

第5章 性能確認実験と設計用特性の設定

5.1 検討概要

第2章で提示した各接合部案を対象に、構造設計に必要な各種性能と施工性(グラウト充填性)を実験により確認する。既製品スリーブの適用において、異形鉄筋をグラウト定着する場合は本来の使用方法であり、構造性能及び施工性の検討は省略できるものとする。これに対して、ボルト・ナットを定着する場合はいずれも未検証であるため、構造性能とグラウト充填性を【実験①】により確認する。また、施工誤差により定着するボルトや異形鉄筋が偏心する場合の構造性能と施工性についても併せて確認する。

また、第2章で提示したように既製品スリーブを適用する場合のほか、CLTパネルにコブ状の掘り込み加工を施し、スリーブ金物を用いず直接CLTにグラウト定着する構成(以降、「コブ定着」と呼ぶ)も検討している。コブ定着による接合部構成では、計算に基づき推定した耐力に対する実態性能を比較するため、予備的な実験として【実験②】を実施し、CLTに設けるコブを1箇所の場合の性能を確認する。

さらに、上記の【実験①】【実験②】による実験結果を踏まえて、接合部全体を対象とした【実験③】を実施し、構造設計に必要な引張、圧縮、せん断の各性能を確認する。なお、コブ定着仕様の引張実験では、実験②の結果をもとにコブの個数に耐力が比例するものと仮定し、試験体仕様を決定する。

以下に各実験の概要を示す。試験体仕様、実験パラメータ、実験方法等の詳細は、付録「実験報告書」参照のこと。

【実験①】：既製品スリーブ継手引張実験

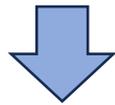
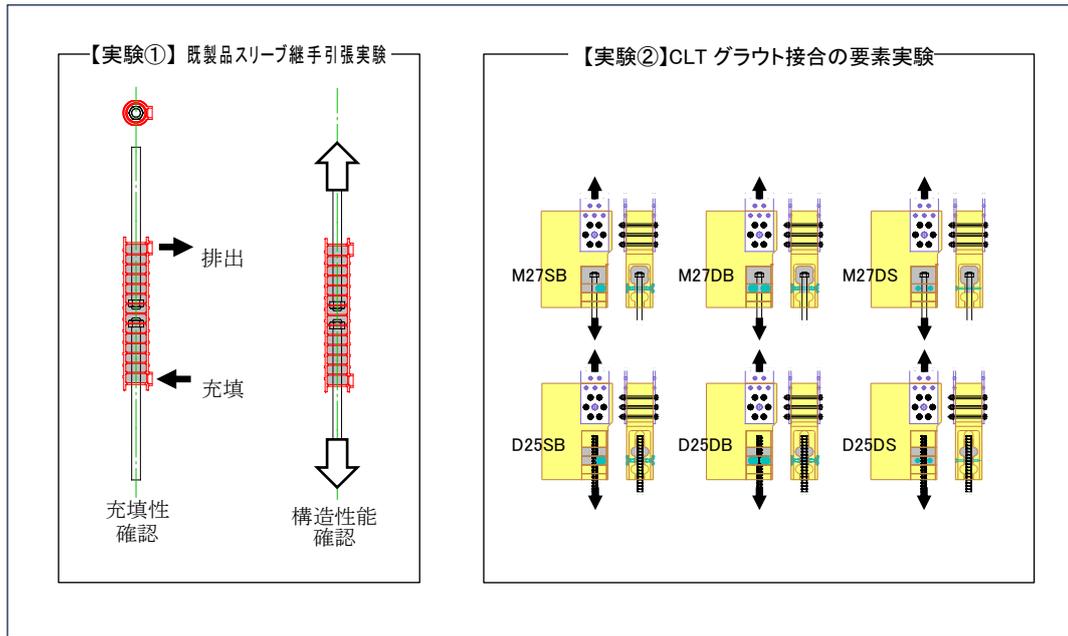
実験パラメータ・・・定着ボルトの径，定着用ナットの形状および個数，定着ボルトの埋込長さ，偏心の有無，施工性

【実験②】：CLTグラウト接合の要素実験

実験パラメータ・・・コブ定着の形状(異形鉄筋／ボルト)，CLTの開き止めの仕様

【実験③】：GJ接合部実験(引張、圧縮、せん断)

- ・ 鋼板挿入ドリフトピン接合部の引張実験
- ・ CLTグラウト接合の引張・圧縮実験
- ・ スリーブ接合・CLTグラウト接合の圧縮実験
- ・ スリーブ接合・CLTグラウト接合のせん断実験
- ・ 異形鉄筋アンカー引張実験



