

## 補剛間隔の異なる並列 H 形鋼梁の横座屈性状の把握\*

仙台高等専門学校 小室 陽輝

仙台高等専門学校 吉野 裕貴

### 1. 序

体育館などの避難所となる大空間建築物において、地震時に柱や梁などの主要構造部材に応力が発生した際、それらを介して母屋や屋根折板等の非構造部材に伝達することで損傷が生じ、地震後に避難所として即時利用できなくなる事例が多くみられた<sup>1),2)</sup>。

一方で、梁の横座屈時に非構造部材が補剛材として機能する可能性があることが示されている。しかし、現行の設計基準・指針<sup>3)</sup>では非構造部材の影響は考慮されておらず、補剛効果も規定されていない。実構造物では梁上部に多くの非構造部材が取り付けられており、横座屈時にこれらに拘束されることで座屈挙動に変化が生じると考えられる。したがって、より正確な梁の横座屈挙動および耐力を把握するためには非構造部材の補剛効果を明らかにする必要がある。

非構造部材の補剛効果に関する既往研究は、屋根折板を連続補剛材とみなした連続補剛 H 形鋼梁の部分架構荷実験を行った研究<sup>4)</sup>から、勾配曲げを受ける H 形鋼梁の横座屈変形に対する連続補剛効果を明らかにしているが、単一の梁を対象としている。一方で、実構造物では複数の梁に渡り非構造部材が取り付けられており、特定の梁が座屈することで非構造部材を介して応力が伝達し、骨組全体で予期しない挙動を誘発する可能性がある。また、縮小ラーメン骨組の振動台実験を行った既往の研究<sup>5)</sup>では、無補剛の梁、屋根折板の取り付け連続補剛の梁を対象としており、非構造部材の有無による横座屈挙動の違いおよびラーメン骨組に及ぼす屋根折板の補剛効果を明らかにしている。一方で、実構造物では屋根折板が直接梁に取り付く事例は少なく、梁には母屋が取り付けられているため、母屋の補剛効果も把握する必要がある。

本研究では、母屋により離散補剛された縮小ラーメン骨組を用いた縮小模型振動台実験を行い、ラーメン骨組における母屋の有無および異なる補剛間隔による H 形断面梁の横座屈性状の違いを把握することを目的とする。

### 2. 並列 H 形断面梁の荷重実験概要

図 1 に実験装置概要図を示す。実験装置は、図 1(a)~(c)に示すように、長手方向(z 方向)が 600 mm、短手方向(x 方向)が 400 mm、高さ方向(y 方向)が 355 mm の柱-梁-(母屋)で構成された単層の大空間構造物を模した 1 層 1 スパンの縮小ラーメン骨組である。繰り返し荷重の際に水平力(質量と加速度の積)を作用させるために、試験体となる梁の直交方向の梁(以下:直交梁)に錘(質量:9kg)を設置している。柱脚部分は x 軸周りのみ回転可能な一方向ピンとする。

図 1(b),(c)に母屋の配置方法および断面形状を示す。離散補剛の場合、図 1(b)に示すように、母屋を試験体の直交方向(x 方向)に取り付ける。母屋断面は図 1(c)に示すように、0.3 mm 厚の溝形鋼とし、接着方法は母屋と試験体の接触面を接着剤等で強固に接着した。

\*Lateral buckling characteristics of parallel H-Shaped-Beams with different brace spacing  
by Haruki KOMURO and Yuki YOSHINO

