

平成22年 2月12日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560572  
 研究課題名（和文） 低靱性実大柱梁溶接部の高速・実地震波載荷時の破壊挙動に関する研究  
 研究課題名（英文） Fracture behavior of actual-size beam-column welded connection under dynamic/seismic loading.  
 研究代表者  
 崎野 良比呂（SAKINO YOSHIHIRO）  
 大阪大学・接合科学研究所・助教  
 研究者番号：80273712

## 研究成果の概要：

近年の地震において、柱梁溶接接合部が脆い破断をする現象が見られた。この現象に及ぼす力の速度の影響を明らかにするため、実大の柱梁試験体に高速度で繰返し力をかけて破壊し、低速度の場合と比較した。鋼材には、靱性（材料の脆さ）の低いものと高いものの2種類を使用した。その結果、靱性が低い試験体で、脆い破壊が再現された。地震の力を吸収する能力は、高速度の場合でも低下せず、靱性の低い鋼材の場合、かえって若干大きくなることが明らかとなった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：溶接構造・建築構造

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：柱梁溶接部，実大実験，高速繰返し，低靱性，脆性破断，吸収エネルギー

## 1. 研究開始当初の背景

阪神大震災や新潟県中越地震に代表される直下型地震や構造物と何らかの衝突のように、構造物を崩壊に至らしめる外力のほとんどが動的外力である。しかしながらこれまでの構造物の安全評価は、静的外力による実験結果を基本に組み立てられており、動的外力の影響はほとんど考慮されていない。

鋼構造建築物が動的外力を受けた場合、力学的に最も厳しい部分は溶接部である。よって、溶接部の動的外力下での破壊挙動を評価することは、動的外力下での鋼構造建築物全

体の安全性を評価することになるといっても過言ではない。また、柱梁接合部の脆性破断の防止と変形能力向上の観点から、近年では、母材や溶接金属のみならず溶接熱影響部（HAZ）も注目されている。この溶接熱影響部は最も靱性の低下した部分を含むため、高ひずみ速度において継手の強度や変形能力が著しく低下することが危惧される。

そこで研究代表者は、高速荷重下における再現溶接熱影響部の引張特性（引張強さ、変形能力）に着目し、4種類の鋼材について熱履歴と載荷速度が鋼材 HAZ 部の引張特性に及

ぼす影響を検討した。まず、再現熱影響部の靱性を推定するため、簡易な靱性評価法として用いられるシャルピー衝撃試験を行った。その後、載荷速度をパラメータとした引張試験を行い、熱履歴と載荷速度が引張特性に及ぼす影響を明らかにした。さらに、シャルピー吸収エネルギーの大小との関係も検討した。その結果、ひずみ速度が速くなると、再現 HAZ 材の引張強さは、少し上昇もしくは静的載荷と同等であった。しかし、変形能力はシャルピー吸収エネルギーが大きな再現 HAZ 材では上昇するが、シャルピー吸収エネルギーが小さな再現 HAZ 材では著しく低下し、脆性破断が発生した。また、載荷速度が速くなると破断までの伸びが半分に以下に低下した。このように、載荷速度が速くなることによって変形能力が向上するか低下するかは、熱影響部のシャルピー吸収エネルギーの大小に大きく依存することが明らかになっていた。

## 2. 研究の目的

研究開始当初の背景で述べた結果は単調引張り荷重下でのモデル試験片での結果である。研究成果を設計レベルで生かすためには実大の実験が必須である。しかしながら、実大の実験を速い載荷速度で行った例は多くない。また、速度の速い実験でも、正弦波を用いたものがほとんどであり、正弦波では破断が起こる変位の大きい部分で速度が低下してしまうため、速度の影響が厳密には評価できない。

そこで本研究の目的は、これまで実施が困難であった溶接接合部の超高速繰返し曲げ試験を行い、溶接接合部の変形能力を実大の柱梁溶接部の実験で定量的に明らかにすることである。これにより、動的外力を対象とした溶接構造物の安全性評価のための基礎資料が得られる。実験には、“超高速構造的評価システム—柱梁接合部試験ユニット”を用いる。本システムの能力に関しては後述するが、従来の試験機では制御不可能であった載荷速度と大きな荷重を繰返し荷重として再現することが可能である。しかしながら、これまで本試験機で高速の実大実験を行った経験はなく、実験のノウハウを収集することも今回の研究の大きな目的の一つである。

