

実大振動台実験による建築鋼構造の 脆性破壊過程解明と破壊抑止策の検証 その1. 実験計画

山田 哲¹, 松本由香², 山口路夫³, 松岡三郎⁴, 小川信行⁵, 秋山 宏⁶

1 博士(工学) 東京工業大学助教授 建築物理研究センター (〒 226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)

2 博士(工学) 横浜国立大学助手 建築学コース (〒 240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

3 修士(工学) 東京工業大学大学院生 環境理工学創造専攻 (〒 226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)

4 工博 物質・材料研究機構 (〒 305-0047 つくば市千現 1-2-1)

5 工博 防災科学技術研究所 (〒 305-0006 つくば市天王台 3-1)

6 工博 日本大学教授 総合科学研究所 (〒 101-8308 千代田区神田駿河台 1-8-14)

After the Hyogo-ken Nanbu Earthquake, it becomes urgent problems that evaluate the fracture toughness of steel members and guarantee the earthquake resistance of steel structures. In this study, two series of full scale shaking table test of steel moment frames were carried out. One was the fracture series for the purpose of clarifying the ultimate behavior of steel members governed by fracture. The other was the damage control series for the purpose of verifying the effectiveness of damage control design in which energy input of earthquake is absorbed by damper and beam to column connection is kept in elastic range. In this part, plan of the experiment is reported.

Key Words: shaking tabel test, full scale test, brittle fracture, damper

1. 序

兵庫県南部地震において破壊被害が顕在化して以来、鋼構造物の破壊抵抗性を評価、保証することが緊急の課題となっている。しかしながら、現状では構成部材の破壊条件が解明されていないため、破壊に対する設計規範が確立されていない。また、破壊の発生しやすい応力集中箇所における塑性化を避ける、新しい構造形式の開発も急がれている。

本研究では、鋼構造建築が破壊に対してどの程度の抵抗能力を有しているのか、そして破壊抑止のためにはどのような手法が有効であるかを定量的に解明することを目的として、鋼構造部分骨組の実大振動台実験を行った。実験は、鋼構造建築の梁端接合部における破壊現象を解明し、設計時に接合部に期待できる変形能力を評価するための「破壊シリーズ」

と、応力集中が起きやすく破壊が発生しやすい梁端接合部の応力レベルを弾性範囲に留め、地震による入力エネルギーをダンパーで吸収する「損傷制御シリーズ」の2つシリーズによって構成される。破壊シリーズにおいては、従来型の耐震設計で多用されるラーメン骨組を対象に、鋼材の靱性を主なパラメーターとした実験を行い、鋼材の靱性と接合部における破壊によって決まる部材としての変形能力の関係を検討した。一方、損傷制御シリーズでは、近年鋼構造骨組において多用されるようになった座屈拘束ブレースを組み込んだ骨組について、入力レベルを主なパラメーターとした実験を行い、設計で想定される入力レベルのみならず、想定以上の過大入力を受けるような場合においても損傷制御型の設計法が破壊抑止に有効であるかを検証した。

本報その1では、実験計画について報告する。

2. 実験方法

(1) 実験装置

強震下における構造要素の破壊過程や、構要素の破壊に起因する構造物の動的崩壊挙動を検証するには、実大の架構に対する振動台実験を行い、強震下における挙動を再現することが最も望ましい。しかしながら、実存する大型振動台は総重量の小さな低層構造物をようやく加振できる程度であり、中層以上の構造物を加振するには、倒壊に対する安全装置を含めて強大な実験装置を製作しなければならない。一方、試験体として縮小架構を用いた場合には、破壊現象の重要な支配要因である寸法効果を反映できないばかりでなく、相似則を満足するために入力波を時間軸に対して拡大して用いることになり、歪み速度を再現することができなくなる。

本実験方法¹⁾は、骨組の中から部分架構を取り出し、これを試験体として用いて、実大の構造部材・接合部に対する動的破壊現象を再現するものである。実験装置の略図および概念を図-1に示す。実験装置は振動台からの入力によって慣性力を生み出す重錘と重錘を支える加振フレーム、重錘および加振フレームに作用する重力を支える積層ゴム、試験体、そして加振フレームから水平力を試験体に伝える加力梁から構成される。実験装置の重量のほとんどは重錘と加振フレームの重量であることから、実験装置は最も基本的な振動系である「1質点系」とみなすことができる。