実験対象の仕様の絞り込み

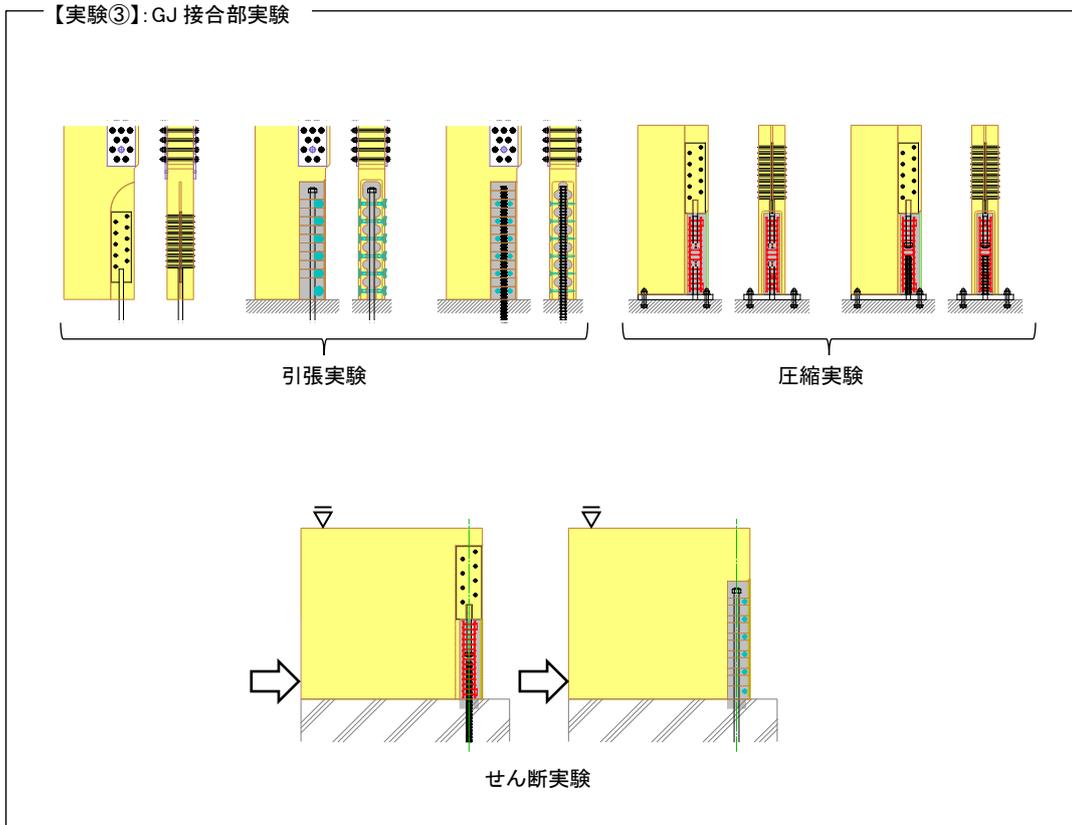


図5.1 本事業における実験計画概要

5.2 接合部仕様の絞り込み

5.2.1 実験①の結果と考察

(1) 分析方法

実験①で対象とした試験体のうち、既製品スリーブの両側に強度区分10.9のM27ボルトを挿入し、定着用ナット個数を3個、2個、1個、0個とした試験体4仕様と、ABR490アンカーボルトM27（ナット3個）、M24（ナット2個）、M20（ナット1個）を挿入した試験体3仕様を対象に、各試験体の引張性能を比較する。強度区分10.9のM27ボルトを挿入した試験体は、ABRアンカーボルトの引張耐力を超える範囲において定着用ナットの保持耐力を確認することを目的としている。ABR490アンカーボルトを挿入した試験体では、定着用ナットの保持耐力を確認するとともに、塑性変形性能を確認することを目的としている。

強度区分10.9の試験体では、荷重－ひずみ関係による性能を比較する。ひずみは図5.2-1のように試験体を設置する試験機のチャック間距離を検長Lとして、変位量をLで除して算定する。また、ABR490アンカーボルトによる試験体では、図5.2-2のように左右のアンカーボルト間に設置した変位計を検長Lとして、変位計で計測した変位量をLで除して算定する。さらに変位計設置位置から各試験体のスリーブ内に設ける最も外側の定着用ナットまでの距離を有効塑性化領域 L_e と仮定し、変位計による変位量の1/2（両側のボルトの伸びを片側に補正）を L_e で除したひずみを“真のひずみ”として性能を比較する。