## 3. 研究の方法

### (1) 使用試験機

本申請研究の実験には、大阪大学接合科学研究所に平成 15 年度末に導入された“超高速構造的評価システム”を用いた。ユニットの写真を図-1 に示す。このシステムは、1) 大地震や衝撃、疲労といった、様々な荷重状態が再現できる 3 台のアクチュエータと、そ

れを駆動する油圧・制御装置、2) 建築、橋梁、船舶、海洋構造物、パイプラインといった、様々な動的外力を受ける構造物の試験にフレキシブルに対応できる大型フレームおよび治具、3) 変位、歪み、温度といった計測データを超高速で収集できるレーザー変位計をはじめとした計測器・データ処理装置群からなっている。本研究では、このシステムのうち、超高速アクチュエータ、大型フレーム、専用ジグおよび計測器・データ処理装置群からなる“柱梁接合部試験ユニット”を用いる。本ユニットの目玉である超高速アクチュエータは、最大速度 1,200mm/sec、最大荷重 2,000kN の世界最高レベルの性能を有しており、実際の柱梁溶接接合部を 350,000kN/sec 以上の衝撃引張力で繰返し載荷することができる数少ない試験機である。また、柱両端部と梁端部に接続するピンジグは遊びがほとんど無く、面外にも回転できるユニバーサルピンになっており、高速での繰返し載荷時にも試験体に意図しない曲げ等がかからない設計となっている。さらに、静的荷重時には問題にならない梁の面外座屈を防止するための横座屈止めも装備している。試験機の検収試験で高速曲げ試験を行った際には、この座屈止めを取り付けないと高速での繰返し載荷はできなかった。このように、本研究はこの柱梁接合部試験ユニットがあるからこそ実現できる、非常に特徴のある研究であるといえる。

### (2) 試験体と試験概要

試験体の形状及び設置状況を図-2 に示す。試験体は実大ト型試験体とし、梁部材に圧延 H 型鋼、柱部材に冷間成形角型鋼管を用いてダイアフラム形式とした。図-3 に接合部詳細を示すように現場型溶接接合形式とした。上下フランジ共に内開先とし、梁フランジとダイアフラムは芯合わせで完全溶け込み溶接とした。スカラップ形状は建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事で推奨されている複合円型スカラップ工法を用い、梁ウェブと柱はシャ



図-1 超高速構造的評価システム  
—柱梁接合部試験ユニット—

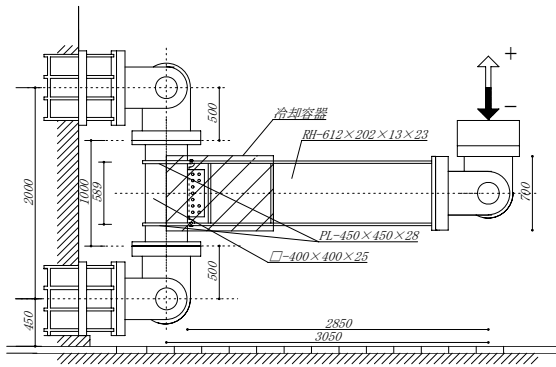


図-2 試験体形状及び設置状況

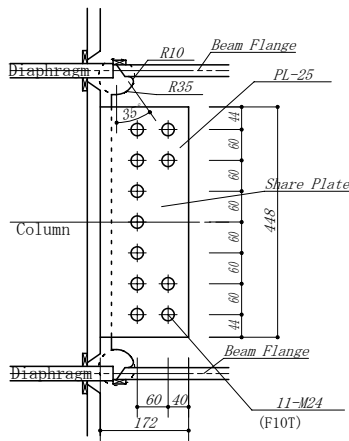


図-3 接合部詳細

ープレートにより高力ボルト摩擦接合とした。溶接ワイヤは YGW11 (1.2φ) を用い、入熱 30kJ/cm、パス間温度 250°C で管理した。

梁材には SS400、SM490 の 2 種類を用いた。サイズは、SS400 が RH-602×202×13×23、SM490 が RH-600×200×16×25 である。梁材の引張試験結果と HAZ 部の 0°C でのシャルピー吸収エネルギーを表-1 に示す。また、SS400 の母材でのシャルピー遷移曲線を図-4 に示す。SS400 材は 0°C でのシャルピー吸収エネルギーが 15J 程度と非常に低い。エネルギー遷移温度・破面遷移温度も共に 70°C 程度と非常に高い。切り欠き付き三点曲げ試験片を用いた CTOD 試験も行っており、0°C での限界 CTOD 値  $\delta_c$  が 0.0444mm と非常に小さい。この様に SS400 材は非常に靱性の低い鋼材であるといえる。これに対し、SM490 材は、HAZ 部のシャルピー吸収エネルギーで 180J と一般的な靱性の材料である。

