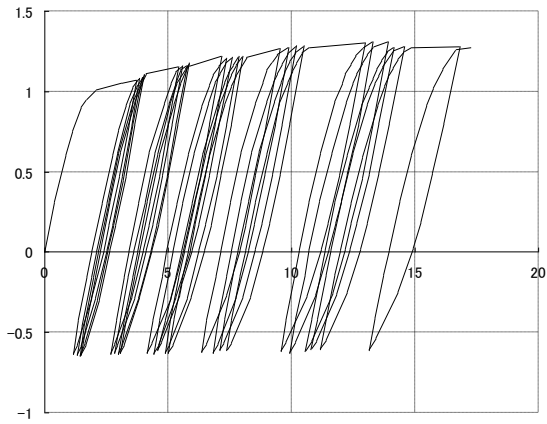
ID=11



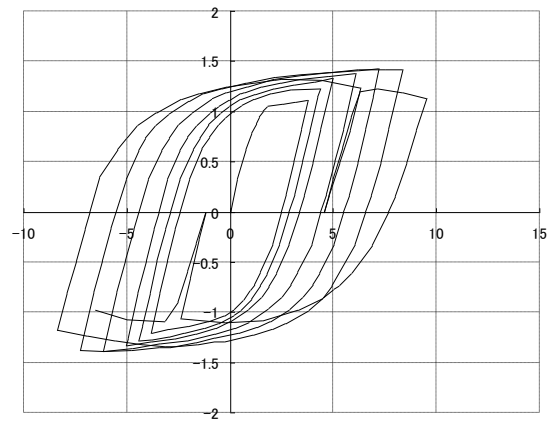
ID=9



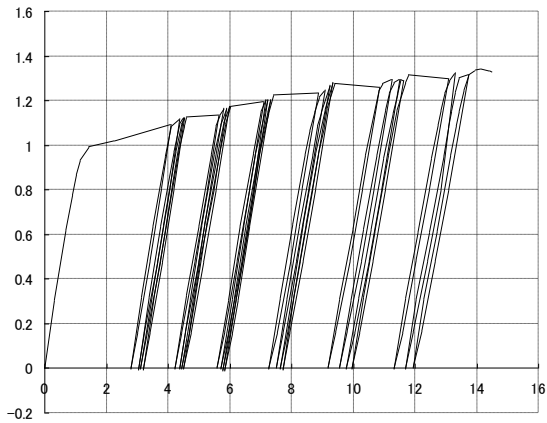
ID=12



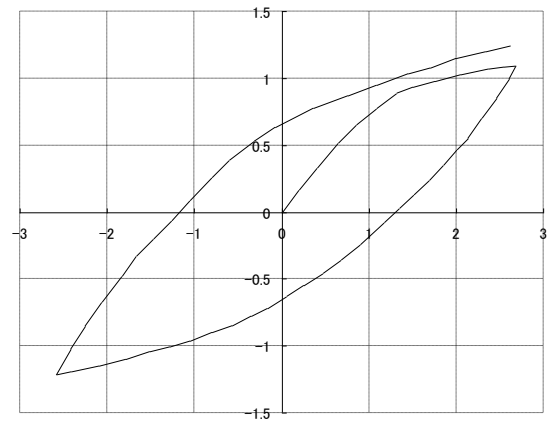
ID=13



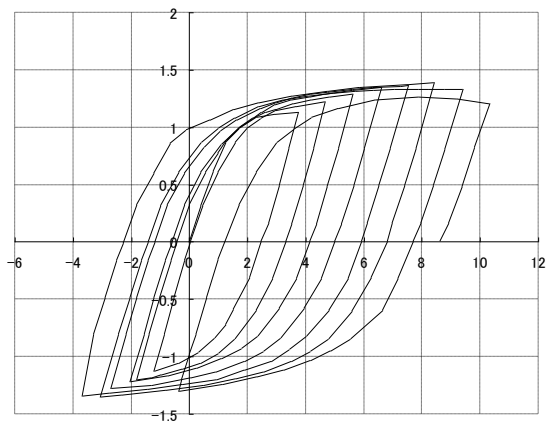
ID=16



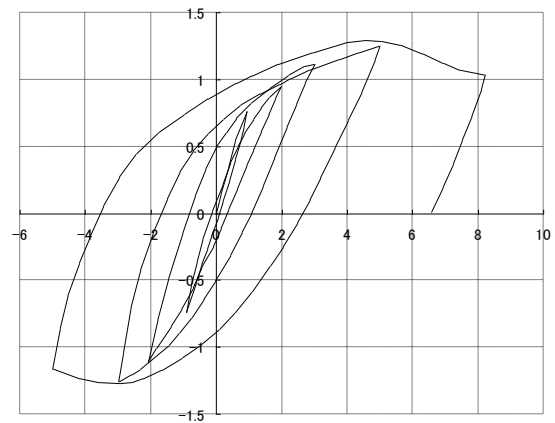
ID=14



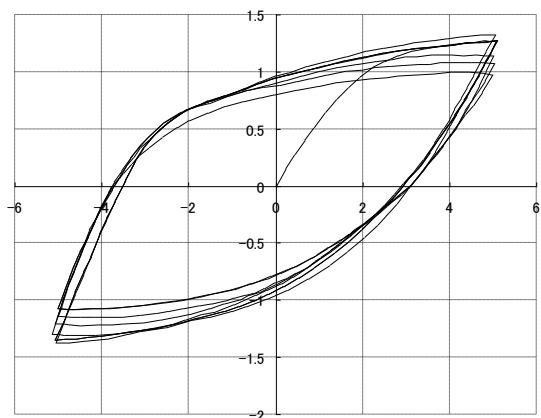
ID=17



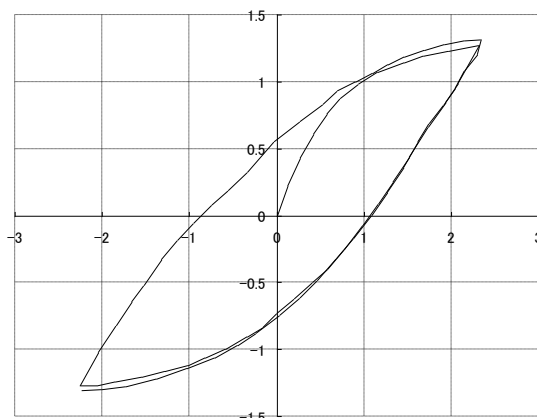
ID=15



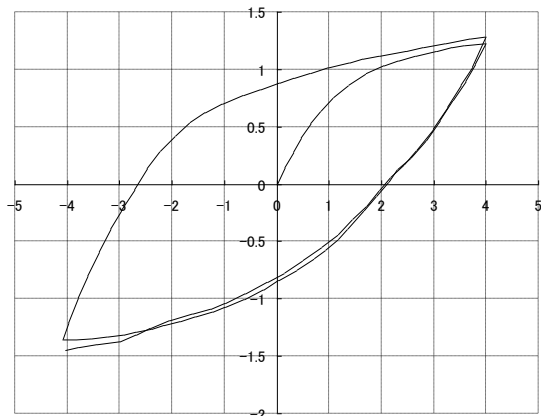
ID=18



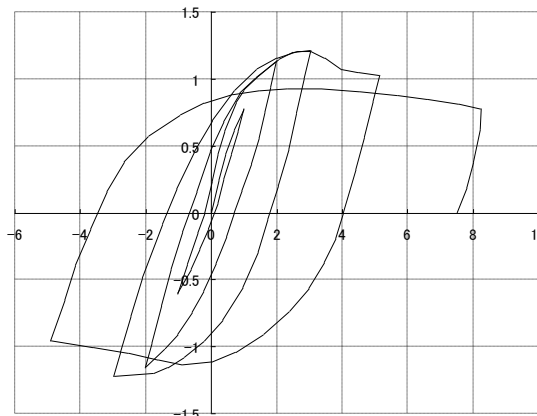
ID=19



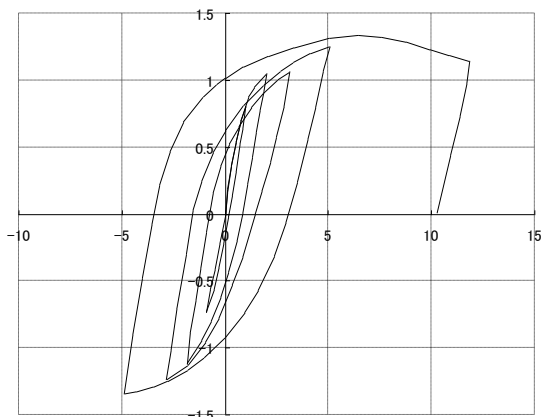
ID=22



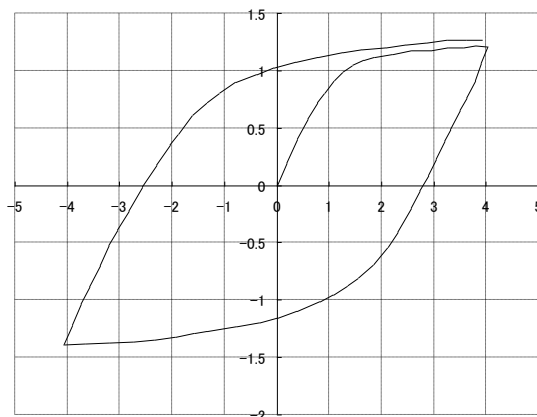
ID=20



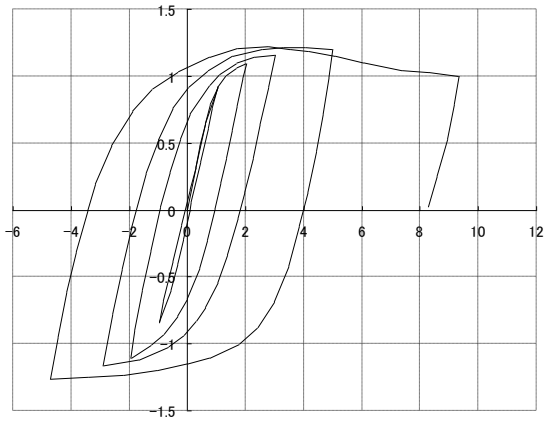
ID=23



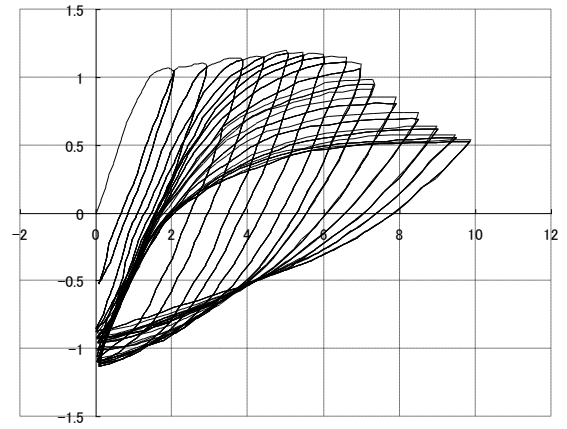
ID=21



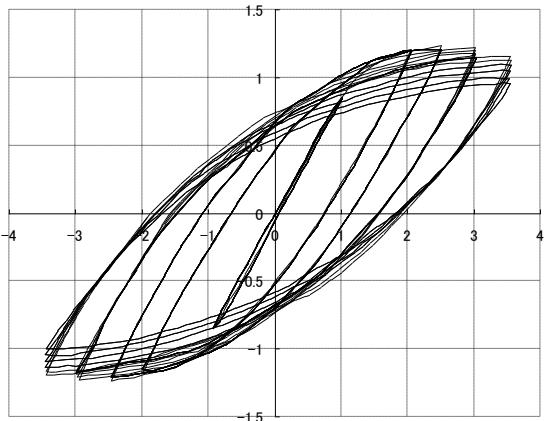
ID=24



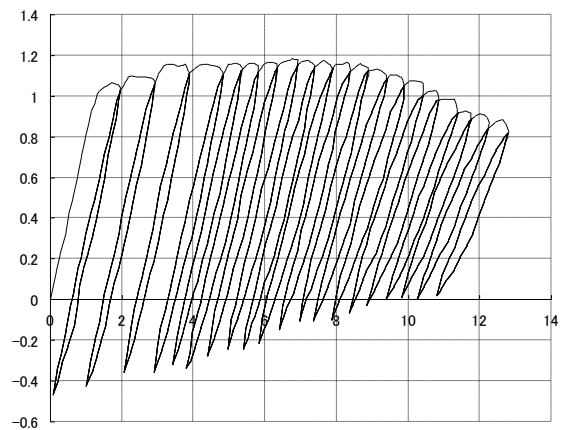
ID=25



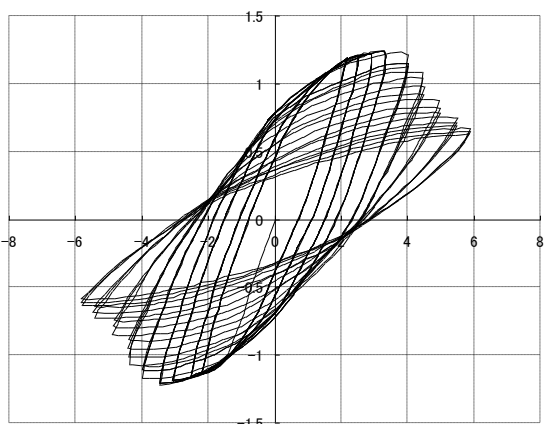
ID=28



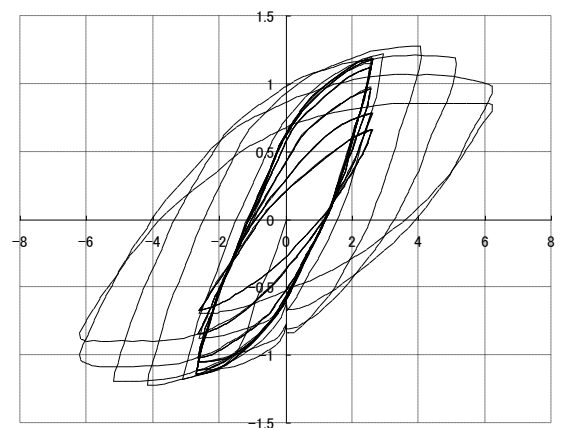
ID=26



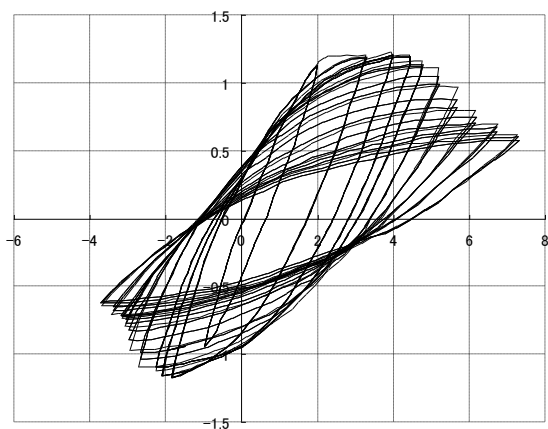
ID=29



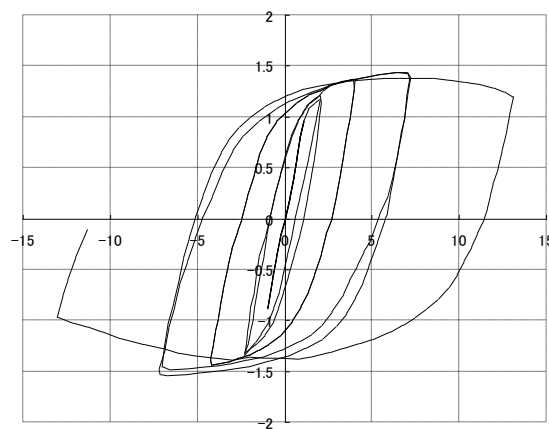
ID=27



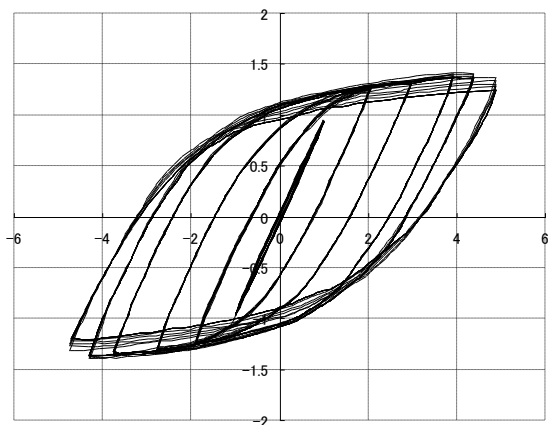
ID=30



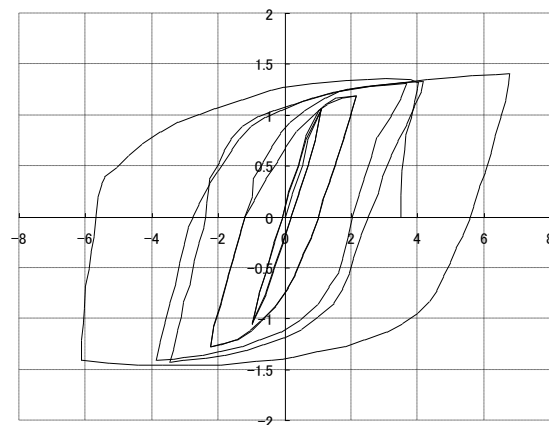
ID=31



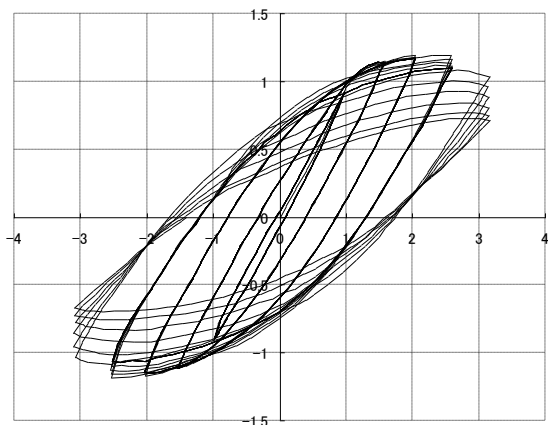
ID=34



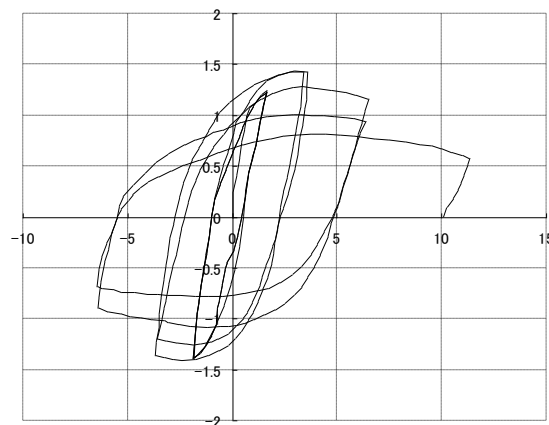
ID=32



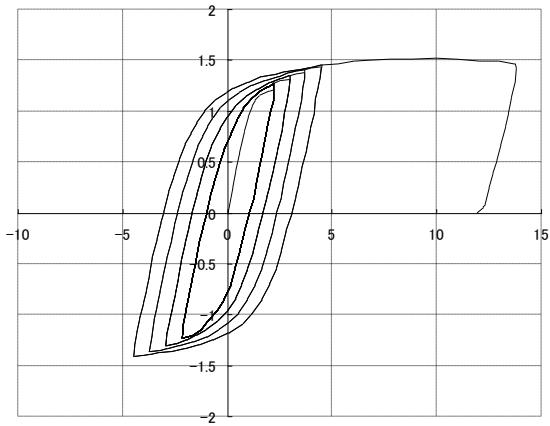
ID=35



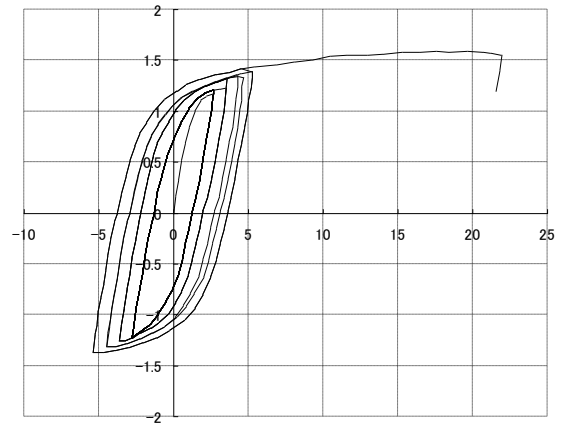
ID=33



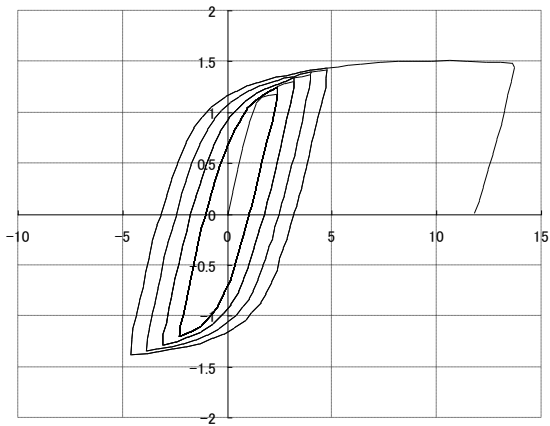
ID=36



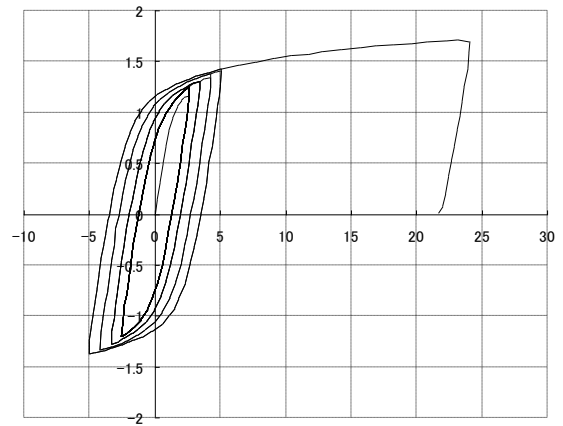