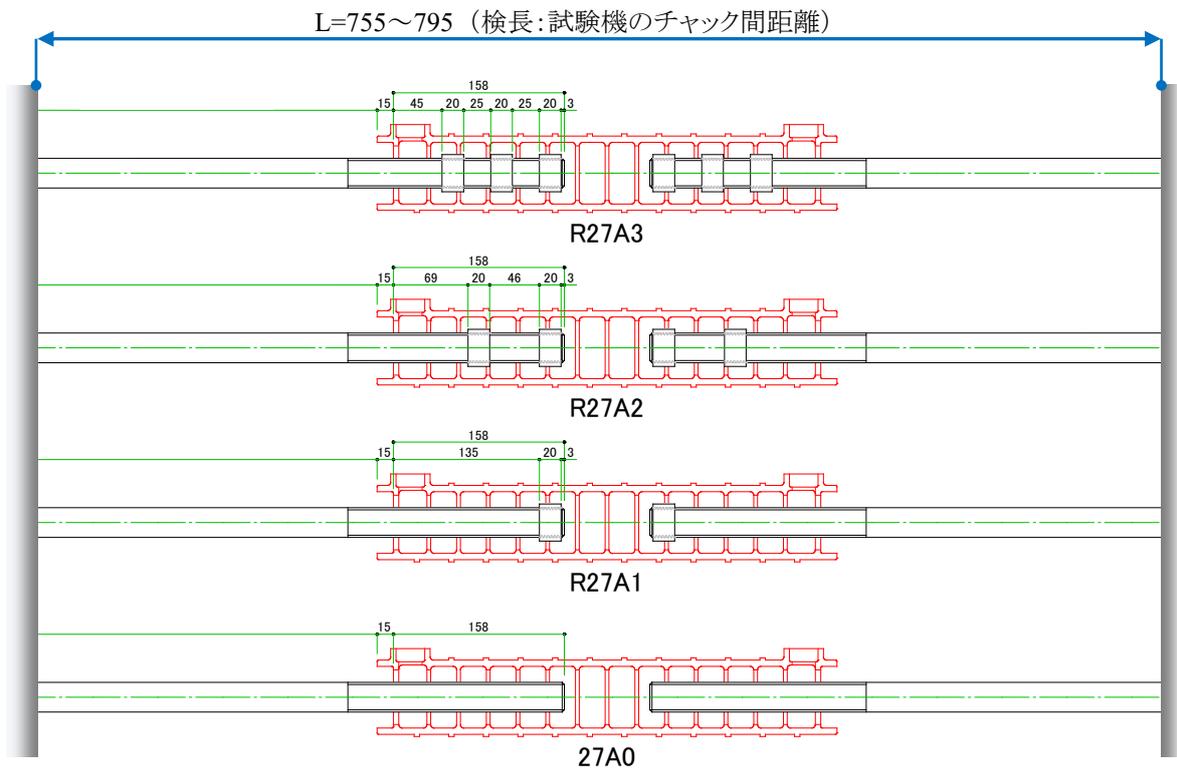


図5.2-1 強度区分10.9によるM27ボルト試験体の検長

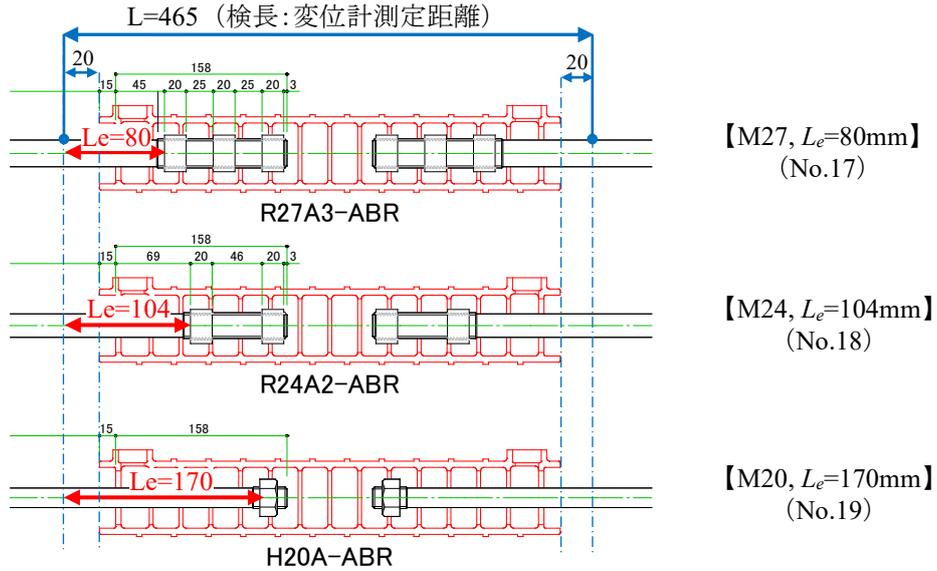


図5.2-2 ABR490アンカーボルトM27, M24, M20による試験体の検長Lと有効塑性化領域 L_e

(2) 定着用ナットの個数

定着用ナットの必要個数は、強度区分10.9によるM27ボルトを用い、ナットの個数をパラメータとした試験体により検証する。ABR490によるM27アンカーボルトによる荷重-ひずみ関係を併せて図5.2-3に示す。ナット0個の場合のみ、図5.2-3の1)の性能を下回り、ABRアンカーボルトの定着に必要な耐力が得られなかった。ナットの形状は、丸型ナット、六角ナットともに大差ない結果であった。この結果より、定着用ナットの個数は1個とし、ナットの形状は、六角ナット、丸型ナットいずれも可とできると判定する。

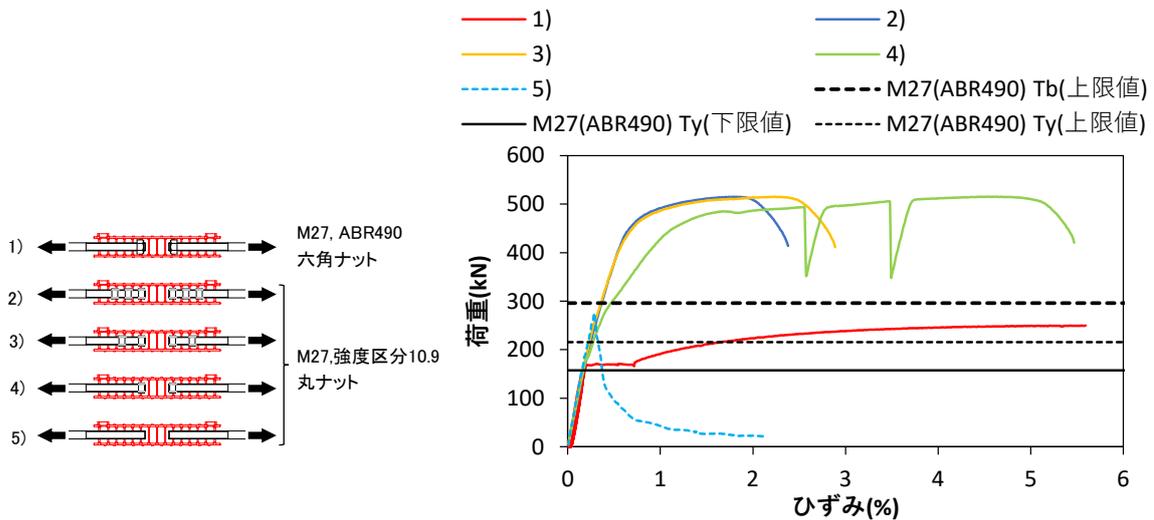


図5.2-3 M27アンカーボルトの定着用ナット個数に応じた定着性能の比較

(3) 定着用ナットの形状とグラウトモルタルの充填性

定着用ナットの形状は、六角ナットと丸型ナットを比較すると既製品スリーブの内径に対するクリアランスが小さく誤差吸収の対応範囲も狭い。一方で、いずれのナット形状もモルタルの充填性には問題ないことが確認された。充填時及び実験後のスリーブ内の状況を図 5.2-4 に示す。