試験機への取付けは、図-2 に示すように柱両端をピン支持とし、梁端にピン支持のアクチュエータを取り付け、超高速衝撃構造性能評価システムにより鉛直荷重を加える。

試験温度は 0°C とし、静的試験の場合は、柱表面から梁材軸方向に 800mm までの部分と柱の 1/2 までのパネルゾーン (図-2 中斜線部) を冷却容器で囲い、エタノール水溶液をドラ

表-1 梁材の引張試験結果とシャルピー試験結果

	$\sigma_Y$ (MPa)	$\sigma_U$ (MPa)	$\delta$ (%)	YR (%)	$vE_0$ (J)
SS400	281	456	31	62	43
SM490	350	550	31	64	188

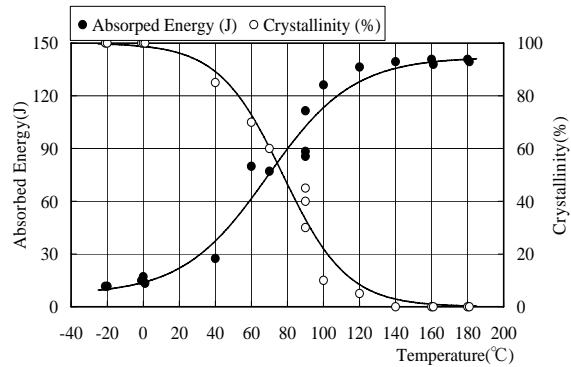
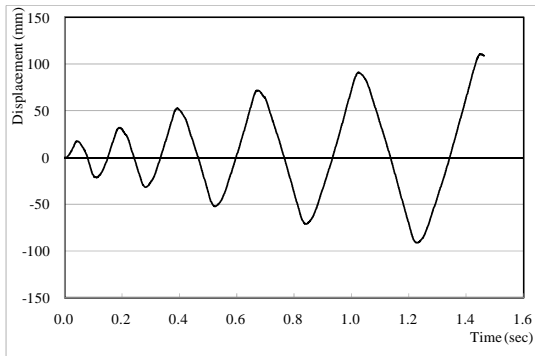


図-4 SS400 材のシャルピー遷移曲線

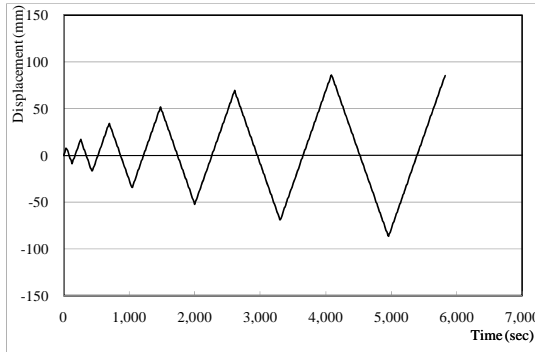
アイスで冷却することにより試験体設定温度 0°C で 30 分保持した後、荷重をおこない、荷重中も設定温度を保持した。動的試験の場合は、同様の方法で試験体設定温度 -4°C で 30 分保持した後、エタノール水溶液を抜き、試験体の温度が 0°C になったことを確認してから実験を開始した。エタノール水溶液を抜いたのは、動的試験の場合の塑性変形の発熱が、エタノール水溶液に奪われることを少しでも防ぐためである。実験中の荷重履歴は、梁端部の全塑性時における変形量  $c \delta p$  を基準に  $0.5c \delta p$ 、 $c \delta p$ 、 $2c \delta p$ 、・・・と漸増させる正負交番繰り返し荷重とした。動的での荷重波形は、正弦波が用いられることが多い。しかしながら、正弦波では最高速度となるのは変位 0 の付近のみであり、実際に破断が生じる荷重の折り返し付近では速度が低下している。これでは、高速度の影響を厳密には評価できない。本研究では、高速度の影響をなるべく厳密に評価するため、最大変位点まで一定速度で荷重し、最大変位点で一気に反転して次の最大変位点までまた一定速度で荷重する三角波を採用する。