ID=37



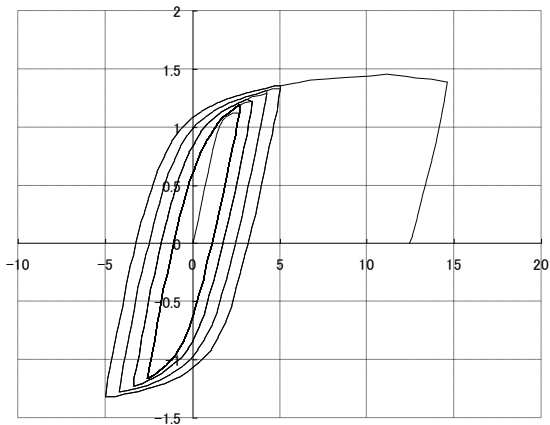
ID=40



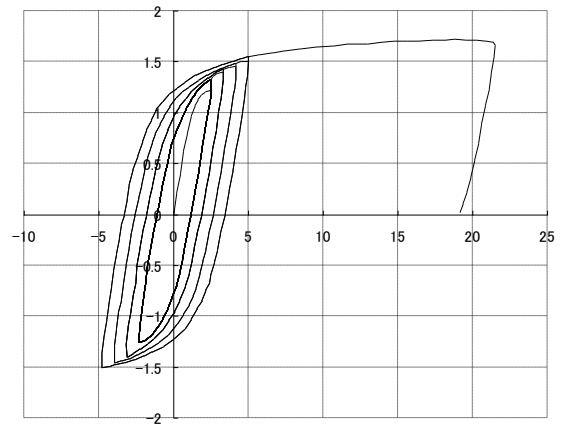
ID=38



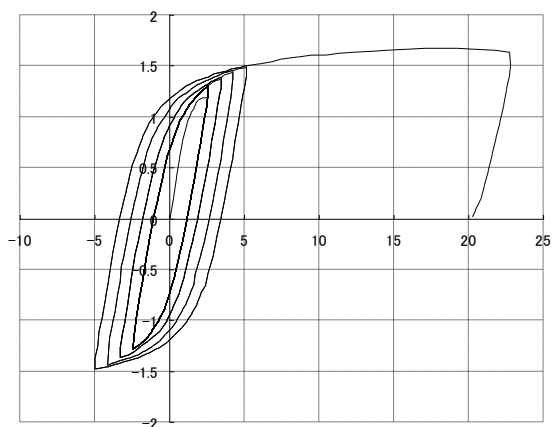
ID=41



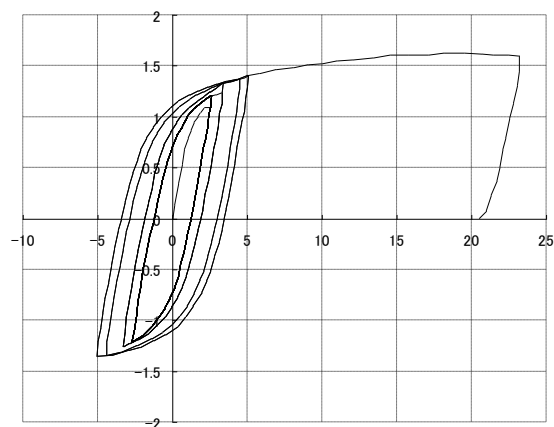
ID=39



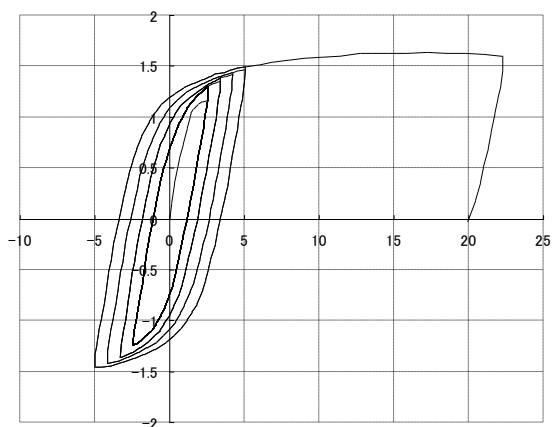
ID=42



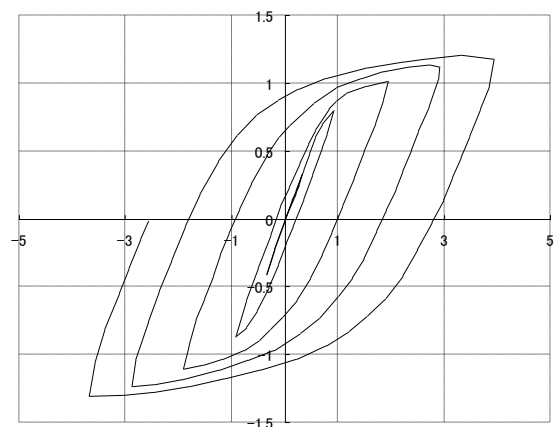
ID=43



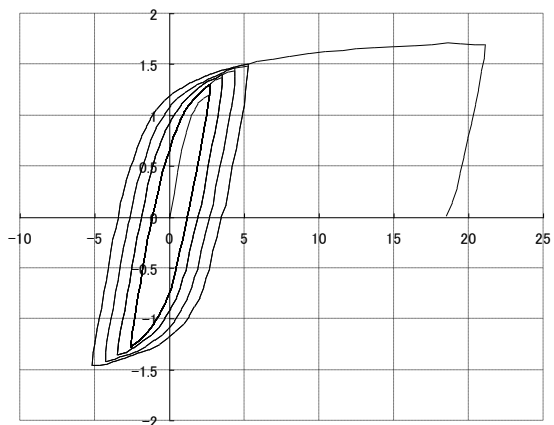
ID=46



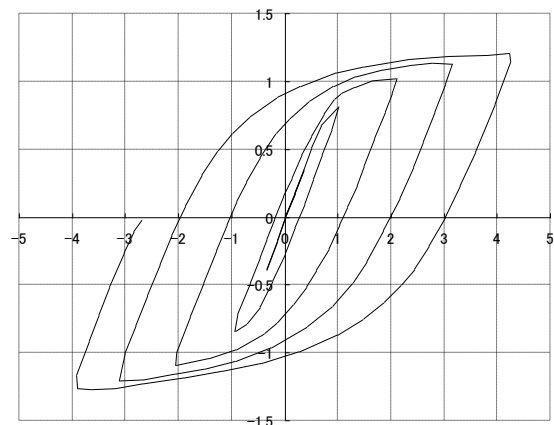
ID=44



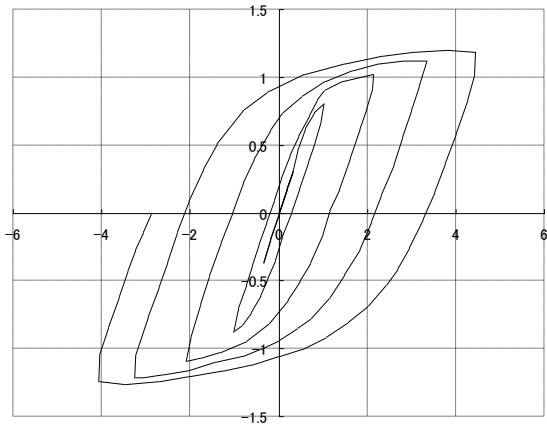
ID=47



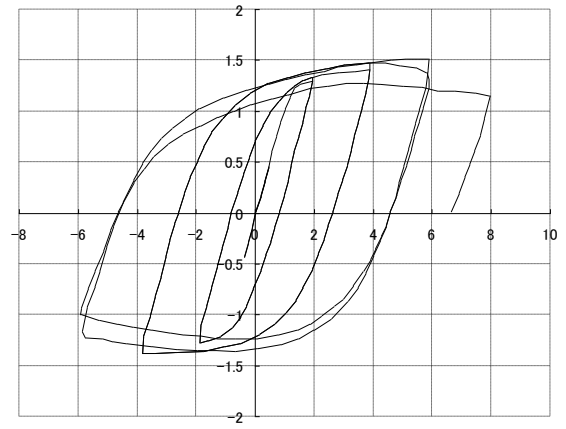
ID=45



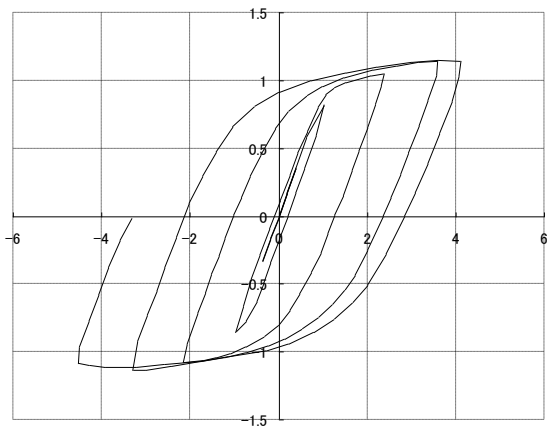
ID=48



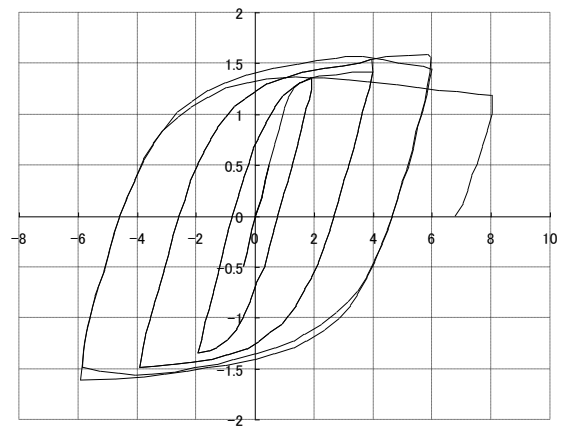
ID=49



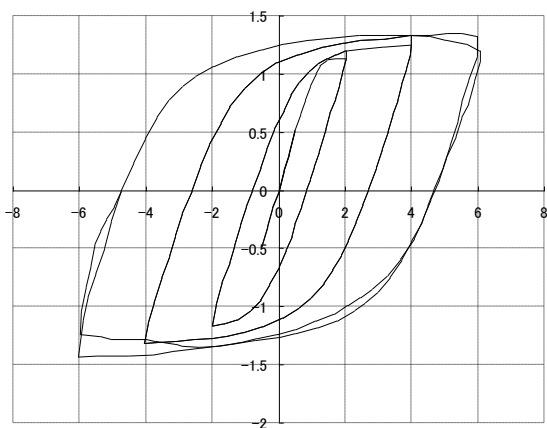
ID=52



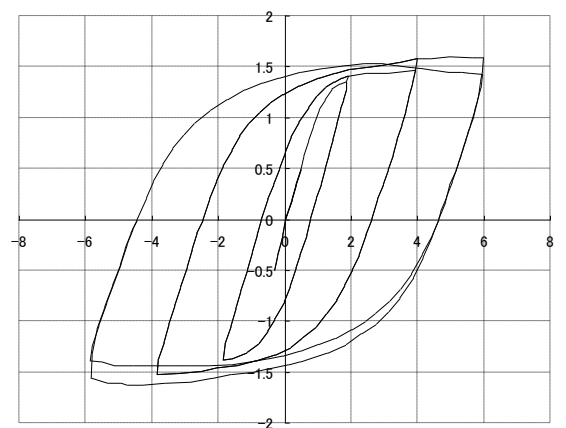
ID=50



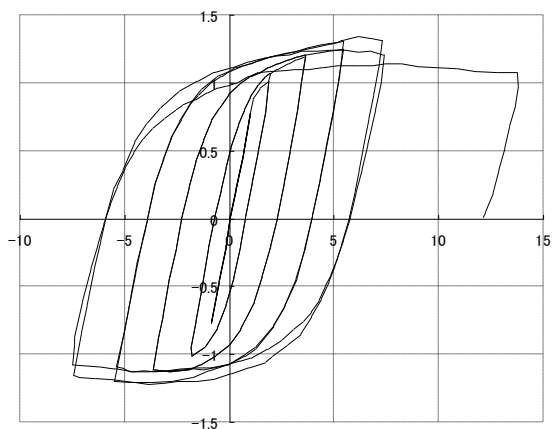
ID=53



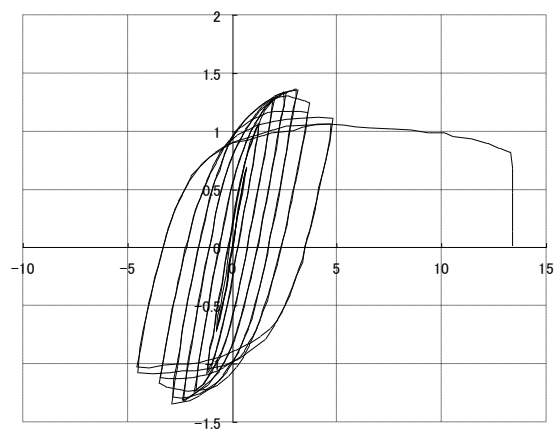
ID=51



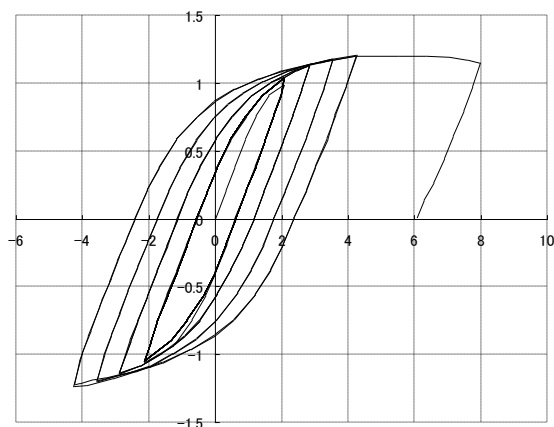
ID=54



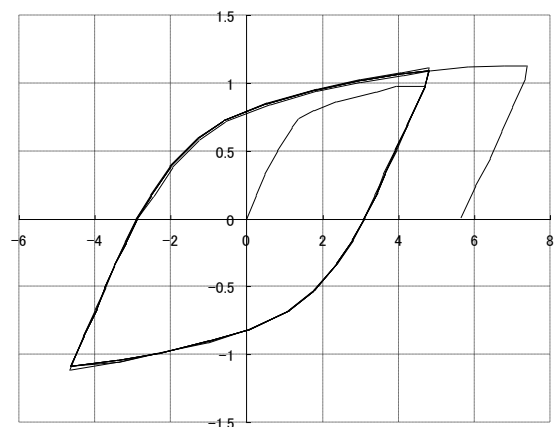
ID=55



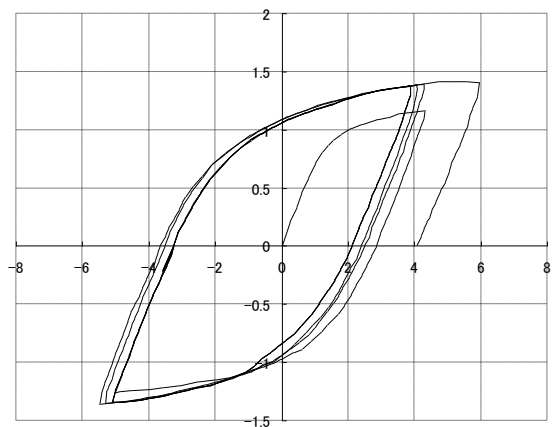
ID=58



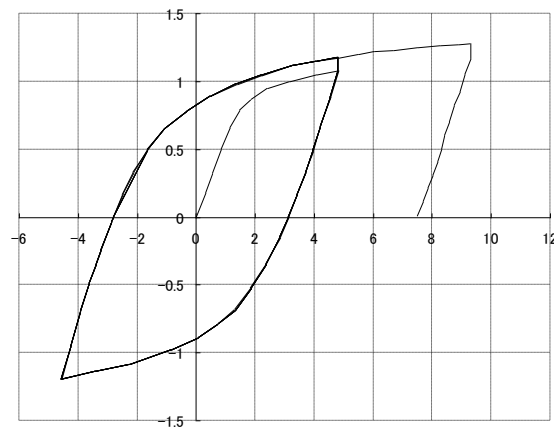
ID=56



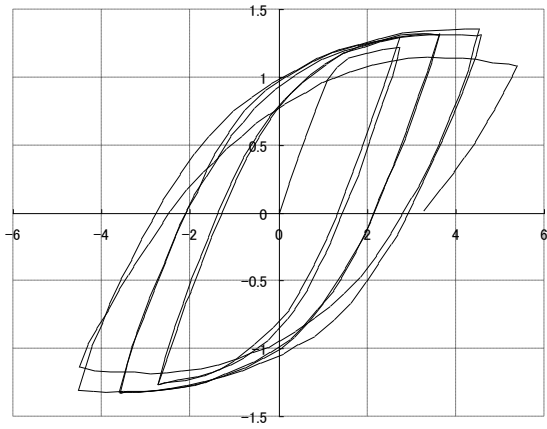
ID=59



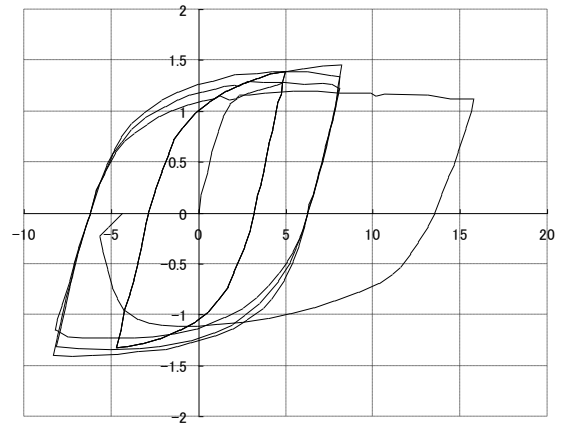
ID=57



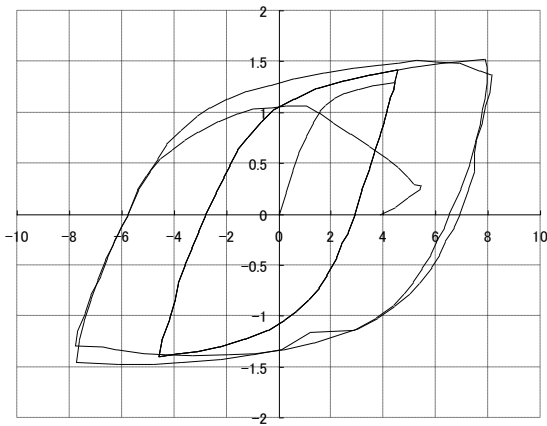
ID=60



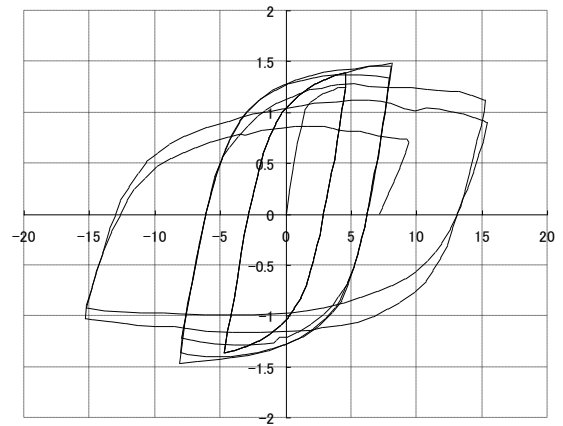
ID=61



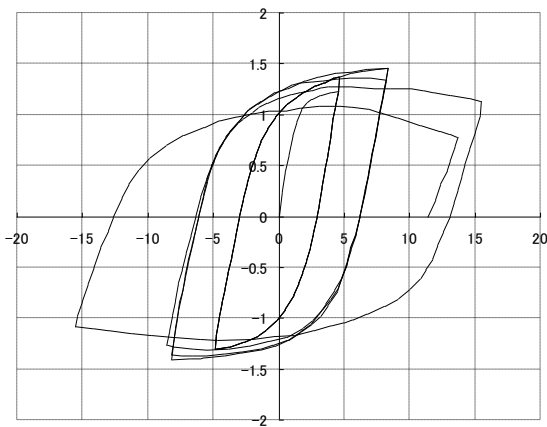
ID=64



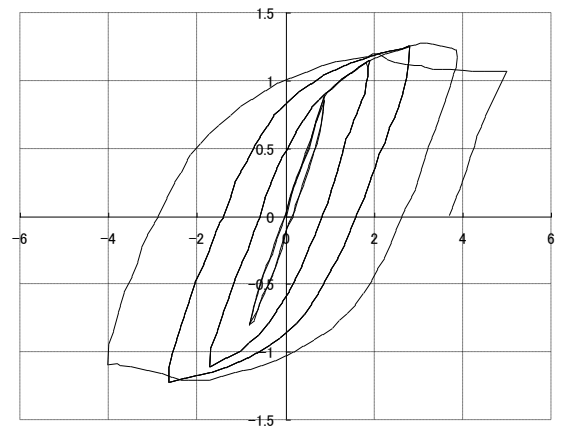
ID=62



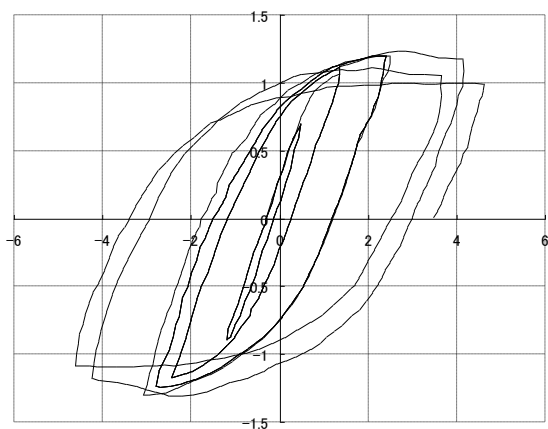
ID=65