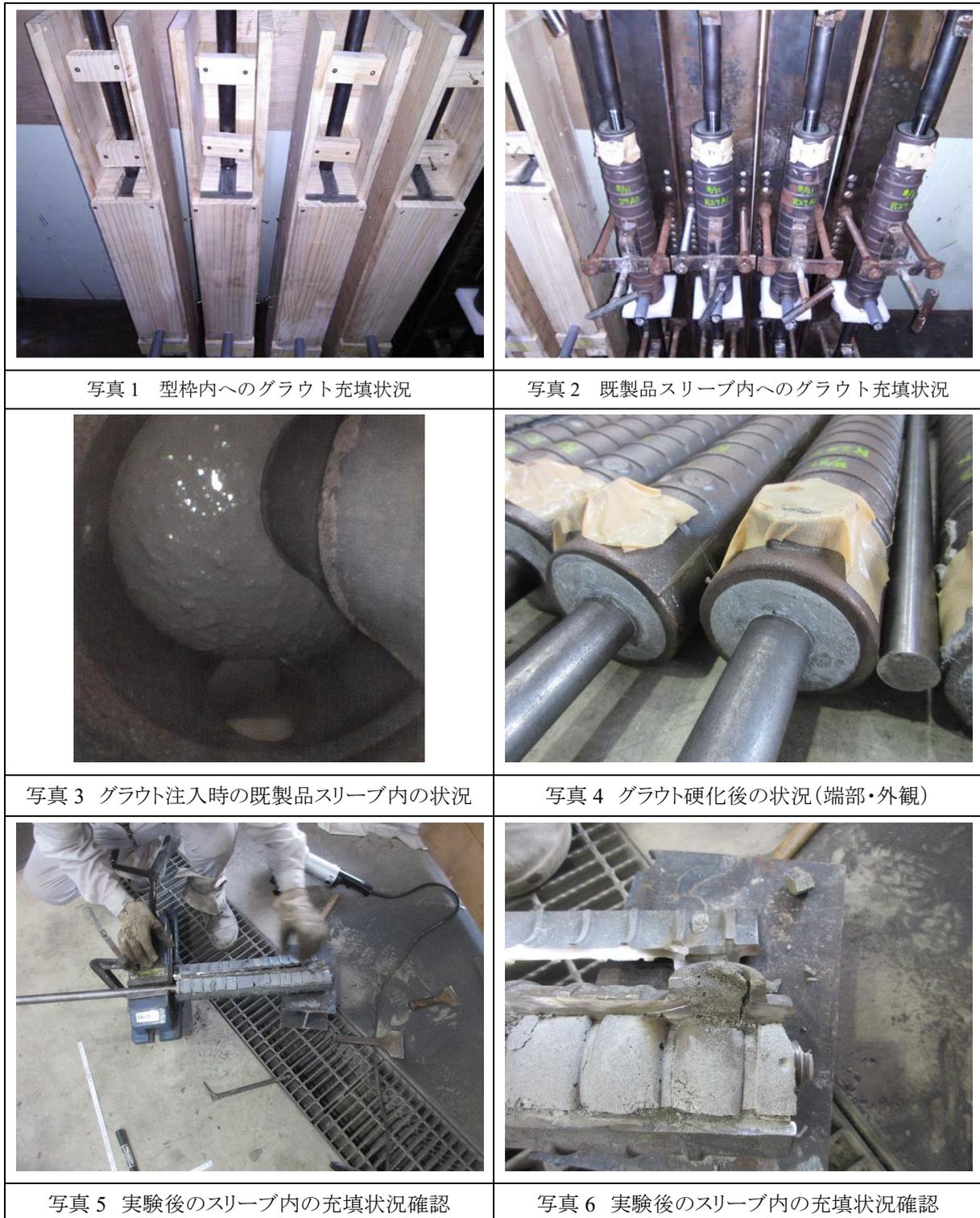


図5.2-4 既製品スリーブ内へのグラウト充填状況の確認

(4) ABRアンカーボルトの定着長さと塑性化領域

定着用ナットの個数を3個, 2個, 1個としたABRアンカーボルト試験体3仕様 (No.17, 18, 19) について、荷重-変位関係、荷重-ひずみ関係を比較する。ひずみは、(1)に示した2通りの方法で算定する。No.17は変位計の計測上限に達し、26mm以降のデータが得られていないが、さらに塑性伸びが進行した後に母材破断したことを確認している。結果を図2.5-5のグラフに示す。

また、荷重を各アンカーボルトの断面積で除して応力度とし、応力度-真のひずみ関係を図5.2-6のグラフに比較する。3仕様のグラフは概ね一致する結果であり、アンカーボルトの塑性化領域は、最外部の定着ナットを起点として算定可能であることを確認した。また、破断時伸びはいずれも16%以上が確保されることを確認した。

