

S31. 階高が高い小規模鉄骨造建築物の ボルト接合に関する基準の合理化に関する検討

- (イ) 梁継手に関する接合部実験と実大骨組試験体
による検証実験
- (ロ) ブレース接合部に関する実験と実大骨組試験体
による検証実験

事業主体

国立大学法人 大阪大学

国立大学法人 宇都宮大学

国立大学法人 東京工業大学

共同研究機関

国立研究開発法人 建築研究所

調査の概要

鉄骨造建築物や住宅等において、ボルト接合を使用する部位として梁継手やブレース接合部等が考えられる。建築物の層間変形の計算では、ボルト孔の滑り(クリアランス)を考慮する必要がある、実験による検証と滑りを考慮した簡易な計算方法の提案が必要である。そのため、階高が高い小規模鉄骨造建築物を主対象として以下のような接合部の実験と実大骨組試験体による検証実験を行う。

(イ) 梁継手に関する接合部実験と実大骨組試験体による検証実験：ボルト接合を使用した梁継手の接合部等の実験を行って、ボルト孔の滑りを伴う履歴性状の確認、梁の塑性変形性能に及ぼす影響等の調査検討を行う。それらの結果に基づいて、骨組の層間変形の簡易な計算方法について検討し、提案する。また実大骨組試験体による検証実験を行う。

(ロ) ブレース接合部に関する実験と実大骨組試験体による検証実験：ボルト接合を使用したブレース接合部等の実験を行って、ボルト孔の滑りを伴う履歴性状の確認、ブレースの塑性変形性能に及ぼす影響等の調査検討を行う。それらの結果に基づいて、ブレース骨組の層間変形の簡易な計算方法について検討し、提案する。また実大骨組試験体による検証実験を行う。

実施体制

研究委員会

年4回程度開催:

- ・ 進捗の確認, 技術知見の共有, 意見交換など.
- ・ 各WGで得られた結果の集約・整理.



共同
研究

事業主体

大阪大学

(代表者: 准教授 桑原進)

宇都宮大学

(代表者: 准教授 中野達也)

東京工業大学

(代表者: 准教授 吉敷祥一)

国土交通省
国 総 研
関 連 団 体
等

梁 継 手 WG

ブ レ ース WG

梁継手に関する接合部実験と実大骨組試験体による
検証実験の計画と実行, 知見の分析. (随時開催)

ブレース接合部に関する接合部実験と実大骨組試験体による
検証実験の計画と実行, 知見の分析. (随時開催)

本成果報告資料の構成

(イ) 梁継手に関する接合部実験と実大骨組試験体による 検証実験：

第Ⅰ編 普通ボルトによる梁継手を有する
部分架構の載荷実験

第Ⅱ編 ボルト支圧接合梁継手を有する骨組の
すべり挙動を考慮した力学性状と層間変形角
の簡略化推定法 (理論・数値解析による検討)

(ロ) ブレース接合部に関する実験と実大骨組試験体 による検証実験：

第Ⅲ編 ブレース接合部における普通ボルトの
適用に関する検討

(イ) 梁継手に関する接合部実験と 実大骨組試験体による検証実験

令和元年度・2年度
建築基準整備促進事業成果報告会
S31. 階高が高い小規模鉄骨造
建築物のボルト接合に関する
基準の合理化に関する検討

第 I 編

普通ボルトによる梁継手を有する 部分架構の載荷実験

背景と目的

実験1 柱脚支持条件および梁継手位置に関する載荷実験

1年目：クリアランスおよび梁せいの影響を梁継手試験体で検討

2年目：柱脚の支持条件および梁継手位置の影響を部分架構試験体で検討

- 1年目に構築した評価式の妥当性を実験的に検証
- 梁継手に組合せ応力（曲げ+せん断力）が作用した場合の継手挙動

実験2 床スラブによるすべり抑制効果に関する載荷実験

1年目：ボルト接合部のすべりに起因する骨組の変形増大により、
層間変形角の制限値を超えるケースが少なくないことを確認

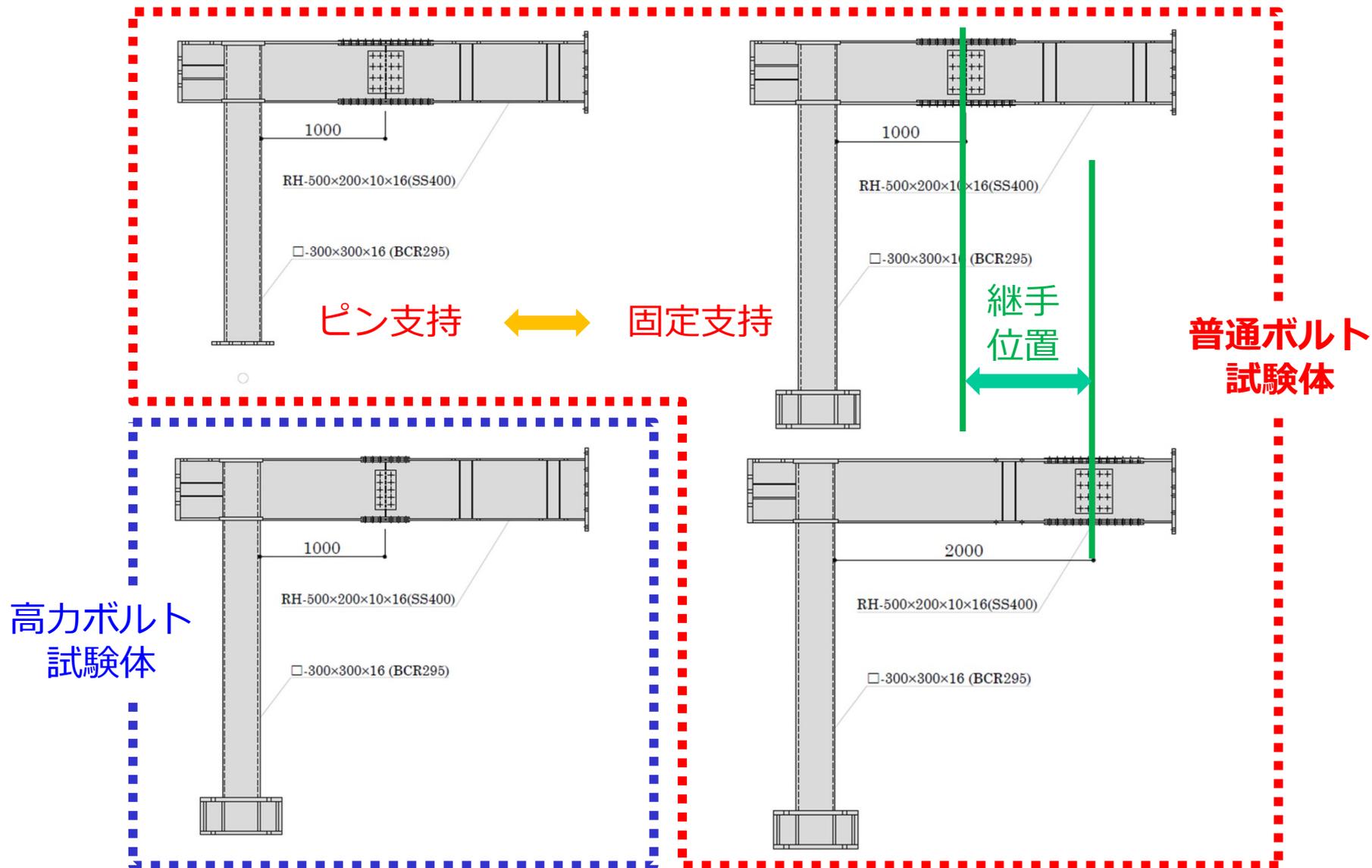
2年目：接合部のすべり量を抑える方策のひとつとして

床スラブによる上フランジ接合部のすべり拘束効果に着目

- デッキ合成スラブによる梁継手のすべり拘束効果について、
スラブの有無、スラブと梁の接合形式の影響を実験的に検討

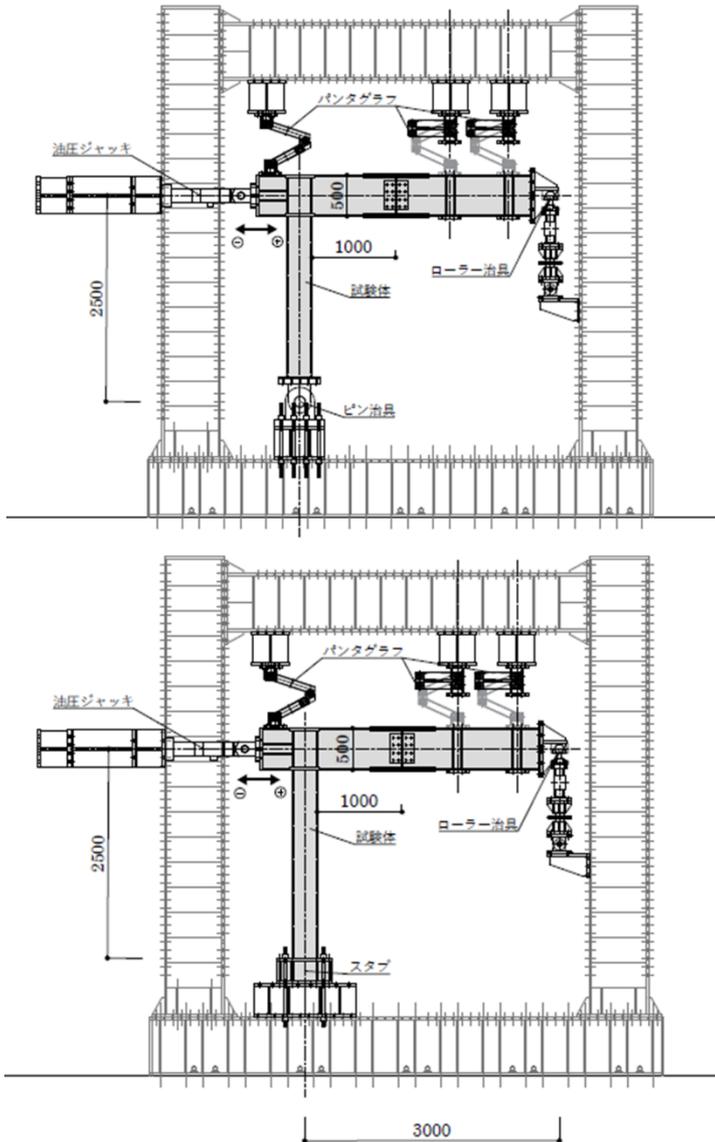
実験 1

一 試験体計画 (柱脚支持条件・梁継手位置) 一



実験1 - 載荷セットアップ -

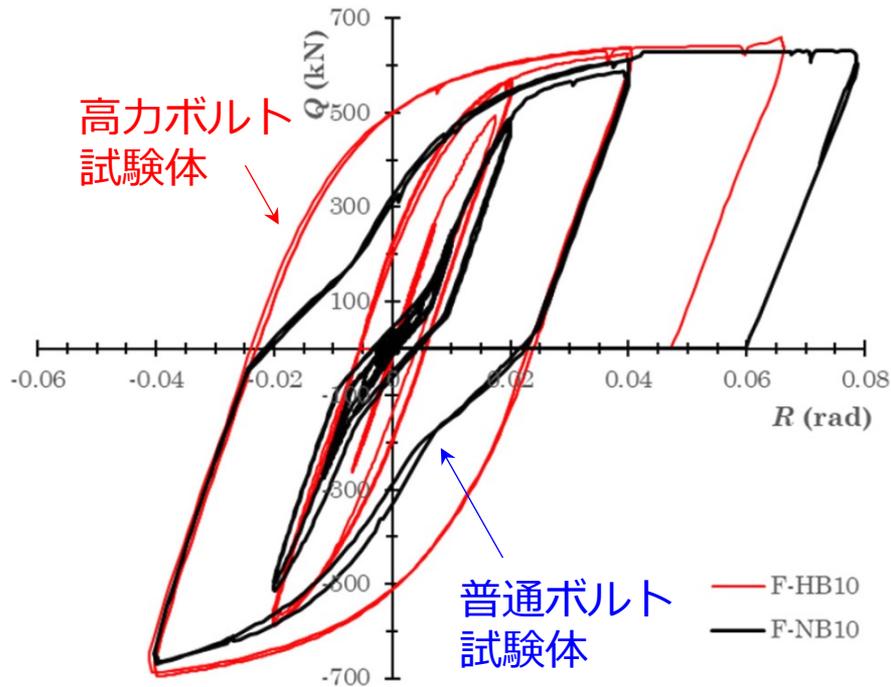
令和元年度・2年度
建築基準整備促進事業成果報告会
S31. 階高が高い小規模鉄骨造
建築物のボルト接合に関する
基準の合理化に関する検討