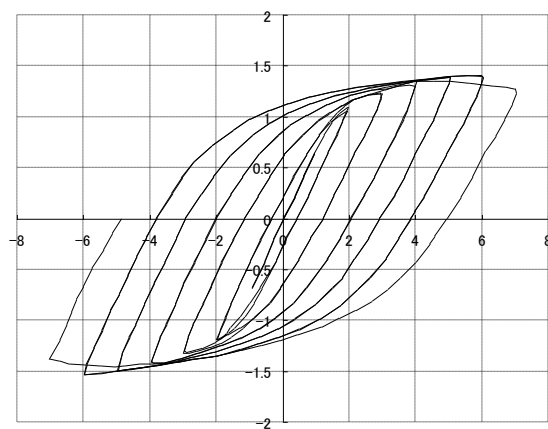
ID=63



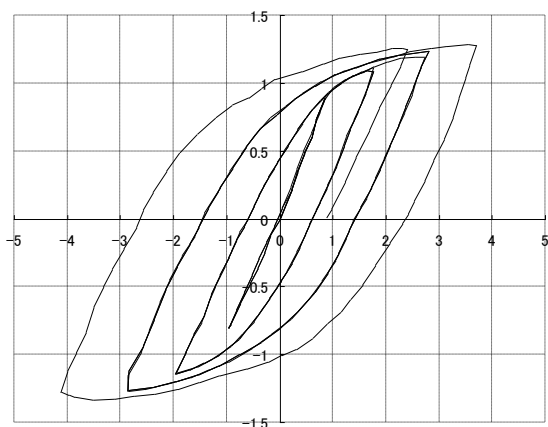
ID=66



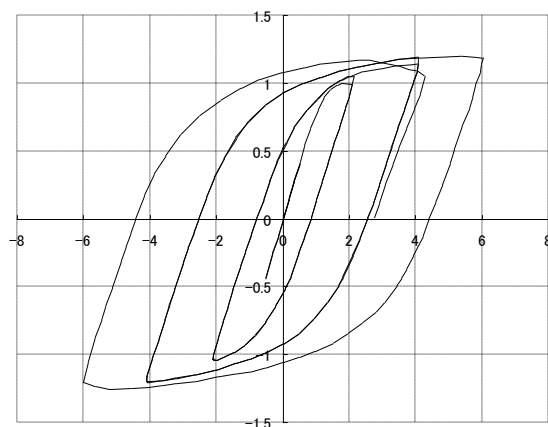
ID=67



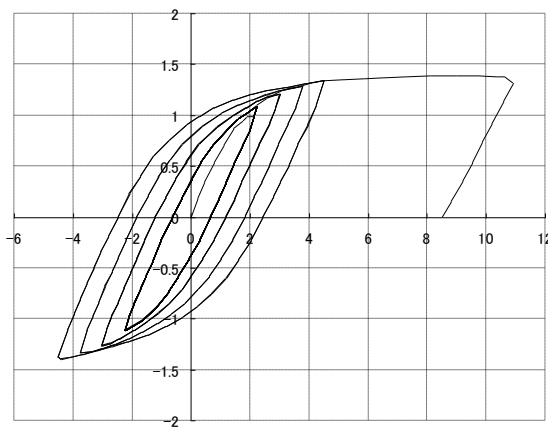
ID=70



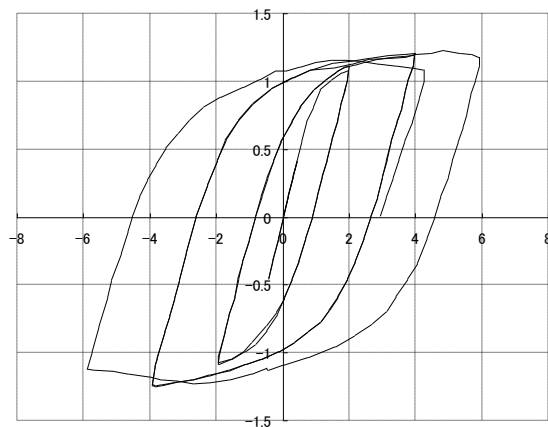
ID=68



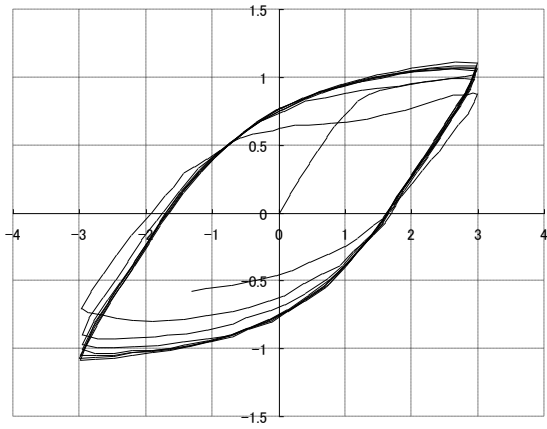
ID=71



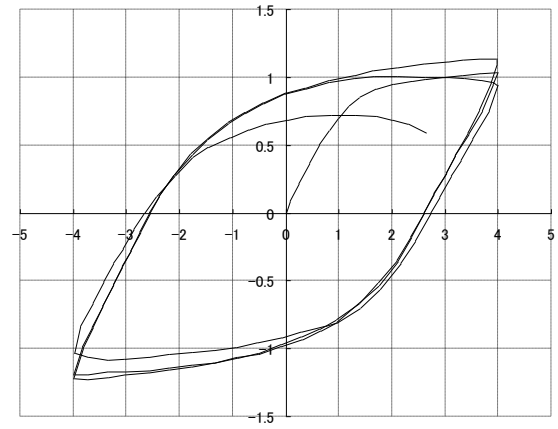
ID=69



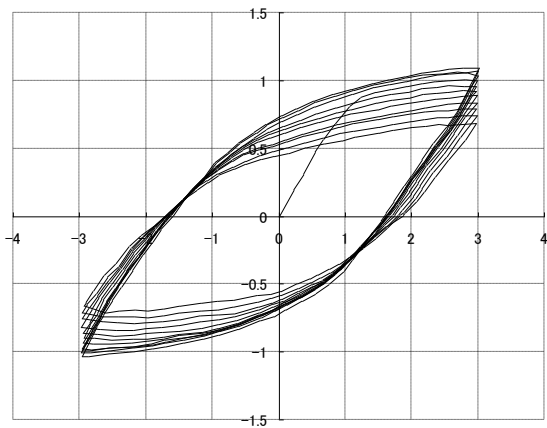
ID=72



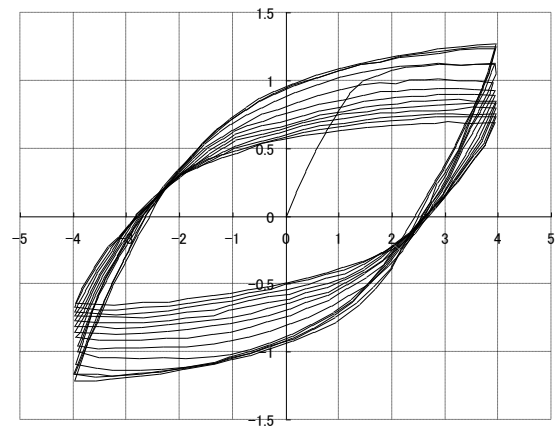
ID=73



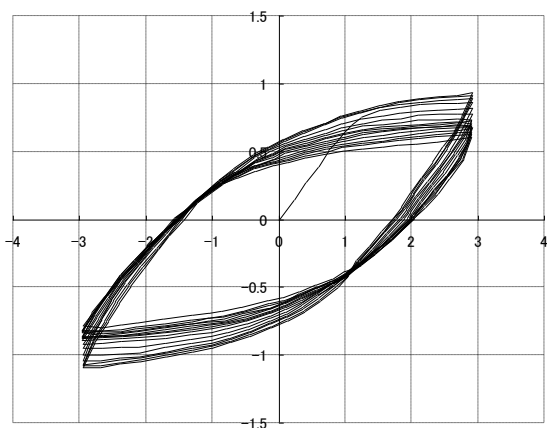
ID=76



ID=74

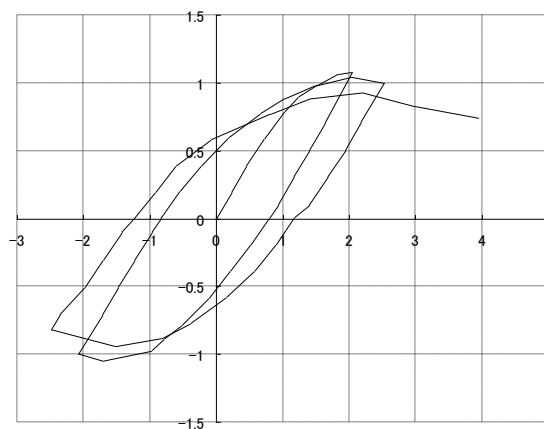


ID=77



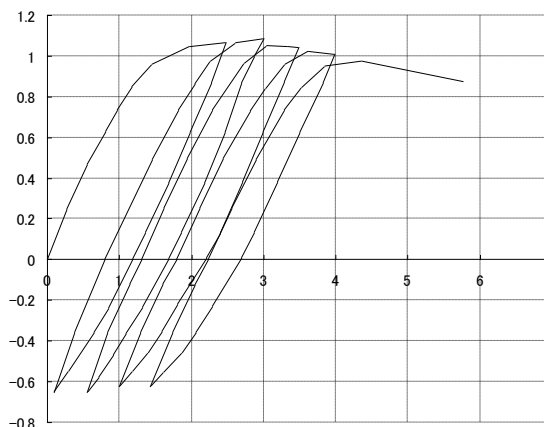
ID=75

ID=78



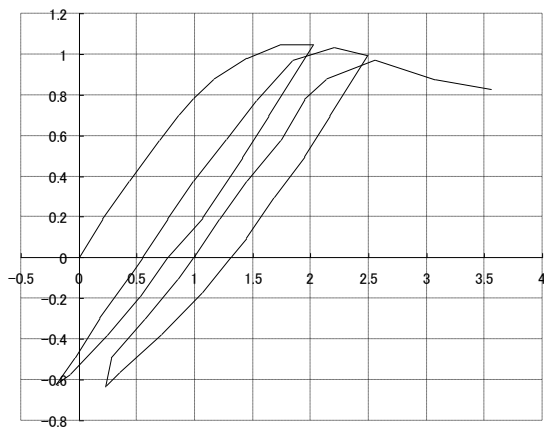
ID=82

ID=79

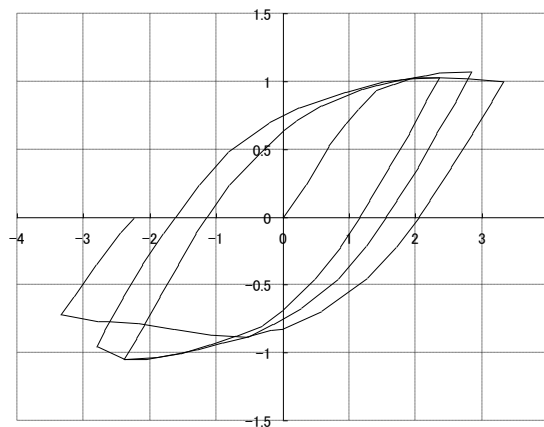


ID=83

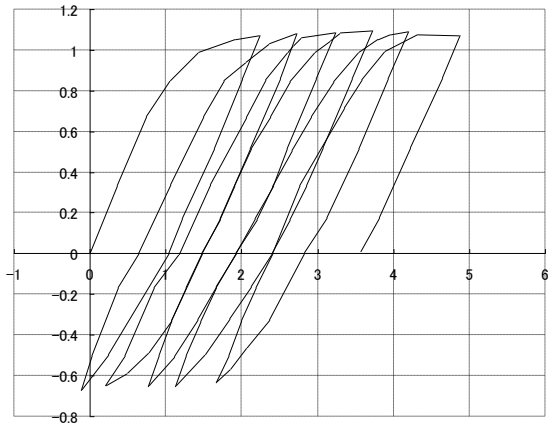
ID=80



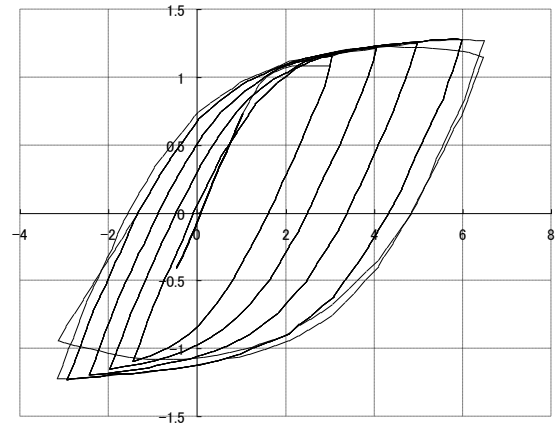
ID=81



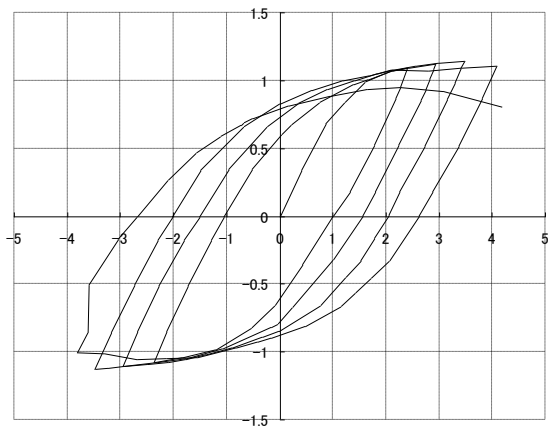
ID=84



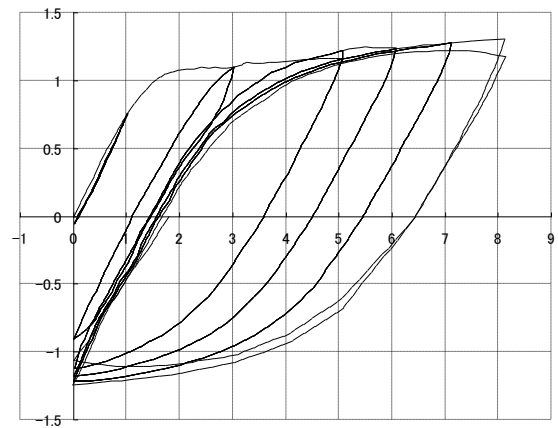
ID=85



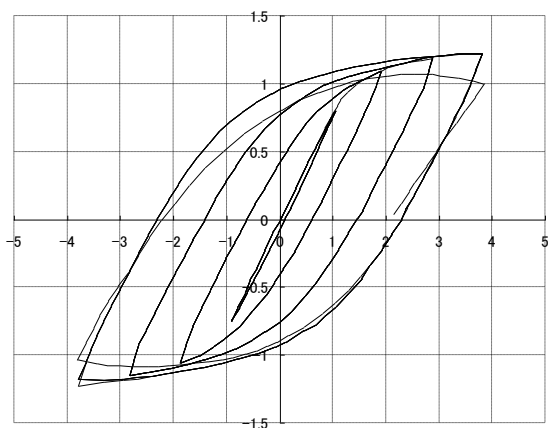
ID=88



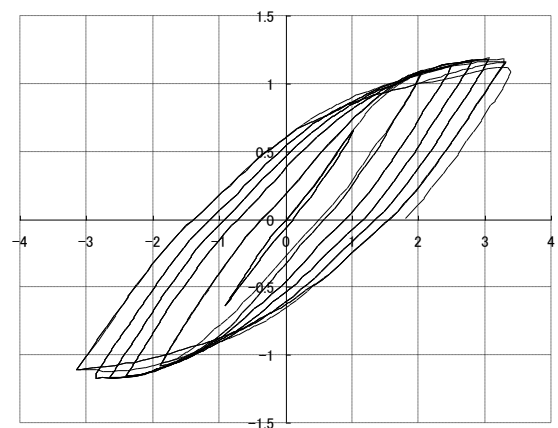
ID=86



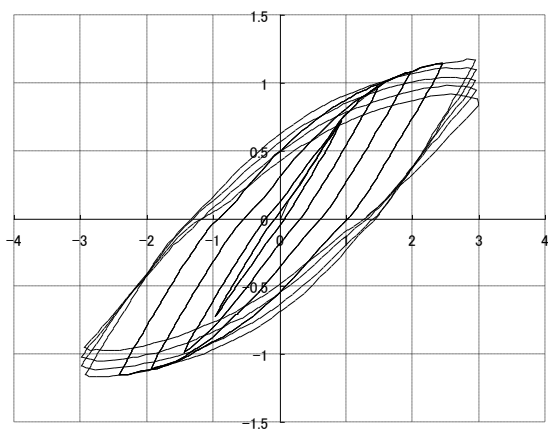
ID=89



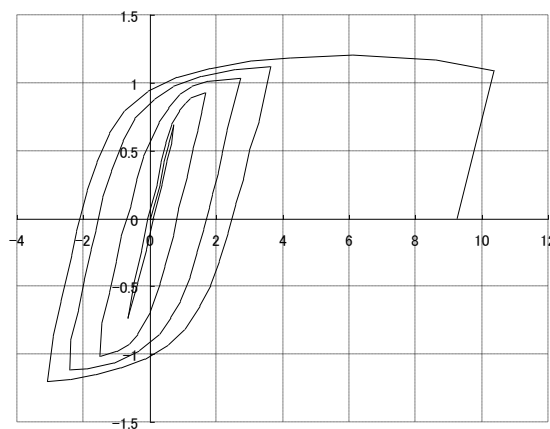
ID=87



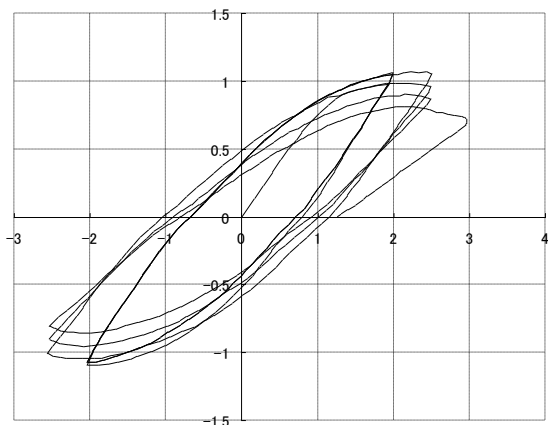
ID=90



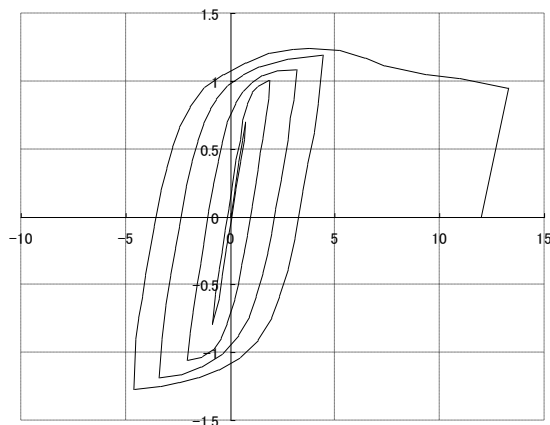
ID=91



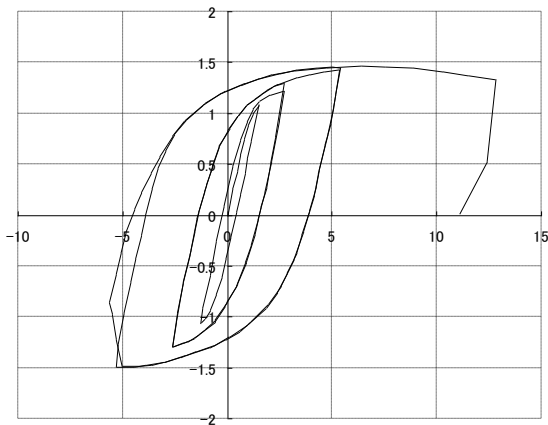
ID=94



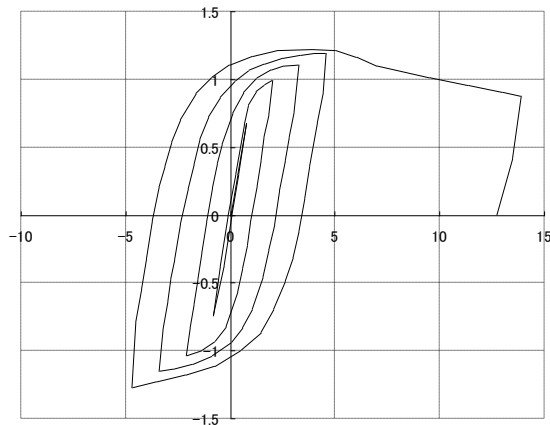
ID=92



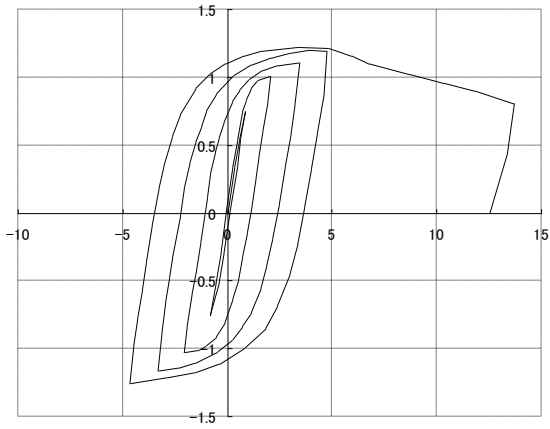
ID=95



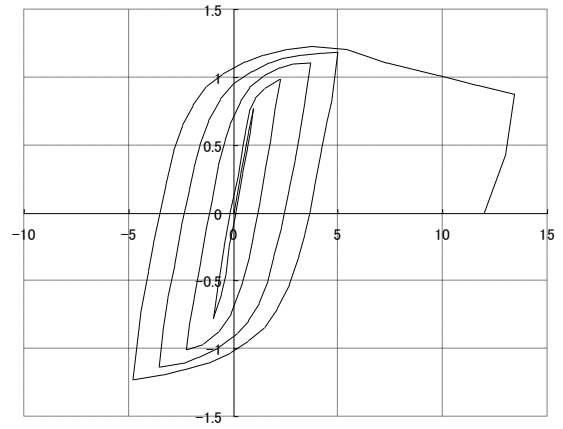