荷重速度は 0.2 mm/sec (静的荷重) と本試験機の最高速度である 1,200 mm/sec (動的荷重) で行った。1,200 mm/sec から換算されるひずみ速度は塑性化後の剛性にも依存するため単純計算はできないが数百 %/sec のオーダーとなると考えられる。阪神大震災でのひずみ速度は数十 %/sec といわれていることから、阪神大震災より一桁大きなひずみ速度で実験を行うこととなる。

試験体数は、SS400 と SM490 で静的と動的 1 体ずつ、計 4 体である。

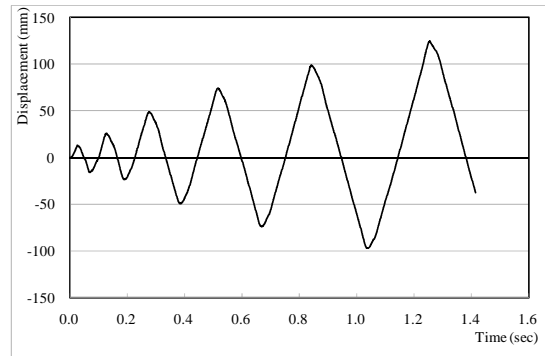


(a) 動的載荷

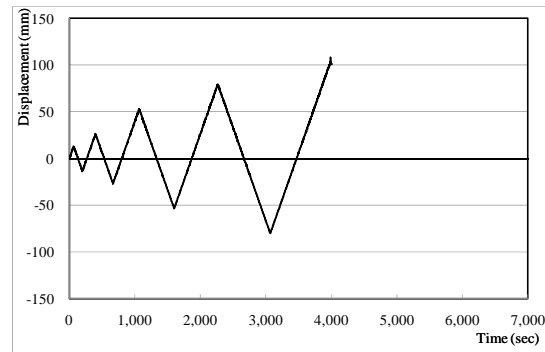


(b) 静的載荷

図-5 SS400 材の変位-時間関係



(a) 動的載荷



(b) 静的載荷

図-6 SM490 材の変位-時間関係

#### 4. 研究成果

##### (1) 動的試験時の載荷状況

図-5に梁材としてSS400を用いた低靱性試験体の破断までの変位-時間関係を示す。静的載荷の場合、反転時以外は一定速度となっている。動的載荷の場合、反転時に速度が落ちているが、それ以外では一定速度が維持されており、正弦波に比べ載荷速度に対し、より厳密な実験が行えていると言える。振幅は一見良く合っているが、動的載荷の  $0.5c\delta p$  を目標としたものが実際には  $1c\delta p$  とほぼ等しく変位まで、 $1c\delta p$  を目標としたものが実際には  $2c\delta p$  とほぼ等しく変位まで、といったように目標変位よりオーバーしてまたまた次の目標変位とほぼ等しくなったものである。これは、反転時の慣性によるものと考えられる。 $0.5c\delta p$  は弾性域での繰り返しであり、結果への影響は小さいと考えられるため、SS400材の動的載荷は  $0.5c\delta p$  を飛ばしたとして評価することとする。よって、破断は、動的載荷が  $6c\delta p$  のプラス側最大変位を若干超えた位置で、静的載荷では  $6c\delta p$  プラス側最大変位直前でと、ほぼ同じ変位で起こったことになる。

図-6に梁材としてSM490を用いた、高靱性試験体の破断までの変位-時間関係を示す。SS400の実験をふまえ、動的載荷での目標変位は慣性の影響を考慮して低めに定めた。SM490の場合も反転時以外は一定速度が維持されており、反転変位も比較的精度良

く再現できている。破断は、動的載荷が  $5c\delta p$  のマイナス側最大変位前で起こったのに対し、静的載荷では  $4c\delta p$  プラス側最大変位付近で早期に起こった。

この様に、本試験機で高速三角波での繰り返し曲げ試験が精度良く行えることが明らかとなった。これにより、100分程度かかっていた載荷を1.5秒で終わらせることができ、より地震等に近い実験が可能となった。

##### (2) 破断状況

図-6に梁材としてSS400を用いた低靱性試験体の動的載荷での破断面付近の写真を示す。破断はスカラップ底から起こっており、全体に脆性破面が観察された。この様に、低靱性鋼において、阪神大震災時に観察されたスカラップ底からの脆性破断が再現できた。