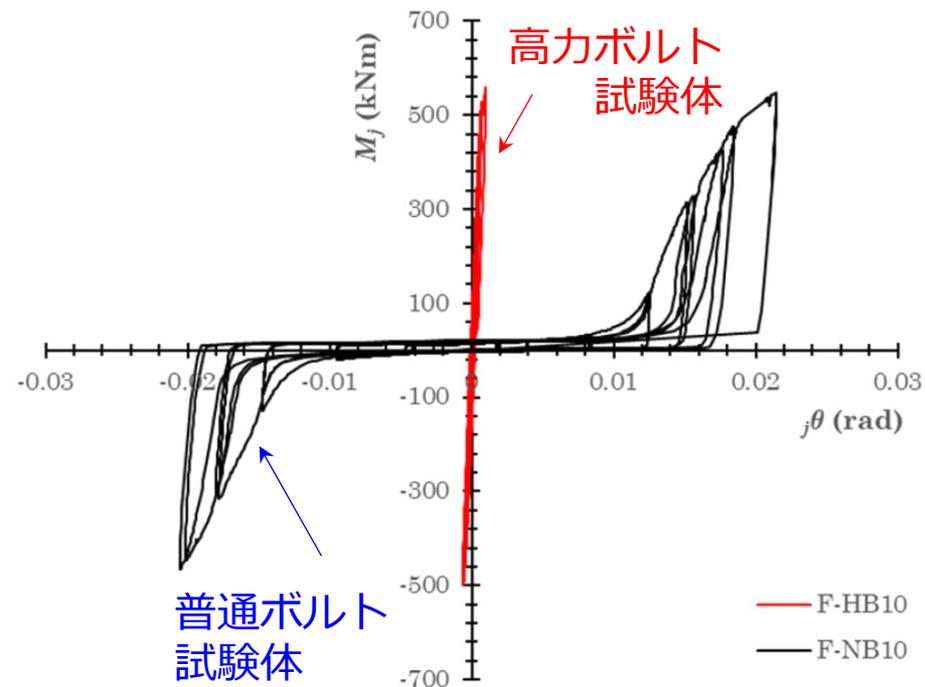
弾性域載荷のあと、層間変形角 $\pm 1/400$ 、 $\pm 1/200$ 、 $\pm 1/100$ 、 $\pm 1/50$ 、 $\pm 2/50$ rad を各2サイクル

実験 1

— 高力ボルトと普通ボルトの比較 —



架構の層せん断力－層間変形角関係

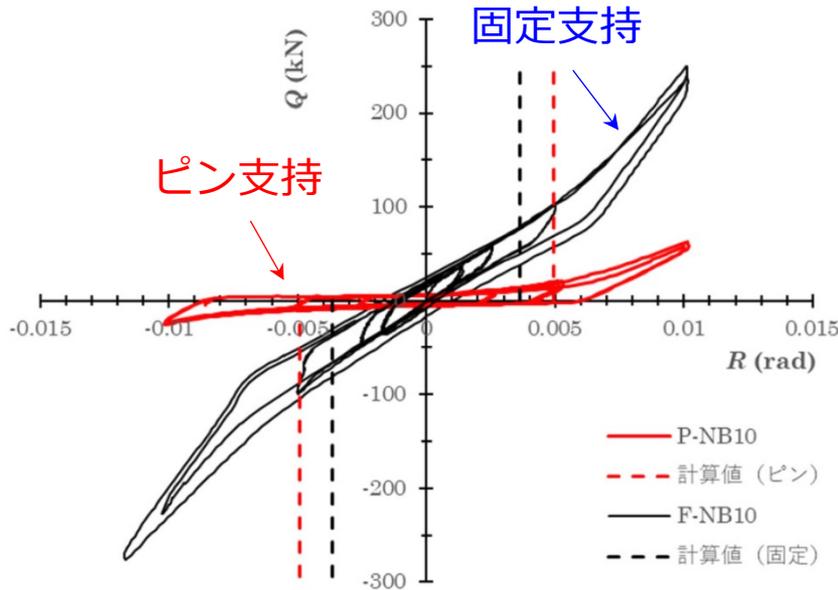


梁継手の曲げモーメント－回転角関係

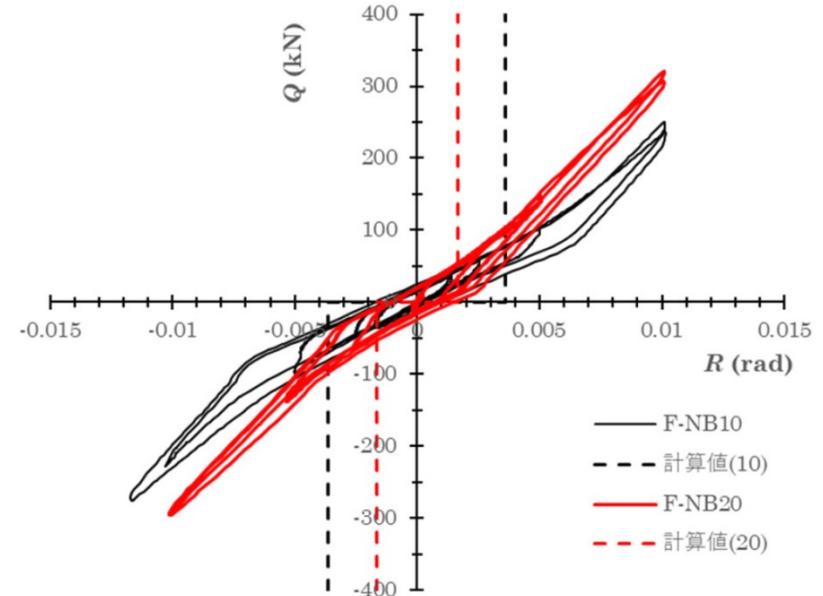
高力ボルト試験体は、梁の弾性範囲では安定した線形挙動を示すのに対して、普通ボルト試験体は初期からすべりを生じ、低荷重時から大きな変形を生じている。支圧状態に到達したあとの降伏曲げ耐力や最大曲げ耐力には大差はみられない。

実験 1

— 柱脚支持条件・梁継手位置の影響 —



柱脚支持条件の影響



梁継手位置の影響

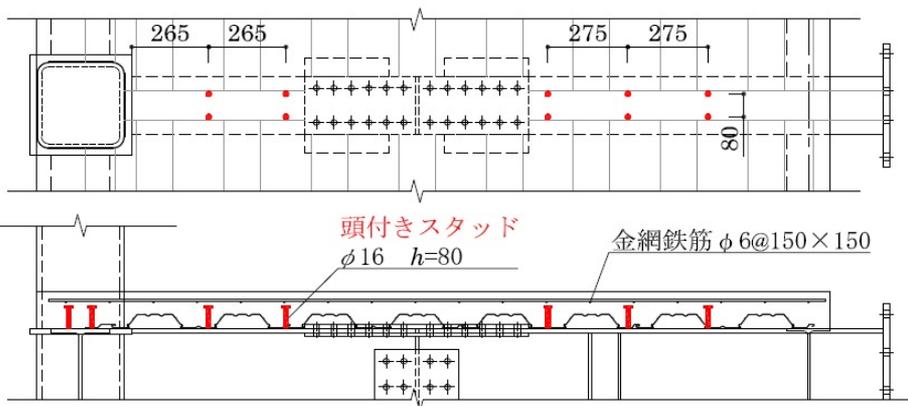
架構の層せん断力－層間変形角関係

- ピン支持に比べて固定支持の方が剛性は大きく、層間変形角は小さくなる。
- 梁継手位置が柱梁節点から離れるほど、層間変形角は小さくなる。
- 支圧開始点に相当する梁継手回転角の実験値と計算値の対応は良好である。