(2) 入力波

加振に用いる入力波は、短時間に大きな入力エネルギーがもたらされる直下型の地震波を代表する兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録(NS成分)と、比較的継続時間の長い海洋型の地震波を代表する十勝沖地震八戸記録(EW成分)に、加速度倍率を掛けて入力レベルを調整したものを用いる。設定した入力レベルについては、各シリーズの中で説明する。

3. 接合部破壊シリーズの概要

(1) 試験体

本実験では、10層程度の中層骨組の低層部に使用される規模の部材を研究対象とする。試験体の形状は鋼構造剛接骨組の柱梁接合部を想定したT形であり、その大きさは実大の中層骨組に相当する。試験体総数は4体であり、形状・使用鋼材・製作方法はすべての試験体で共通である。図-2に試験体の

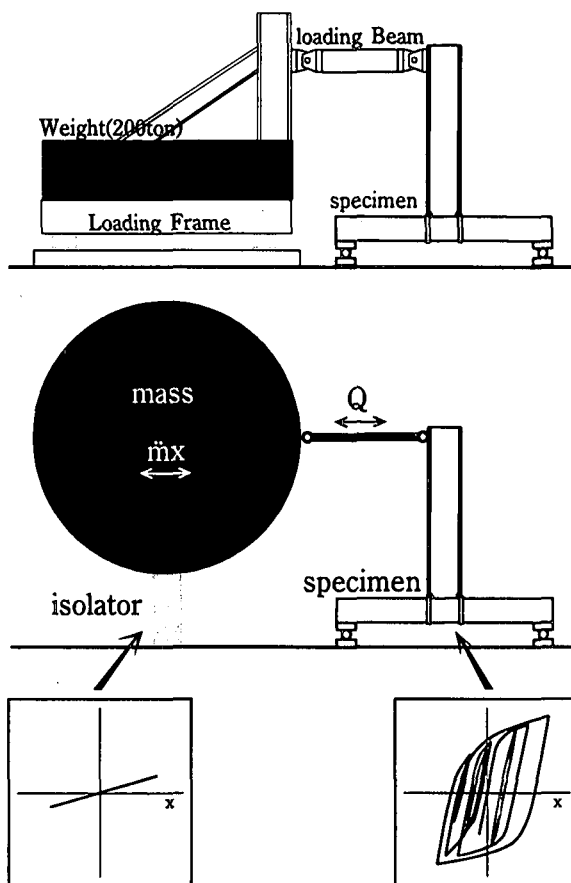


図-1 実験装置の略図および概念

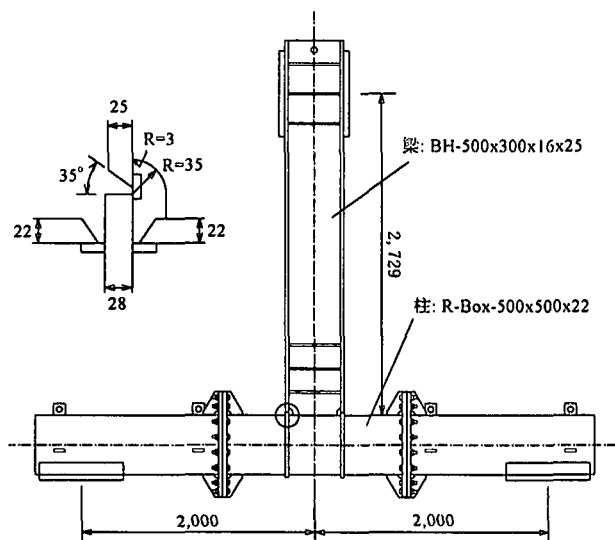


図-2 破壊シリーズ試験体形状

形状を示す。試験体は、想定する実構造物を90度回転させた状態で実験装置に設置する。従って、図-2において、実構造物における柱に相当するものが水平材であり(以後、柱材と称する)、梁に相当するものが鉛直材である(以後、梁材と称する)。柱材は冷間成形角形鋼管(STKR490A)

R-Box-500x500x22, 梁材は溶接組立 H 形鋼 BH-500x300x16x25 である。柱材は、想定する実構造物の反曲点位置（梁材の中心軸から 2000mm）で振動台基礎梁にピン接合する。梁材も同様に、想定する実構造物の反曲点位置（柱材の中心軸から 2979mm）で加力梁にピン接合する。なお、この位置を加力位置と定義する。