図-7に梁材としてSM490を用いた高靱性試験体の動的載荷での破断面付近の写真を示す。破断はスカラップ底から起こっていると考えられるが、SS400材と異なり延性破面が多く見られた。この様に、梁材の靱性により破断面に違いが見られた。

##### (3) 荷重-変形関係

図-9にSS400材試験体の荷重変形関係を、図-10にSM490材試験体の荷重変形関係を示す。動的載荷の場合、SS400, SM490いずれの場合も、低速載荷に比べ荷重の上昇がスムーズでなく、ばらついている。また、最大変位手前で荷重が低下し、最大変位付近では荷重が上下に振れている。これは、反転時に速



図-7 SS400 材の破断面



図-8 SM490 材の破断面

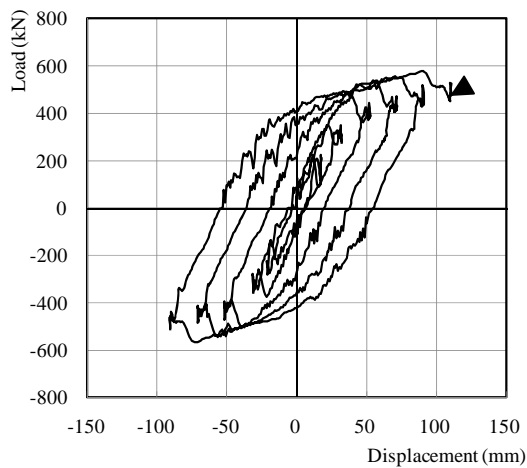
度が低下した影響であると考えられる。特に  $5c \delta_p$  プラス側の最大変位付近で大きく低下しているが、これは延性き裂が進展したのではないかと推測される。

SS400 材試験体の動的と静的を比較すると、同じ変位での荷重は動的荷重の方が大きいことが分かる。しかし、反転時の荷重は動的荷重の荷重が速度の低下により静的荷重とほぼ同じになっている。これは、高速三角波

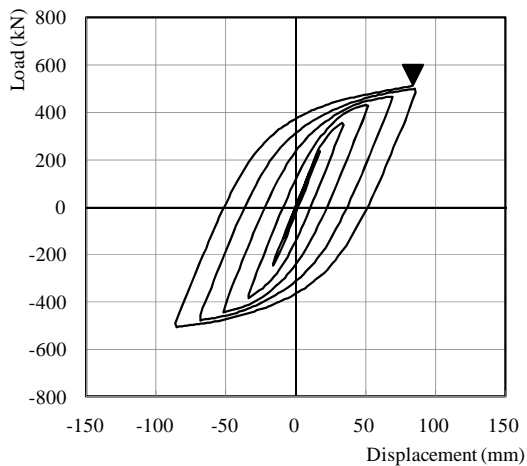
での実験で得られた新たな知見である。SM490 材試験体の場合も同様の傾向が見られるが、荷重の上昇率は SS400 ほど大きくない。これは、強度が小さいほど荷重速度の影響を受けやすいという、高速引張り試験での結果と合致する。

