

# 高力ボルト接合による重ね梁の補強構法に関する研究

## — 山留め腹起し材における設計方法の検討 —

日大生産工(院) ○高島 透      日大生産工 藤本 利昭      日大生産工 下村 修一  
丸藤シートパイル      竹井 涼介

### 1. はじめに

山留めの腹起し材や隅各部においては、部材を補強するためにH形鋼を重ね合わせて使用することは一般的なことであり、よく用いられる構法の一つでもある。一方、根切り空間において、切梁工法が採用されることは多いが、掘削・躯体築造の際の施工に支障を生じさせることや切梁の取り付けに手間がかかるなどの問題があるため、作業空間を効率的に利用する上で、適していなかった。

このような背景を踏まえて、筆者らは施工の容易さと経済性から2つのH形鋼を高力ボルトにより重ね接合することで、高耐力・高剛性の部材となる重ね梁構法を提案する。

そこで、筆者らは重ね梁の高力ボルトによる摩擦接合部に着目し、摩擦接合部引張実験、重ね梁の縮小試験体および実大試験体による曲げ実験により、重ね梁の基礎的な構造的な性能について検証を行った<sup>1)2)3)</sup>。

本報告では、縮小試験体及び実大試験体による曲げ実験の結果を中心に、重ね梁の設計法に関して考察したので報告する。

### 2. 実験概要

#### 2.1 縮小試験体の曲げ実験概要<sup>2)</sup>

摩擦接合部引張実験<sup>1)</sup>から得た各摩擦面処理方法のすべり係数の値を基に、2つのH形鋼を重ね接合した梁の構造的な性能を把握した。摩擦面処理方法と高力ボルト本数を実験変数とし、縮小試験体による曲げ実験を行うことですべり耐力への影響を検証した。なお部材の基本試験として、単体のH形鋼の曲げ実験を行いそれぞれ比較検討している。図1に縮小試験体の詳細図、図2に縮小実験結果を示す。

基準試験体は、摩擦接合面をショットブラスト処理したボルト間隔@120mmの試験体(以下、ショット120)と設定した。上記の基準試験体に対して、ボルトピッチのみをそれぞれ@90mm(以下、ショット90)、@240mm(以下、シ

ョット240)に変化させた試験体、ボルトピッチは変えずに摩擦面の処理を施さない場合(黒皮120)、塗装した場合(塗装120)の試験体の計5体の重ね梁を製作した。

実験結果として、図2に示す通り全ての試験体において、中央たわみの最大値に大きな差異が認められなかった。また、黒皮120、塗装120、ショット240試験体では、摩擦接合面にすべりが生じることで、起きる上下梁間のずれ(横ずれ)を確認することができたが、中央たわみに大きな変化はなく、その影響は少ないことが分かった。しかし、黒皮120、塗装120、ショット240においてはすべりが生じた後に、上下のH形鋼が別々の挙動を示すことが分かっている。

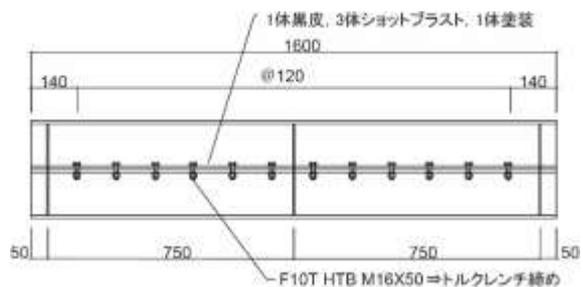


図1 縮小試験体詳細図

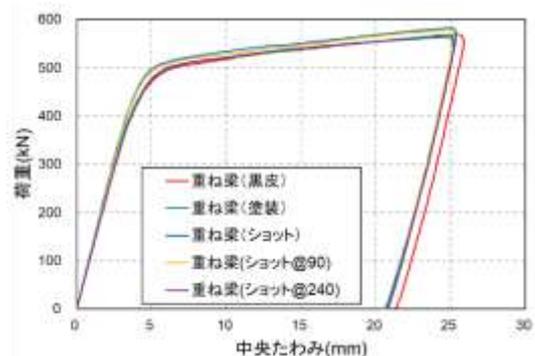


図2 縮小実験結果

#### 2.2 実大試験体の曲げ実験概要<sup>3)</sup>

前節の縮小実験により、縮小試験体における重ね梁の曲げ性状を把握した。次に山留め腹起

A study on the reinforcement building construction of built-up beam using high strength bolts