実験2

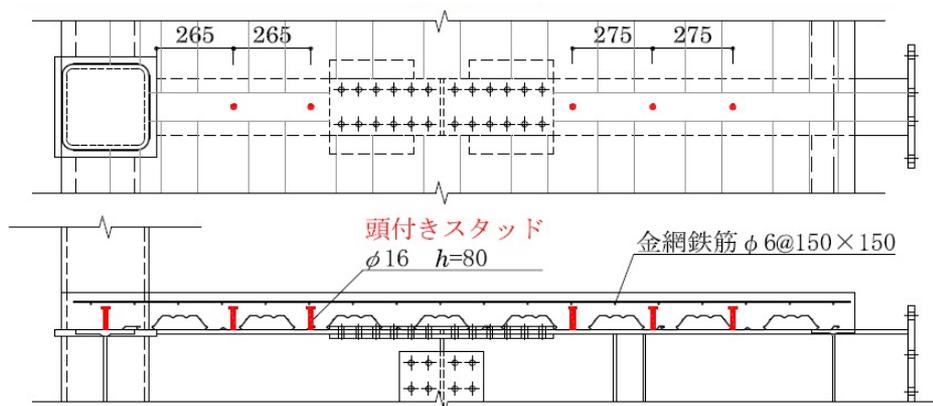
一試験体計画 (床スラブ有無, スラブ・梁接合形式) 一

令和元年度・2年度
建築基準整備促進事業成果報告会
S31. 階高が高い小規模鉄骨造
建築物のボルト接合に関する
基準の合理化に関する検討



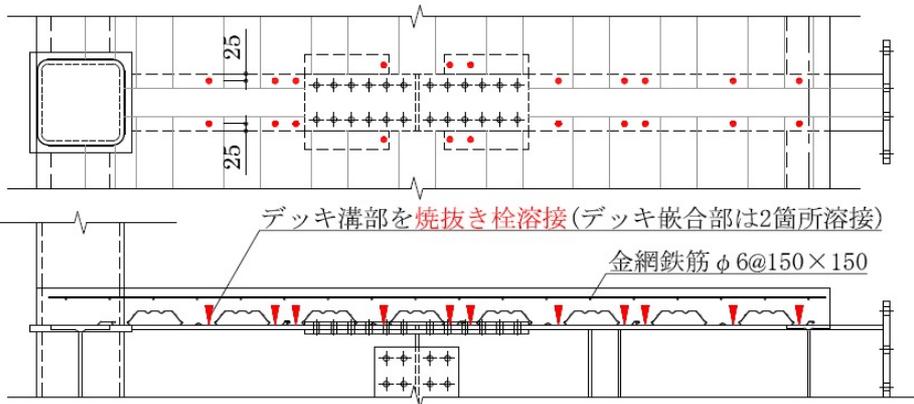
NB-SW10

完全合成梁



NB-SW05

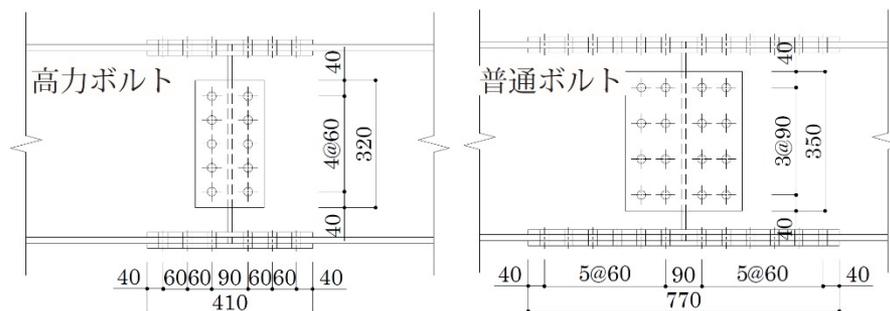
不完全合成梁



NB-PW

焼抜き栓溶接

純鉄骨

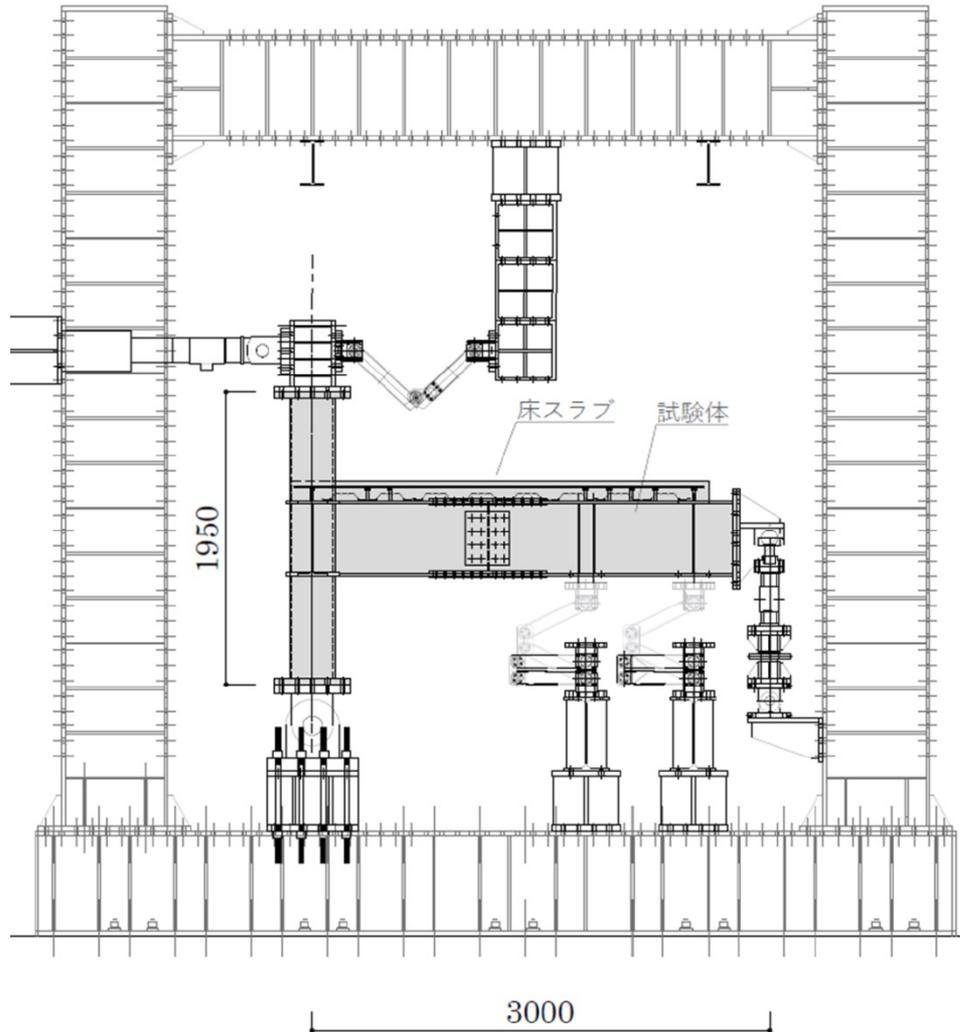


梁継手詳細図

実験2

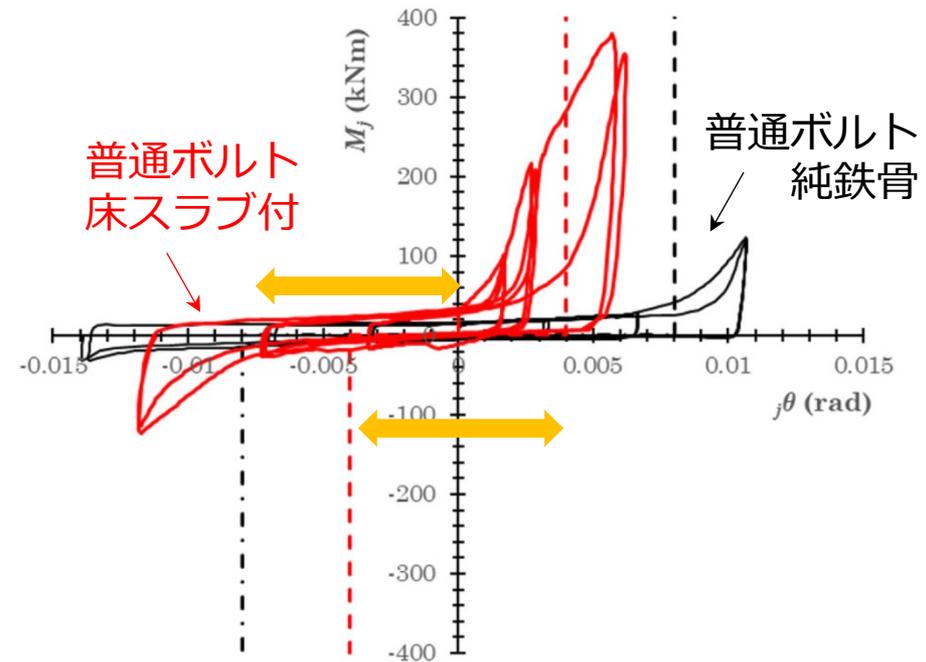
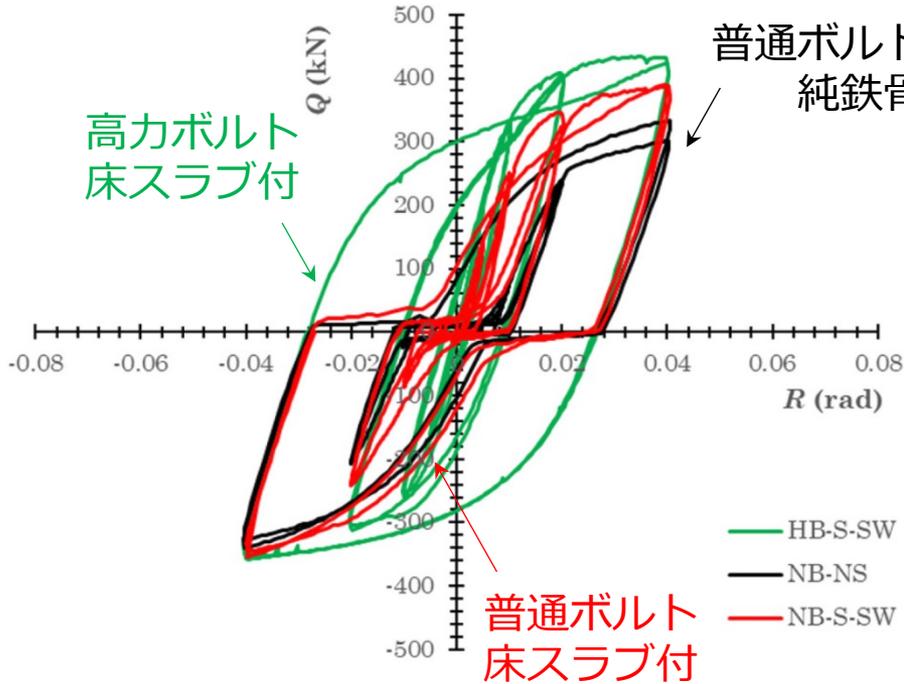
— 載荷セットアップ —

令和元年度・2年度
建築基準整備促進事業成果報告会
S31. 階高が高い小規模鉄骨造
建築物のボルト接合に関する
基準の合理化に関する検討



実験2

—床スラブの有無，高カボルトとの比較—



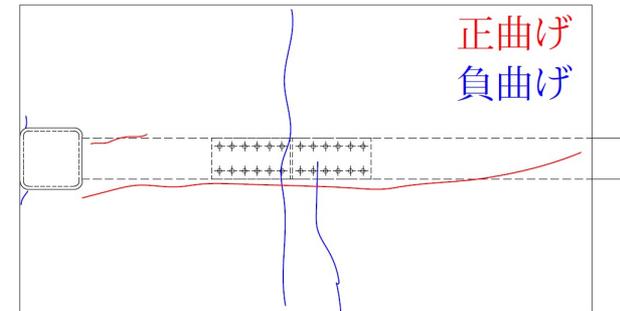
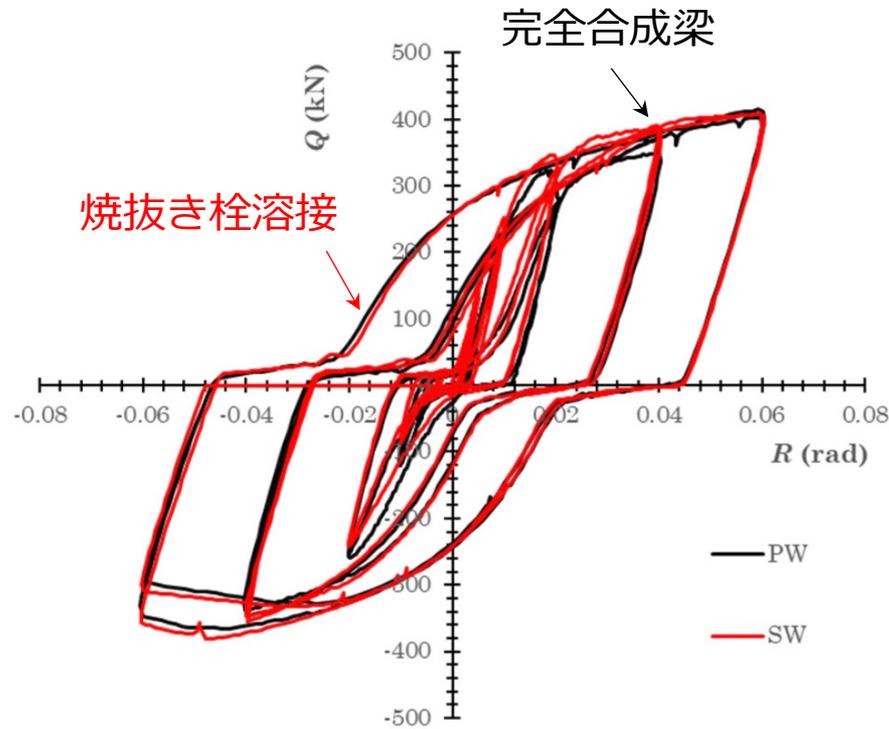
架構の層せん断力－層間変形角関係

梁継手の曲げモーメント－回転角関係

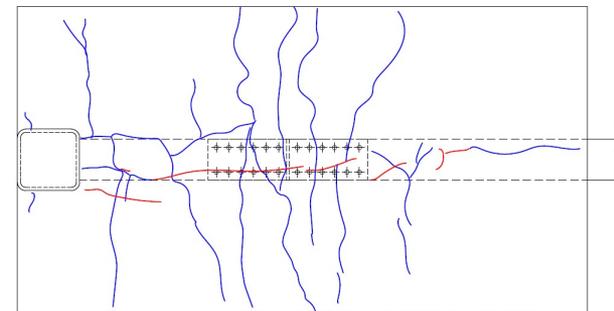
普通ボルト試験体にデッキ合成スラブを取り付けることで上フランジ接合部のすべりが拘束され，純鉄骨試験体に比べて支圧開始点に相当する梁継手回転角は理論どおり半分程度となることを実験的に確認した。

実験 2

－スラブと梁の接合形式の影響－



焼抜き栓溶接



架構の層せん断力－層間変形角関係

- 完全合成梁の条件を満たすスタッド溶接の場合だけでなく、不完全合成梁や焼抜き栓溶接の場合でも、同等のすべり拘束効果が得られた。
- スタッド溶接ではコンクリートのひび割れ、焼抜き栓溶接では溶接部の破断によってすべり拘束効果が喪失した。

まとめ

実験1 柱脚支持条件および梁継手位置に関する載荷実験

1. 梁継手に普通ボルトを用いた架構では、載荷初期から接合部のすべりに起因して変形が増大した。支圧剛性はボルトの局所的な変形やめり込みによって高カボルトを用いた場合の弾性剛性よりも低下した。
2. 柱脚を固定支持とし、梁継手に普通ボルトを用いた架構は、すべり発生から支圧開始点まで荷重が上昇する挙動を示した。その剛性は、梁の曲げ抵抗を無視した柱の曲げ剛性と柱脚の回転剛性により概ね評価できた。
3. 梁継手位置が柱梁節点から離れるほど支圧開始点までのすべり層間変形角は小さくなり、支圧剛性もわずかに高くなることが確認できた。
4. 梁継手のせん断方向へのすべり変形量は最大でも0.3mm程度であり、ウェブ接合部のボルト孔クリアランスよりも小さな変形に留まった。

実験2 床スラブによる梁継手のすべり抑制に関する載荷実験

1. 普通ボルト試験体にデッキ合成スラブを取り付けることで上フランジ接合部のすべりが拘束され、純鉄骨試験体に比べて支圧開始点に相当する梁継手回転角は理論どおり半分程度となることを実験的に確認した。
2. デッキ合成スラブと梁の接合形式について、完全合成梁の条件を満たすスタッド溶接の場合だけでなく、不完全合成梁や焼抜き栓溶接の場合でも、同等のすべり拘束効果が得られることを実験的に確認した。
3. すべり拘束効果は、スタッド溶接ではコンクリートのひび割れ、焼抜き栓溶接では溶接部の破断によって喪失されることを実験的に確認した。

(イ) 梁継手に関する接合部実験と 実大骨組試験体による検証実験

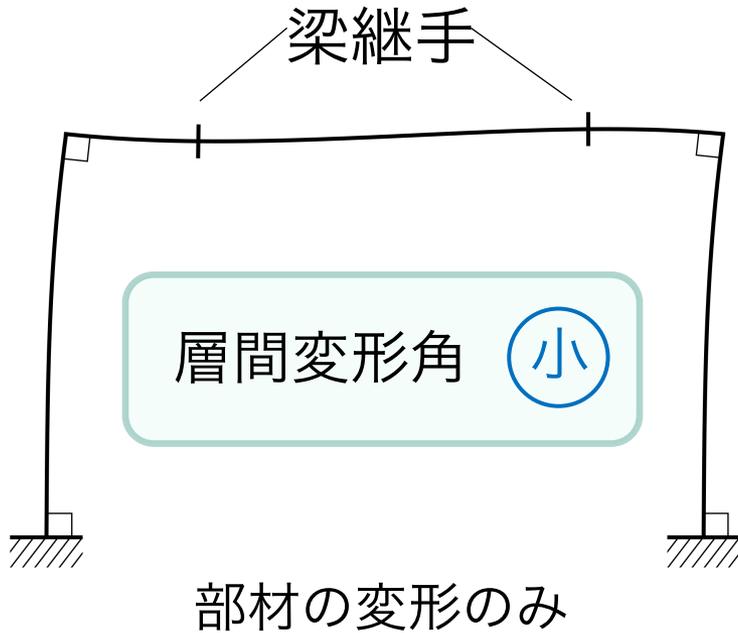
令和元年度・2年度
建築基準整備促進事業成果報告会
S31. 階高が高い小規模鉄骨造
建築物のボルト接合に関する
基準の合理化に関する検討