試験体の柱材-梁材の接合はスカラップを設けた通しダイアフラム形式の工場型溶接接合である。梁材フランジ-ダイアフラムの溶接接合部の詳細を図-2中に示す。

また、試験体の柱及びパネルゾーンは、梁が終局モーメントを発揮している状態においても塑性化しない、十分な強度を有する部材である。梁フランジの局部座屈によって終局状態となることを避けるため、接合部付近には 200mm 間隔で 3 枚のスチフナを溶接してある。

試験体梁材に用いた鋼材の引張試験結果を表-1に、応力度-歪度関係を図-3に示す。また、図-4に梁材フランジに用いた鋼材のシャルピー衝撃試験結果を示す。シャルピー衝撃試験片の切り出し位置は、梁材フランジ板の板厚 1/2 位置と 1/4 位置の 2 種類である。図-4からフランジに用いた鋼材の遷移温度は概ね 60 度であることがわかる。

(2) 実験パラメーター

本実験では、同材料から製作した同形状を有する 4 試験体に対して、1) 接合部の温度、2) 入力地震波のレベルを変えることで実験条件を変化させる。接合部の温度を変化させるのは、基本的に実験で生じる破壊モードを変化させるためである。また、入力地震波のレベルを変化させるのは、基本的に試験体に生じる変位振幅を変化させるためである。

試験体と実験パラメーターとの対応を表-2に示す。接合部の温度は、No.1 ~ No.3 までを延性破壊する温度、No.4 を脆性破壊する温度とする。既往の研究²⁾において、シャルピー値 70J、脆性破面率 75%以下で延性破壊が生じたことから、No.1 ~ No.3 の接合部温度を遷移温度に相当する 60 度（シャルピー値 70J、脆性破面率 60%）、No.4 の接合部温度を常温に相当する 25 度（シャルピー値 30J、脆性破面率 80%）とする。

入力地震波の原波は、兵庫県南部地震（1995）において神戸海洋気象台で観測された南北方向成分の加速度記録（Kobe 波）である。本実験では、レベル 1 の入力波を試験体が弾性範囲に留まる限度と定義し、これを予備解析の結果に基づいて Kobe 波の最大速度を 15kine に調節したもの（Kobe 15kine）

表-1 試験体梁材の材料試験結果

	降伏耐力 (MPa)	破断耐力 (MPa)	一様伸び (%)	降伏比
フランジ	385	589	12.0	0.65
ウェブ	364	500	17.5	0.73

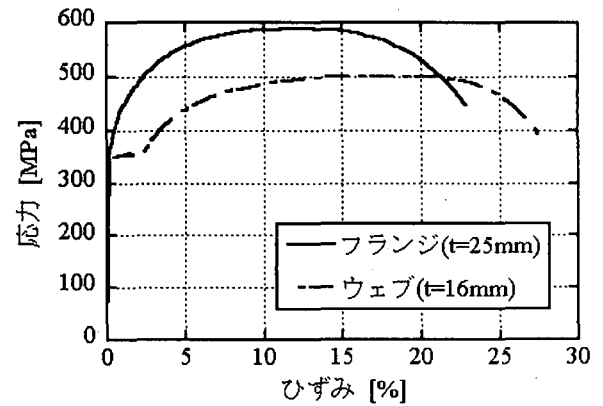


図-3 使用鋼材の応力度-歪度関係(破壊シリーズ)

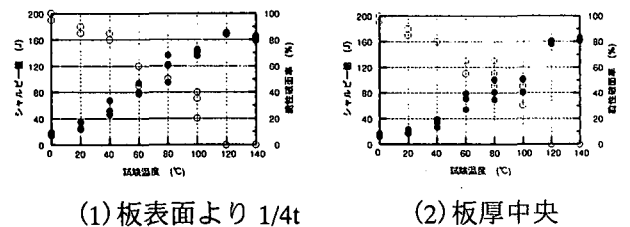


図-4 使用鋼材(梁フランジ)のシャルピー試験結果

とする。従って、本論文において入力波のレベルとは Kobe 15kine に対する最大速度の倍率を表す。

No.1 は、Kobe 100kine、レベル 6 相当以上の入力を行う試験体である。No.2 は、Kobe 60kine、レベル 4 相当の入力を行う試験体である。予備解析の結果から、これら 2 試験体はそれぞれ異なる変位履歴を示すものの、1 回の加振によって破壊することが予想される試験体である。これに対して、No.3 は複数回の入力を行うことを目的とする試験体である。まず Kobe 30kine、レベル 2 相当の入力を行い、その後 Kobe 45kine、レベル 3 相当の入力を試験体が破壊するまで行う。