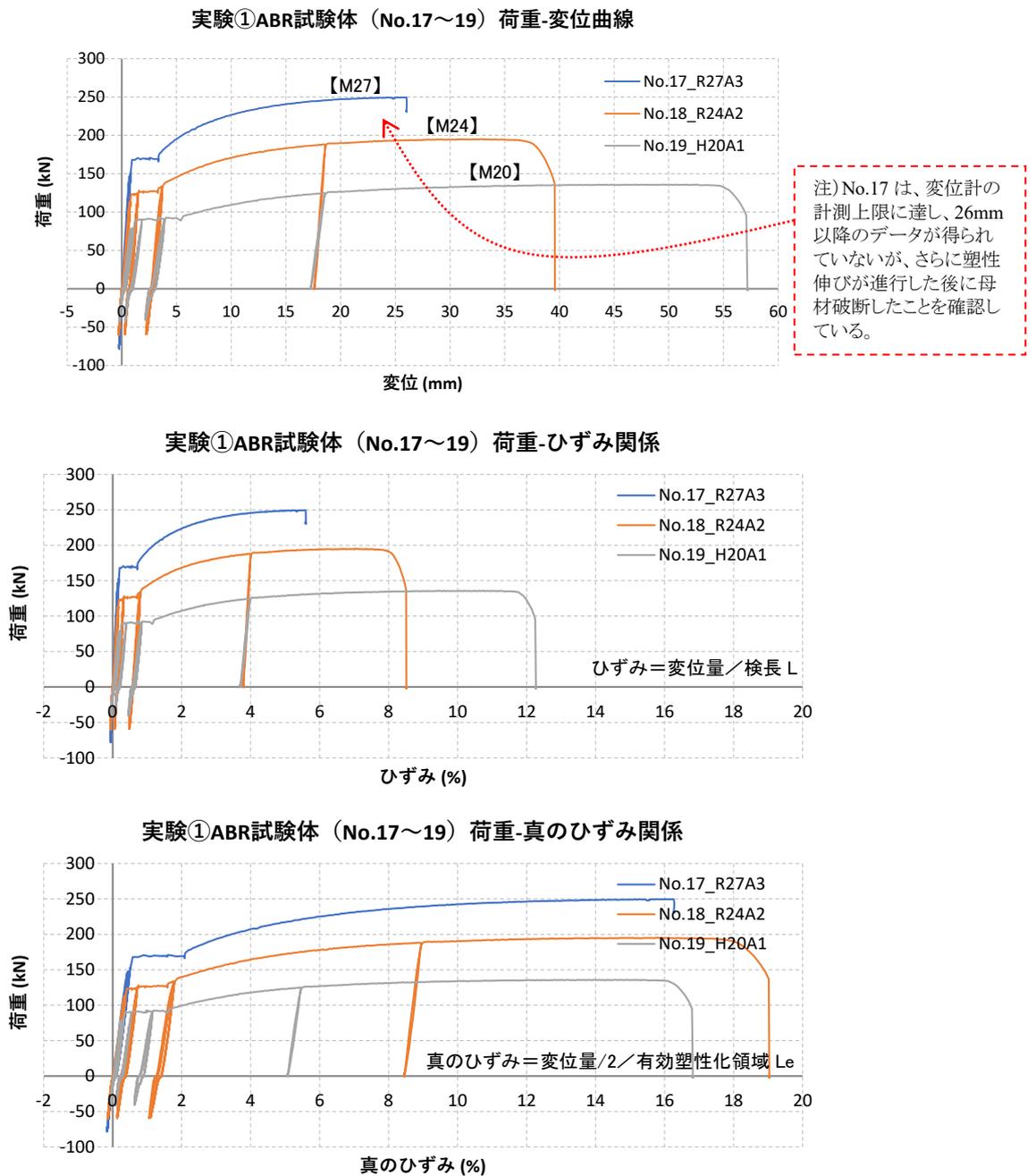


図5.2-5 ABRアンカーボルト試験体3仕様の荷重-変位関係および荷重-ひずみ関係

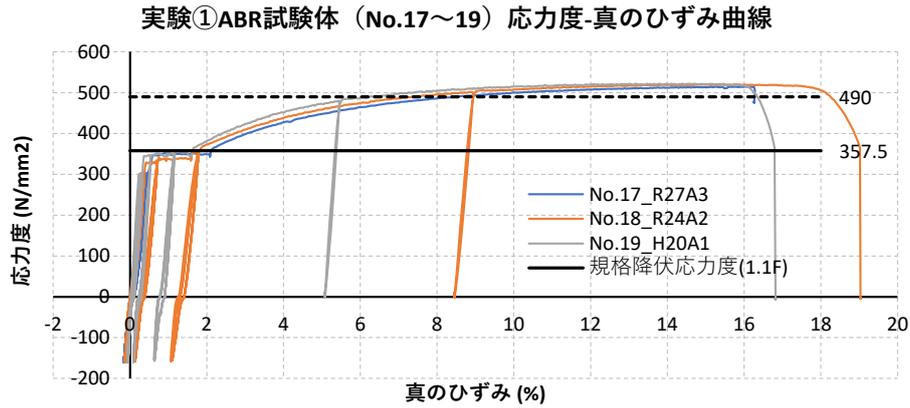


図5.2-6 ABRアンカーボルト試験体3仕様の応力度-ひずみ曲線

(5) ABRアンカーボルトのモデル化

前項(4)で得られた応力度-ひずみ曲線をもとに、ABRアンカーボルト部分のモデル化特性を設定する。骨格曲線はトリリニアモデルとし、特定点は以下のように設定する。対応するグラフを図5.2-7に示す。

- ・初期剛性 $E=205000\text{N/mm}^2$ とする。
- ・第一折れ点は、 F 値の1.1倍 ($=357.5\text{N/mm}^2$) とする。
- ・第二折れ点は、ひずみ8%とし、応力度は規格引張強度 ($=490\text{N/mm}^2$) とする。