第 II 編

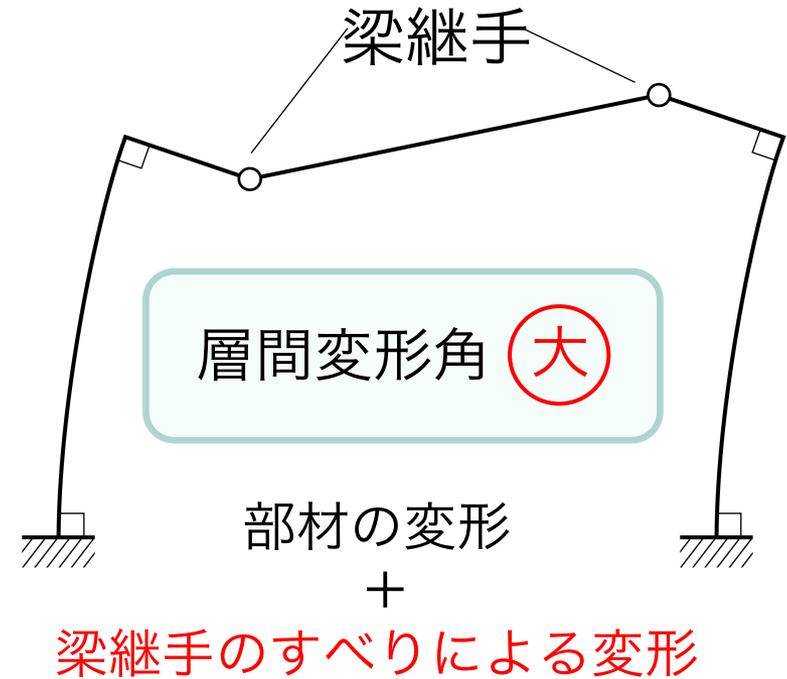
ボルト支圧接合梁継手を有する骨組のすべり挙動を
考慮した力学性状と層間変形角の簡略化推定法
(理論・数値解析による検討)

研究背景・目的

高力ボルト摩擦接合部



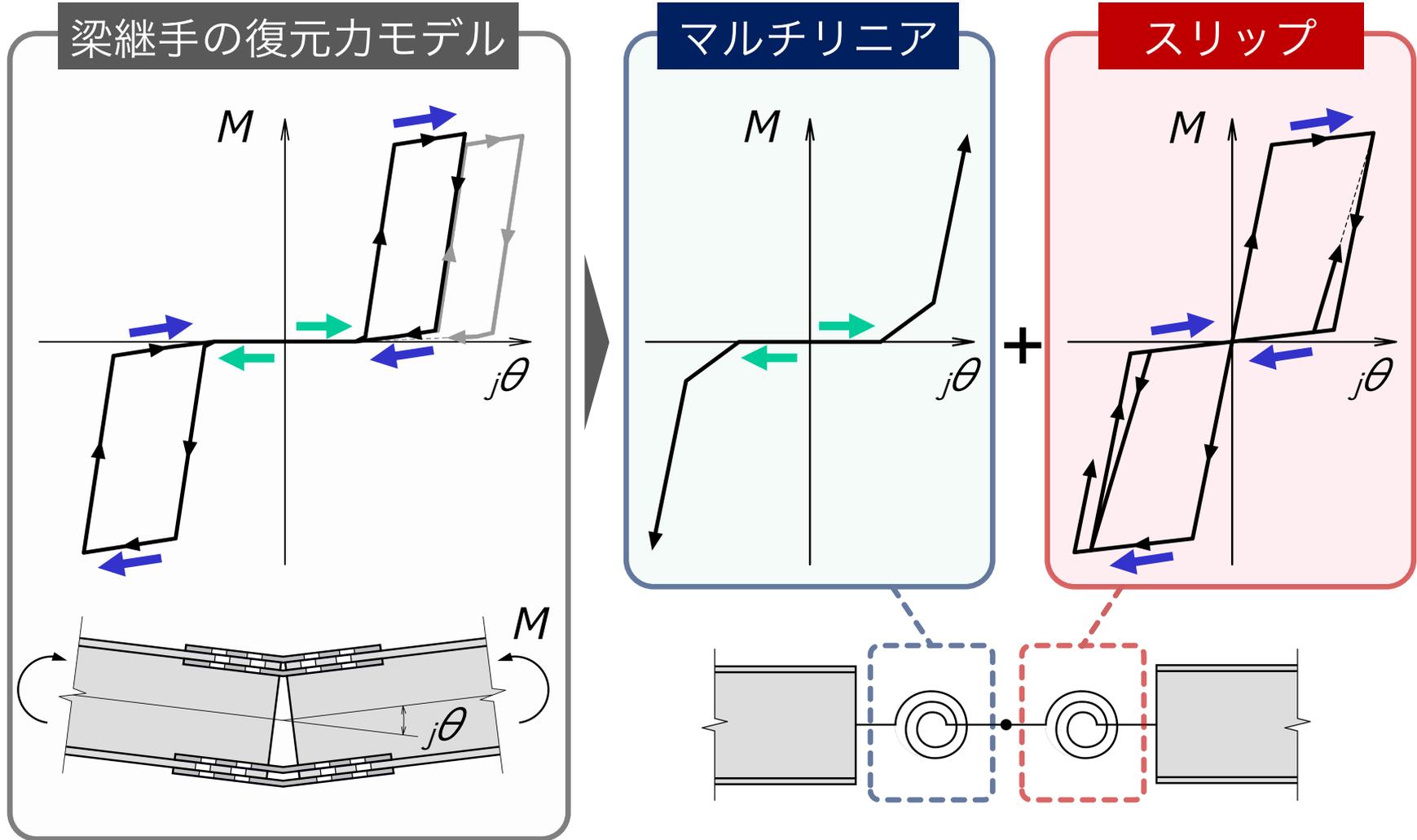
ボルト支圧接合部



目的

- ・ ボルト支圧接合梁継手を有する骨組の力学性状の把握
- ・ 層間変形角を簡略に推定する方法の提案

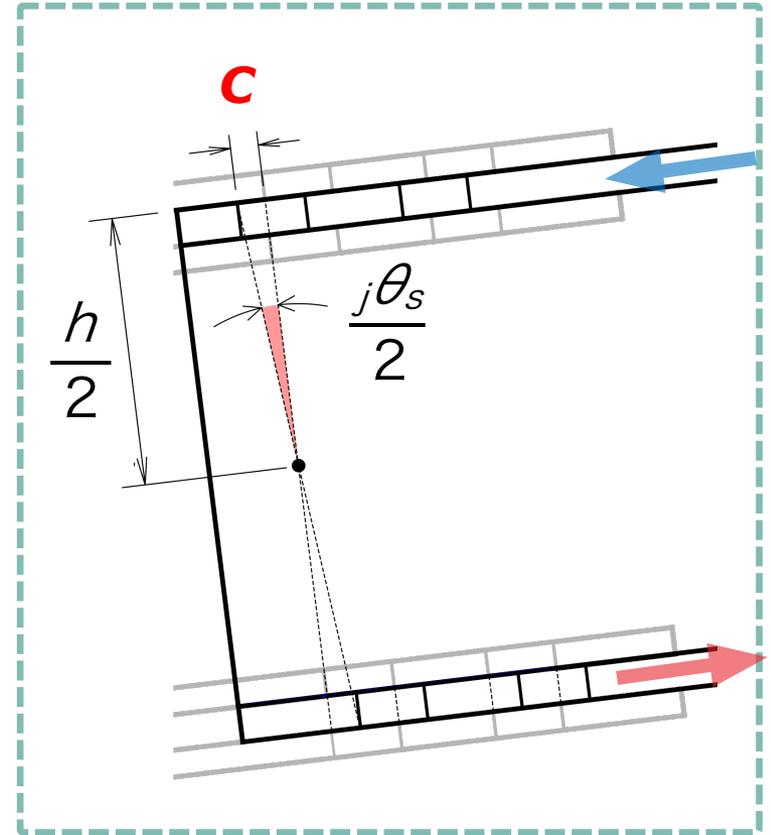
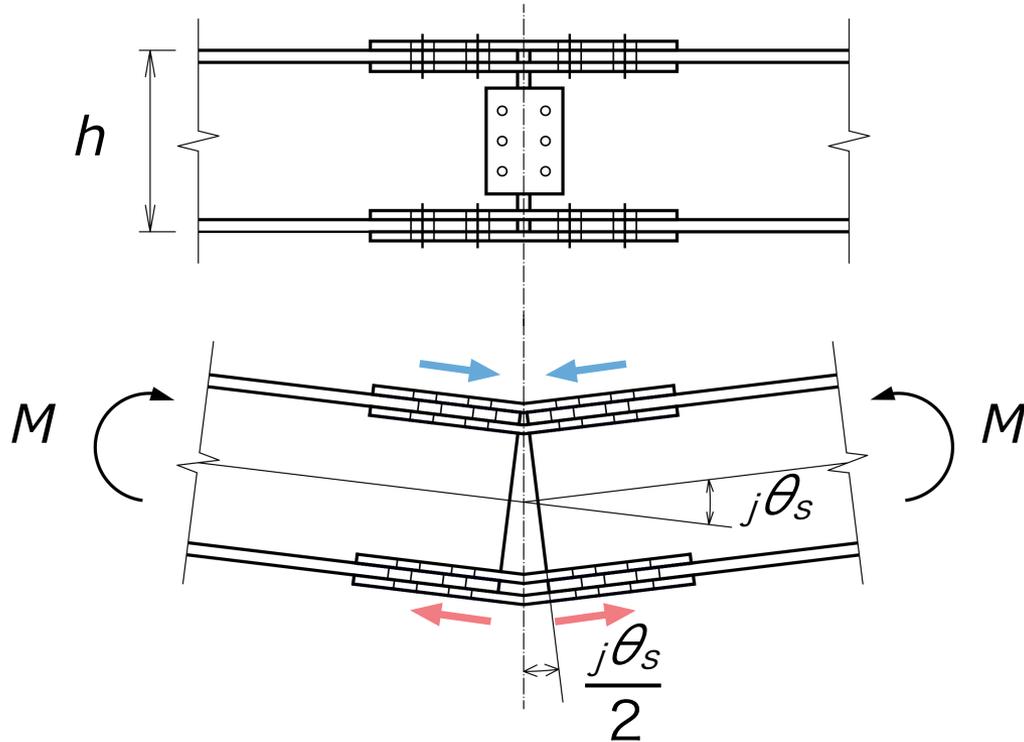
梁継手のすべり挙動のモデル化



2つのモデルを直列に足し合わせ、梁継手のすべり挙動を再現

梁継手の支圧到達時の変形角 $j\theta_s$

ボルト支圧接合梁継手



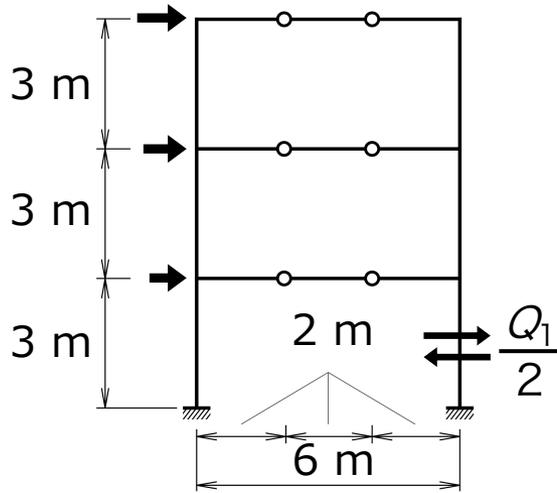
$$j\theta_s = \frac{4c}{h}$$

梁継手の支圧到達時の変形角 $j\theta_s$ は、

- ・ ボルト孔クリアランス c に比例
- ・ 梁せい h に反比例

理論解析結果と数値解析結果の比較

固定
柱脚

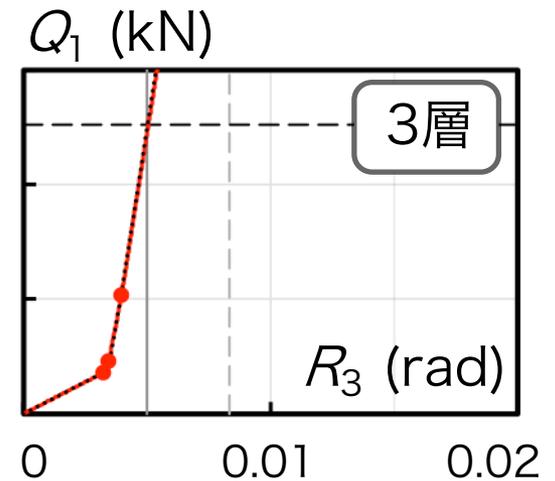
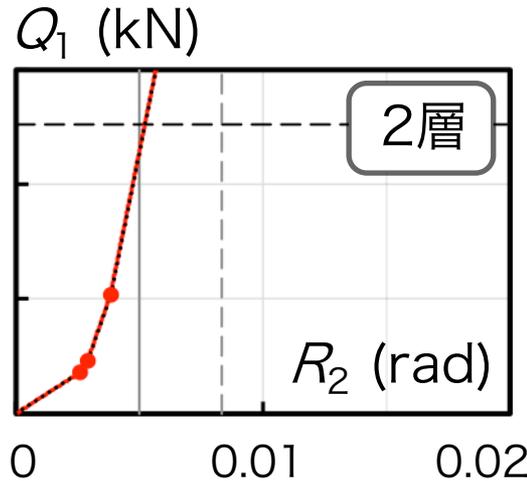
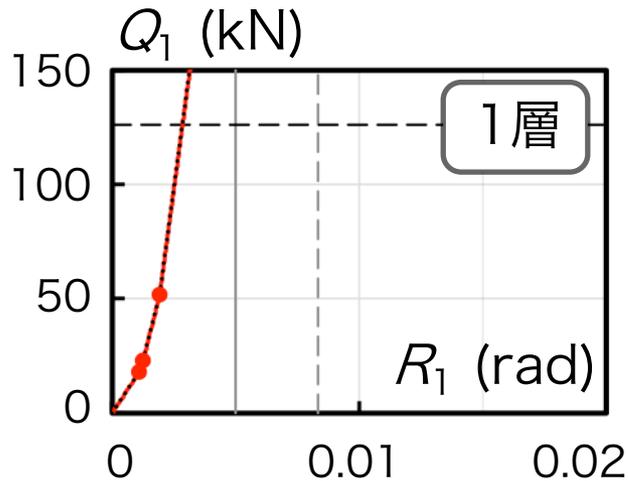