また、No.4 は No.2 を比較対象とし、Kobe 60kine、レベル 4 相当の入力を行う試験体である。

(3) 接合部温度の管理法

本実験では、試験体の梁材フランジに、一般に使用される鋼材よりも遷移温度が高い鋼材を意図的に使用してあり、実験で対象とする温度とするために

は試験体を加熱する必要が生じる。

加熱には、ガスバーナーを用いる。加振前にガスバーナーで接合部付近のフランジ、ウェブ及び柱管壁を設定温度を超えるまで加熱し、その後一旦中断して温度を観察する。これを数回繰り返して、試験体接合部の温度が目標温度付近で安定したことを確認した後、加振を行う。

(4) 計測

実験から得られる荷重-変形関係としては、柱梁接合部の柱フェース面において梁に作用するモーメント (M) と、試験体の変形角から柱の回転変形とパネルゾーンの剪断変形の影響を取り除いた梁の部材角 (θ) の関係を用いる。 M の算出に必要な、試験体に作用する剪断力は、加力梁に内蔵したロードセルで計測する。 θ の算出に必要な試験体各部の変位は、振動台に対する相対変位として計測する。計測する主要な変位は、試験体頂部(加力点)水平変位、柱梁接合部水平変位及び回転変位である。また、接合部付近にはひずみゲージ及び温度ゲージを貼付して各部のひずみ及び温度の変化を計測する。図-5にひずみゲージ貼付位置を示す。

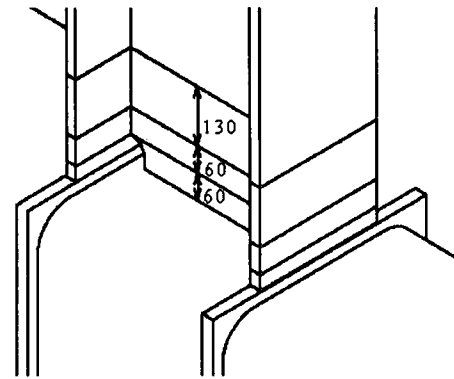


図-5 ゲージ貼付位置

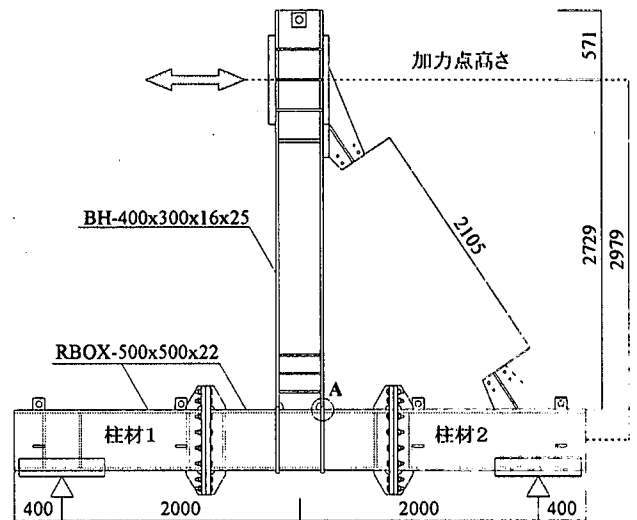


図-6 損傷制御シリーズ試験体概形

4. 損傷制御シリーズの概要

(1) 試験体

試験体は図-6に示す主体構造に座屈拘束ブレースを組み込んだ部分骨組であり、接合部破壊シリーズと同様に、水平材に柱を想定した角形鋼管、垂直材に梁を想定した H 形鋼を使用する。本研究では、同一形状、同一鋼材の主体構造を 2 体製作した。継続して行う加振の中で梁端部の損傷を観察し、適宜判断し交換した。主体構造の断面形状は、梁材を H 形断面部材 (BH-400x300x16x25) とし、柱材を箱形断面部材 (RBOX-500x500x22) とした。柱梁接合部は破壊シリーズ同様、ダイアフラムを介スカラップを有する工場溶接とし、梁材の接合部近傍には、局部座屈の発生を防ぐため 150mm の間隔で 3 枚のスタフナを設けた。