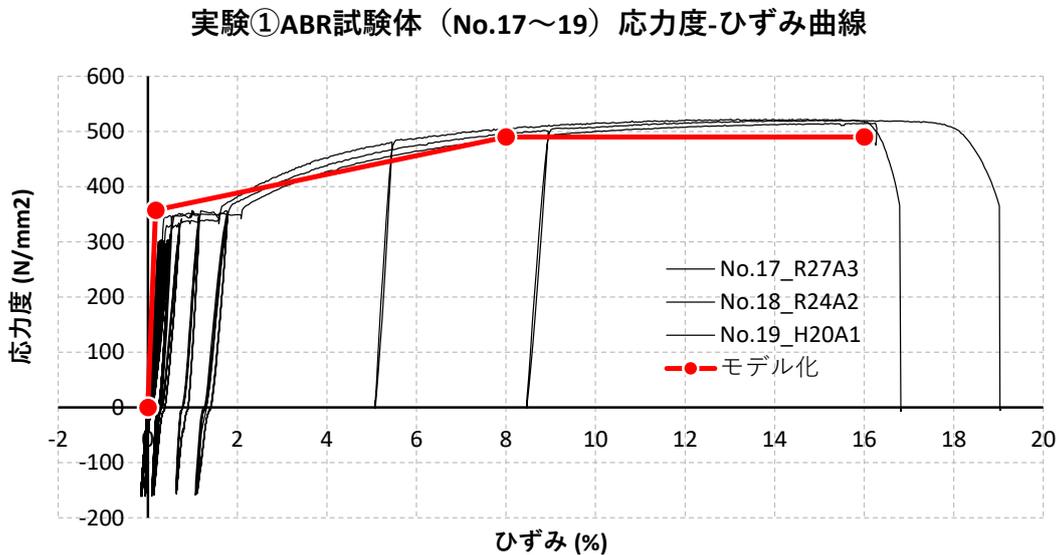


図5.2-7 ABRアンカーボルトのモデル化

モデル化の比較対象とした実験結果による初期勾配 (黒線) は、鋼材のヤング係数より低い傾向がみられる。要因としてナットとモルタルの接地面のモルタルに局部的に圧壊等が生じたこと等が推察されるが、設計用のモデル化においてはこの影響が全体におよぼす影響が小さいと考えられるため、鋼材の規格ヤング係数を採用して差し支えないと考えられる。

5.2.2 実験②の結果と考察

(1) 分析方法

実験②では、M27アンカーボルト及び異形鉄筋をCLTに直接グラウトするコブ定着について、コブ1箇所あたりの引張耐力を、接合部の仕様を決定するための予備的実験として実施した。実験は一方向引張加力として行い、CLTとアンカーボルトまたは異形鉄筋の相対変位を計測した。参考として、実験後の試験体の状況を図5.2-8に示す。

接合部全体のコブ定着の個数を決定するにあたり、コブの箇所数に耐力が比例するものと仮定する。本実験で得られた荷重変位関係に、ABRアンカーボルト及び異形鉄筋の上限耐力(アンカーボルトは規格破断強度の上限値、異形鉄筋はミルシートを参照)を想定するコブの箇所数 n で除した耐力と比較する。

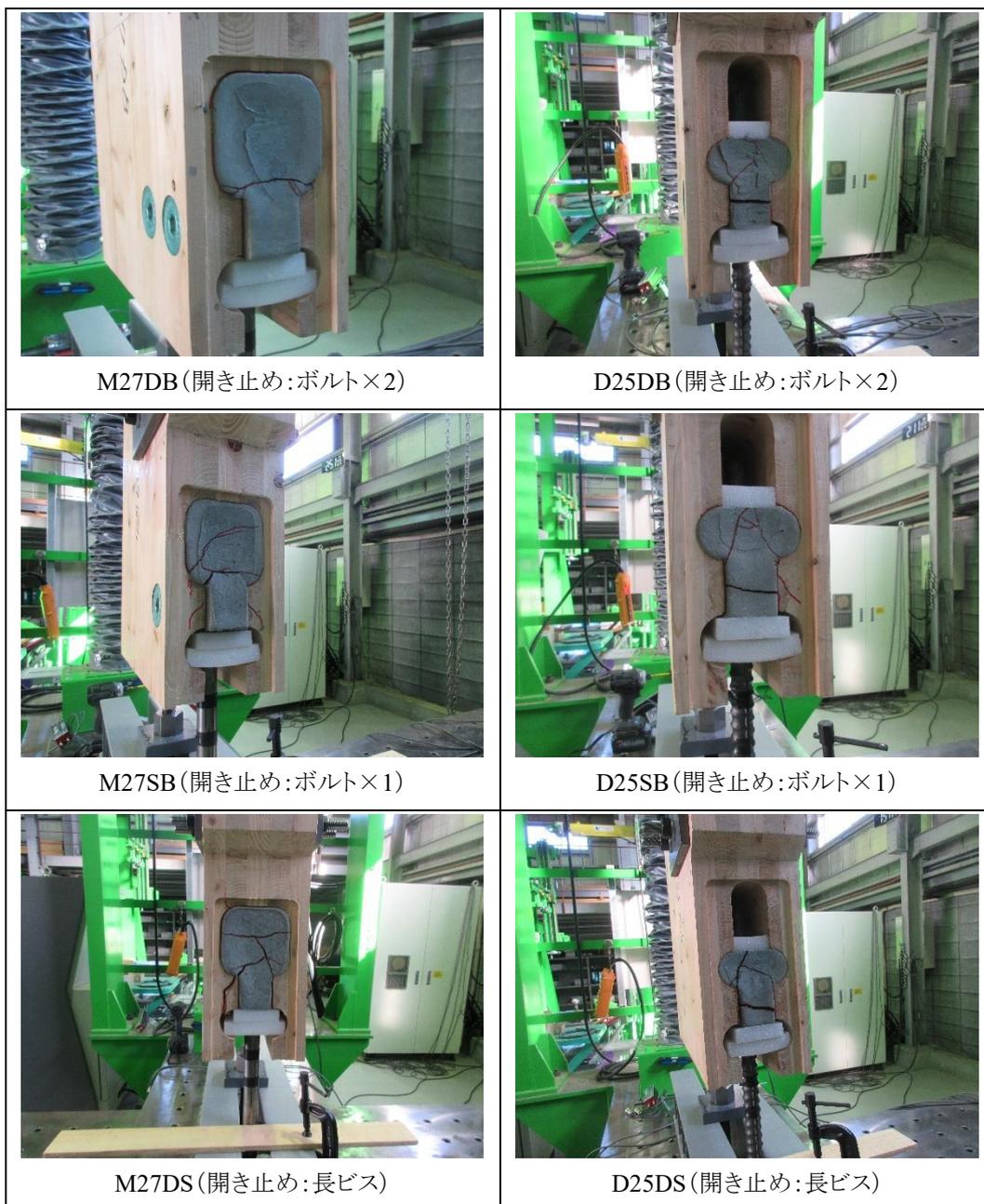


図5.2-8 実験②の試験体の設定状況と実験後の様子

(2) 定着用コブ1個当たりの荷重変形特性

実験対象とした6仕様は、いずれも初期剛性は概ね一致し、80kN/mm/箇所程度であった。最大耐力は、ばらつきが大きいもののナット定着による仕様が高い傾向が見られ、100kNを超える仕様も見られた。異形鉄筋では40kN程度で耐力が頭打ちとなるものも見られた。図5.2-9に各試験体を重ねた荷重変位グラフを示す。