柱：□-350×350×16

梁：H-400×200×9×19

ボルト孔クリアランス $c = 1.0$ mm

..... 理論解析 — 数値解析
—— 1/200 rad - - - 1/120 rad
- - - 一次設計用地震力

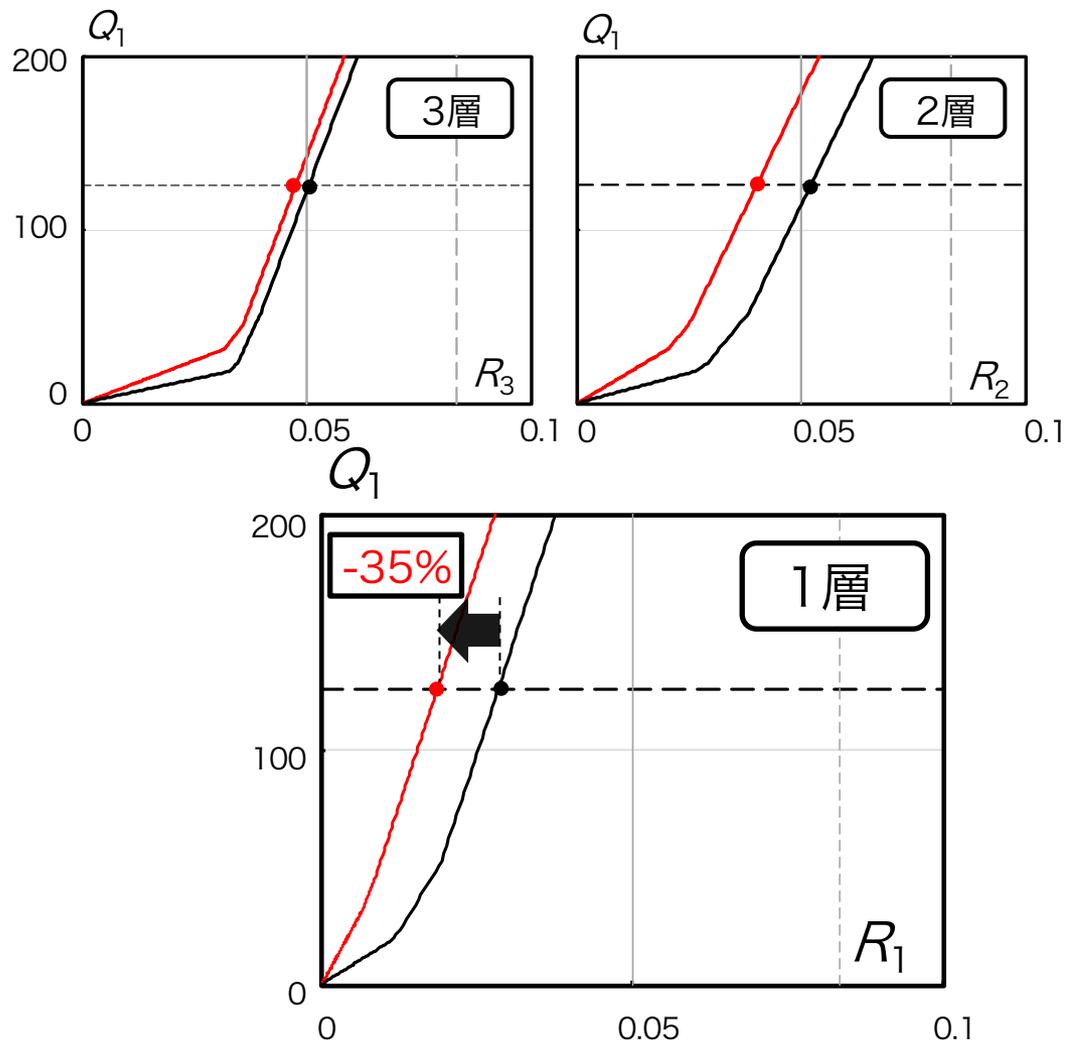


本モデル化により梁継手のすべり挙動を精度良く再現できる

各種変数の影響

— 1層目の梁継手を高力ボルト —

— 全層ボルト支圧接合 — 1層目のみ高力ボルト
— 1/200 rad — 1/120 rad
- - - 一次設計用地震力



層間変形角の抑制が期待できる

各種変数の影響

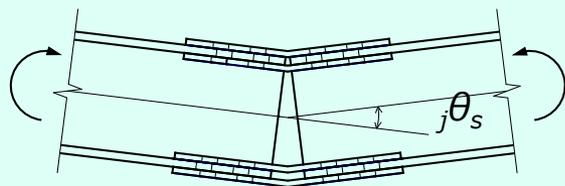
—クリアランスを小さくした場合—

— クリアランス 1.0mm — クリアランス 0.5mm
— 1/200 rad - - - 1/120 rad
- - - 一次設計用地震力

支圧到達時の変形角

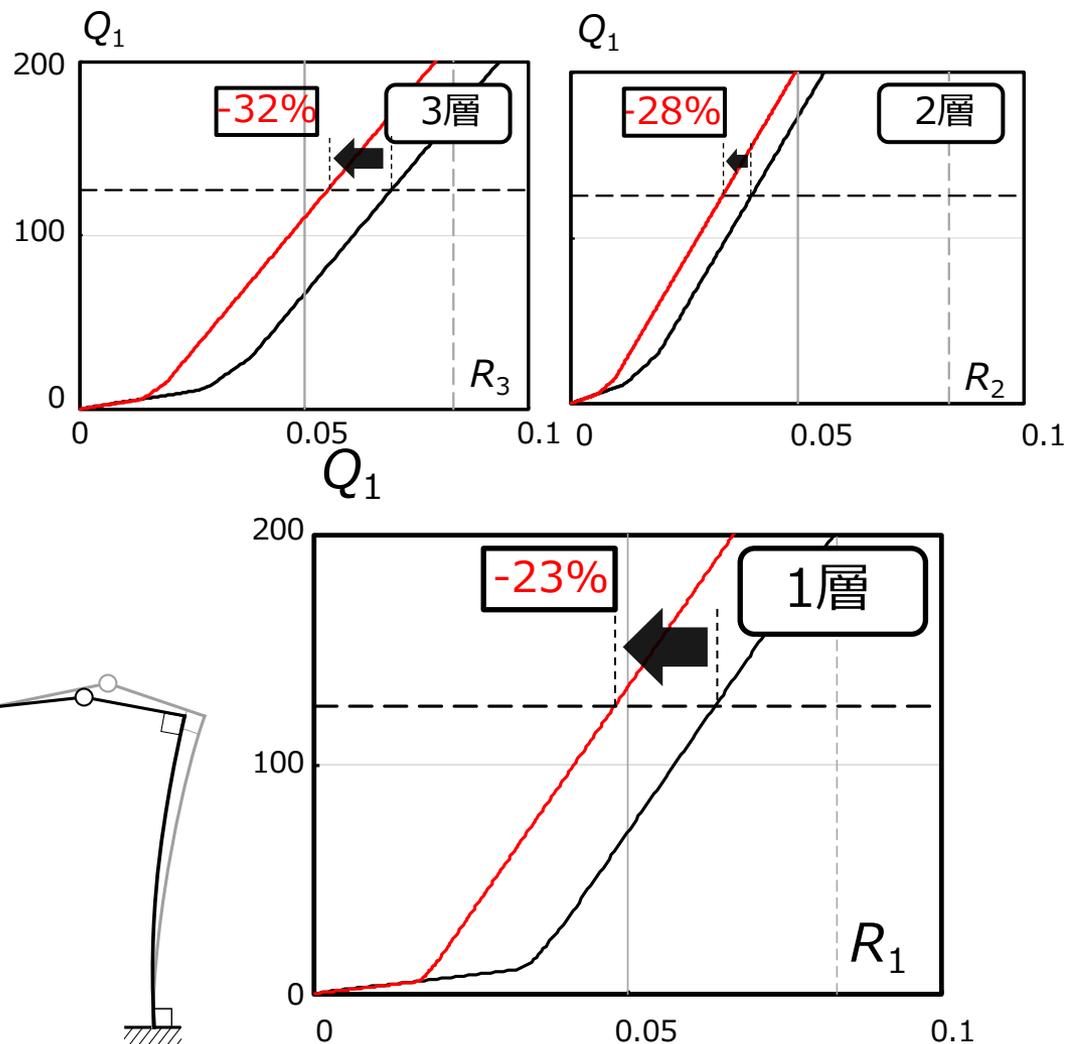
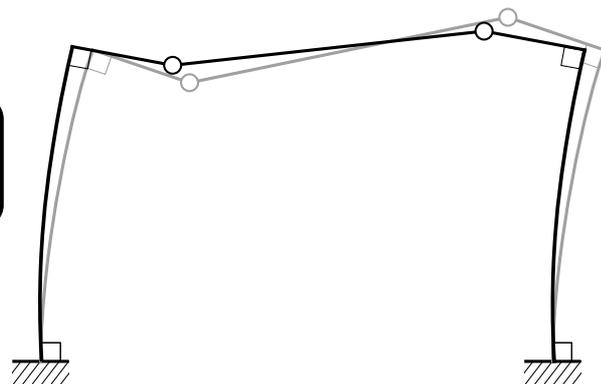
$$j\theta_s = 4c/h$$

c : クリアランス
 h : 梁せい



支圧到達時の
層間変形角

小



全層で層間変形角が抑制される

層間変形角の簡略化推定法

—簡略化2折れ線—

数値
解析

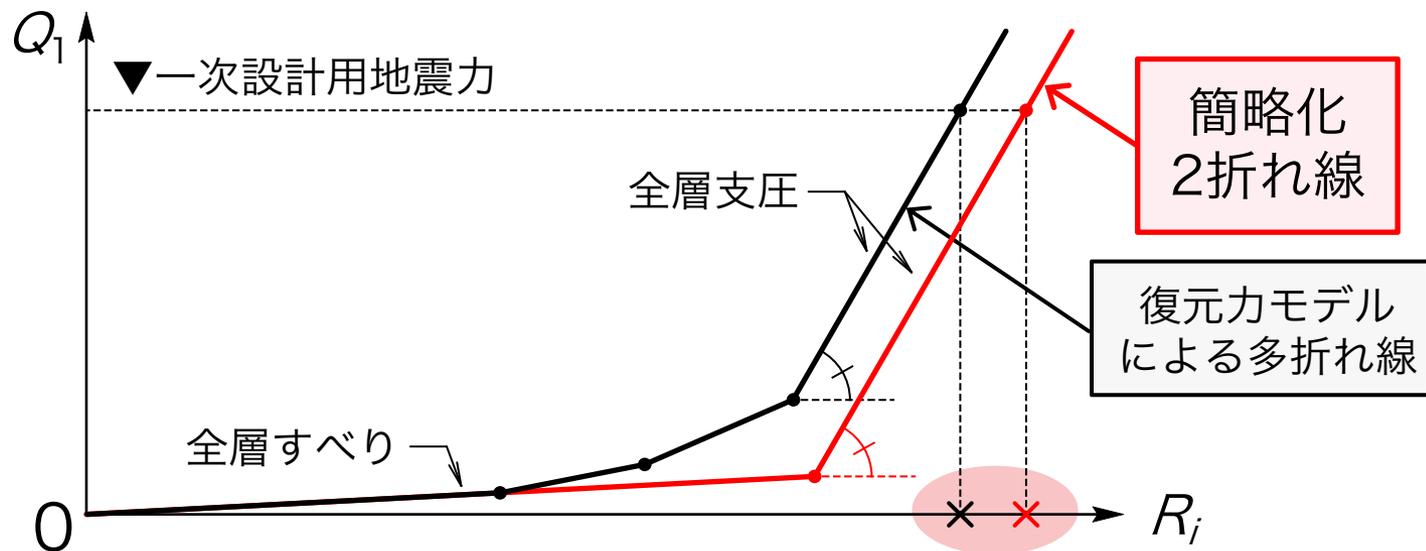
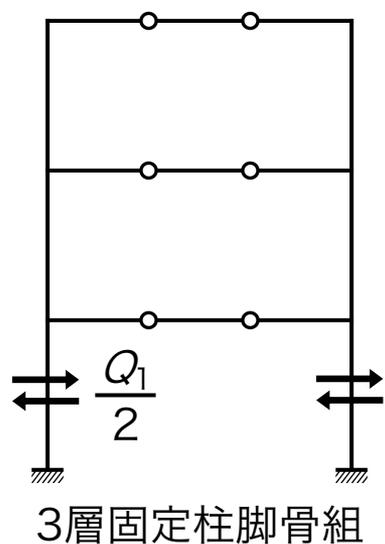
広範な架構形状，設計条件でも
梁継手のすべり挙動を考慮した
骨組の変形性状を明らかにできる