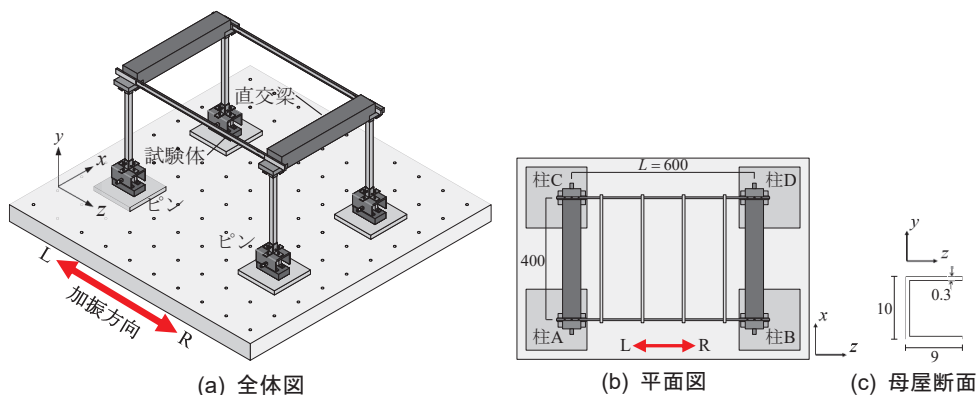


図1 実験装置概要図

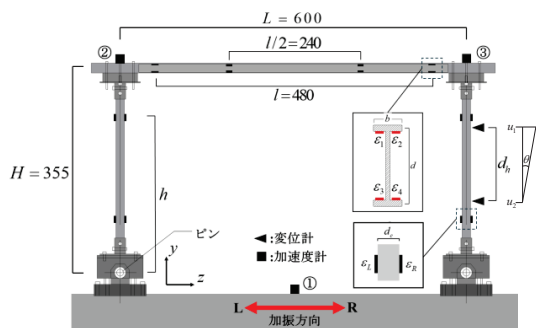


図2 計測位置詳細図

表1 材料特性

	材料	断面	$E$ ( $10^3\text{N/mm}^2$ )	$\sigma_y$ ( $\text{N/mm}^2$ )
柱	A6063	■-15×15	67.9	186
梁(試験体)	A6063	H-17×6×0.8×1.25	68.8	202.7

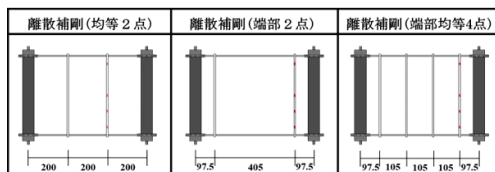


図3 補剛形式

表1に材料特性を示す。梁材および柱材はアルミ A6063 を用いている。梁材は 13B 号試験片を 3 本切り出し、行った引張試験結果の平均値であり、柱材は既往研究と同様であるため、文献 5) にて示されている数値を参照した。

図2に骨組の計測位置詳細を示す。ラーメン骨組に作用する水平力は図中の■プロットで示す、直交梁に設置した加速度計②,③により計測された応答加速度と質量の積から算出する。また、骨組の傾きによって生じる部材角は、図中の◀プロットで示す柱 B, 柱 D の柱頭および柱脚付近に設置した変位計により算出する。図中の黒プロットは柱梁における歪ゲージの貼付位置を示している。柱の歪ゲージは柱頭柱脚に生じるモーメントを算出するために  $H=355\text{mm}$  を基準とし、柱の中央より  $\pm 0.25H$  の位置に貼付する。梁の歪ゲージは材長方向(z 方向)の応力分布を明らかにするために、 $L=600\text{mm}$  を基準とし、部材中央より  $\pm l/4=0.2L$  および  $l/2=0.4L$  の位置に貼付する。梁断面内の貼付位置は、横曲げ歪を算出するため、図中に示すように上下フランジともにフランジ内側かつフランジ端部とする。なお、フランジ内側に貼付する理由として、歪ゲージ貼付位置に母屋材を接着した場合を考慮している。また、後述する応答加速度や載荷履歴曲線は、骨組が R 側に傾いたときを正載荷(正值)としている。

図3に母屋の補剛形式を示す。本研究では、離散補剛の補剛形式として図3に示す3パターンを検討する。図3の左から順に、 $L=600\text{mm}$ を基準とし、3等分するように2点に配置する均等2点補剛、無補剛載荷時に横座屈変形量が最大となる梁両端部に配置する端部2点補剛、端部2点補剛の内側にさらに均等に2点配置した端部均等4点補剛としている。なお、比較対象として無補剛の場合も検討する。

図4に振動台の载荷プログラムを示す。縦軸は入力加速度  $a(\text{G})$ 、横軸は時刻歴  $t(\text{sec})$  である。本研究では、入力加速度として各補剛形式時に自由振動実験にて計測した実験装置の固有振動数近傍に合わせた漸増する正弦波振動を与え、 $z$  方向に加振することにより試験体に逆対称曲げモーメントを作用させる。

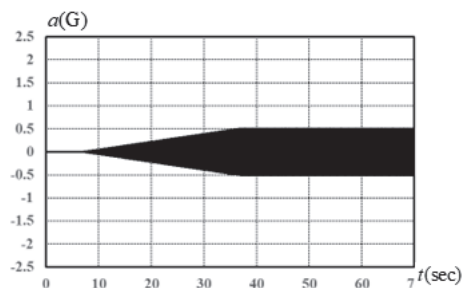


図4 入力加速度

### 3. 並列 H 形断面梁の载荷実験結果

#### 3.1 補剛間隔の異なる H 形断面梁の荷重変位関係

図5に加速度と時刻歴の関係を示す。縦軸は図2の■プロットで示す加速度計①～③によって得られた応答加速度  $a(\text{G})$ 、横軸は時刻歴  $t(\text{sec})$  である。なお、図中の離散補剛は端部均等4点補剛の場合である。