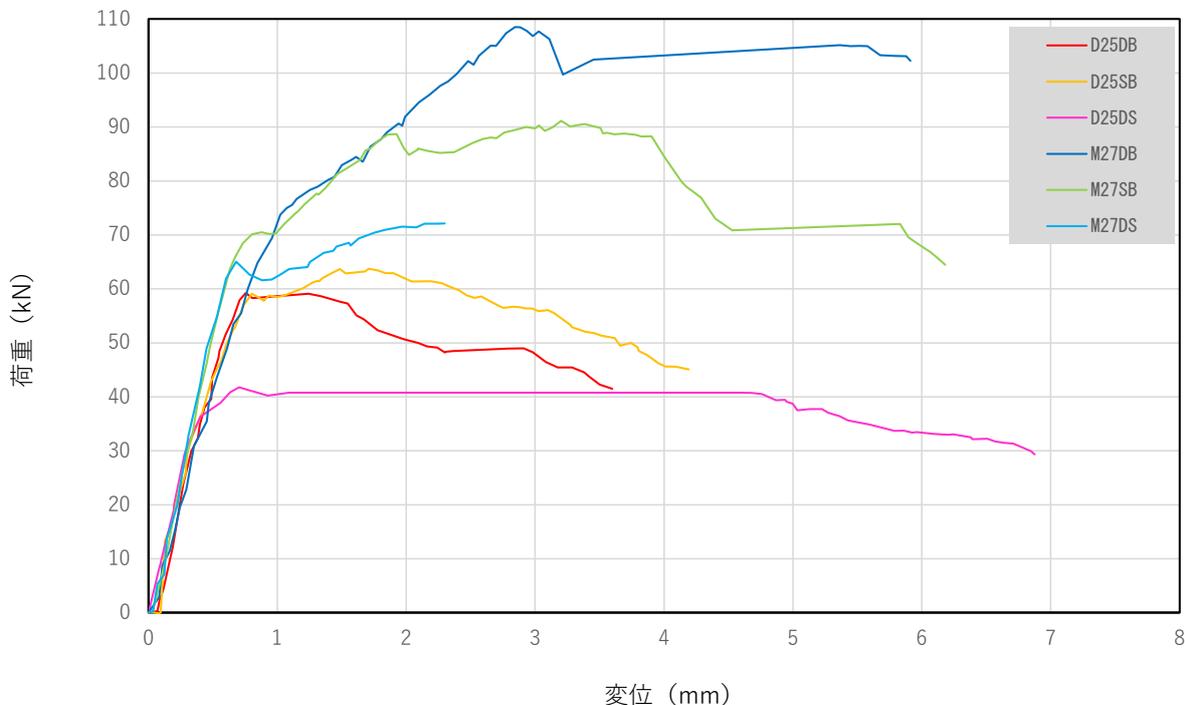


図5.2-9 実験②の試験体6仕様の荷重変位グラフ

(3) 必要定着コブ箇所数

本実験で得られた性能がコブ1箇所あたりであり、箇所数に応じた耐力の比例則が成り立つと仮定すれば、定着するアンカーボルトまたは鉄筋の引張耐力に応じて箇所数の設定が可能である。本検討では、アンカーボルトM27 (ABR490)、異形鉄筋D25 (SD345)をコブ定着する場合について、コブ箇所数 $n=6$ と仮定し、規格降伏強度および引張強さの上限値(それぞれ445N/mm², 610N/mm²)を n で除した値と、実験結果の荷重変位関係と比較する。異形鉄筋の場合は、本実験で用いた鉄筋のミルシートによる降伏点及び引張強さおよび異形鉄筋の上限強度に関する資料(文献⁵⁻¹)に基づき、D25 (SD345)の推定上限破断強度を606N/mm²とする。図2.5-10にグラフを比較する。

M27アンカーボルトは、コブ定着箇所数を6とすれば、いずれの仕様もアンカーボルトの破断耐力まで概ね弾性範囲となる結果であった。異形鉄筋D25は、降伏耐力まではいずれの仕様も弾性範囲であったが、開き止めを長ビスによる仕様(試験体名:D25DS)のみ、ミルシートによる破断強度までの定着性能が10%ほど不足する結果であった。コブ定着の箇所数を7とすれば定着部の耐力が7/6倍(約16%)向上するため満足できることになるが、耐力が箇所数に比例することも仮定であること、開き止めをボルト仕様とすれば6箇所でも足りる可能性があること、ABRアンカーボルトの試験体と仕様を合わせることを考慮し、実験③ではコブ箇所数 $n=6$ で計画することとした。