試験体の寸法についても破壊シリーズ同様、接合部パネル中央から加力点までの高さを 2979mm、梁材のピン中心までの距離を 2000mm と設定した。また、座屈拘束ブレースの部材長さを 2100mm と設定し、高力ボルト摩擦接合により主体構造と接続した。

表-2に JIS-1A 号引張試験片による素材試験結果一覧を、図-7に応力度-歪度関係を示す。

表-2 素材試験結果一覧(損傷制御シリーズ)

鋼種	場所	板厚 cm	降伏点 tf/cm ²	引張強さ tf/cm ²	破断伸び %	降伏比 %
SM490	梁フランジ	2.5	4.17	5.23	29.1	79.7
SM490	梁ウェブ	1.6	3.59	5.21	24.5	69.0
STKR490	柱	2.2	3.82	4.34	27.9	88.1
SS400	ダンパー	1.6	2.59	4.09	32.4	63.4
LYP235	ダンパー	1.6	2.28	2.88	37.9	79.1
LYP100	ダンパー	1.6	*0.82	2.42	44.2	33.9

*0.2%オフセット耐力

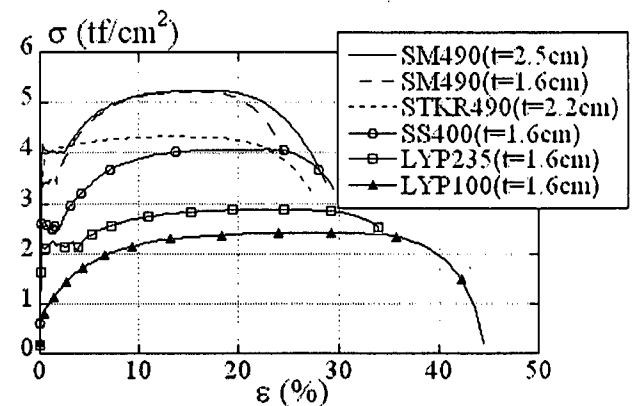


図-7 使用鋼材の応力度-歪度関係 (損傷制御シリーズ)

(2) 座屈拘束ブレースの形状と力学的性能

本研究では、4種類の座屈拘束ブレースを製作し、主体構造へと組み入れた。表-3に名称および基本性能を示す。試験体名称はLYP100, SS400-, SS400+, LYP235の4種類とし、LYP100, SS400-の2種を本研究での基本試験体とする。LYP100, SS400-を各2本、LYP235, SS400+を各1本ずつ主体構造へと組み込み、加振を行った。本研究で用いる座屈拘束ブレース(図-8参照)は、軸方向力を伝達する鋼板(以下、芯材)を鋼管とモルタルを用いて拘束するもので、圧縮、引張とも安定した復元力特性を示すことが知られている³⁾。鋼管とモルタルに軸力を伝えないこと、およびポアソン比による影響を排除することを意図して、芯材とモルタルの間に特殊な緩衝材が用いられている。また、図-8中に示すクッション材を各25mmと設定したため、座屈拘束ブレースは圧縮軸歪4.1%、層間変形1/32の変形までを許容する構成となっている。それ以上の大変形では、芯材端部の十字断面部分と鋼管に充填されたモルタルが接触することが予想される。

芯材に用いた鋼材の素材試験結果については、表-2、図-7に併せて示している。本研究では、LYP100とSS400-を基本試験体として位置づけ、部材性能およびパラメーターを決定した。座屈拘束ブレースのパラメーターは、芯材の鋼種、断面形状、幅(断面積)、長さとし、本研究では表中に示す4種を試験体とする。LYP100とSS400-を各2本、その他を各1本ずつ製作した。また、SS400+は、断面形状を+字型断面として断面積を増やしたものを、LYP235は、鋼材にLYP235を用い、芯材長さを他の半分の600mmとしたものである。