ID=93



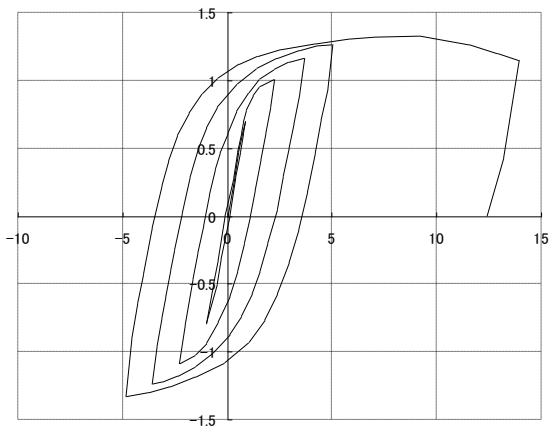
ID=96



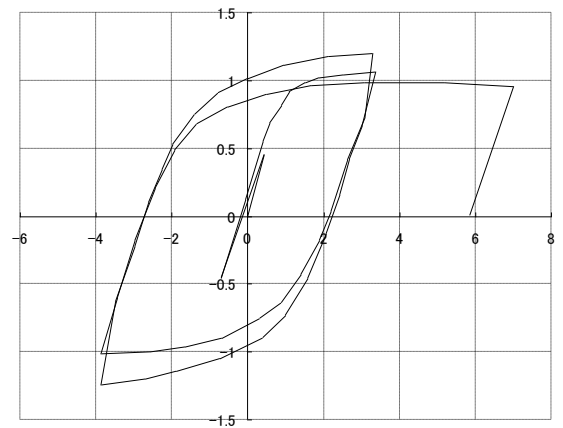
ID=97



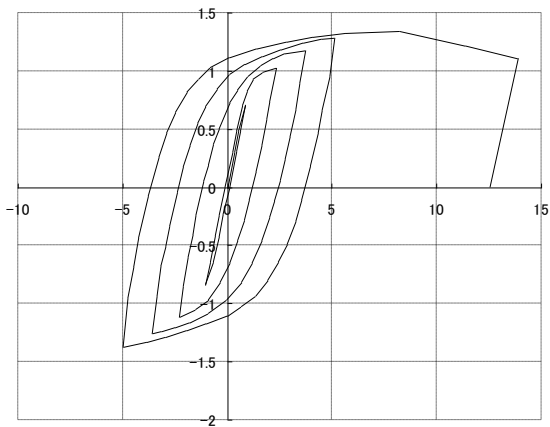
ID=100



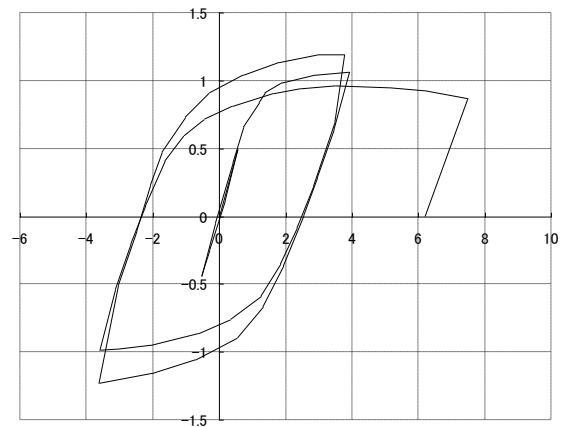
ID=98



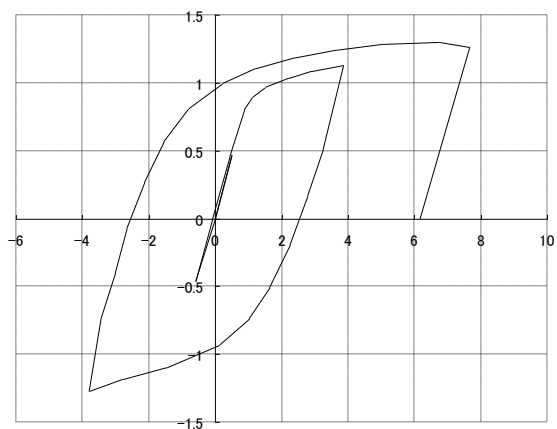
ID=101



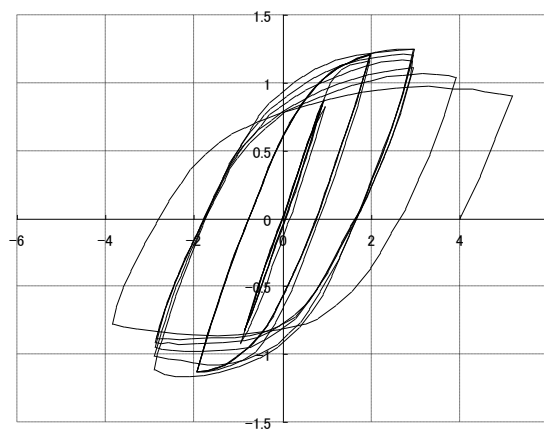
ID=99



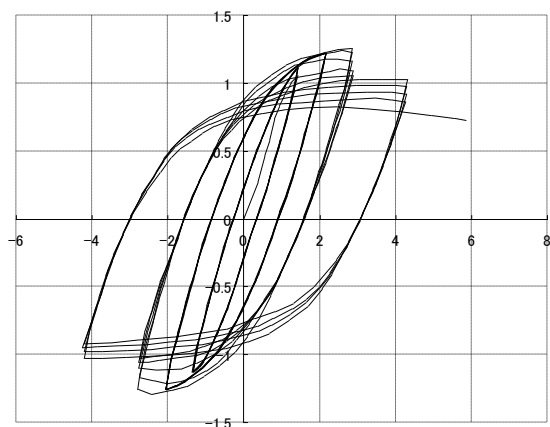
ID=102



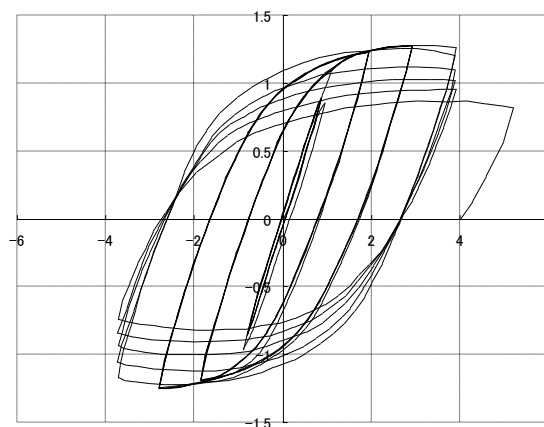
ID=103



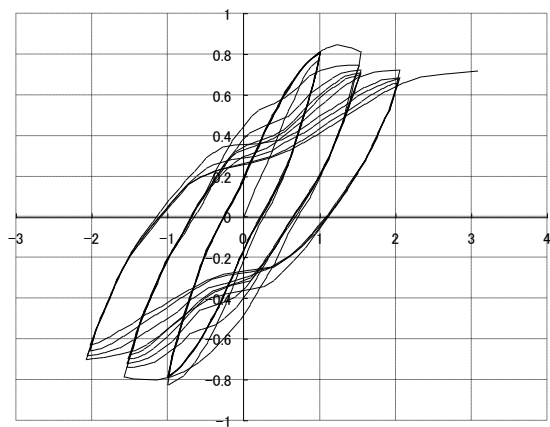
ID=106



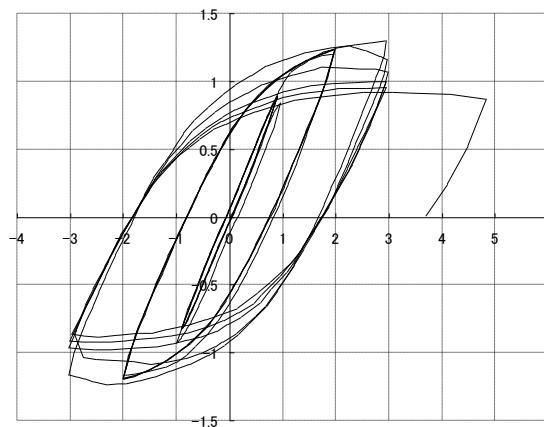
ID=104



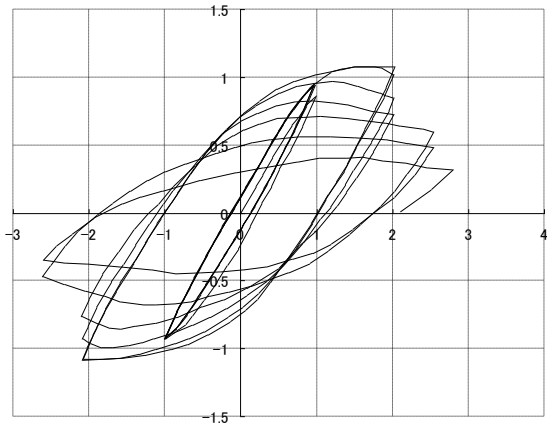
ID=107



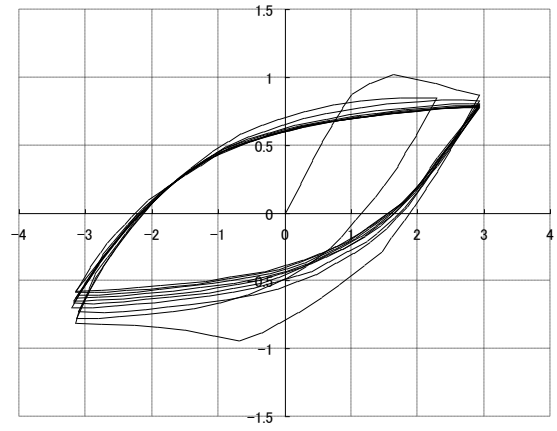
ID=105



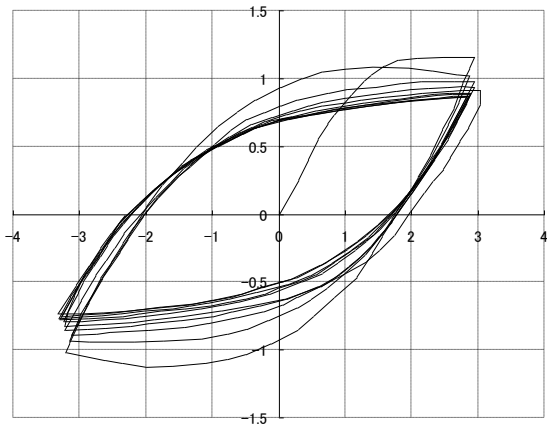
ID=108



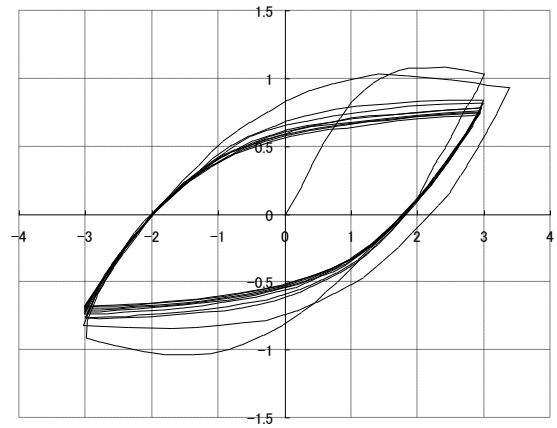
ID=109



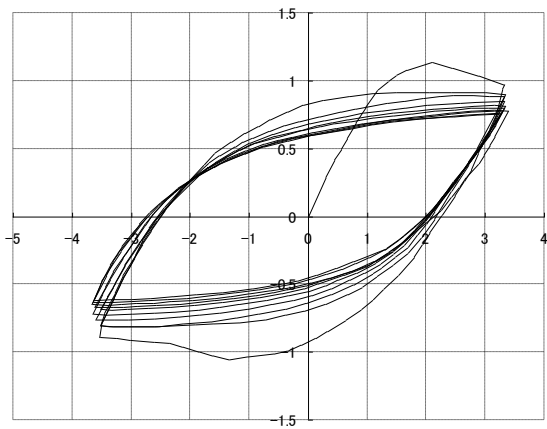
ID=112



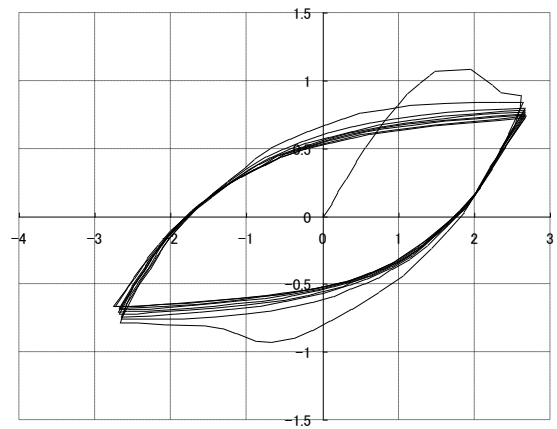
ID=110



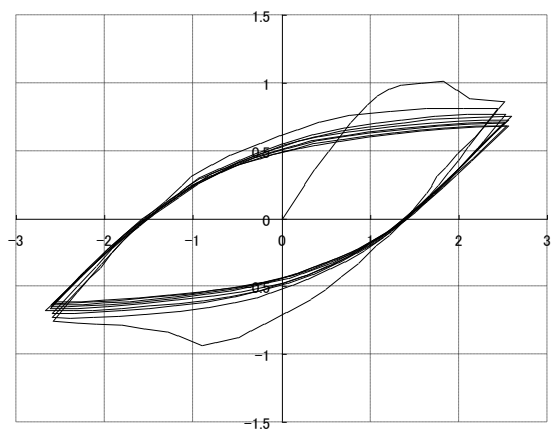
ID=113



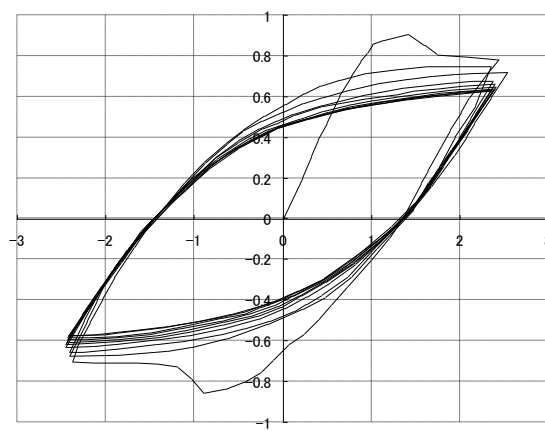
ID=111



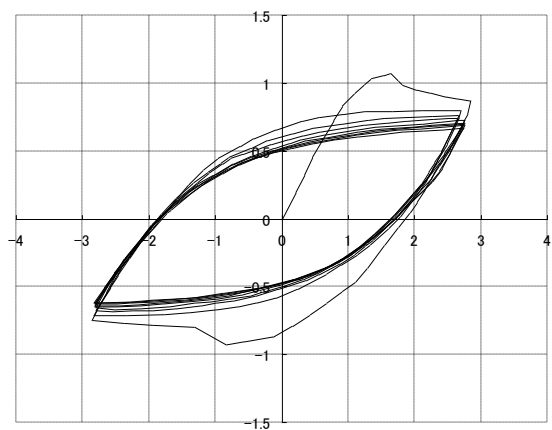
ID=114



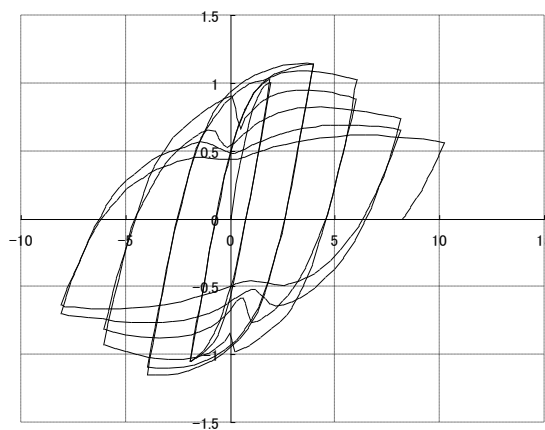
ID=115



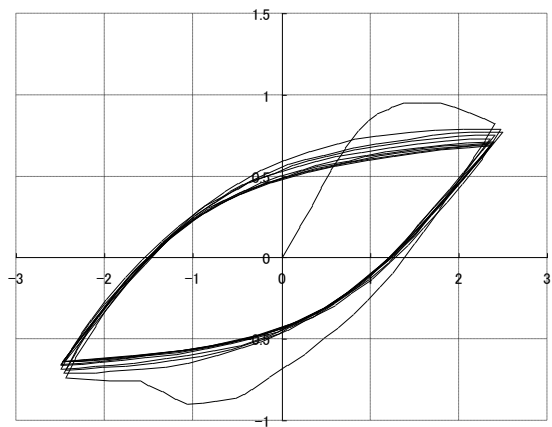
ID=118



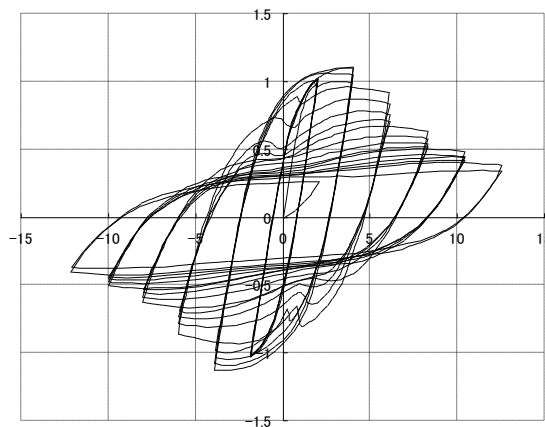
ID=116



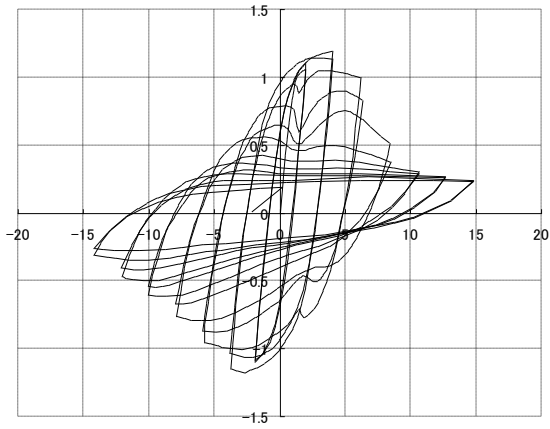
ID=119



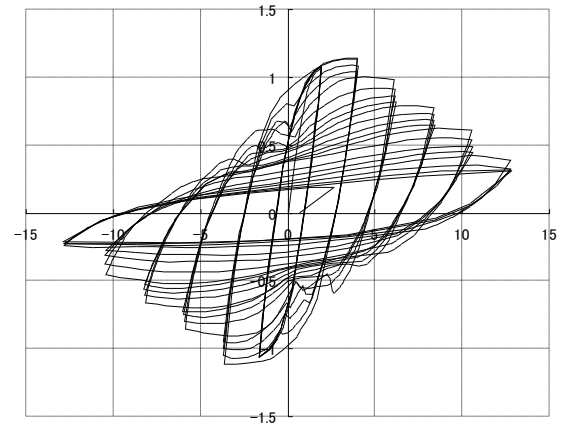
ID=117



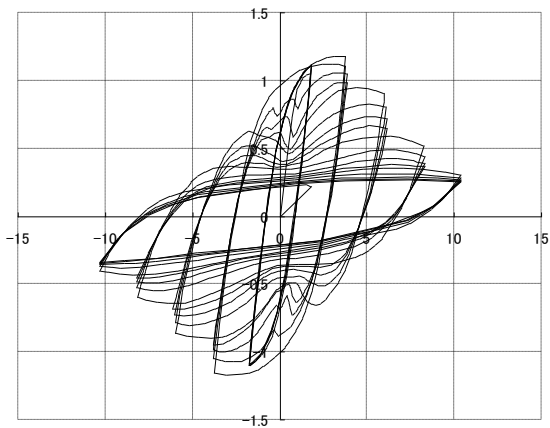
ID=120



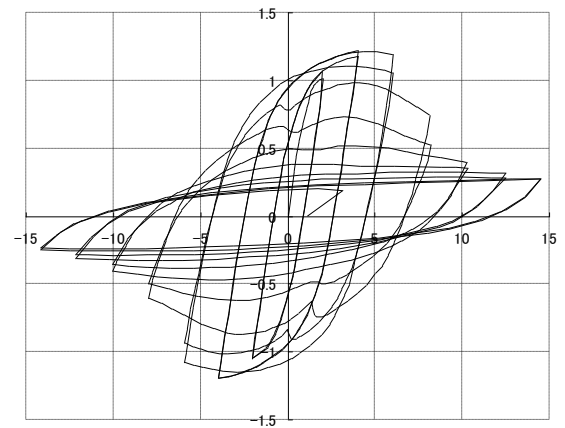
ID=121



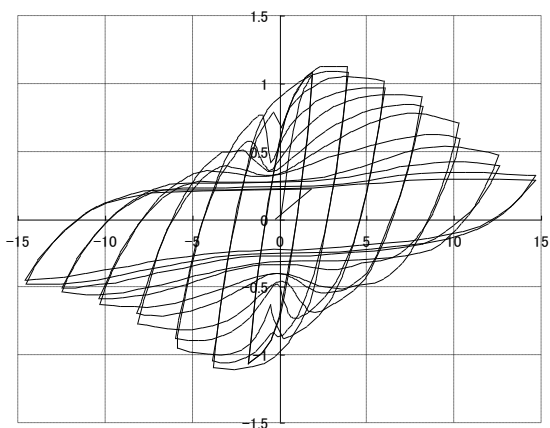