実設計では継手は最初から剛
であるとし，梁を剛接された
一本部材として扱う

梁継手を特別に設けずに，層間変形角を推定する手法

簡略化2折れ線



第1・最終折れ線の剛性 ▶ 数値解析

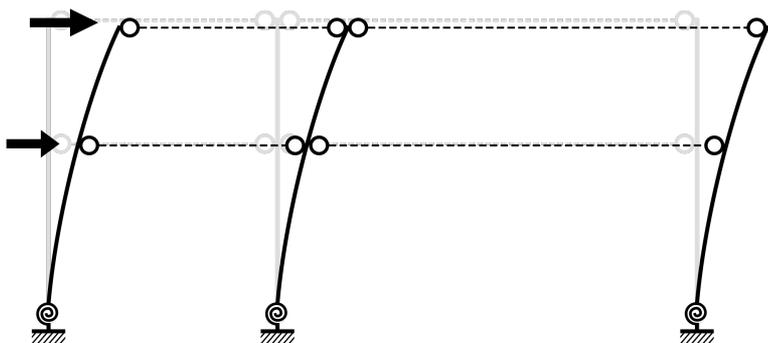
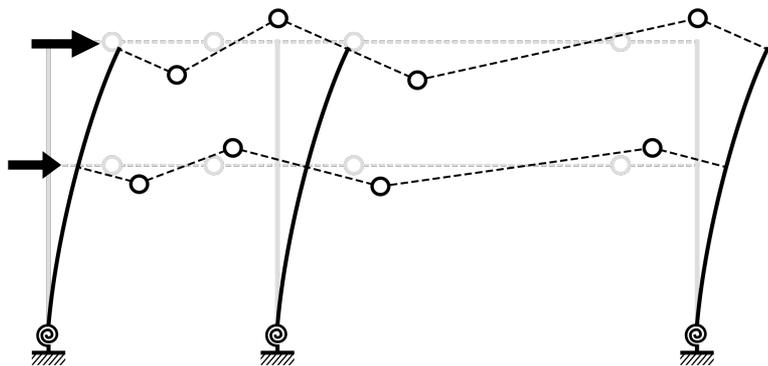
折れ点 ▶ 理論解析

層間変形角の簡略化推定法

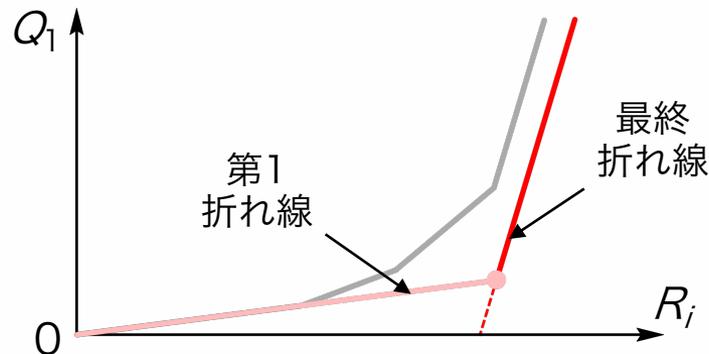
—剛性の推定方法—

第1 折れ線

全ての梁継手がすべり状態
柱だけで水平外力に抵抗

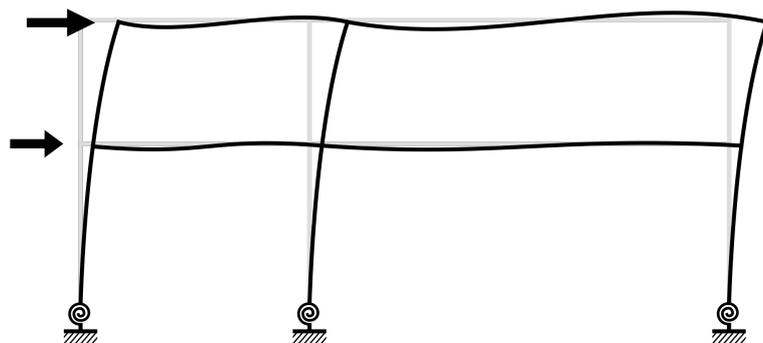


梁端ピンの増分解析より
剛性が得られる



最終 折れ線

全ての梁継手が支圧状態

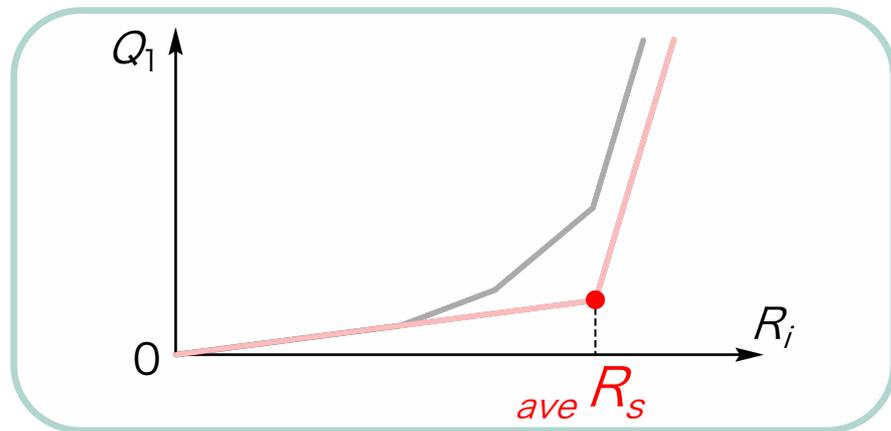
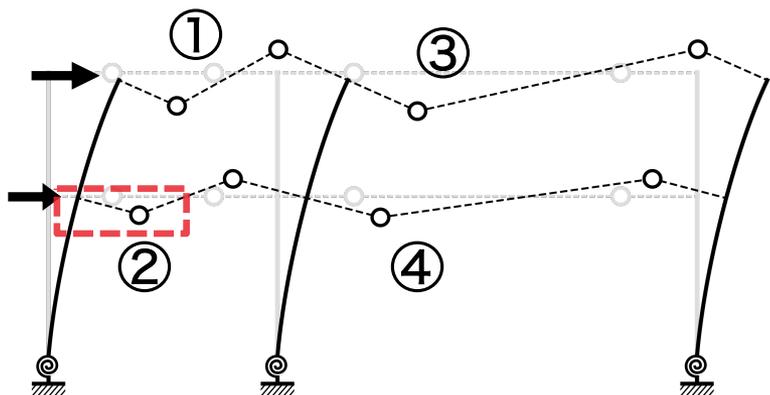


梁端剛の増分解析より
剛性が得られる

層間変形角の簡略化推定法 —折れ点の推定方法—

折れ点

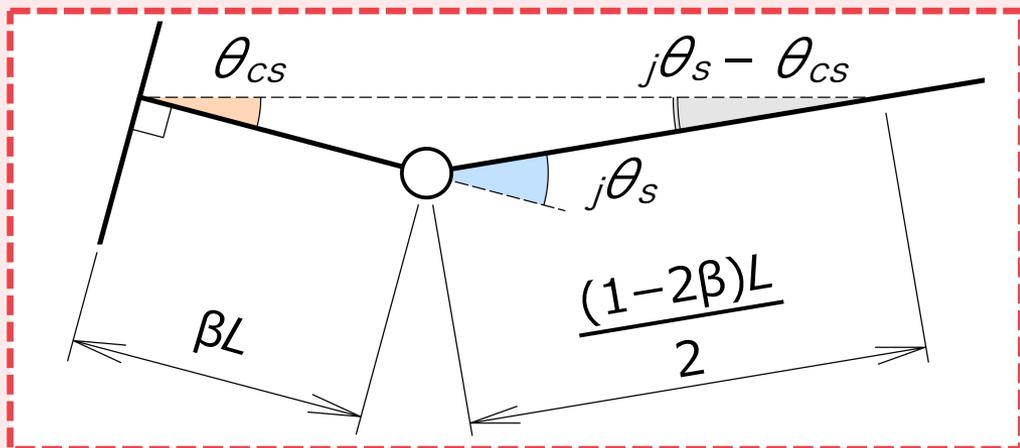
梁継手支圧到達時の
層間変形角の平均値 $ave R_s$



①～④の梁継手支圧到達時の
層間変形角の平均値を採用

理論解析より，支圧時の柱梁節点の回転角は，

$$\theta_{cs} = (1-2\beta) \frac{4c}{h}$$



+

第1折れ線の増分解析より，
 R / θ_c を算出

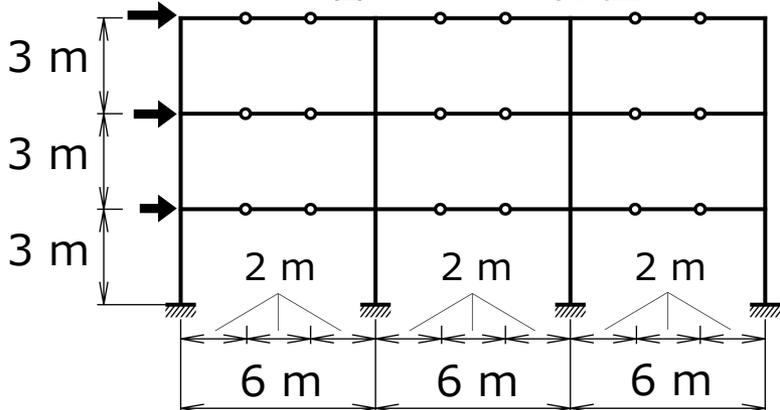
梁継手支圧時の R_s を算出

平均値 $ave R_s$ を算出

層間変形角の簡略化推定法

—推定例—

3層3スパン骨組

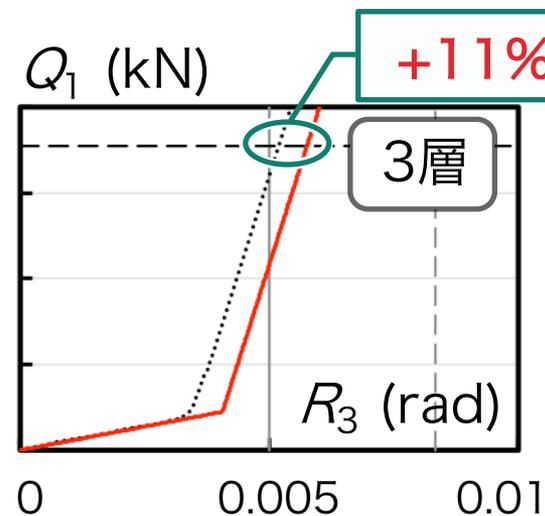
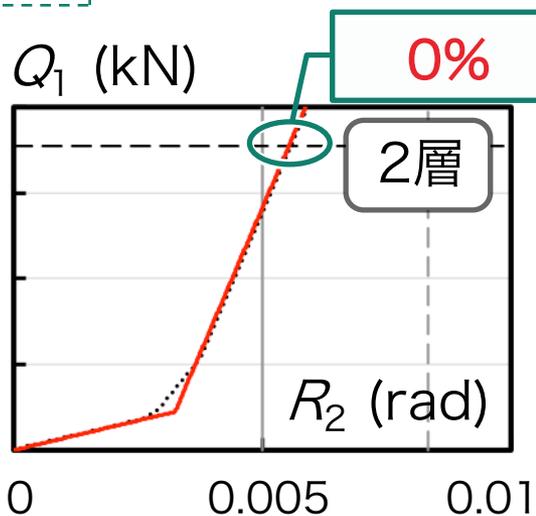
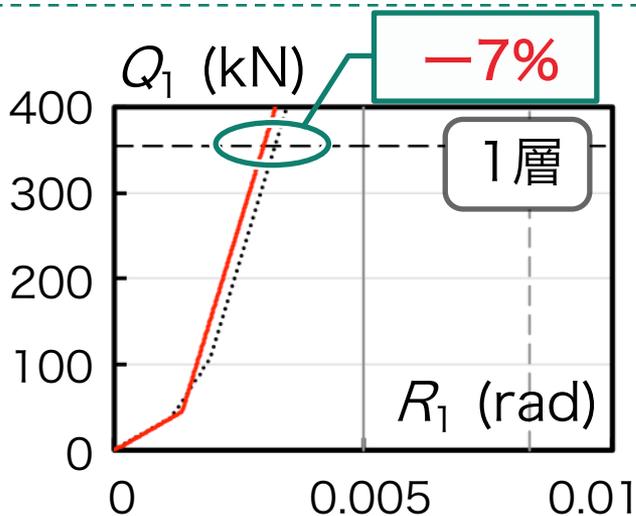


柱：□-350×350×16

梁：H-400×200×9×19

ボルト孔クリアランス $c = 1.0$ mm

- 復元力モデル
- 1/200 rad
- 1/120 rad
- 一次設計用地震力
- 簡略化2折れ線



簡略化2折れ線を用いることで
復元力モデルによる数値解を概ね精度良く再現可能

まとめ

ボルト支圧接合梁継手を有する骨組のすべり挙動による変形性状を把握するため、理論解析と数値解析による検討を行った。

- ・ 梁継手支圧到達時の層間変形角は継手位置の割合、ボルト孔のクリアランス、梁せいの影響を受ける。
- ・ 梁継手のすべりを考慮した場合、骨組のベースシア-層間変形角関係は多折れ線で表現できる。
- ・ 梁継手のすべり挙動を再現する復元力モデルを提案した。

また、ベースシア-層間変形角関係を2折れ線で簡略化し、一次設計用地震力に対応する層間変形角の推定方法を提案した結果、簡略化2折れ線は復元力モデルによる多折れ線を精度良く再現できる