— Consideration on design method of the earth retaining wales —

Toru TAKASHIMA, Toshiaki FUJIMOTO,  
Shuichi SHIMOMURA and Ryosuke TAKEI

し材における構造性能を検査するため、既存の腹起し材により製作した2体の実大試験体による重ね梁の曲げ実験を行った。

図3に実大試験体の詳細図を示す。試験体は既に腹起し材として使用したことがあるH形鋼から無作為に抽出し、摩擦接合面をショットブラストとしたものを製作した。実験は2体の同一試験体について行い構造性能のばらつきの確認と、すべり耐力の整合性を縮小試験体と比較検証している。

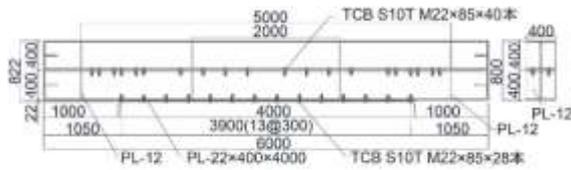


図3 実大試験体詳細図

### 3. 重ね梁の設計法に関する検討

#### 3.1 重ね梁のすべり耐力設計式

文献4)を参照し、重ね梁のすべり耐力式について検討を行った。初めに図4に示すように、重ね梁の上梁に作用する軸力 $F_1$ について考える。上梁にかかる応力 $\sigma$ は断面を細かく分割した各微小断面においては一定であると見なせるため、各微小断面が負担する応力は $\sigma \cdot dA$ と表すことができる。これらの集合が外力と釣り合っていると考えると軸力 $F_1$ は以下のように(1)式によって表すことができる。

$$F_1 = \int_{A_H} \sigma dA \quad \dots\dots\dots (1)$$

また(1)式の応力 $\sigma$ を式変換すると、(2)式となる。

$$F_1 = \frac{M}{I} \int_{A_H} y dA = \frac{MS_1}{I} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $A_H$ : H形鋼の断面積(mm<sup>2</sup>)、 $M$ : モーメント(kN・mm)、 $I$ : 重ね梁の断面二次モーメント(mm<sup>4</sup>)、 $y$ : 中立軸からの距離(mm)、 $S_1$ : 上梁の中立軸に関する断面一次モーメント(mm<sup>3</sup>)である。

次に(2)式の両辺を微分すると(3)式のように表すことができる。

$$\frac{dF_1}{dx} = \frac{dM}{dx} \cdot \frac{S_1}{I} = \frac{QS_1}{I} \quad \dots\dots\dots (3)$$

この $dx$ をボルトピッチ $p_1$ と仮定すると、(4)式のようになる。

$$dF_1 = \frac{QS_1}{I} p_1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、 $dx$ をボルトピッチ $p_1$ と仮定しているため、微小断面に作用する軸力 $dF_1$ は2本のボルトの抵抗値と等しくなっていると考えられる。よってボルト耐力 $R$ が2本分より、 $2R > dF_1$ が成立する。これより $2R$ を(4)式に代入すると(5)式のように表すことができる。

$$p = \frac{2IR}{QS_1} \quad \dots\dots\dots (5)$$

また、この式をせん断力 $Q$ の式に整理し、すべり耐力 $P_s$ で表すと以下の(6)式で与えられる。

$$P_s = 2Q = \frac{4IR}{S_1 p_1} = \frac{4I\mu R_1}{S_1 p_1} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\mu$ : ボルトのすべり係数、 $R_1$ : ボルト設計張力(kN)を表す。ボルトすべり耐力 $R$ は摩擦面のすべりを考慮に入れ、すべり係数 $\mu$ とボルト張力 $R_1$ の積より表されるためその値を代入し、評価できるようにした。