ID=124



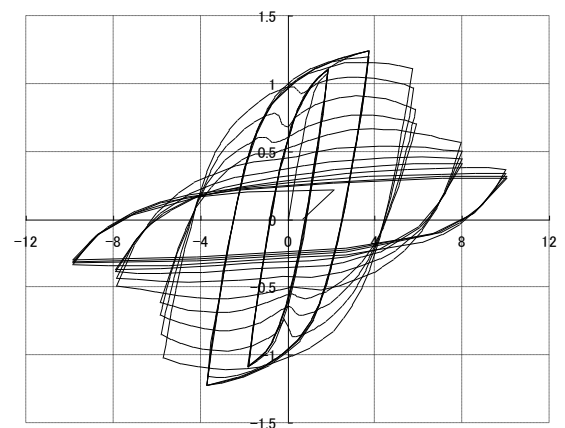
ID=122



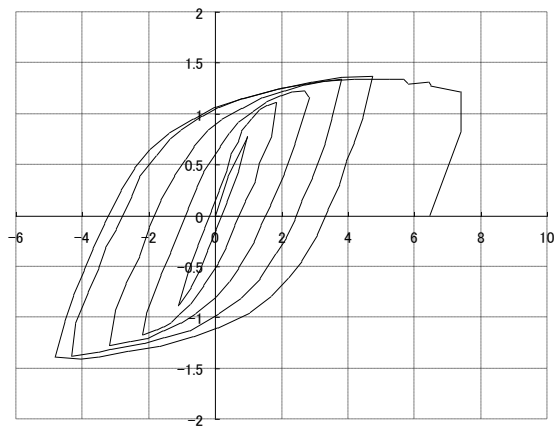
ID=125



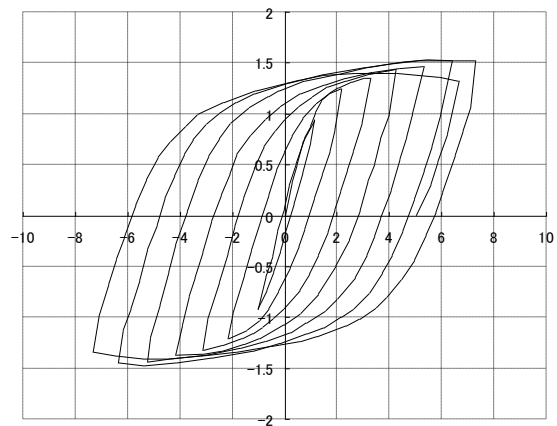
ID=123



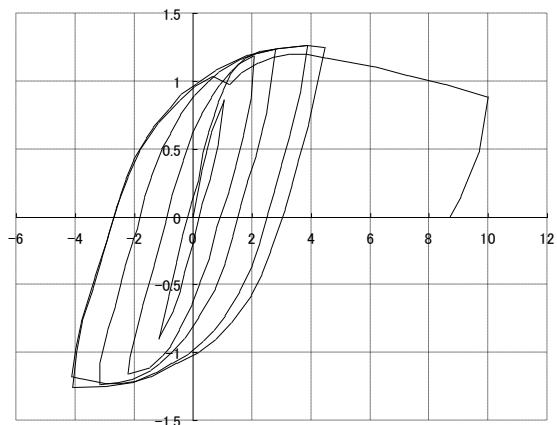
ID=126



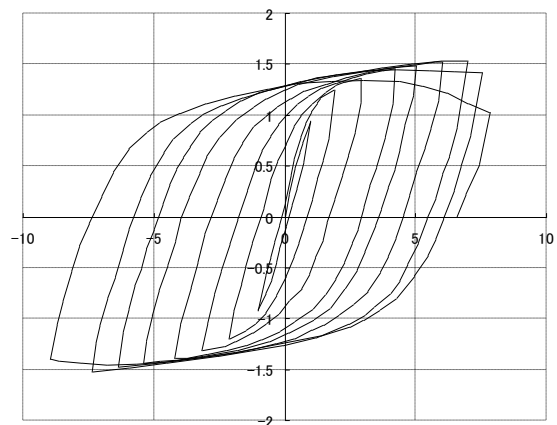
ID=127



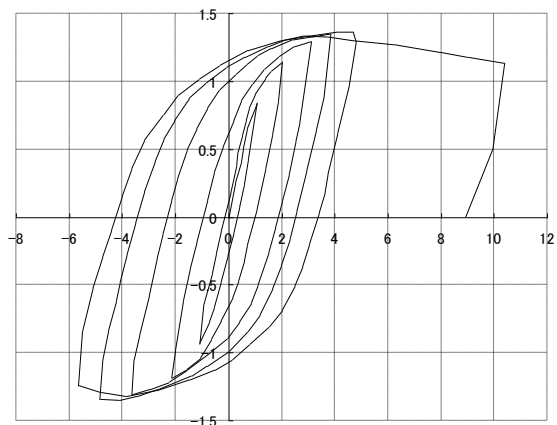
ID=130



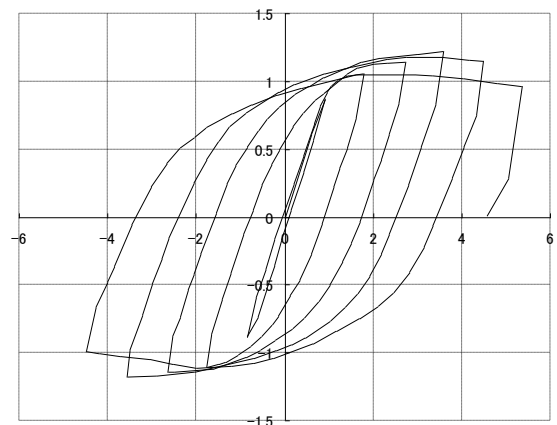
ID=128



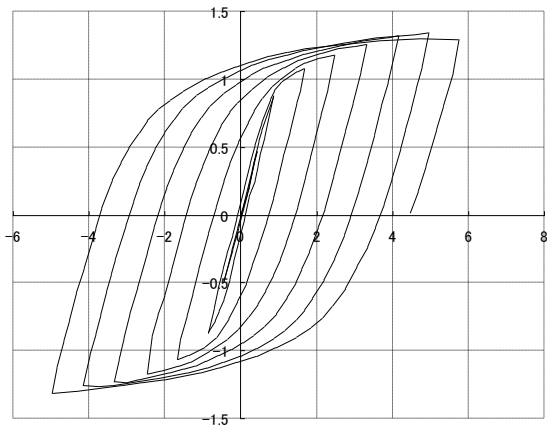
ID=131



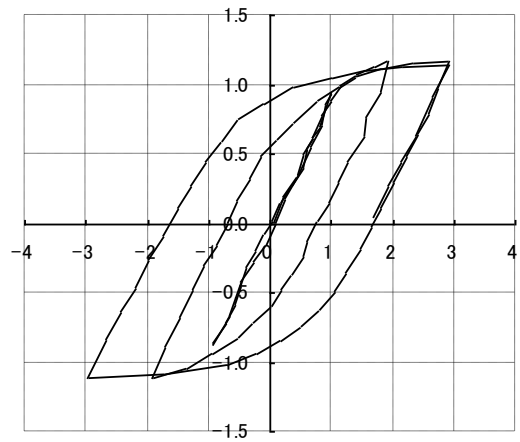
ID=129



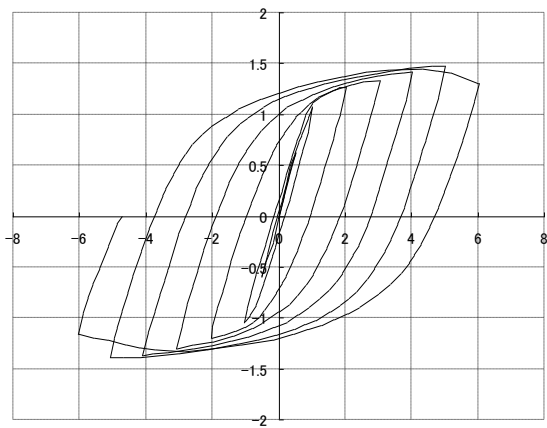
ID=132



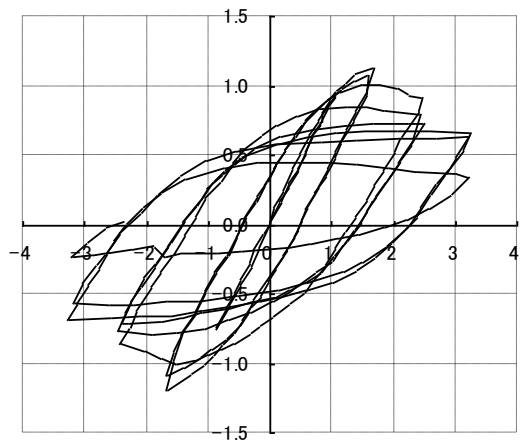
ID=133



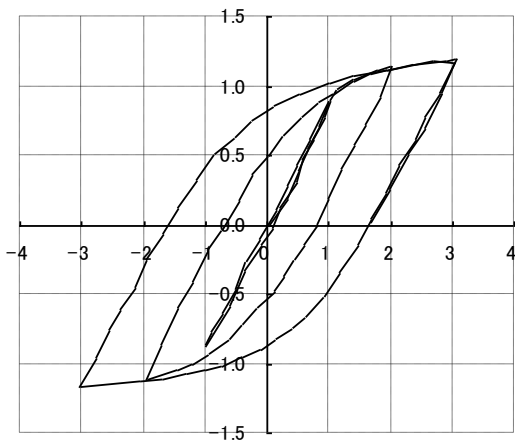
ID=136



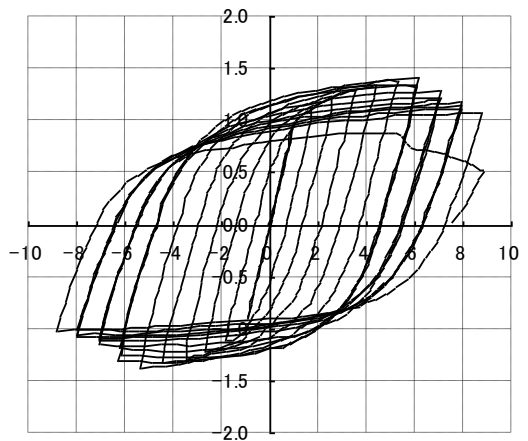
ID=134



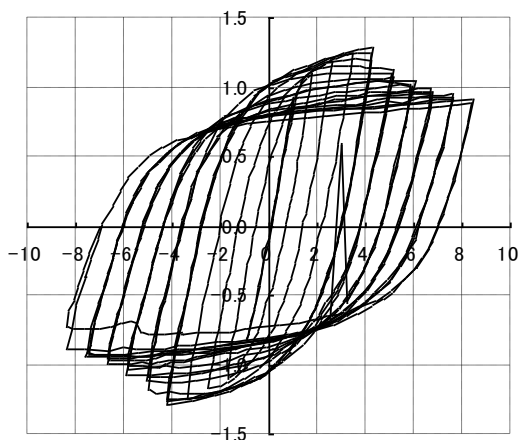
ID=137



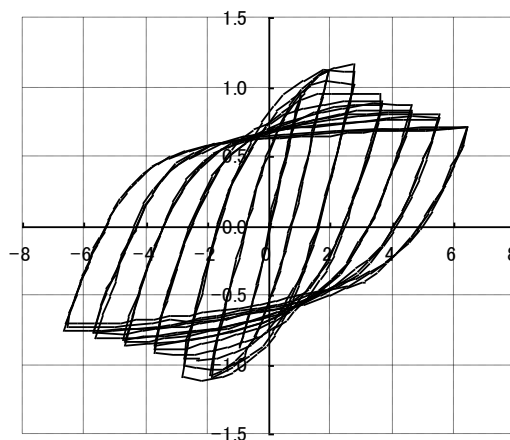
ID=135



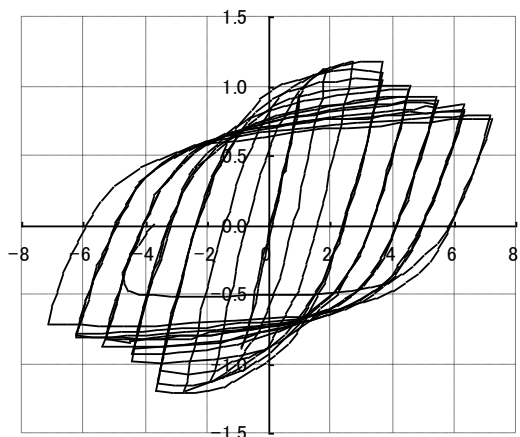
ID=138



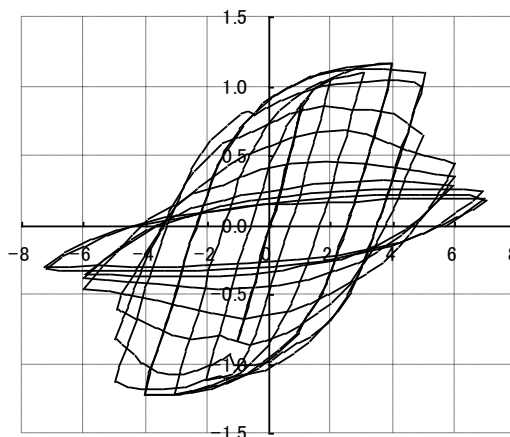
ID=139



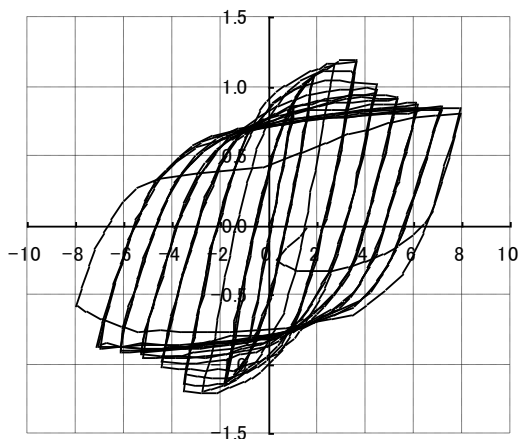
ID=142



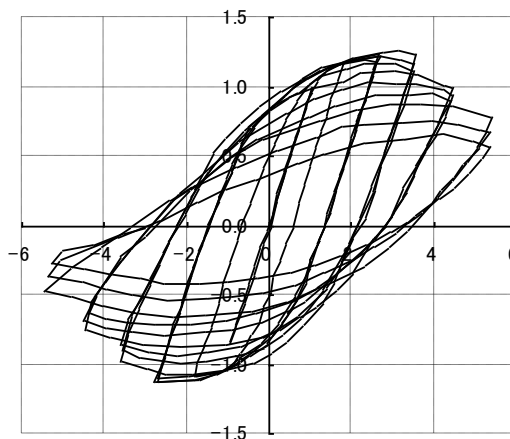
ID=140



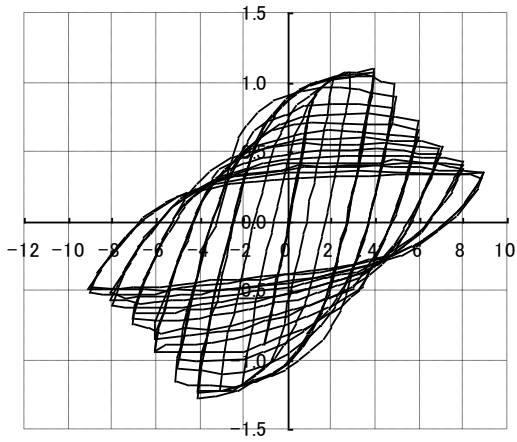
ID=143



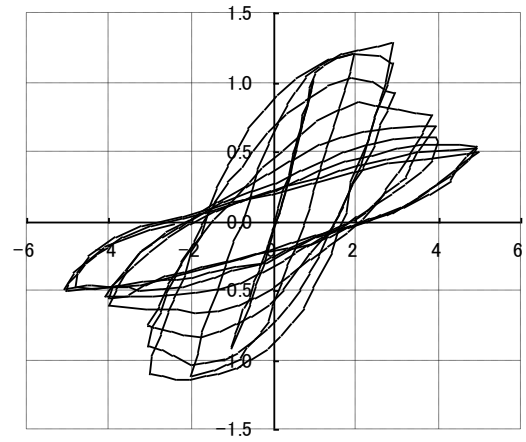
ID=141



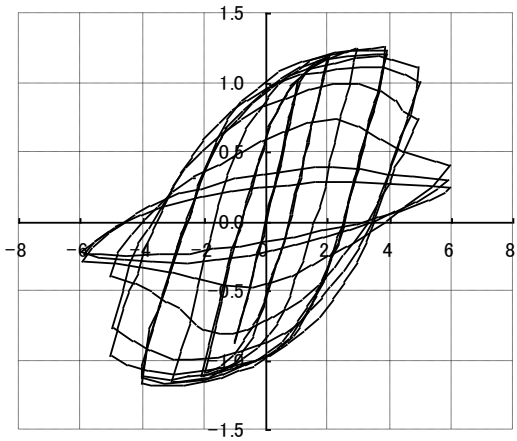
ID=144



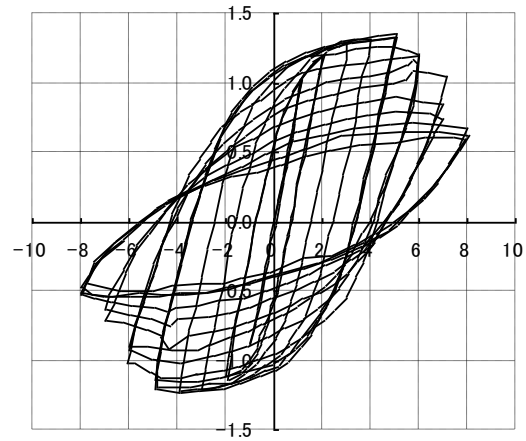
ID=145



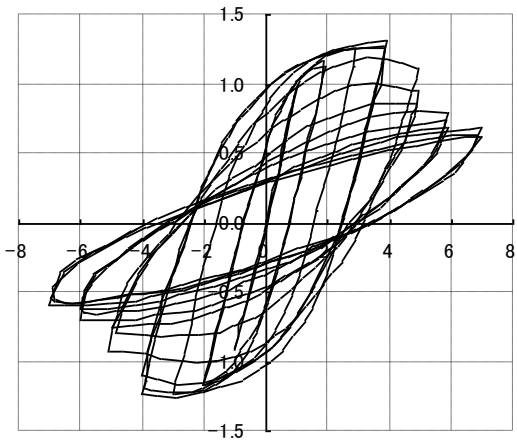
ID=148



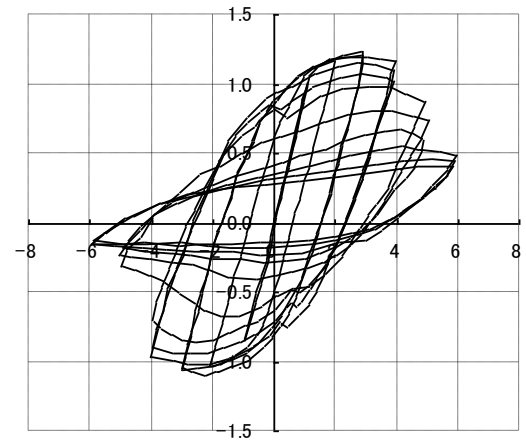
ID=146



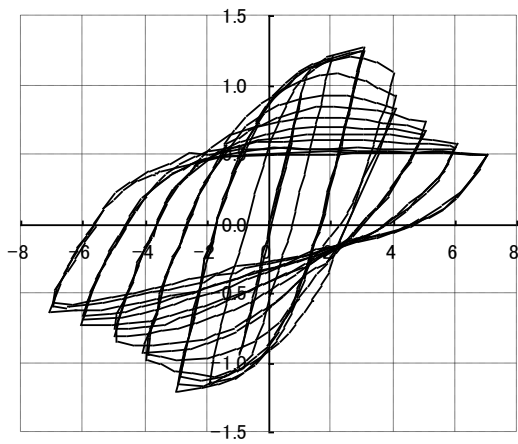
ID=149



ID=147



ID=150



ID=151

図 A-1 H形鋼梁の荷重変形関係 [A-1]