図5より、振動台の応答加速度(①)は  $t=35\text{s}$  まで上昇している。一方で、骨組の応答加速度(②,③の平均値)は  $t=7\text{s}$  付近から応答加速度が急激に上昇し、無補剛は  $t=17.8\text{s}$ 、離散補剛は  $t=23.3\text{s}$  に加速度最大を迎えた。離散補剛の最大応答加速度は無補剛よりも大きく、骨組により大きな水平力が作用した。最大加速度到達後は、振動台の応答加速度が上昇しているのに対し、骨組の応答加速度は急激に低下した後一定をたどっている。

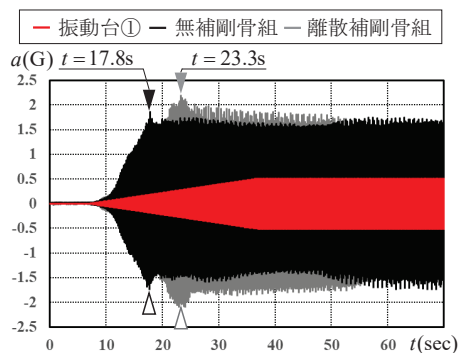
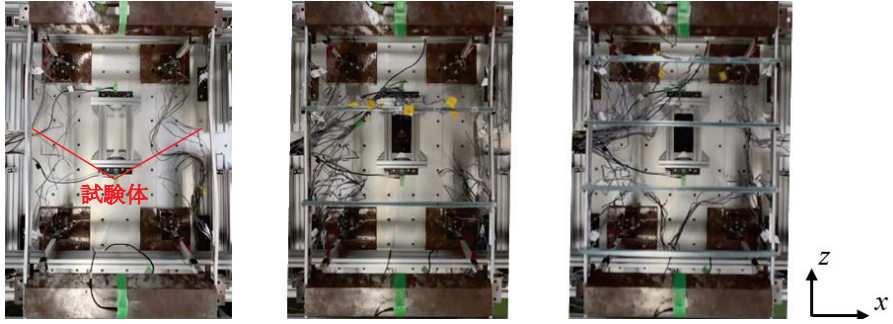


図5 時刻歴応答加速度

離散補剛された場合に作用する水平力が上昇した要因として、無補剛時に振動台の応答加速度が上昇する一方で、試験体の面外方向( $x$  方向)の変形を伴う横座屈現象により、骨組の耐力が低下したが、離散補剛によって、面外変形を拘束したことにより横座屈による耐力の低下を遅らせることができたためである。写真1は無補剛最大加速度直後における各補剛形式の試験体の変形の様子を示したものである。写真から見ても離散補剛により試験体の横座屈変形が拘束されていることがわかる。また、最大加速度到達後に骨組の応答加速度が低下した要因として、骨組の耐力低下に伴った固有振動数の変化により、入力固有振動数に対する骨組の共振域のズレが影響している考えられる。



(a) 無補剛 (b) 均等 2 点補剛 (c) 4 点補剛  
写真 1 試験体の変形の様子(無補剛最大加速度直後)