以上より、重ね梁のすべり耐力 $P_s$ は(6)式により使用するボルト張力 $R_1$ 、ボルトピッチ $p_1$ と摩擦面のすべり係数 $\mu$ により評価できると考えられる。

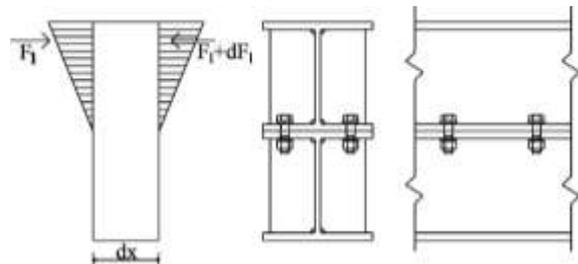


図4 重ね梁微小断面略図

#### 3.2 すべり耐力の検討

前節ではすべり耐力式の考え方について述べた。本節では(6)式を用い求めたすべり耐力結果に基づき、実験結果と比較検討を行ったので報告する。また、実大試験体の摩擦面はショットブラスト処理を施しているため、すべり係数は0.45を用い、(6)式によってすべり耐力を算出した。表1に縮小試験体(重ね梁)の計算耐力一覧、表2に実大試験体(重ね梁)の計算耐力一覧を示す。

縮小実験で得られた結果<sup>2)</sup>では、中央たわみに大きな差が見られなかった。この理由として表1に示す通りショット120とショット90において、すべり耐力 $P_s$ が降伏耐力 $P_y$ を上回ることに、降伏が先に起きたことが考えられる。また、黒皮120、塗装120、ショット240においても中央たわみの差が小さい原因として、スパンが短いことにより大きなせん断力が作用し

たことが考えられる。しかし、黒皮120、塗装120、ショット240ではたわみの値の差は小さいものの、降伏に至る前にすべり耐力に達するため、すべり耐力を境界として、上下H形鋼に分離が生じている。それらを考慮すると、重ね梁本来の性能を評価する上で、計算すべり耐力以下であることが重要であり、(6)式によるすべり耐力で評価することが望ましいと考えられる。

次に、実大実験の結果<sup>3)</sup>は縮小実験とは異なり、すべり耐力 $P_s$ と降伏耐力 $P_y$ に大きな差があるため、計算すべり耐力を超えた所から横ずれが生じ、徐々に梁の剛性低下が起こった。

このことから、山留め腹起し材の重ね梁では(6)式によるすべり耐力を設計の許容耐力として用いることで、その性能を評価できると考えられる。

以上から、重ね梁の設計においてすべり耐力は重要な指標であると言える。

表1 縮小試験体(重ね梁)の計算耐力一覧

摩擦面	ボルト ピッチ @(mm)	すべり 耐力 $P_s$ (kN)	すべり 係数 $\mu$ (平均)	降伏 耐力 $P_y$ (kN)	全塑性 耐力 $P_p$ (kN)
ショット ブラスト	90	551	0.45	392	458
	120	413	0.45		
	240	206	0.45		
黒皮	120	329	0.36		
塗装	120	206	0.26		

表2 実大試験体(重ね梁)の計算耐力一覧

	降伏耐力 $P_y$ (kN)	全塑性 耐力 $P_p$ (kN)	平均ボルト ピッチ @(mm)	すべり 耐力 $P_s$ (kN)
H形鋼×2	2048	2256	250	1040
重ね梁	2368	2689		
重ね梁 +プレート	2839	3794		