(4) 変形能力

実大柱梁溶接接合部の変形能力を比べる場合、累積塑性変形倍率を用いることが多い

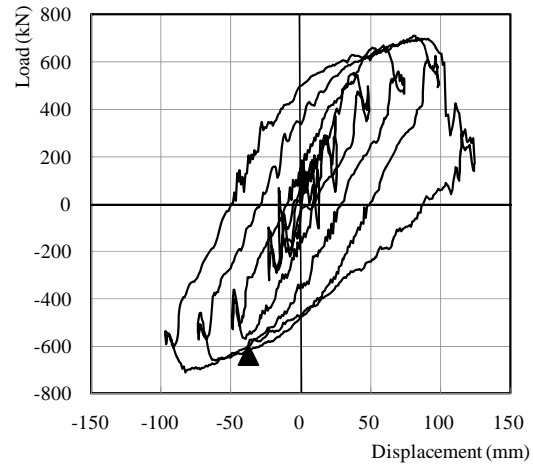


(a) 動的荷重

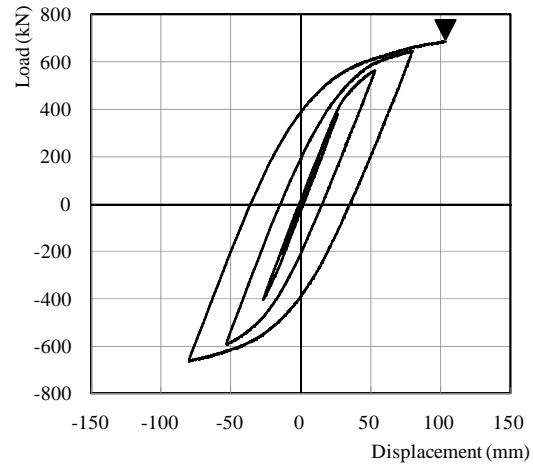


(b) 静的荷重

図-9 SS400 材の荷重-変形関係



(a) 動的荷重



(b) 静的荷重

図-10 SM490 材の荷重-変形関係

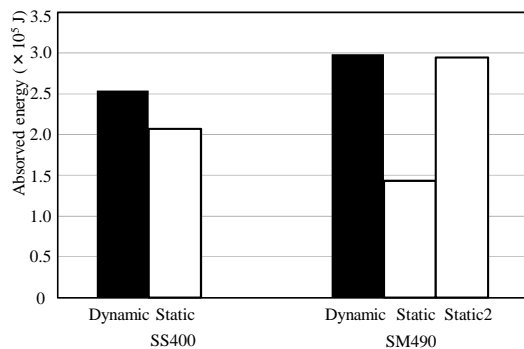


図-1 1 累積吸収エネルギーの比較

が、本研究の結果では動的試験のスケルトン曲線の取り方が従来の方法でよいのかが明らかではない。そこで、本研究では各ループの吸収エネルギーを全て足した累積吸収エネルギーと比較することとする。

図-1 1 に累積吸収エネルギーを比較したものを示す。SS400 材試験体の場合、動的・静的共に  $6c \delta p$  のプラス側最大変位付近で破断したが、累積吸収エネルギーは動的の方が大きい。これは、高速载荷時に荷重が上昇したことによると考えられる。この様に、実大柱梁試験体では、引張り試験の結果とは異なり、低靱性鋼の場合でも吸収エネルギーが上昇した。SM490 材試験体の場合、動的载荷の吸収エネルギーは静的载荷に比べ 2 倍程度と大きくなっている。これは本研究での静的载荷試験体が溶接欠陥により早期に破断したためであると考えられる。そこで、過去の結果 (Static2 RH-602×202×13×23) と比較する。累積吸収エネルギーはほぼ同等であり、鋼靱性材の場合にも、高速载荷が変形能力に及ぼす影響は大きくないと考えられる。

#### (5) 今後の課題と展望

今回の実験では、低靱性材でも高速载荷の影響で変形能力が低下することはなく、逆に荷重が上昇することで累積吸収エネルギーは増加した。その原因として、塑性変形による発熱が考えられる。今回の実験でも温度の計測を試みたが、動的試験の場合には熱電対

がどうしても外れてしまい、計測ができなかった。

また、荷重の計測方法を工夫する必要がある。動的試験の場合、試験器のロードセルでは様々なノイズ他を拾っている。SM490 の実験では、試験体の弾性域にひずみゲージを貼り、その値から荷重を換算することを試みたが現在の所キャリブレーションがとれていない。材料の選定や、実大実験の補間のために高速の引張り試験も行ったが、やはり荷重の計測がデータ整理時に問題となっている。今後の課題である。

本研究により、超高速衝撃構造性能評価システムでの、三角波での高速曲げ試験の試験方法がほぼ確立した。また、今回は高速三角波のみの実験となったが、実地震波も試験体を付けない状態でパイロット試験を行い、動作を確認している。

今後、この実地震波での検討や、もう少し低速の場合、ディテールが異なる場合などの検討につなげていく予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 1 件)

- ① You-Chul KIM and Yoshihiro SAKINO, SOUNDNESS DIAGNOSIS OF STRUCTURES UNDER ULTRA-DYNAMIC LOADS, Proceedings of International Symposium on Structures under Earthquake, Impact and Blast Loading 2008, 査読無し, 2008, pp. 53-58.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

崎野 良比呂 (SAKINO YOSHIHIRO)

大阪大学・接合科学研究所・助教

研究者番号：80273712