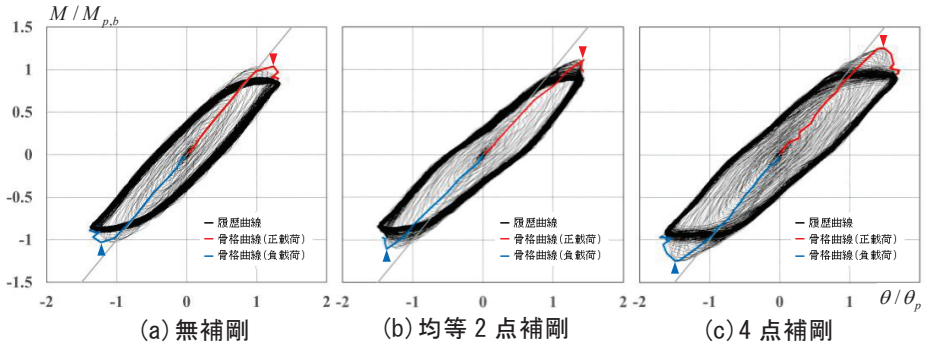


図 6 载荷履歴曲線

図 6 に载荷履歴曲線を示す。縦軸は柱から換算した材端曲げモーメント  $M$  を梁の全塑性モーメント  $M_{p,b}(\sigma_y \times Z_p)$  で除した値である。 $M$  は図 2 に示す各柱の軸歪を用いて(1)式より求めた曲げモーメントを材端の位置に換算したものである。ここで、梁降伏時に柱に生じる軸歪は柱の降伏歪の 1/4 程度となり、柱は弾性と想定できるため、柱の軸歪による換算値を用いた。なお、弾性域において梁の軸歪より求めた梁端曲げモーメントと柱の軸歪により求めた材端曲げモーメントが等しくなることを確認している。

$$M = \frac{\varepsilon_L - \varepsilon_R}{d_c} E_c I_c \left( \frac{H}{H-h} \right) \tag{1}$$

ここで、 $\varepsilon_L$ 、 $\varepsilon_R$ ：柱左右の軸歪、 $E_c I_c$ ：柱の曲げ剛性、 $d_c$ ：柱の歪計測間距離である。横軸は図 2 ◀プロットで示す水平変位の差を計測間距離で除した部材角  $\theta = (u_1 - u_2) / d_b$  を梁の全塑性モーメント  $M_{p,b}$  時の柱の部材角  $\theta_p$  で除した値である。 $\theta_p$  は(2)式より求めた。

$$\theta_p = \frac{M_{p,b} L}{6 E_b I_b} \left( 1 + \frac{E_b I_b H}{2 E_c I_c L} \right) \tag{2}$$

ここで、 $E_b I_b$ ：梁の強軸回りの曲げ剛性、 $E_c I_c$ ：柱の曲げ剛性である。図 6 中の ▼▶プロットは正負载荷時の最大荷重の位置を示している。また、赤、青線は後述する骨格曲線を示している。

図 6 より、無補剛の場合は、 $\theta/\theta_p = 1.18$  に最大荷重に到達後、急激に耐力低下している。一方、離散補剛された骨組は最大荷重および部材角比が無補剛よりも上昇しているが、最大荷重到達後は無補剛と同様に急激な耐力低下が発生している。これは、写真 1 にもあるように横座屈変形は試験体全体に連続して発生するが、母屋は離散的に配置されており、梁を連続的に拘束できないためであると考えられる。

図 7 に正載荷時の骨格曲線を示す。縦軸および横軸は図 6 と同様であり、縦軸は履歴曲線における周期ごとの最大モーメントをつなぎ合わせた値である。横軸は縦軸の周期ごとの最大モーメント時の柱の部材角比  $\theta/\theta_p$  である。▼プロットは無補剛時、▽プロットは離散補剛時の最大荷重位置を示している。

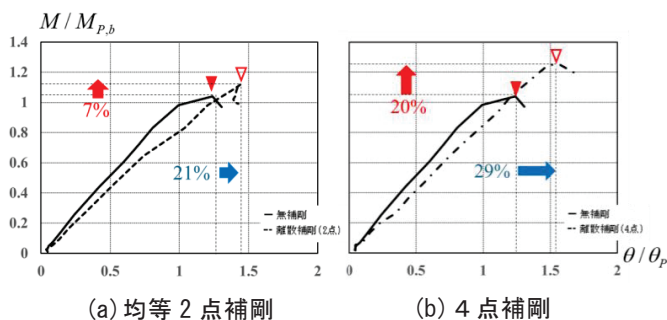


図 7 骨格曲線

各補剛条件による耐力の違いは、無補剛は  $\theta/\theta_p = 1.18$  のとき  $M/M_{p,b} = 1.04$ 、離散補剛は 2 点補剛の場合が  $\theta/\theta_p = 1.43$  のとき  $M/M_{p,b} = 1.11$ 、4 点補剛の場合が  $\theta/\theta_p = 1.52$  のとき  $M/M_{p,b} = 1.25$  であった。無補剛と比較して、2 点補剛の場合、最大荷重は 7% 程度、最大荷重時の部材角は 21% 程度大きくなり、4 点補剛の場合、最大荷重は 20% 程度、最大荷重時の部材角は 29% 程度大きくなった。離散補剛により最大荷重および塑性変形性能がともに向上した。また、補剛本数が多くなることで、最大荷重が大幅に向上することを把握した。