### 3.3 スパンに関する検討

縮小試験体における、スパンの検討を以下の(7)、(8)式により行った。

$$L_y = \frac{2\sigma_{yf}Z}{Q_y \cdot 10^3} = \frac{4\sigma_{yf}Z}{P_y \cdot 10^3} \dots\dots\dots (7)$$

$$L_p = \frac{4(\sigma_{yf}Z_{pf} + \sigma_{yw}Z_{pw})}{P_p \cdot 10^3} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $L_y$ :降伏状態におけるスパン(mm),  
 $\sigma_{yf}$ :フランジの降伏強度(N/mm<sup>2</sup>),  $Z$ :断面係数(mm<sup>3</sup>),  $Q_y$ :降伏せん断荷重(kN),  $P_y$ :降伏荷重(kN),  $L_p$ :全塑性状態におけるスパン(mm),  
 $\sigma_{yw}$ :ウェブの降伏強度(N/mm<sup>2</sup>),  $Z_{pf}$ :フランジの塑性断面係数(mm<sup>3</sup>),  $Z_{pw}$ :ウェブの塑性断面係数(mm<sup>3</sup>),  $P_p$ :全塑性耐力(kN)を表す。

H形鋼の降伏応力度(297N/mm<sup>2</sup>)を基に、接合面を一体化していない試験体(以下H形鋼×2とする)と、高力ボルトにより接合した重ね梁におけるスパン $L$ をH形鋼単体と比較検討した。表3にその計算結果を示した。

重ね梁のスパンはH形鋼が降伏時においてH形鋼単体の2.36倍、H形鋼×2に対して1.18倍、全塑性時ではH形鋼単体の2.45倍、H形鋼×2に対して1.23倍のスパンが可能となる。重ね梁は単体のH形鋼を用いるより、2倍以上のスパンを可能とし、またH形鋼を単に重ねるよりも高い効果があることが分かった。これにより、スパンにおいても、高力ボルトと摩擦面のショットブラスト処理によるH形鋼の一体化の効果を確認できた。

表3 縮小試験体によるスパンの検討結果

	H形鋼が降伏時の スパン $L_y$ (mm)	H形鋼が全塑性時の スパン $L_p$ (mm)
H形鋼単体	1500	1500
H形鋼×2	3000	3000
重ね梁	3551	3682

### 3.4 変形量に関する検討

#### 3.4.1 縮小試験体の場合

重ね梁の変形量(中央たわみ)を梁の曲げ変形の式とせん断変形の式を足し合わせた以下の(9)式から求めた。

$$\delta = \frac{Ql^3}{24EI} + \frac{Qlk}{2GA_w} = \frac{Ql}{2} \left( \frac{l^2}{12EI} + \frac{\kappa}{GA_w} \right) \cdot (9)$$

ここで、 $\delta$ :変形量(mm),  $Q$ :せん断力(N),  $l$ :スパン(mm),  $\kappa$ :形状係数,  $E$ :ヤング係数(N/mm<sup>2</sup>),  $I$ :断面二次モーメント(mm<sup>4</sup>),  $G$ :せん断弾性係数(N/mm<sup>2</sup>),  $A_w$ :ウェブ断面積(mm<sup>2</sup>)を表す。また、スパンと同様にH形鋼の降伏応力度(297N/mm<sup>2</sup>)を基に、H形鋼×2と高力ボルトにより接合した重ね梁における変形量 $\delta$ をH形鋼単体と比較検討した。表4にその計算結果を示した。

結果として、重ね梁の変形量 $\delta$ はH形鋼が降伏時においてH形鋼単体時の0.28倍、H形鋼×2の0.55倍程に抑えることができる。

また、図5にH形鋼が降伏時の(8)式による計算変形量と実験値の比較図を示した。実験値との整合性は比較的高いと思われるが、計算値の方がわずかに小さい値となった。理由として、せん断力を卓越させるために、スパンを短く設定したことやせん断変形においてウェブが全て負担しているものとして計算を行ったため、その差が表れたと考えられる。