A.2 繰返し塑性振幅を受ける角形鋼管柱のデータベース

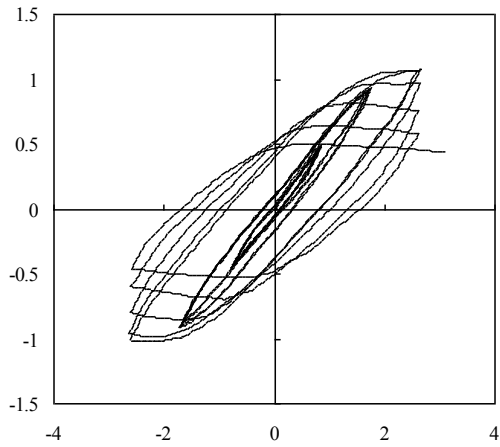
2章で検討した繰返し塑性振幅を受ける角形鋼管柱の既往実験のデータベースについて、各実験データから格納したデータを表 A-2 に、各試験体の荷重変形関係を図 A-2 に示す。なお、荷重変形関係は縦軸を M/M_{pc} で、横軸を θ/θ_{pc} で示している。

用語や記号の説明

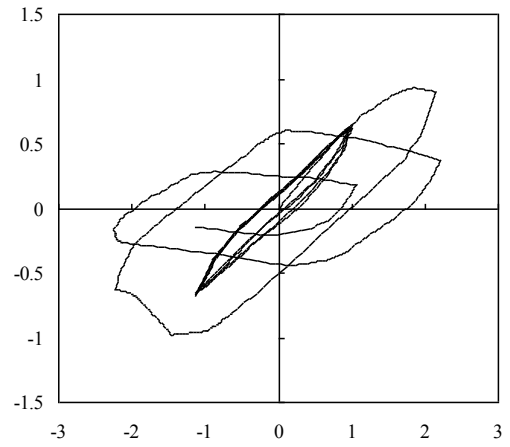
試験体 ID	データベース上の試験体 ID
試験体名	既往の文献における試験体名
試験体形状	B : 断面の幅, t : 板厚, L : せん断スパン
加工方法	各試験体の製造工程・製造方法, (1) 冷間成形, (2) 溶接組立
材料特性	σ_y : 降伏強さ, σ_u : 引張強度, E : 初期ヤング係数
一般化細長比 λ_x	$\lambda_x = \frac{1}{\pi} \frac{L}{i_x} \sqrt{\varepsilon_y}$ (ε_y : 降伏歪)
一般化幅厚比 β	$\beta = b/t \sqrt{\varepsilon_y}$
軸力比	N/N_y (N_y : 降伏軸力, N : 作用軸力)
幅厚比区分	部材ランクと LSD 指針による板要素の幅厚比区分
右添え字	m : 最大耐力点
左添え字	s : 骨格曲線, c : 累積変形曲線
M/M_{pc}	耐力 (M : 荷重, M_{pc} : 軸力を考慮した全塑性モーメント)
θ/θ_{pc}	変形 (θ : 回転角, θ_{pc} : 弾性勾配を仮定したときの M_{pc} 時の回転角)
${}_s\mu$	骨格曲線部における累積塑性率
${}_s\eta$	骨格曲線部における累積塑性変形倍率
η^*	累積変形曲線における各サイクルの塑性率の総和
${}_c\mu$	累積変形曲線における累積塑性率
${}_c\eta$	累積変形曲線における累積塑性変形倍率
N	半サイクル数
N_e	有効半サイクル数
γ	変位振幅の偏り

表 A-2 繰返し塑性振幅を受ける角形鋼管柱のデータベース [A-2]

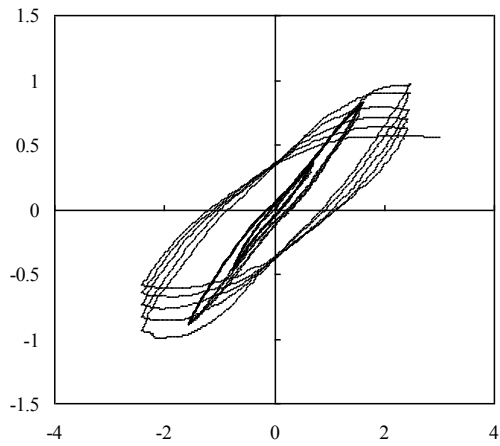
文献 番号	試験体名	断面寸法			せん断 スパン	材料特性			軸力比	載荷 形式	載荷ハ ターン	幅厚比 区分	実験結果							
		B	t	r		鋼材種	加工方法	σ_y					σ_{max}	E	M_m/M_{pc}	μ_m	η^*	η_m	η_{m1}	γ_m
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[Mpa]	[Mpa]	[Gpa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	
10	253c	150	6.00	750	STKR400	(1)	456	516	205	0.30	(1)	(2)	P-I-2	1.07	1.66	9.76	1.29	7.29	0.59	11
	331c	150	4.50	750	STKR400	(1)	440	502	205	0.10	(1)	(2)	P-II	1.00	1.60	7.26	1.13	4.30	0.58	10
	333c	150	4.50	750	STKR400	(1)	440	502	205	0.30	(1)	(2)	P-II	0.96	1.26	3.69	0.77	1.79	0.64	10
	335c	150	4.50	750	STKR400	(1)	440	502	205	0.45	(1)	(2)	P-II	0.98	1.38	5.60	0.92	3.24	0.51	10
13	C1-2	50	3.20	257	SS400	(2)	360	413	205	0.30	(1)	(2)	P-I-1	1.36	11.83	29.42	14.06	33.03	0.60	6
	C1-3	50	3.20	257	SS400	(2)	360	413	205	0.30	(1)	(6)	P-I-1	1.51	16.45	37.51	22.24	46.37	0.61	5
	C1-5	50	3.20	257	SS400	(2)	360	413	205	0.30	(1)	(2)	P-I-1	1.37	14.84	35.23	18.80	41.88	0.56	4
	C1-8	50	3.20	257	SS400	(2)	360	413	205	0.30	(1)	(6)	P-I-1	1.40	12.56	29.53	15.29	36.92	0.59	2
	C1-9	50	3.20	257	SS400	(2)	360	413	205	0.30	(1)	(1)	P-I-1	1.42	8.24	17.85	10.11	21.27	0.55	3
	C1-10	50	3.20	257	SS400	(2)	360	413	205	0.30	(1)	(1)	P-I-1	1.69	9.97	25.68	14.36	34.04	0.60	3
	C2-2	50	2.30	257	SS400	(2)	379	379	205	0.15	(1)	(2)	P-I-1	0.98	3.88	11.91	2.96	9.47	0.58	3
	C2-3	50	2.30	257	SS400	(2)	379	379	205	0.15	(1)	(6)	P-I-1	0.98	1.69	6.50	1.44	5.52	0.60	3
	C2-5	50	2.30	257	SS400	(2)	379	379	205	0.15	(1)	(5)	P-I-1	1.01	2.33	10.34	2.11	9.13	0.60	3
	C2-6	50	2.30	257	SS400	(2)	379	379	205	0.15	(1)	(6)	P-I-1	1.06	3.36	5.07	2.98	4.59	0.65	2
C2-7	50	2.30	257	SS400	(2)	379	379	205	0.15	(1)	(4)	P-I-1	0.98	4.49	13.01	3.67	11.80	0.59	2	
15	22S0510	100	4.50	1000	STKR400	(1)	332	403	205	0.05	(1)	(1)	P-I-1	1.22	4.89	4.89	4.65	4.65	1.00	1
	22S1010	100	4.50	1000	STKR400	(1)	332	403	205	0.10	(1)	(1)	P-I-1	1.21	3.32	3.32	3.10	3.10	1.00	1
	22S1510	100	4.50	1000	STKR400	(1)	332	403	205	0.15	(1)	(1)	P-I-1	1.23	2.90	2.90	2.76	2.76	1.00	1
	22S2010	100	4.50	1000	STKR400	(1)	332	403	205	0.20	(1)	(1)	P-I-1	1.20	3.01	3.01	2.61	2.61	1.00	1
16	22S0513	100	4.50	1000	STKR400	(1)	332	-	196	0.05	(1)	(1)	P-I-1	1.11	7.20	10.50	6.49	9.82	0.66	2
	22S1013	100	4.50	1000	STKR400	(1)	332	-	196	0.10	(1)	(1)	P-I-1	1.16	4.20	4.20	3.86	3.86	1.00	1
	22S1513	100	4.50	1000	STKR400	(1)	443	-	206	0.15	(1)	(1)	P-I-1	1.04	3.12	3.12	2.64	2.64	1.00	1
	22S2013	100	4.50	1000	STKR400	(1)	443	-	206	0.20	(1)	(1)	P-I-1	1.08	3.87	6.82	3.05	5.98	0.51	2
	31S0510	100	3.20	1000	STKR400	(1)	399	-	201	0.05	(1)	(1)	P-II	0.96	1.38	1.38	0.89	0.89	1.00	1
	31S1010	100	3.20	1000	STKR400	(1)	399	-	201	0.10	(1)	(1)	P-II	0.92	1.42	1.42	0.94	0.94	1.00	1
17	31S1510	100	3.20	1000	STKR400	(1)	399	-	201	0.15	(1)	(1)	P-II	0.99	1.62	2.39	1.05	1.70	0.62	2
	31S2010	100	3.20	1000	STKR400	(1)	324	-	171	0.20	(1)	(1)	P-II	1.08	2.10	3.08	1.67	2.54	0.66	2
	0°漸増試験体	300	9.00	1468	BCR295	(1)	330	426	205	0.14	(1)	(2)	P-II	1.14	1.98	7.68	1.86	7.30	0.54	6
	0°漸減試験体	300	9.00	1468	BCR295	(1)	330	426	205	0.14	(1)	(3)	P-II	1.15	1.86	1.86	1.93	1.93	1.00	1
18	0°試験体	300	9.00	1468	BCR295	(1)	330	426	205	0.15	(1)	(2)	P-II	1.21	1.88	3.21	1.68	2.69	0.77	3
	30°試験体	300	9.00	1468	BCR295	(1)	330	426	205	0.14	(1)	(2)	P-II	1.16	3.57	9.35	3.34	8.55	0.56	6
	45°試験体	300	9.00	1468	BCR295	(1)	330	426	205	0.15	(1)	(2)	P-II	1.18	2.53	7.06	2.25	6.47	0.51	4
	S-1701	200	###	1265	STKR400	(1)	425	483	205	0.10	(1)	(2)	P-I-1	1.00	3.95	30.24	3.46	23.39	0.58	17
19	S-1703	200	###	1265	STKR400	(1)	425	483	205	0.30	(1)	(2)	P-I-1	1.09	2.12	15.82	1.87	13.17	0.54	14
	S-2201	200	9.00	1265	STKR400	(1)	404	475	205	0.10	(1)	(2)	P-I-1	0.96	1.88	10.75	1.37	7.69	0.57	13
	S-2203	200	9.00	1265	STKR400	(1)	404	475	205	0.30	(1)	(2)	P-I-1	1.05	1.61	5.42	1.26	3.96	0.64	7
	S-3301	200	6.00	1265	STKR400	(1)	380	463	205	0.10	(1)	(2)	P-II	0.95	1.46	6.81	1.13	4.98	0.55	8
	S-3303	200	6.00	1265	STKR400	(1)	380	463	205	0.30	(1)	(2)	P-II	0.93	1.31	3.36	0.98	2.45	0.57	3
	PL-2	60	2.30	350	STKR400	(1)	390	500	205	0.30	(2)	(2)	P-I-2	1.25	4.35	5.55	3.95	4.80	0.88	3
20	PS-2	60	2.30	250	STKR400	(1)	390	500	205	0.30	(2)	(2)	P-I-2	1.23	6.54	9.08	4.94	6.81	0.82	5
	E22-5	125	5.65	795	STKR400	(1)	405	484	205	0.40	(1)	(1)	P-I-1	1.43	4.61	10.69	5.59	12.77	0.57	3
	E33-5	100	3.00	595	STKR400	(1)	347	471	205	0.30	(1)	(1)	P-I-2	1.16	1.64	1.64	1.64	1.64	1.00	1
	E42-3	125	3.00	795	STKR400	(1)	324	436	205	0.10	(1)	(1)	P-II	1.13	1.31	1.31	1.22	1.22	1.00	1
	E42-5	125	3.00	795	STKR400	(1)	324	436	205	0.30	(1)	(1)	P-II	0.95	1.28	1.28	1.02	1.02	1.00	1
21	t=3.2,δa=20	125	3.20	750	STKR400	(1)	411	472	205	0.30	(2)	(1)	ランク外	0.80	1.02	1.44	0.53	0.82	0.64	2
	t=3.2,δa=30	125	3.20	750	STKR400	(1)	411	472	205	0.30	(2)	(1)	ランク外	0.75	1.07	1.07	0.57	0.57	1.00	1
	t=4.5,δa=30	125	4.50	750	STKR400	(1)	366	447	205	0.30	(2)	(1)	P-I-2	0.96	2.60	5.34	1.75	3.89	0.56	3
	t=4.5,δa=45	125	4.50	750	STKR400	(1)	366	447	205	0.30	(2)	(1)	P-I-2	0.99	3.05	3.05	2.33	2.33	1.00	1
	t=6.0,δa=45	125	6.00	750	STKR400	(1)	345	440	205	0.30	(2)	(1)	P-I-1	1.37	4.69	9.55	4.85	9.94	0.63	3
	t=6.0,δa=60	125	6.00	750	STKR400	(1)	345	440	205	0.30	(2)	(1)	P-I-1	1.45	4.64	14.16	5.14	16.63	0.58	3
22	t=6.0,δa=75	125	6.00	750	STKR400	(1)	345	440	205	0.30	(2)	(1)	P-I-1	1.41	5.75	5.75	6.61	6.61	1.00	1
	N/Ny=0.2,L/D=4.8	125	4.50	300	STKR400	(1)	436	-	205	0.20	(2)	(2)	P-I-2	1.02	2.31	2.93	1.47	1.96	0.75	2
	N/Ny=0.4,L/D=4.8	125	4.50	300	STKR400	(1)	436	-	205	0.40	(2)	(2)	P-I-2	1.13	2.50	3.81	1.98	2.78	0.71	2
	N/Ny=0.2,L/D=6.4	125	4.50	400	STKR400	(1)	436	-	205	0.20	(2)	(2)	P-I-2	1.00	1.76	5.53	1.40	4.09	0.60	7
	N/Ny=0.4,L/D=6.4	125	4.50	400	STKR400	(1)	436	-	205	0.40	(2)	(2)	P-I-2	1.11	1.89	3.49	1.56	2.87	0.63	3
	N/Ny=0.2,L/D=8.0	125	4.50	500	STKR400	(1)	436	-	205	0.20	(2)	(2)	P-I-2	0.99	1.37	3.19	1.04	2.20	0.68	6
23	N/Ny=0.4,L/D=8.0	125	4.50	500	STKR400	(1)	436	-	205	0.40	(2)	(2)	P-I-2	0.99	1.03	3.32	0.71	2.37	0.55	5
	C-25-30(3)	150	5.72	700	SS400	(2)	318	432	205	0.30	(3)	(1)	P-I-1	1.26	2.21	8.06	2.06	8.08	0.55	3
	C-30-30(3)	150	5.72	850	SS400	(2)	318	432	205	0.30	(3)	(1)	P-I-1	1.24	1.78	1.78	1.73	1.73	1.00	1
	C-30-30(6)	150	5.72	850	SS400	(2)	318	432	205	0.30	(3)	(1)	P-I-1	1.25	2.26	2.26	2.23	2.23	1.00	1
24	C-35-15(3)	150	5.72	1050	SS400	(2)	318	432	205	0.15	(3)	(1)	P-I-1	1.17	1.90					