### 3.2 補剛間隔の異なる H 型断面梁の横座屈性状

図 8 に試験体梁端部に発生する横曲げ歪と部材角比の関係を示す。縦軸は正負載荷時に圧縮応力が生じる上下フランジに生じた横曲げ歪の値であり、図 2 中に示す上下フランジに貼付した歪の差 ( $\varepsilon_M = ((\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/b)$  もしくは  $(\varepsilon_3 - \varepsilon_4)/b$ ) により算出した。横軸は周期ごとの最大モーメント時の柱の部材角比  $\theta/\theta_p$  である。また、▼プロットは最大荷重時の部材角比を示しており、▽プロットは無補剛における最大荷重時の部材角比を示している。

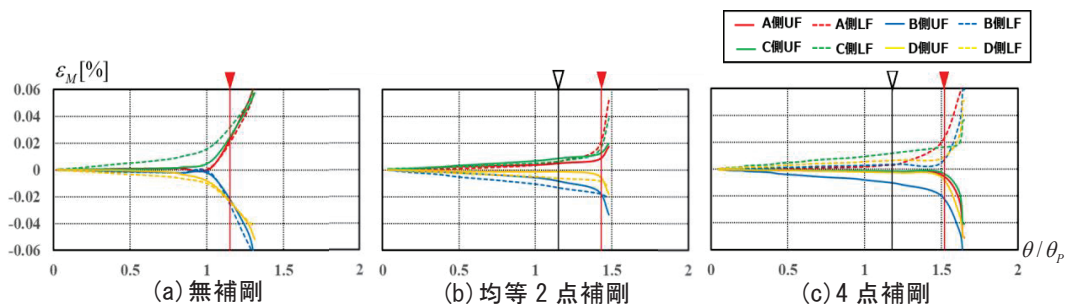


図 8 横曲げ歪-部材角比関係

図 8 より、無補剛時は  $\theta/\theta_p=1.0$  を以降に横曲げ歪が緩やかに上昇していき、骨組の最大荷重時には  $\varepsilon_M=0.02\%$  を示している。一方、離散補剛では 2 点,4 点ともに無補剛最大時の横曲げ歪は無補剛よりも小さく、4 点補剛においてはほとんど発生していない。

これは先述した通り、試験体の面外方向(x 方向)の変形を伴う横座屈現象に対して、母屋により横曲げ変形を拘束したためであり、母屋による拘束効果が確認できた。

また、骨組の最大荷重時の横曲げ歪は無補剛と同様に  $\varepsilon_M=0.02\%$  を示しているが、離散補剛では最大荷重到達後に横曲げ歪が急激に上昇している。なお、母屋の取り付く上フランジと下フランジの横曲げ歪に大きな違いは確認できなかった。

#### 4. 結

本研究では、離散補剛された並列 H 形断面梁の横座屈性状を把握した。無補剛と比較して最大耐力は均等 2 点補剛の場合 7%程度、端部均等 4 点補剛の場合 20%程度向上した。部材角比は均等 2 点補剛の場合 21%程度、端部均等 4 点補剛の場合 29%程度向上した。

また、離散補剛の場合、母屋により無補剛時の座屈変形を拘束できているため最大耐力および部材角比が上昇した。しかし、離散補剛は部分的な補剛しかできないため、最終的な座屈変形の拘束はできない。

#### 参考文献

- 1) 吉敷祥一, 仲田章太郎, 黒澤未来: 東北地方太平洋沖地震等による被災を経て補強・補修された屋内運動場の地震被害調査, 日本建築学会 技術報告集, 第 28 巻, 第 70 号, pp.1230-1235, 2022.10
- 2) 吉敷祥一ほか: 令和 6 年(2024 年)能登半島地震にて被災した鉄骨造文教施設の被害調査の概要, 日本建築学会技術報告集, 第 31 巻, 第 77 号, pp.264-269, 2025.2
- 3) 日本建築学会: 鋼構造限界状態設計指針・同解説, 2010
- 4) 吉野 裕貴, 廖 望, 木村 祥裕: 部分架構荷重実験による連続補剛 H 形鋼梁の横座屈性状に及ぼす補剛効果, 日本建築学会構造系論文集, 第 87 巻, 第 797 号, pp.634-645, 2022.7
- 5) 久保理博飛, 吉野裕貴, 木村祥裕: 縮小ラーメン模型における連続補剛 並列 H 形鋼梁の横座屈挙動, 日本建築学会東北支部研究報告集, 第 86 号, pp.9-12, 2023.6