(ロ) ブレース接合部に関する実験と 実大骨組試験体による検証実験

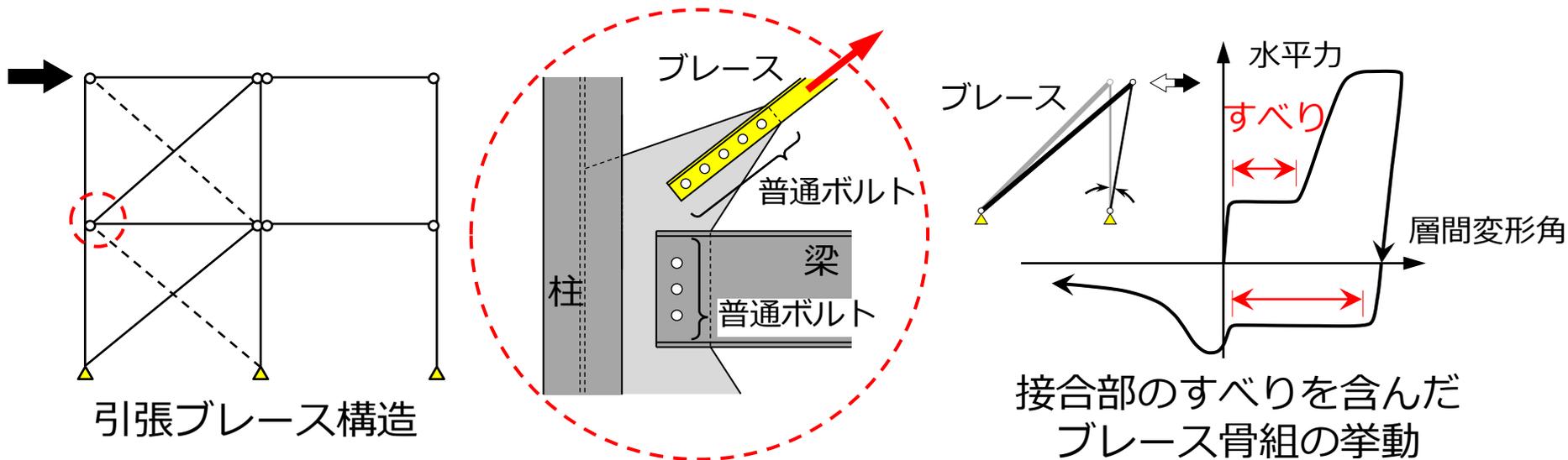
令和元年度・2年度
建築基準整備促進事業成果報告会
S31. 階高が高い小規模鉄骨造
建築物のボルト接合に関する
基準の合理化に関する検討

第Ⅲ編

ブレース接合部における普通ボルトの 適用に関する検討

研究背景と目的

引張ブレース構造のブレース端接合部に普通ボルトを用いた場合、**接合部耐力の確保(保有耐力接合)**と、**すべりによる変形**を考慮する必要がある。



ブレース端接合部

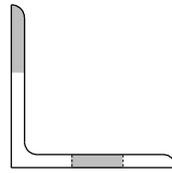
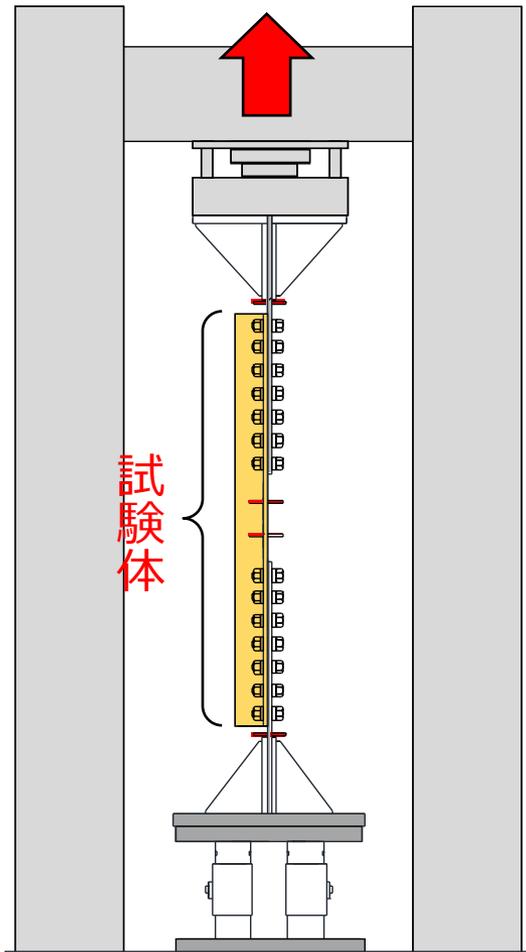
普通ボルトでは**接合部のボルト本数が6本以上必要**となることもある。
ただし、6本以上の有効断面破断耐力は明らかにされておらず、**実験的に検討する必要がある。**

ブレース架構

ボルト接合部のすべりにより、骨組の層間変形が大きくなる。 接合部のすべりによる骨組の変形について、**簡易な計算法を構築する必要がある。**

ブレース端接合部の実験 —実験目的・方法—

ブレース端接合部の単調引張載荷実験



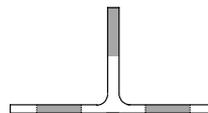
山形鋼



溝形鋼



リップ溝形鋼



CT形鋼

対象断面

<目的>

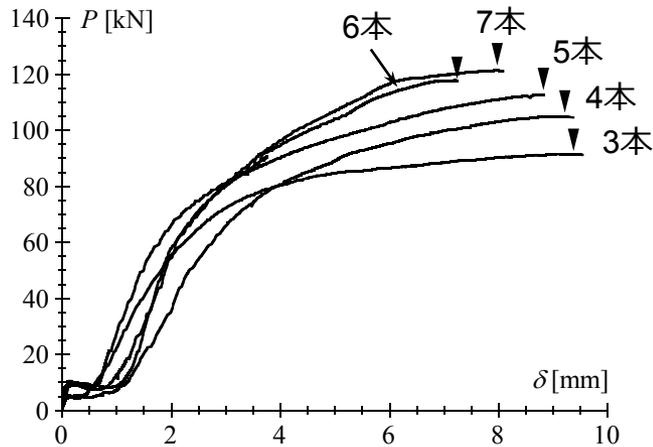
ボルト本数を6本以上とした場合や、母材を薄板とした場合のブレース端接合部の有効断面破断耐力を明らかにする。また、接合部に生じるすべり量を把握する。

<方法>

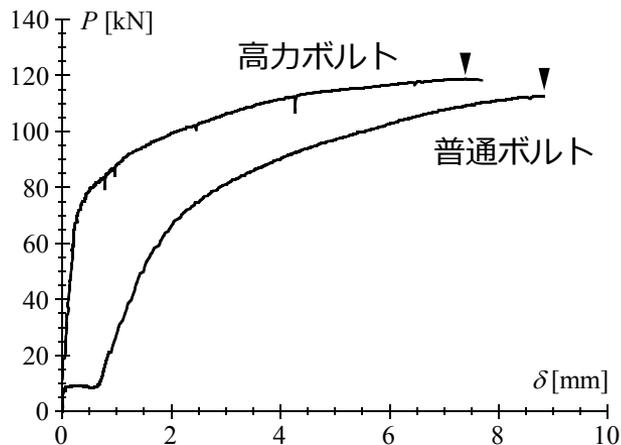
ブレース端接合部に対して、単調引張実験を行う。実験パラメータは、ブレースの断面形状、ブレースの断面寸法、接合部のボルト本数、ボルトの強度区分、ボルト配置とした。

ブレース端接合部の実験 —荷重－変形関係，強度区分の影響—

【荷重－変形関係】



ボルト本数による比較(普通ボルト)



ボルトの強度区分による比較

【最終破壊状況】



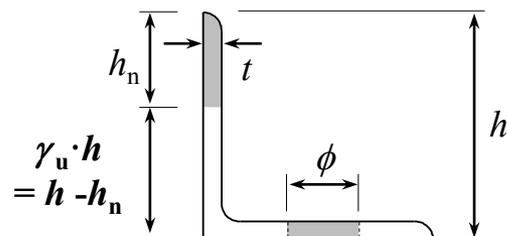
普通ボルトを使用した場合：

- ・ **最大耐力への影響は小さい**
- ・ **降伏耐力は低下する**
- ・ **最大耐力時の変形は増加する**

ブレース端接合部の実験 —突出脚有効率—

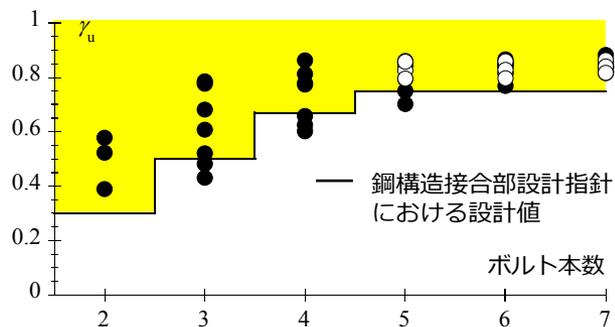
【突出脚有効率 γ_u 】

山形断面



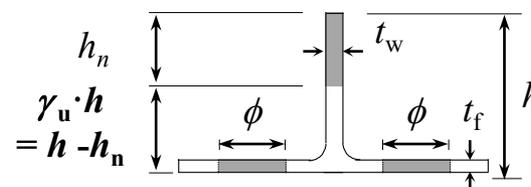
$$\gamma_u = 1 - \left(A - \frac{P_u}{\sigma_u} - \phi \cdot t \right) \cdot \frac{1}{h \cdot t}$$

○ 一般形鋼(板厚6mm以上) ● 軽量形鋼(板厚6mm未満)



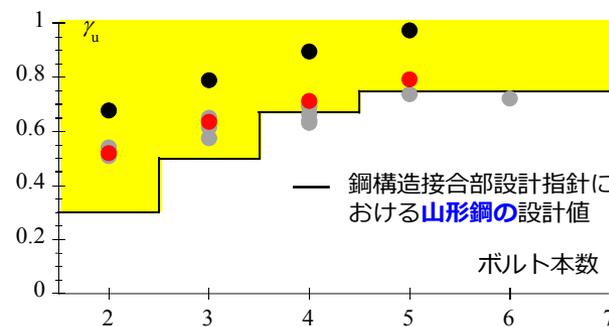
ボルト本数6本以上では増加しない

CT形断面



$$\gamma_u = \frac{P_u - \{(w - t_w) \cdot t_f - 2\phi \cdot t_f\} \cdot \sigma_u}{t_w \cdot h \cdot \sigma_u}$$

● CT100x100x5.5x7 ● CT125x125x6x9
● 加藤ら(1980)による既往研究の結果



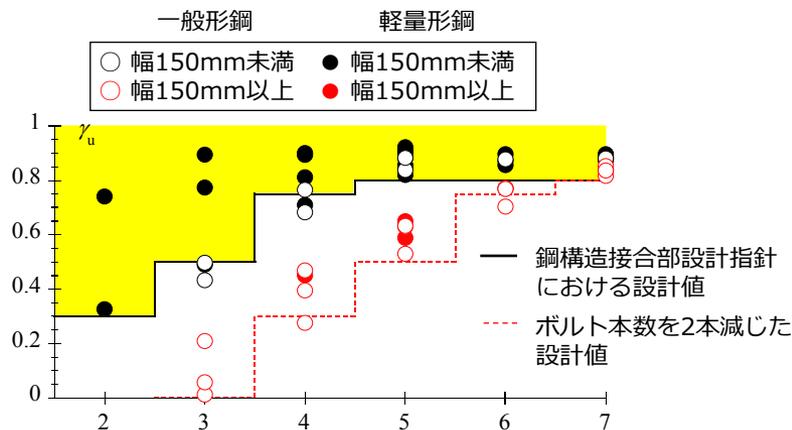
山形鋼の設計値で安全側に評価できる

ブレース端接合部の実験 —突出脚有効率—

【突出脚有効率 γ_u 】

溝形断面

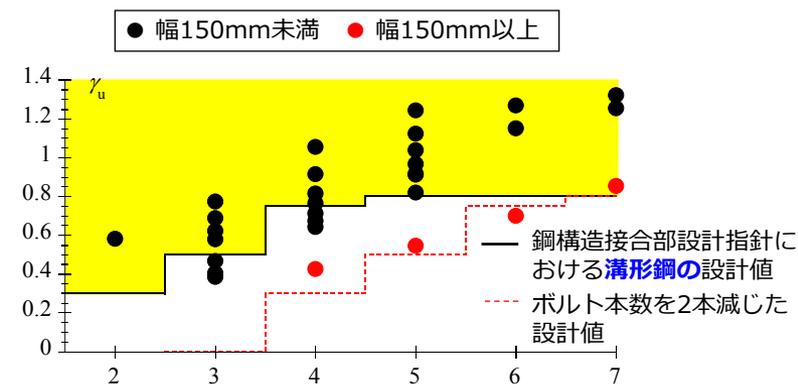
$$\gamma_u = \frac{P_u - \{(w - 2t_1) \cdot t_2 - \phi \cdot t_w\} \cdot \sigma_u}{2t_f \cdot h \cdot \sigma_u}$$



幅150mm未満：ボルト本数6本以上では増加しない
幅150mm以上：本数を2本減じた設計値と対応する

リップ溝形断面

$$\gamma_u = 1 - \frac{A - P_u / \sigma_u - \phi \cdot t - 2(r - t) \cdot t}{2h \cdot t}$$