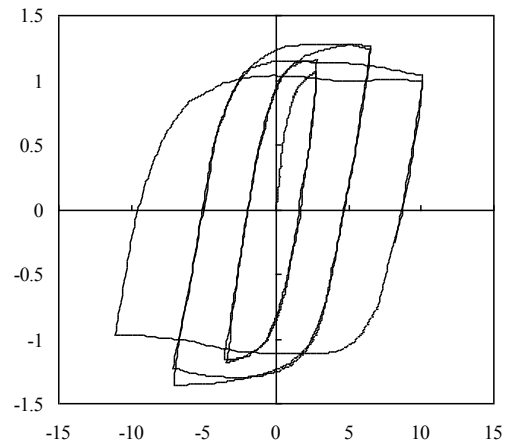
ID=1



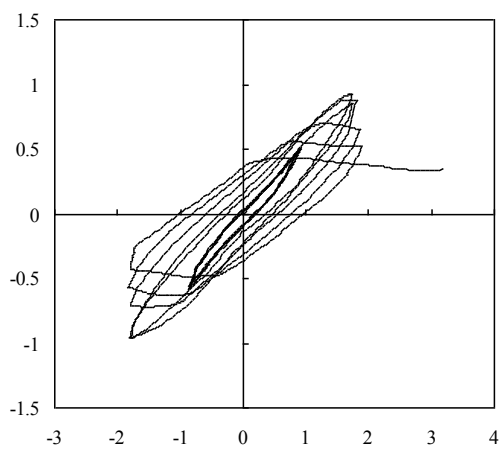
ID=4



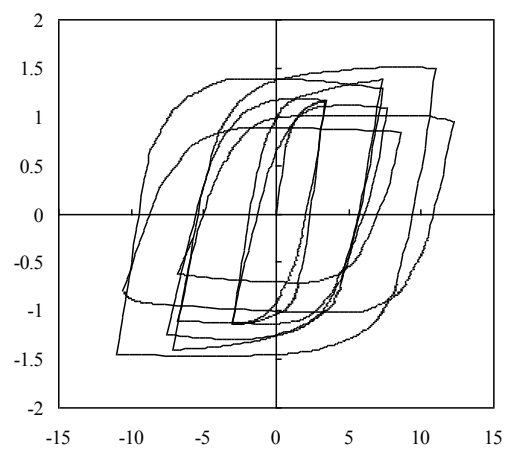
ID=2



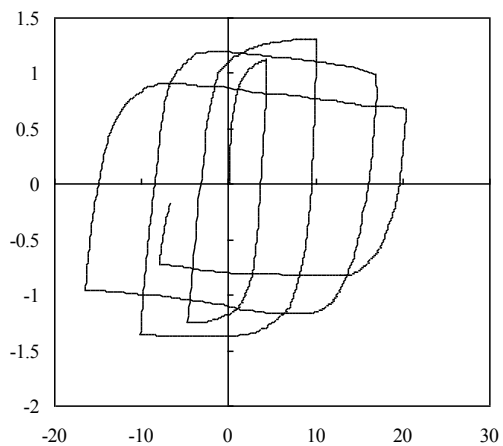
ID=5



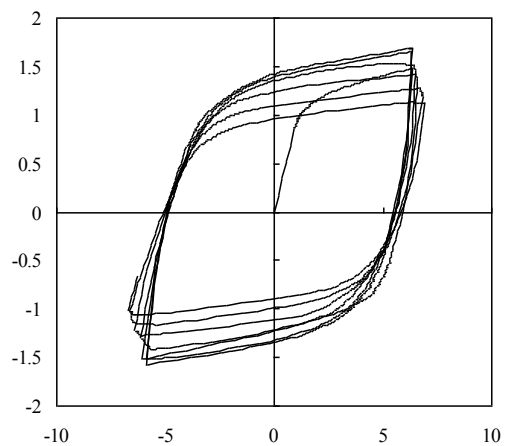
ID=3



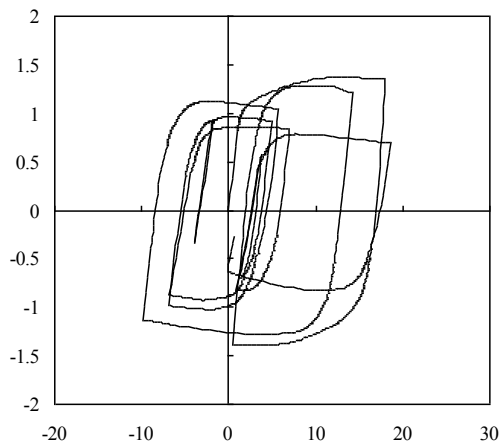
ID=6



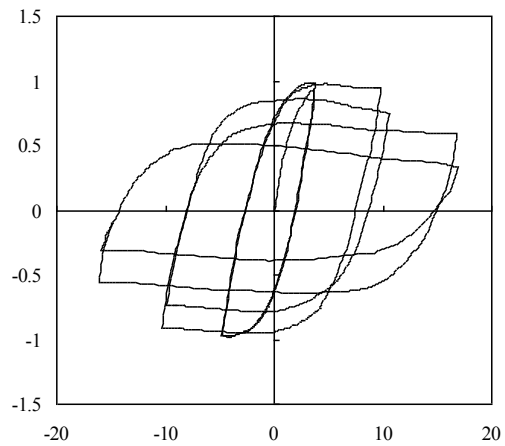
ID=7



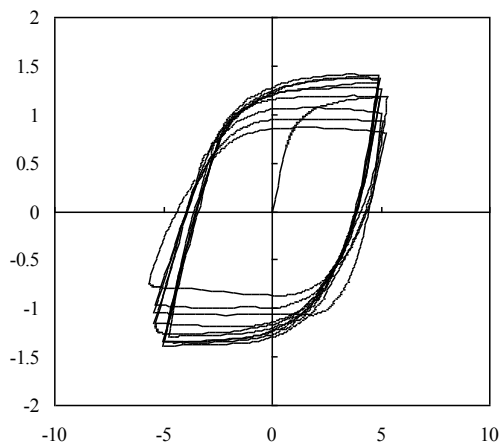
ID=10



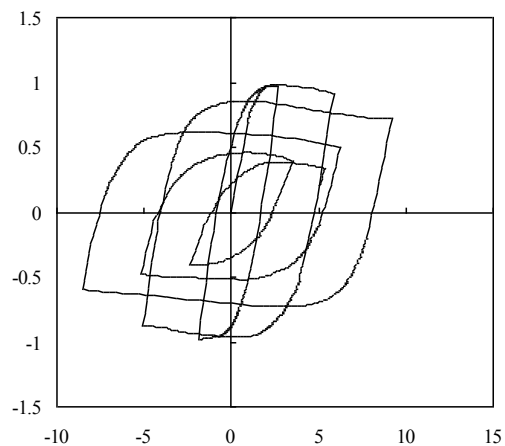
ID=8



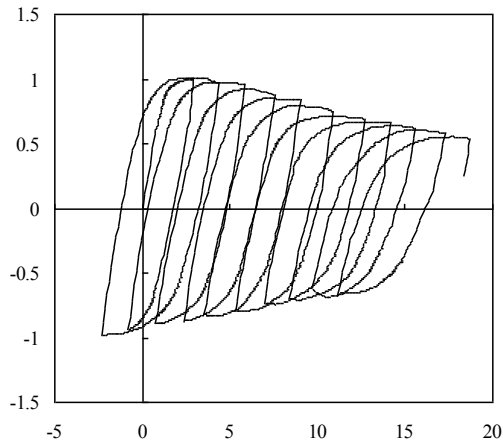
ID=11



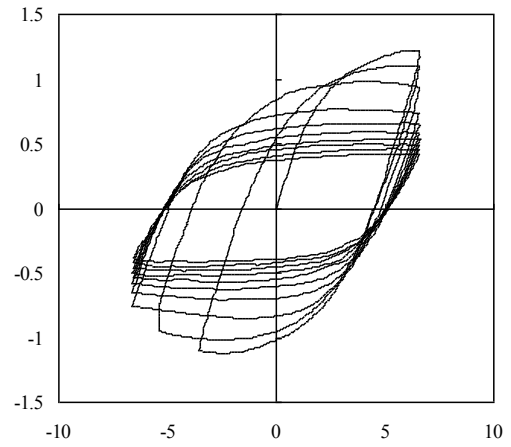
ID=9



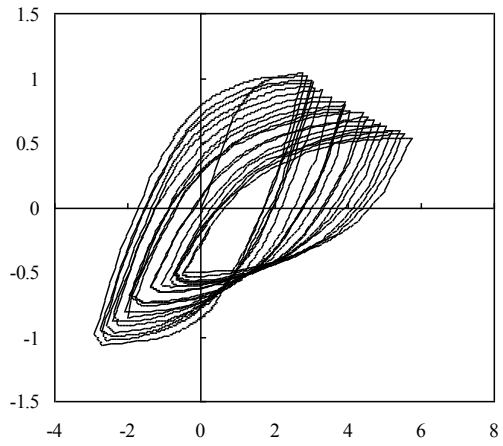
ID=12



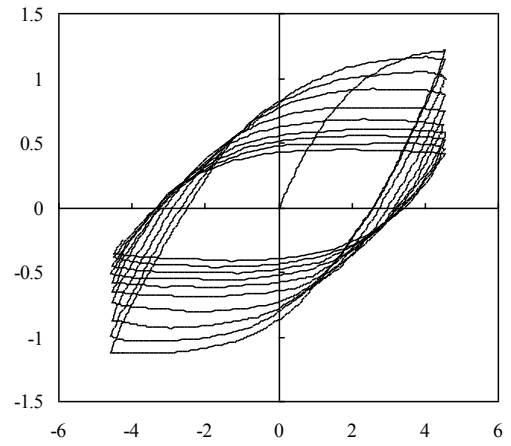
ID=13



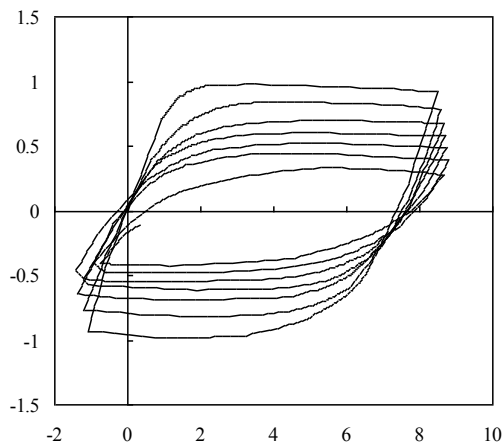
ID=16



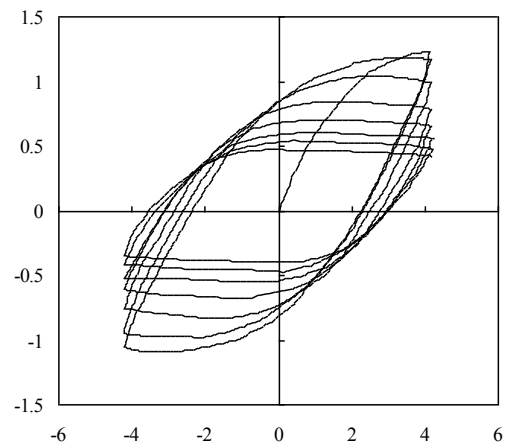
ID=14



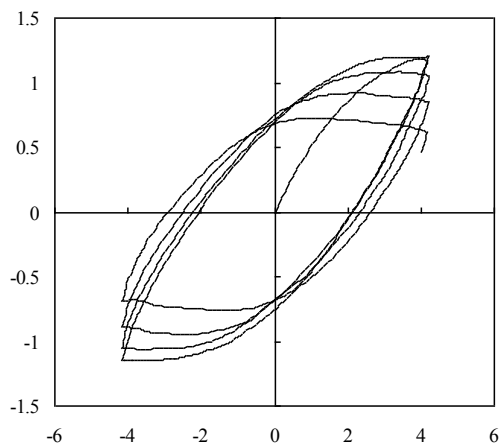
ID=17



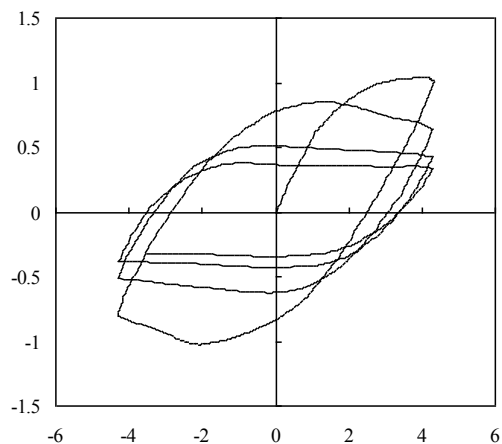
ID=15



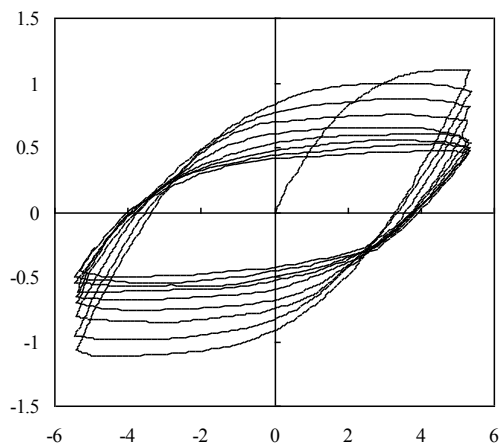
ID=18



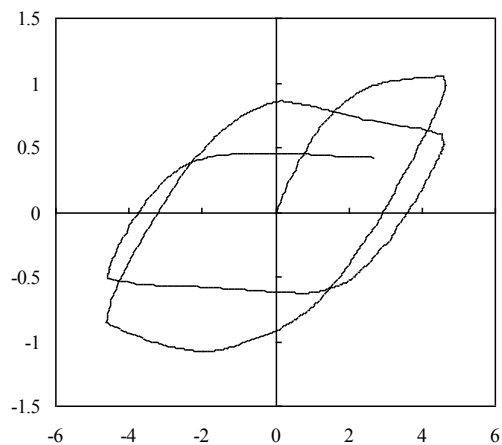
ID=19



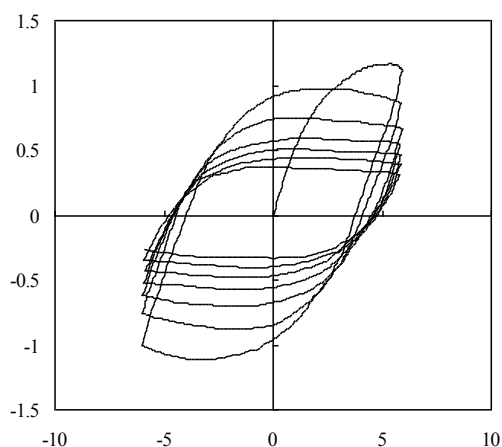
ID=22



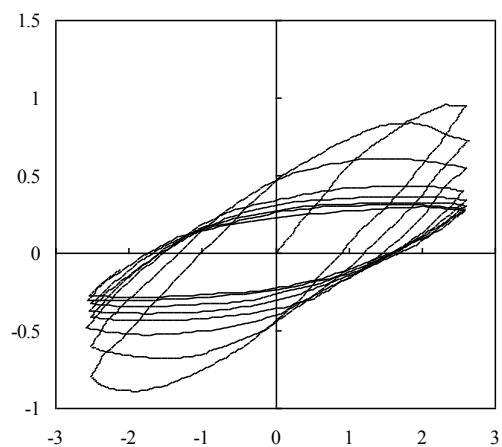
ID=20



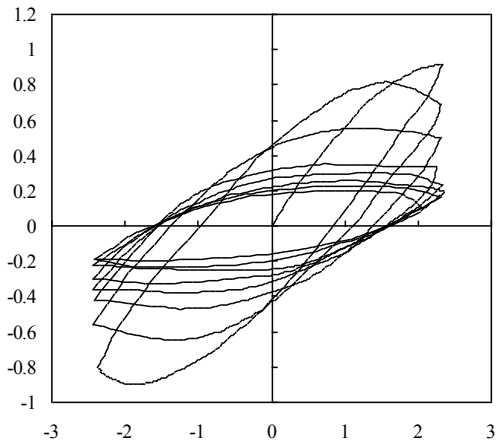
ID=23



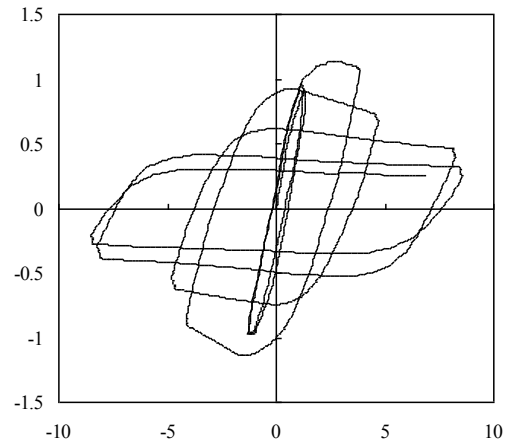
ID=21



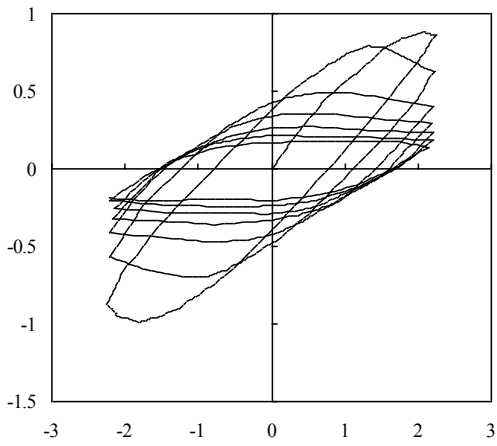
ID=24



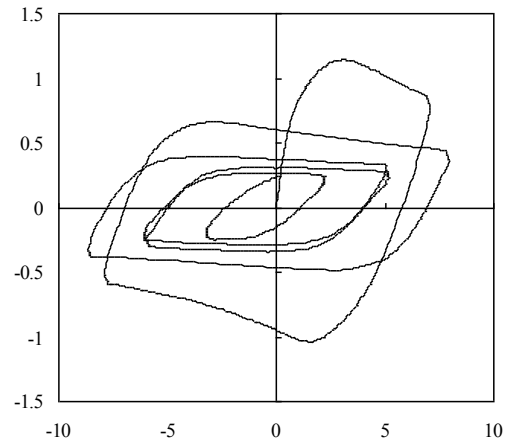
ID=25



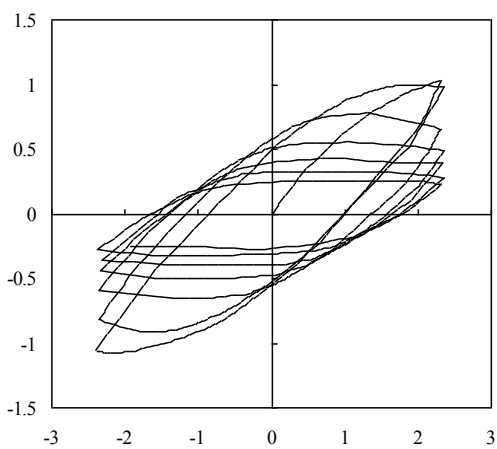
ID=28



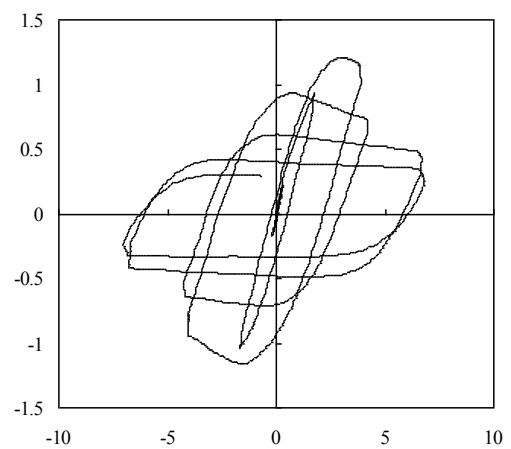
ID=26



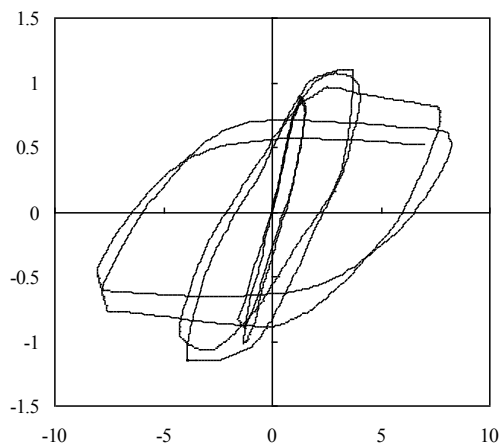
ID=29



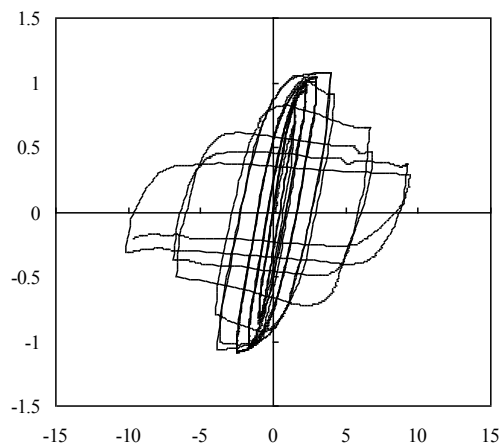
ID=27



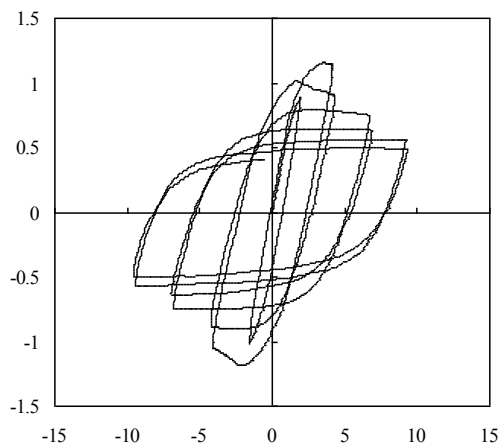
ID=30



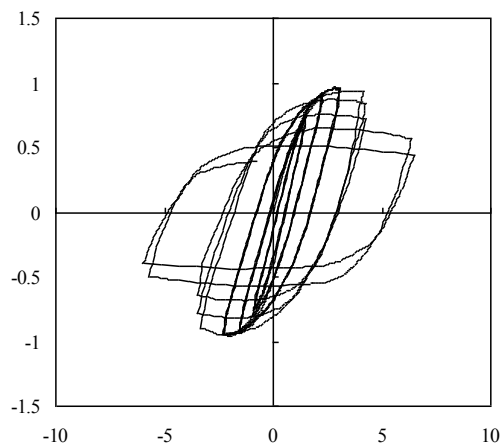
ID=31



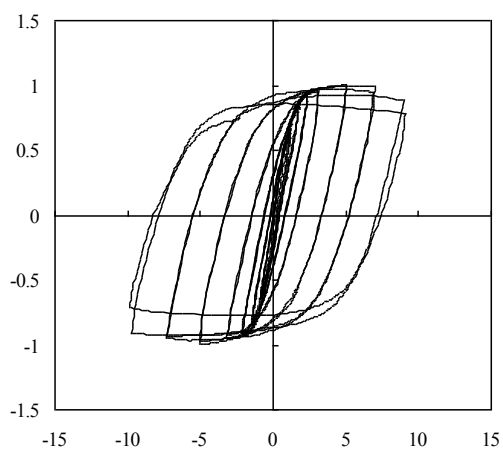
ID=34



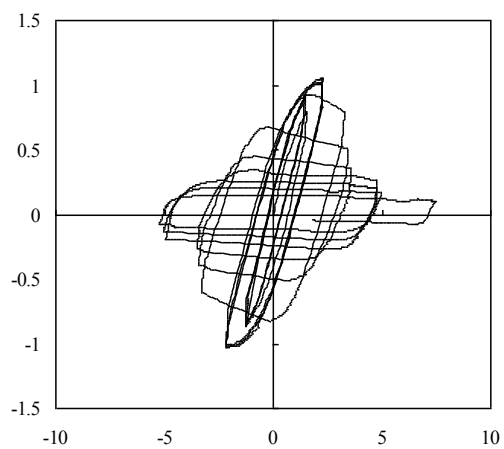
ID=32



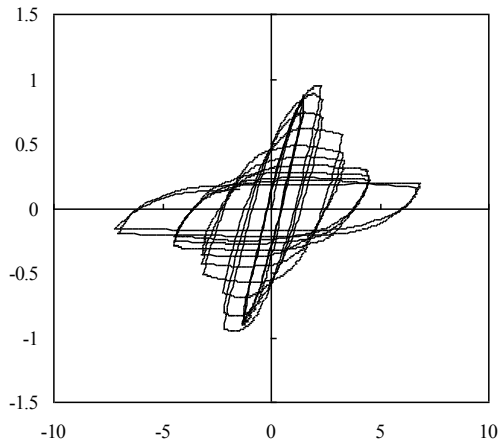
ID=35



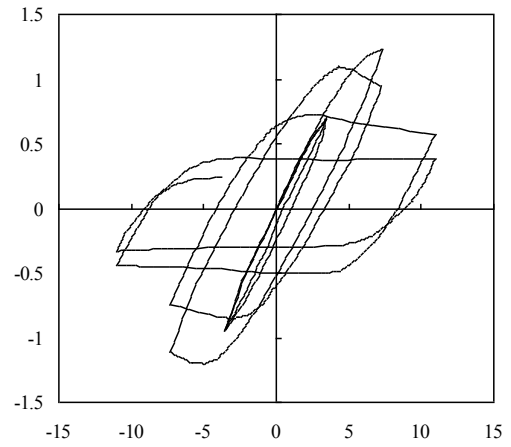
ID=33



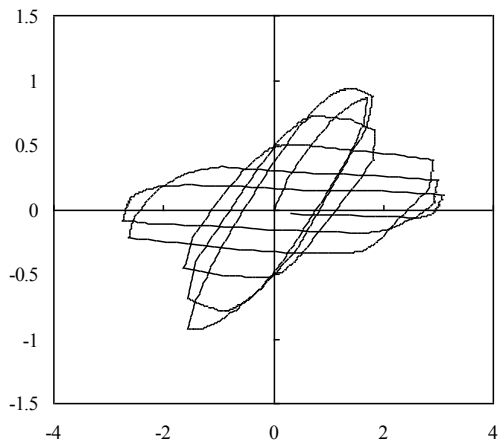