これらを加味したとしても、変形量を予測する上で(9)式は重要であると考えられる。

表4 縮小試験体による変形量の検討結果

	H形鋼が降伏時の変形量 $\delta_y$ (mm)
H形鋼単体	4.69
H形鋼×2	2.35
重ね梁	1.30

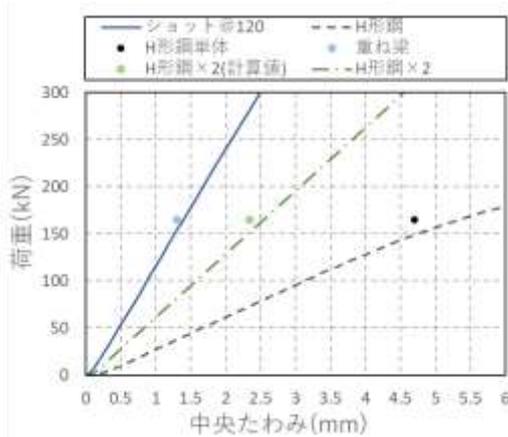


図5 変形量の計算値と実験値比較図

### 3.4.2 実大試験体の場合

縮小試験体と同様に梁の曲げ変形の式とせん断変形の式を足し合わせた以下の(10)式から求めた。ただし、実際の山留め腹起し材を想定し、等分布荷重時における変形量(中央たわみ)について検討した。

$$\delta = \frac{5wl^4}{384EI} + \frac{wl^2\kappa}{8GA_w} = \frac{wl^2}{8} \left( \frac{5l^2}{48EI} + \frac{\kappa}{GA_w} \right) \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $w$ ：等分布荷重(N/mm)を表す。

表5に実大試験体による変形量の検討結果を示す。H形鋼の降伏応力度(297N/mm<sup>2</sup>)から等分布荷重の値を想定し、その値を基準にH形鋼×2と高力ボルトにより接合した重ね梁における変形量 $\delta$ をH形鋼単体と比較検討した。

結果として、重ね梁の変形量 $\delta$ はH形鋼が降伏時においてH形鋼単体時の0.20倍、H形鋼×2

の0.79倍程に抑えることができる。縮小試験体に比べ、変形量の抑制効果は小さいものの、同様にH形鋼の一体化による効果を確認できた。

表5 実大試験体による変形量の検討結果

	H形鋼が降伏時の変形量 $\delta_y$ (mm)
H形鋼単体	14.53
H形鋼×2	3.73
重ね梁	2.96

以上から、高力ボルト接合と摩擦面処理により重ね梁にすることで、容易に構造性能の高い部材を製作でき、施工性も良いことから、小規模な現場においても、使用しやすいことが考えられる。

## 4. まとめ

本報告では、重ね梁の設計方法に関して、縮小試験体及び実大試験体の曲げ実験結果を基に、計算式を比較検討することにより検証した。得られた知見を以下に示す。

- 重ね梁におけるすべり耐力式を上梁にかかる軸力に注目し算出した。(6)式は特に実大試験体の評価基準となり、山留め腹起し材を設計する上で重要な指標であり、ボルトピッチや摩擦面処理方法を調整することで、適切なすべり耐力を算出できる。
- 重ね梁のスパンは応力度が一定の時、H形鋼単体の2.36倍、H形鋼×2に対して1.18倍長くすることができる。
- 重ね梁の変形量は縮小試験体では、応力度が一定の時、H形鋼単体時の0.28倍、H形鋼×2の0.55倍、実大試験体では、H形鋼単体時の0.20倍、H形鋼×2の0.79倍に抑えることができる。

### 参考文献

- 1) 高島透, 藤本利昭, 竹井涼介: 重ね梁を用いた山留め腹起し材に関する研究—摩擦接合部引張実験結果と考察—, 2018年度(第89回)日本建築学会関東支部研究報告集, pp.505-508, 2018.3
- 2) 高島透, 藤本利昭, 下村修一, 竹井涼介: 重ね梁を用いた山留め腹起し材に関する研究—組合せ腹起し縮小実験結果と考察—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造I, pp.709-710, 2019.9
- 3) 高島透, 藤本利昭, 下村修一, 竹井涼介: 重ね梁を用いた山留め腹起し材に関する研究—実大試験体による検討—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造I, pp.587-588, 2020.9
- 4) 北島頭正, 片山健次郎共訳, S.TIMOSHENKO: 材料力学 上巻, コロナ社, 1955.6