幅150mm未満：溝形鋼の設計値で安全側に評価できる
幅150mm以上：本数を2本減じた設計値と対応する

ブレース端接合部の実験 —ボルト本数ごとの突出脚無効長さ—

【現行基準への適用の提案】

赤字箇所は現行基準からの変更点

筋かい材の 断面形	筋かい材を結合しているファスナーの本数 n ※				
	1	2	3	4	$5 \leq$
山形鋼	$h_1 - t_1$	$0.7 h_1$	$0.5 h_1$	$0.33 h_1$	$0.25 h_1$
溝形鋼	$h_1 - t_1$	$0.7 h_1$	$0.5 h_1$	$0.25 h_1$	$0.2 h_1$
CT形鋼	$h_1 - t_1$	$0.7 h_1$	$0.5 h_1$	$0.33 h_1$	$0.25 h_1$

(注) h_1 は筋かい材の突出脚の高さ (mm)

溝形鋼の t_1 はウェブ部分の厚さ (mm)

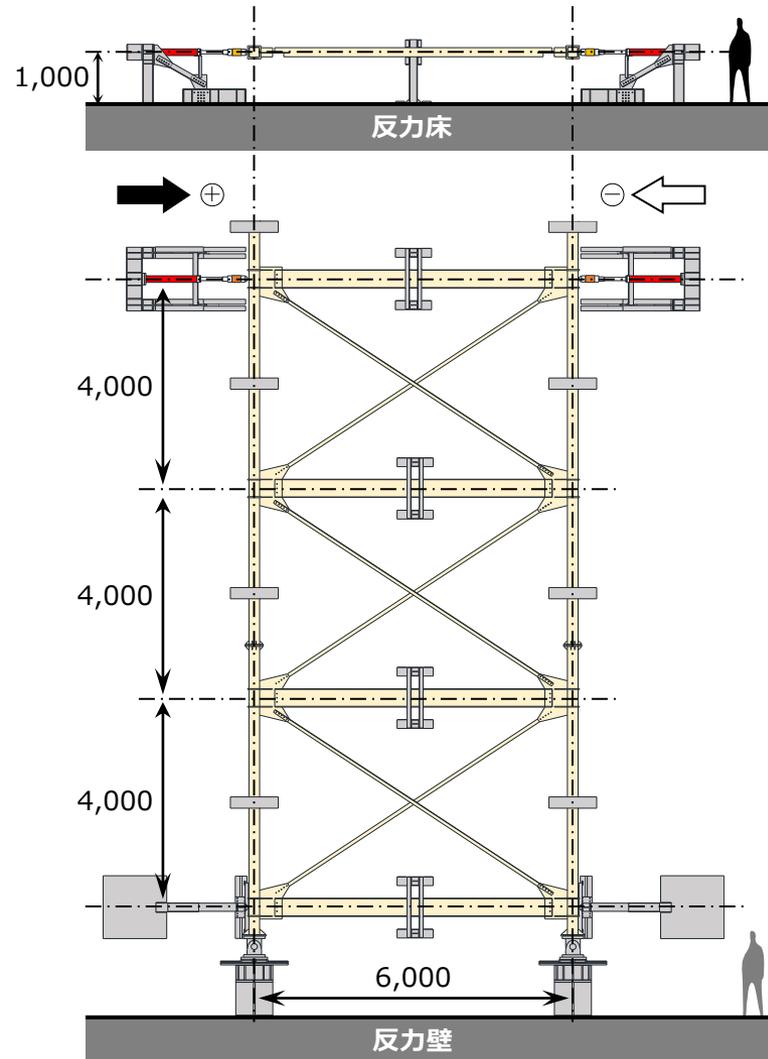
CT形鋼の t_1 はフランジ部分の厚さ (mm)

溝形鋼の接合面の幅は150mm未満とする

※ 応力の方向に2列以上配置される場合はその方向に関する接合個所数とする。

実大ブレース架構の実験 —実験目的, 方法—

実大ブレース架構の繰返し載荷実験



<目的>

多層骨組となった場合の層間変形に及ぼす普通ボルト接合部のすべりの影響を確認する。また、梁端接合部のすべりを含めた、すべりによって生じる架構全体の層間変形の評価方法について検討する。

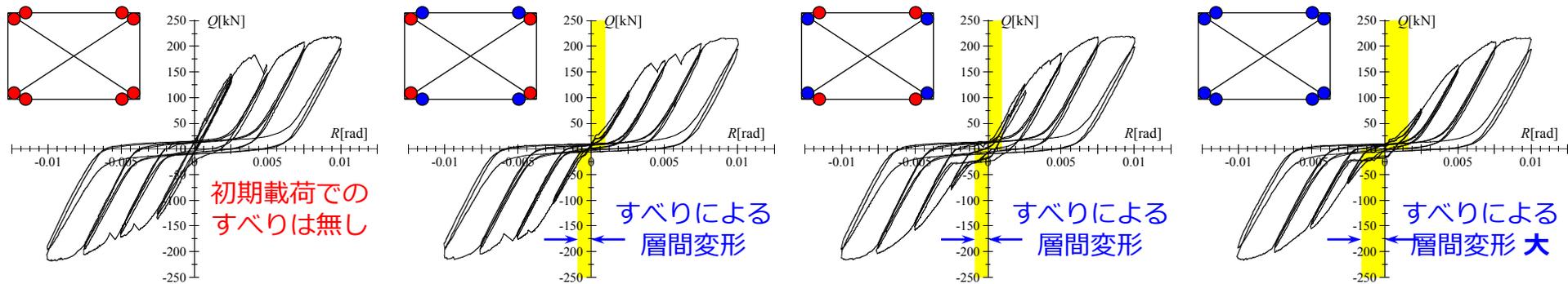
<方法>

接合部を普通ボルトとした実大ブレース架構に対して、繰返し載荷実験を行う。

主な実験パラメータは、
ブレース架構の層数、
ボルトの強度区分、
普通ボルトの使用箇所とした。

実大ブレース架構の実験 —全体挙動, 接合部挙動—

【層せん断力-層間変形角関係】



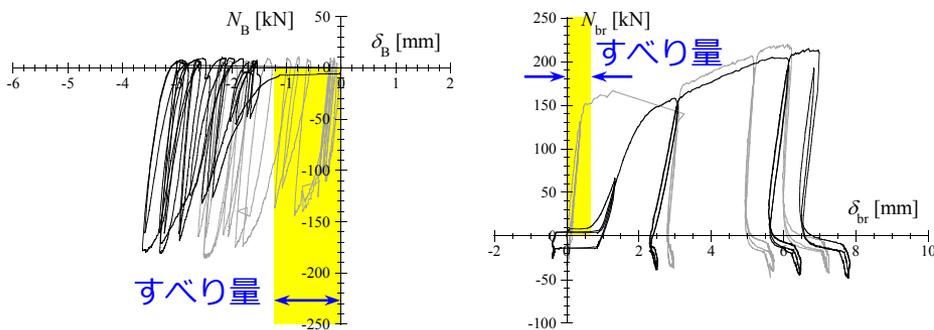
梁端:高力
ブレース端:高力

梁端:普通
ブレース端:高力

梁端:高力
ブレース端:普通

梁端:普通
ブレース端:普通

【接合部挙動】 — 普通ボルト — 高力ボルト



梁端接合部

ブレース端接合部

・接合部のすべりによって生じる層間変形は、**梁端とブレース端の両方に普通ボルトを用いた試験体で最も大きい結果が得られた。**

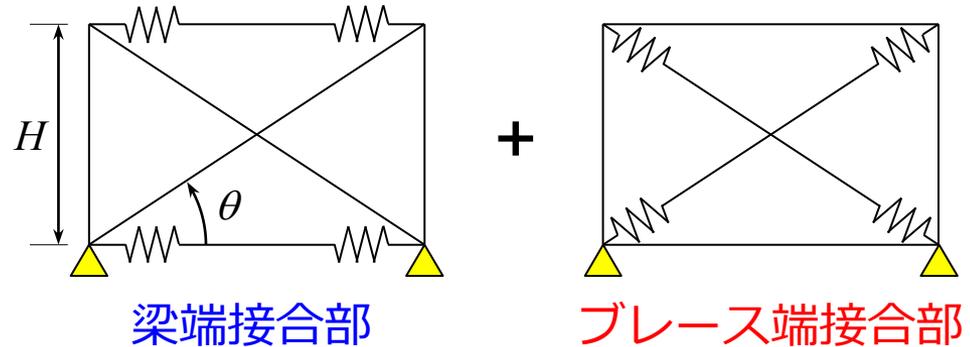
・梁端およびブレース端接合部におけるすべり量は、ブレースとガセットプレートの**ボルト孔クリアランス ±0.5mmの和1mmに相当する。**

実大ブレース架構の実験 —すべりによって生じる層間変形角—

【接合部のすべりによって生じる層間変形角の評価式】

$$R_{\text{slip}} = \frac{2c}{H} + \frac{2c}{H \cdot \cos \theta} \dots (1)$$

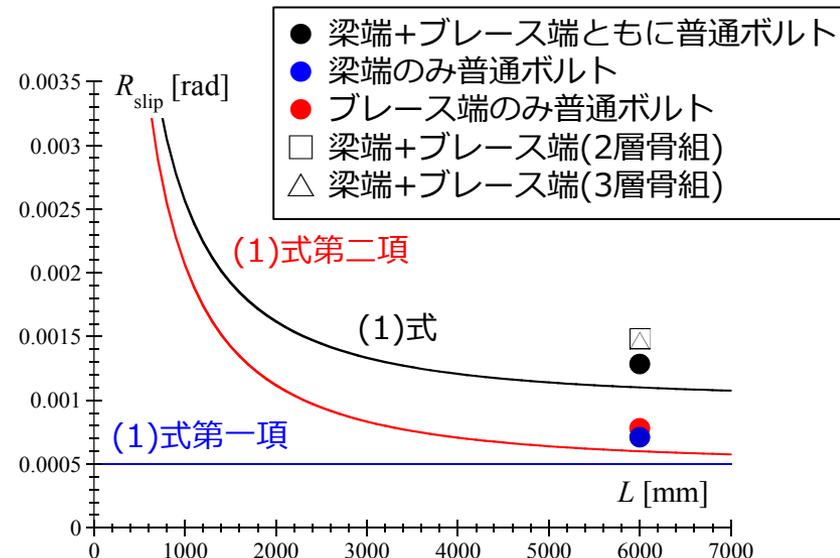
c : ボルト孔クリアランス,
 H : 階高,
 θ : ブレースの取り付け角度



(1)式の**第一項**, **第二項**はそれぞれ**梁端接合部**, **ブレース端接合部**におけるすべりの影響を表す。

【実験結果との対応】

梁端, ブレース端のいずれかのみにも普通ボルトを用いた結果は, それぞれ**(1)式第一項**, **(1)式第二項**と良好に対応している. また, 梁端, ブレース端の両方に普通ボルトを用いた結果は骨ブレース架構の層数によらず概ね対応している.



実大ブレース架構の実験 —すべりによって生じる層間変形角—

【接合部のすべりによって生じる層間変形角の簡易評価法の提案】

(1)式を一般的な条件に適用できるように修正した以下の式により、すべりによって生じる層間変形角の簡易評価法を提案する。

$$R_{\text{slip}} = \frac{n_1 \cdot c}{H} + \frac{n_2 \cdot c}{H \cdot \cos \theta} \quad \dots (2)$$

ここで、

n_1 [-] : 1スパンのブレース構面を構成する梁におけるボルト接合部の数。
ただし、層の上下に梁が配置される場合には、上下の梁におけるボルト接合部の平均値とする。

- 例) ・ 上下の梁の左右両端にそれぞれボルト接合部がある場合 : 2
- ・ 上層側の梁は上記と等しいが、下層側には梁がない場合 : 1
- ・ 上下の梁がそれぞれ合成スラブとなっている場合 : 0

n_2 [-] : 1スパンに配置されている1本のブレースにおけるボルト接合部の数。
ただし、1スパンにX形やK形に2本のブレースが配置されている場合は、それらの平均値を用いて良い。

- 例) ・ ブレースの両端にそれぞれボルト接合部がある場合 : 2
- ・ 1本のブレースが中間ガセットによって2本に分断され、それぞれの両端にボルト接合がある場合 : 4

まとめ

【ブレース端接合部の実験】

- 普通ボルトを用いた場合でも、接合部の**有効断面破断耐力は高力ボルトを用いた場合とほぼ変わらない。**
- ボルト本数を5本より多く使用したブレース端接合部の有効断面破断耐力は、**5本の場合とほぼ同じ結果が得られた。**
- 接合面の幅が**150mm以上の溝形鋼**の場合、有効断面破断耐力は**鋼構造接合部指針における値と対応しないが、ボルト本数を2本減じた計算値に対応する**結果が得られた。
- CT形鋼とリップ溝形鋼の無効突出脚長さは、鋼構造接合部設計指針に提示されている**山形鋼と溝形鋼の無効突出脚長さにそれぞれ対応する。**

【実大ブレース架構の実験】

- 梁端またはブレース端接合部に普通ボルトを用いたブレース架構では、**接合部のすべりによって層間変形が生じた。**接合部のボルト孔クリアランスに基づく**(1)式による理論値は、実験結果と概ね良い対応を示した。**