ID=36



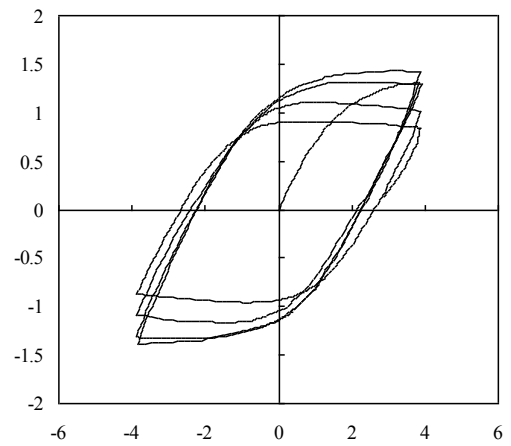
ID=37



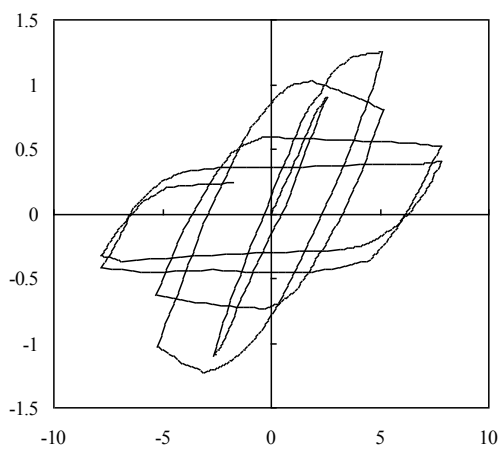
ID=40



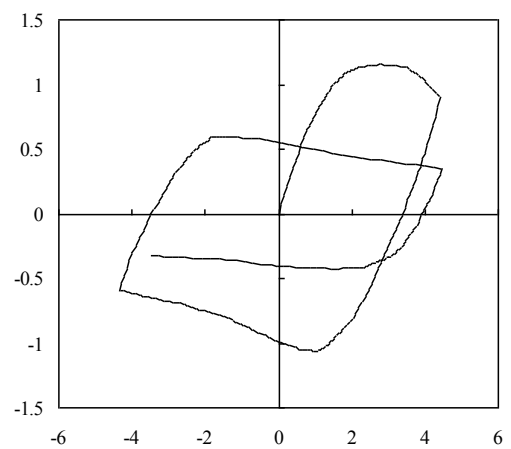
ID=38



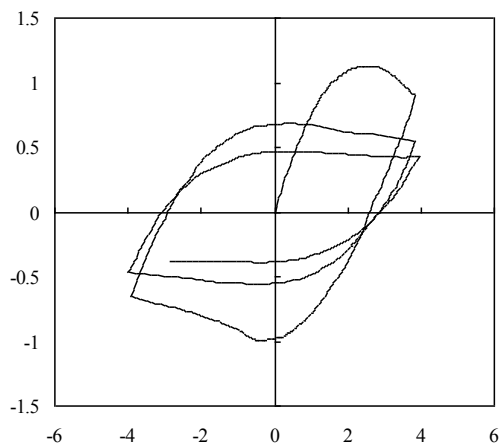
ID=41



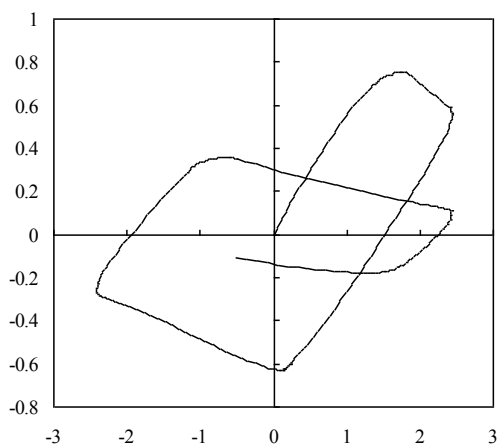
ID=39



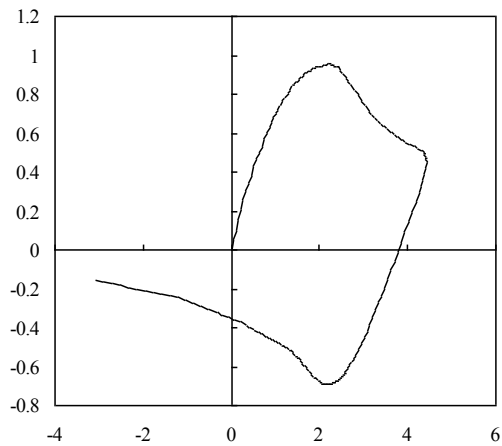
ID=42



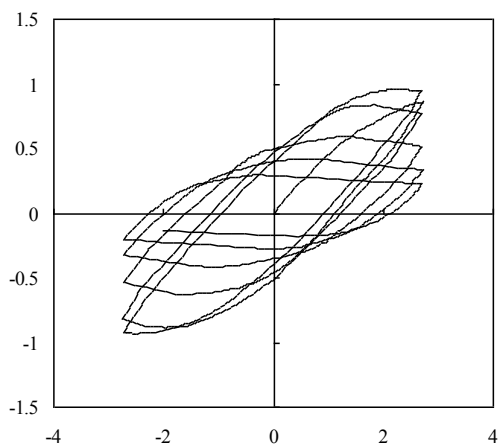
ID=43



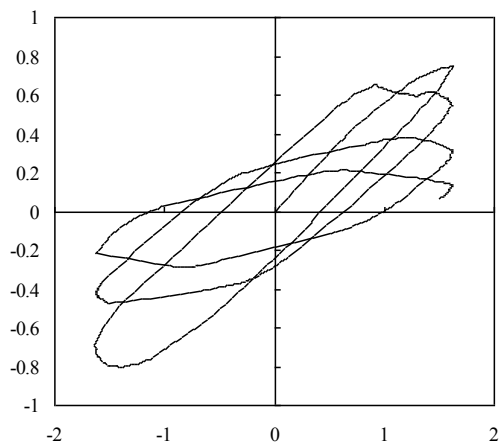
ID=46



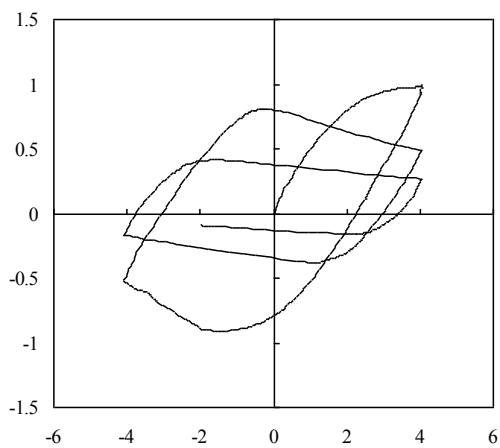
ID=44



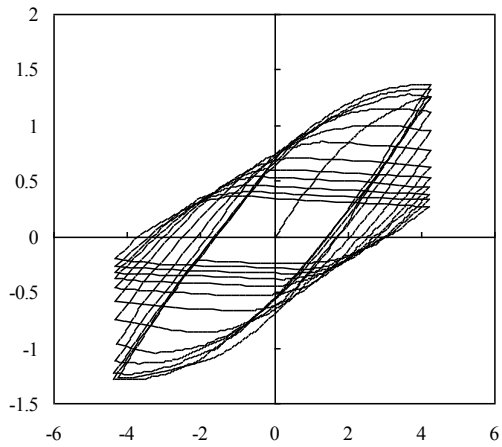
ID=47



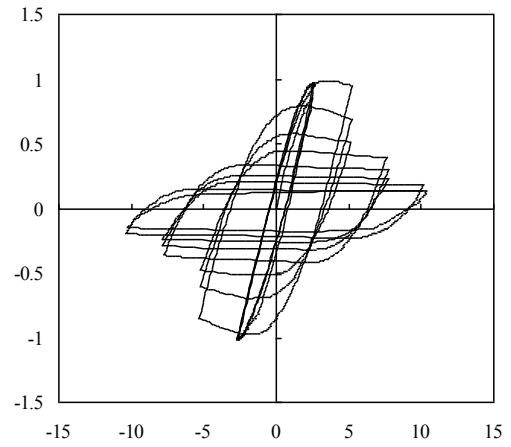
ID=45



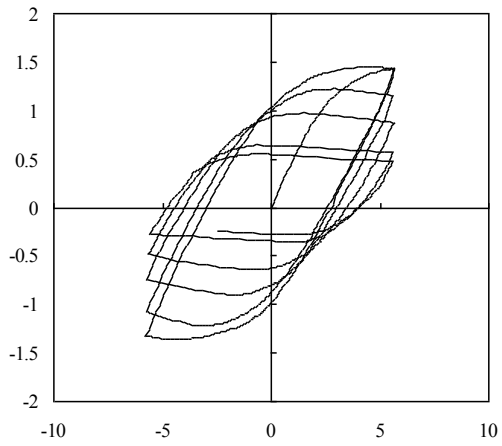
ID=48



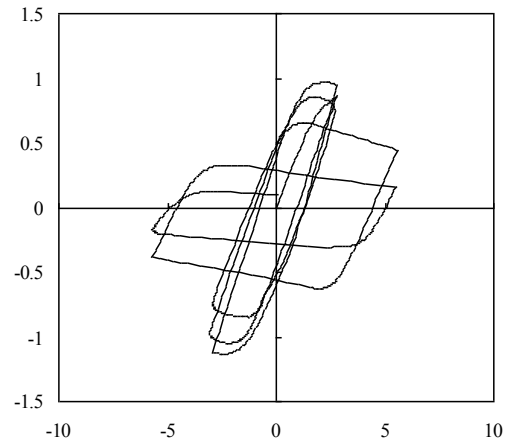
ID=49



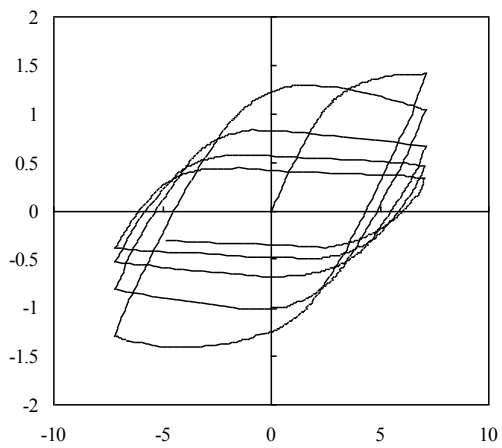
ID=52



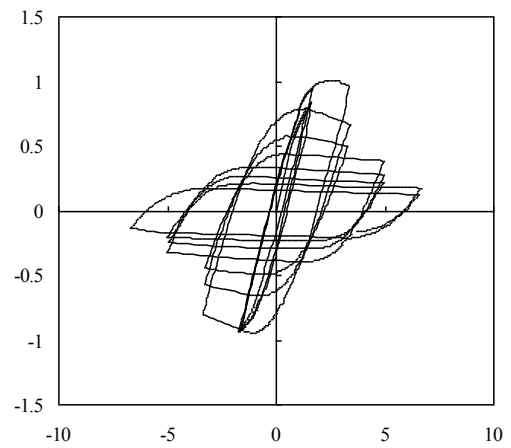
ID=50



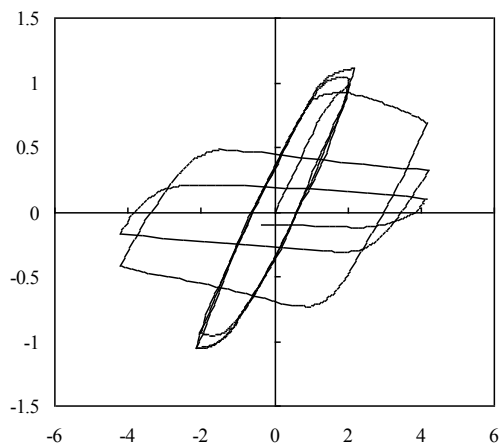
ID=53



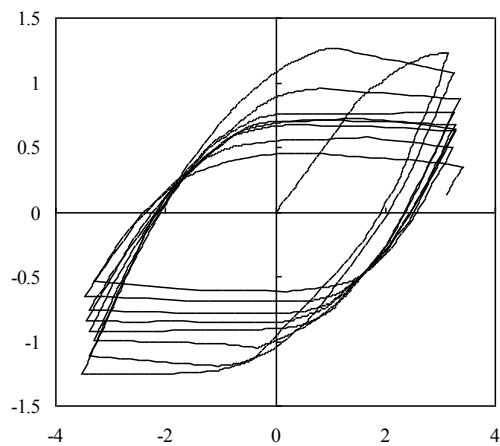
ID=51



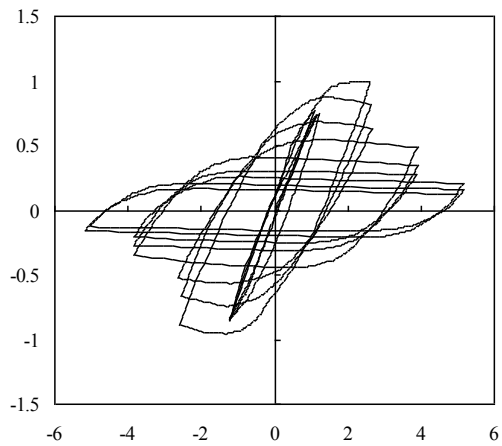
ID=54



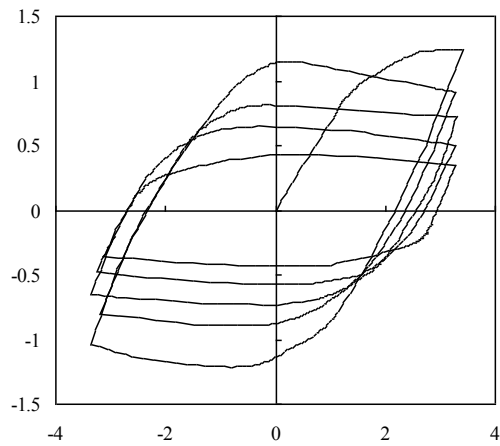
ID=55



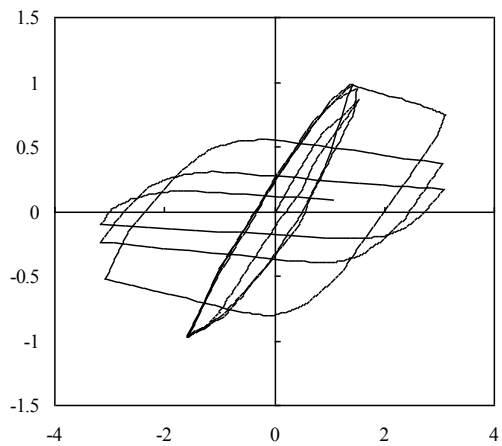
ID=58



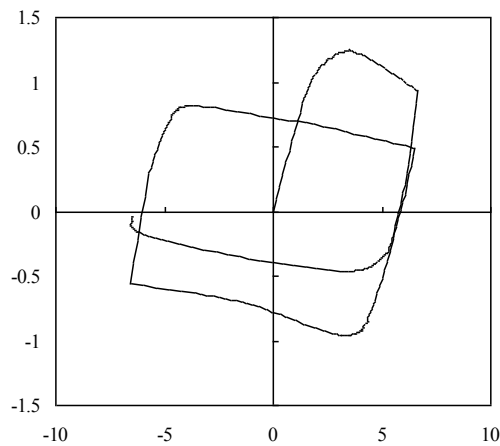
ID=56



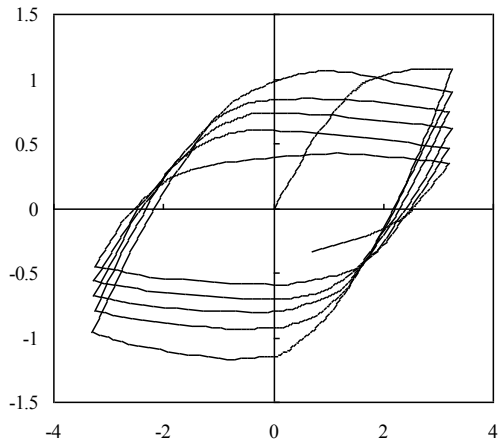
ID=59



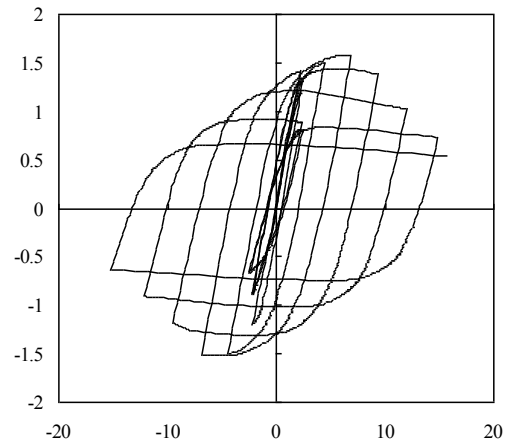
ID=57



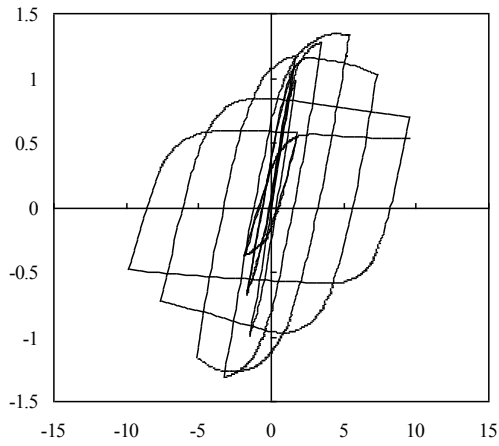
ID=60



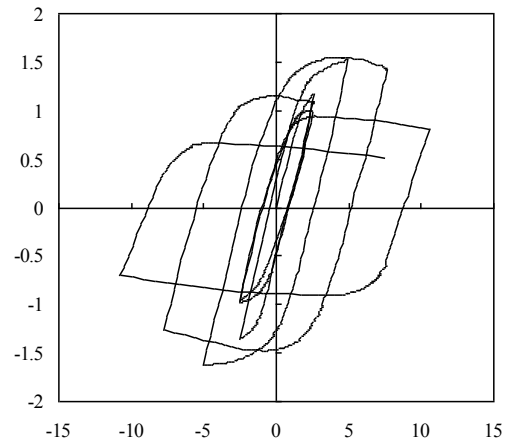
ID=61



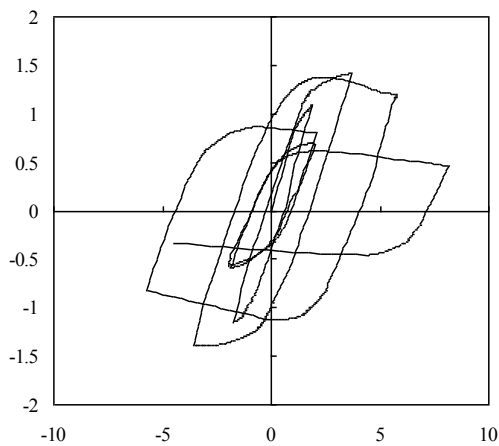
ID=64



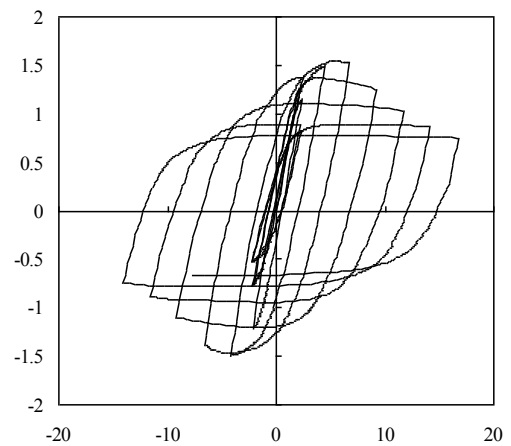
ID=62



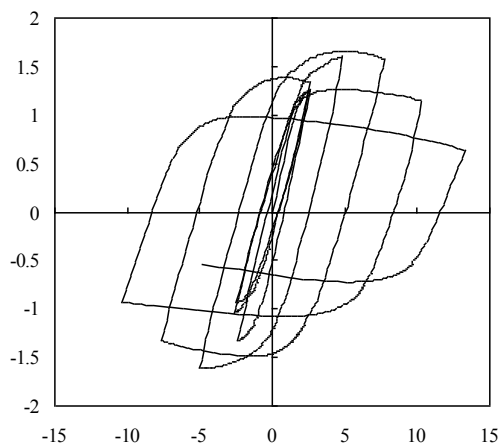
ID=65



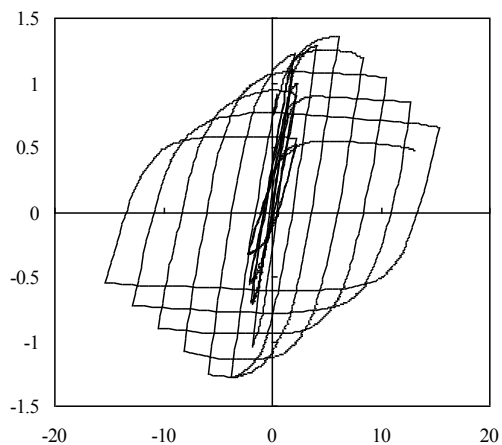
ID=63



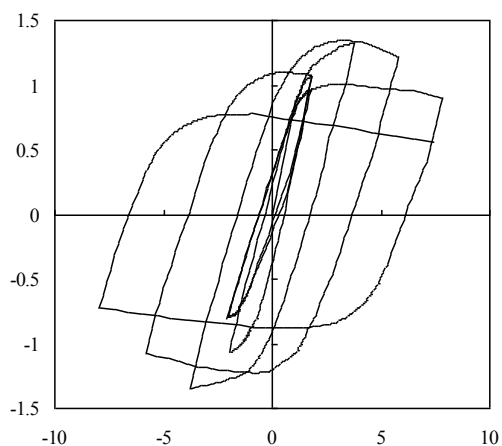
ID=66



ID=67



ID=68



ID=69

図 A-2 角形鋼管柱の荷重変形関係[A-2]

参考文献

- [A-1] 伊藤拓海, 森健士郎: 繰返し塑性振幅荷を受ける H 形鋼梁の塑性変形性能と累積損傷評価法, 日本建築学会構造系論文集, No.691, pp.1603-1612, 2013.9
- [A-2] 加藤隆之, 森健士郎, 伊藤拓海: 繰返し塑性振幅荷を受ける角形鋼管柱の塑性変形性能と累積損傷評価法, 構造工学論文集, Vol.60B, pp.273-280, 2014.3