(3) 主体構造と座屈拘束ブレースの耐力分担

表-4に、試験体設計時に設定した主体構造と座屈拘束ブレースの降伏せん断力、降伏変形、水平剛性、降伏せん断力比、剛性比を示す。設計時においては、座屈拘束ブレース芯材に用いる鋼材の降伏応力度を、低降伏点鋼の動的実験結果⁴⁾を参考にして表-4に示す値に仮定している。これは、振動台に繰り返し入力を行うことを想定し、また、徐々に入力を強くした加振を計画したことに対応して、歪み硬化の影響が少なくなった状態での座屈拘束ブレースの性能に焦点を当てたことによる。そのため、図-9に示すLYP100とSS400-のせん断力-水平変形関係(設定値)のように、座屈拘束ブレースの負担するせん断力は、歪み硬化の進展に伴って増加する。本研究では、動的荷重下において、歪み硬化の影響が少なくなった時点での降伏応力(LYP100で $\sigma_y = 2.2tf/cm^2$

表-3 座屈拘束ブレースの基本性能

試験体名	鋼種	断面	t cm	W cm	Lcore cm	Area cm ²	Py tf	Pu tf	Δyd cm	Qyd tf	Qud tf	Δyd cm
LYP100	LYP100	-	1.6	7.5	120.0	12.0	18.0	48.0	0.086	9.8	26.1	0.157
SS400-	SS400	-	1.6	6.0	120.0	9.6	26.9	43.2	0.160	14.6	23.5	0.294
SS400+	SS400	+	1.6	*13.4	120.0	21.4	60.0	96.5	0.160	32.7	52.5	0.294
LYP235	LYP235	-	1.6	7.5	60.0	12.0	27.6	50.4	0.066	15.0	27.5	0.121

t: 芯材板厚, W: 芯材幅, Lcore: 芯材長さ, Area: 芯材断面積, Py: 降伏軸力, Pu: 破断軸力,
 Δyd : 降伏変形(軸方向), Qyd: 降伏せん断力(降伏水平耐力),
 Qud: 破断せん断力(破断水平耐力), Δyd : 降伏変形(水平方向)
 ただし、表中の耐力は、降伏応力(σ_y)、破断応力(σ_u)を以下値を用いている。
 LYP100 σ_y 2.1tf/cm² σ_u 4.0tf/cm²
 LYP235 σ_y 2.3tf/cm² σ_u 4.2tf/cm²
 SS400 σ_y 2.8tf/cm² σ_u 4.5tf/cm²

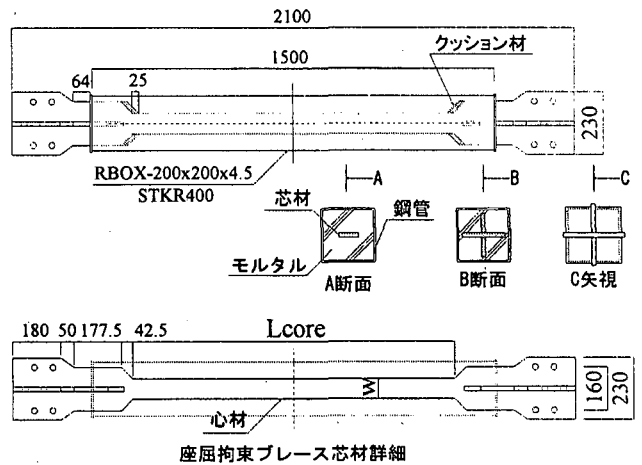
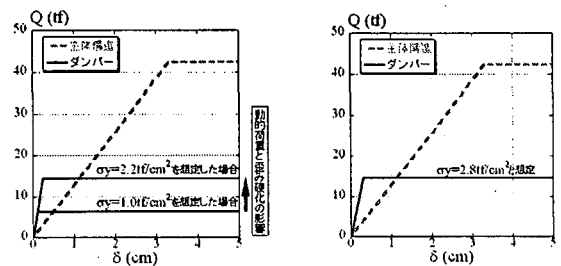


図-8 座屈拘束ブレース

表-4 主体構造と座屈拘束ブレースの耐力分担

主体構造	Qyf(tf) Δyf(cm) Kf(tf/cm)				
	42.4	3.3	12.8		
種類	Qyd(tf)	Δyd(cm)	Kd(tf/cm)	Qyd/Qyf	Kd/Kf
LYP100	14.4	0.23	62.3	0.34	4.87
SS400-	14.6	0.29	49.8	0.34	3.89
SS400+	32.7	0.29	111.3	0.77	8.70
LYP235	12.5	0.13	99.7	0.29	7.79



(1) LYP100

(2) SS400-

図-9 せん断力-水平変形関係(設計)

m程度)を基に、LYP100とSS400-の降伏せん断力が揃うように設計を行っている。

主体構造と座屈拘束ブレースの降伏せん断力比は、LYP100とSS400-の基本試験体で0.34程度と、主体構造塑性化のせん断力の1/3程度を座屈拘束ブレースが負担する設計とした

(4) 入力および加振手順

入力には兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録 NS 成分 (以下 Kobe) と十勝沖地震八戸港湾記録 EW 成分 (以下 Hachinohe) の 2 種類の加速度記録を用い、振動台の動きを可動範囲にとどめるため 0.2Hz 以下 (Hachinohe Level 4(80kine)では、0.3Hz 以下) の低周波成分を除去し、入力波とした。

入力レベル設定時の留意点を以下に示す。

①実験システムへの総入力エネルギー量の速度換算値³⁾ (以下 V_E) が揃うように、最大速度を設定する。

$$V_E = \sqrt{2E/M} \quad (1)$$

ここで、 E : 構造物への総エネルギー入力
 M : 構造物の総質量

②損傷制御シリーズでは、基本試験体 (主体構造および LYP100 または SS400-) において、主体構造が弾性限に留まる限界の入力レベルを Level 2 とし、予備解析の結果から $V_E=80\text{cm/s}$ 程度と設定した。対応する Kobe, Hachinohe の最大速度はそれぞれ 25kine, 40kine であり、最大速度を用いて入力レベルを表現する。

③地震動の最大速度で、Level 2 の 1/2 を Level 1, 3/2 倍を Level 3, N/2 倍の入力レベルを Level N とする。

本研究では、Level 1, 2 を通常設計で考慮する程度の入力、Level 3 以上の入力を、ダンパーまたは主体構造が終局状態に達することが想定される過大入力と位置づけている。

各種座屈拘束ブレースを組み込んだ試験体ごとの加振は、以下の順序で行うものとする。

パルス加振 →

- ① Kobe Level 1 → ② Hachinohe Level 1 →
- ③ Kobe Level 2 → ④ Hachinohe Level 2 →
- ⑤ Kobe Level 3 → ⑥ Hachinohe Level 3 →
- ⑦ Kobe Level 4 → ⑧ Hachinohe Level 4

まず、各座屈拘束ブレースを主体構造へと設置した後、パルス加振を行い、固有周期と減衰の検証を行う。その後、4種の全試験体の Level 1, Level 2 の加振を続けて行う。そのとき主体構造は振動台上に設置したまま、座屈拘束ブレースのみを取り替える。その後、各試験体ごとに Level 3, Level 4 の加振を行い、座屈拘束ブレース芯材が破断に至るまで、適宜入力を判断し加振を続ける。また、主体構造の梁端部に大きな損傷が見られた場合、適宜判断し主体構造を入れ替えることとした。

5. 結

本報その1では、鋼構造建築が破壊に対してどの程度の抵抗能力を有しているのか、そして破壊抑止のためにはどのような手法が有効であるかを定量的に解明することを目的として行った、鋼構造部分骨組の実大振動台実験の実験計画について報告した。実験結果については続報で報告する。

参考文献

- 1) 秋山 宏, 山田 哲, 箕輪親宏, 寺本隆幸, 大竹章夫, 矢部喜堂: 慣性加力装置を用いた構造要素の実大振動台実験方法, 日本建築学会構造系論文集 第 505 号, pp.139-146, 1998 年 3 月.
- 2) 秋山 宏, 山田 哲, 松本由香, 松岡三郎, 大竹章夫, 杉本浩一: 実大柱梁接合部の試験温度による延性破壊-脆性破壊遷移, 日本建築学会構造系論文集 第 522 号, pp.105-112, 1999 年 8 月.
- 3) 佐伯 英一郎, 岩松浩一, 和田 章: 有限要素法によるアンボンドブレースの弾塑性挙動解析と実験結果との比較, 日本建築学会構造系論文集 第 484 号, pp.111-120, 1996 年 6 月.
- 4) 山田 哲, 山小路夫, 竹内百合, 竹内 徹, 和田 章: 動的繰り返し載荷実験に基づくダンパー用鋼材の履歴特性の評価 速度依存性を考慮したダンパー用鋼材の履歴特性に関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文集 第 553 号, 2002 年 3 月 [採用決定]
- 5) 秋山 宏: 建築物の耐震極限設計 第 2 版, 東京大学出版会, 1987 年.