⁵⁻¹ 茨城県建設技術管理センター：年報 No 28、7. 鋼材試験、7.2 鉄筋コンクリート用異形棒鋼、2019

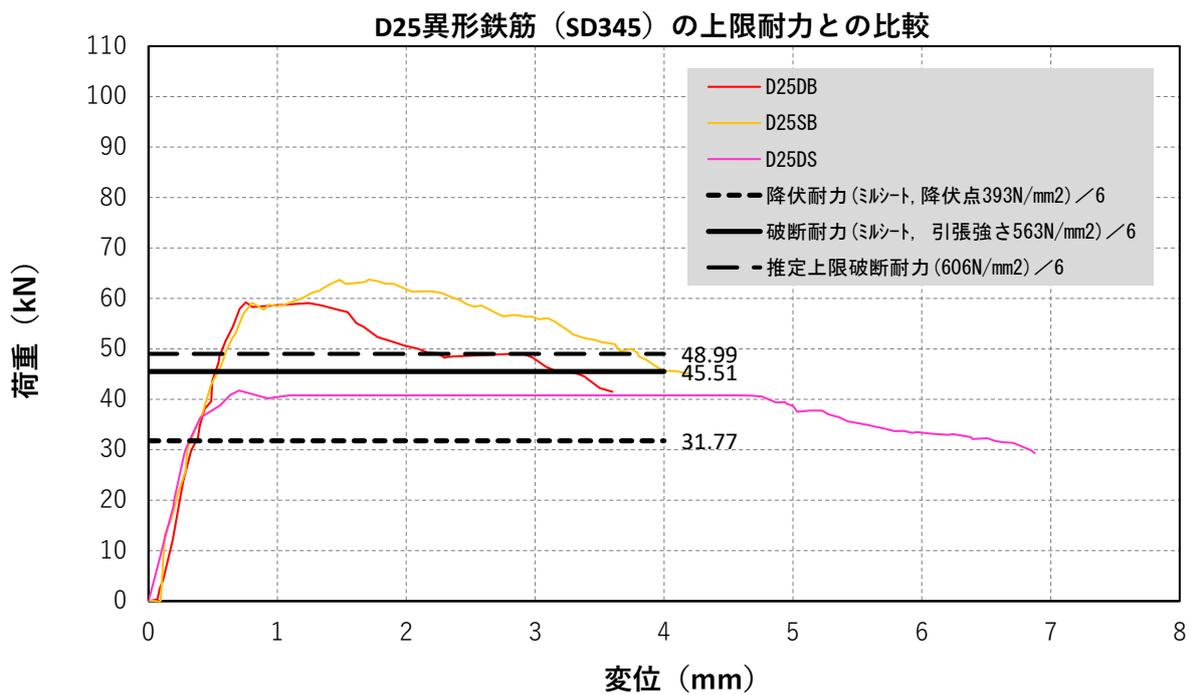
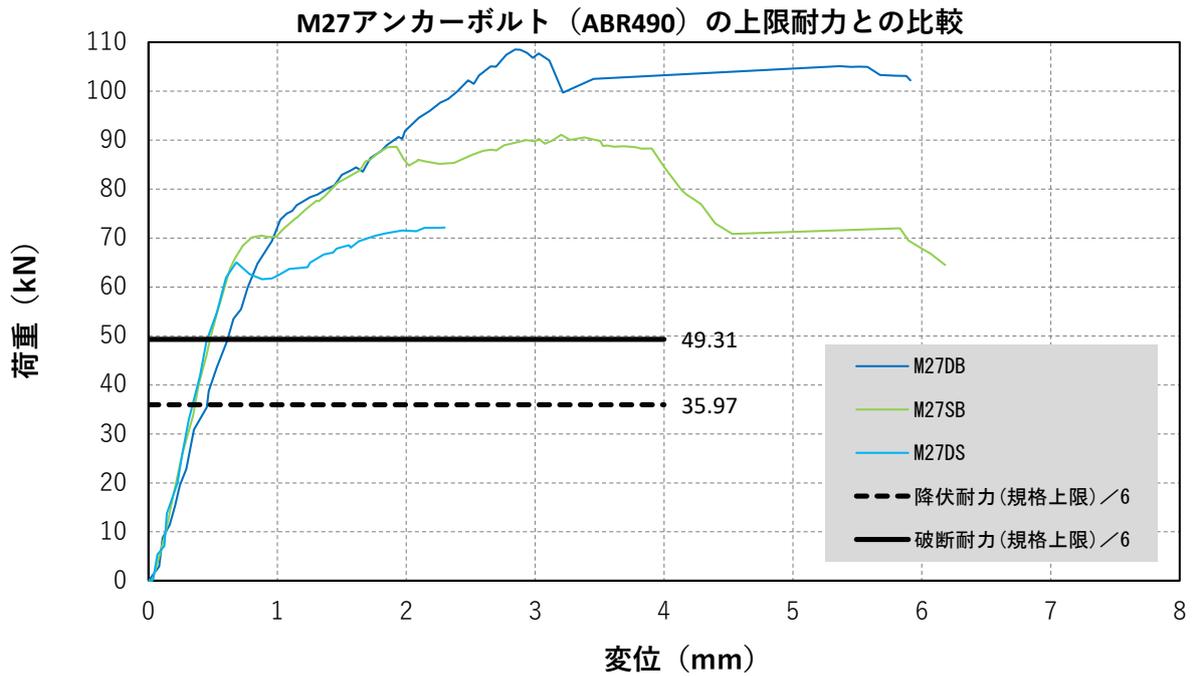


図5.2-10 CLTコブ定着部1箇所当りの耐力性能とABRアンカーボルトの規格上限耐力の比較
 (コブ定着数を6、耐力比例則が成立すると仮定した場合)

5.3 GJ接合部実験の結果分析 (実験③)

5.3.1 引張実験

(1) 鋼板挿入ドリフトピン接合部

実験対象としたドリフトピン接合部の試験体は、図5.3-1に示すドリフトピン間隔が異なる2仕様(4d, 5d)である。いずれの試験体もドリフトピンの間隔は10本である。両試験体ともに、M27(ABR490)アンカーボルトの破断耐力まで概ね弾性範囲であることを確認した。

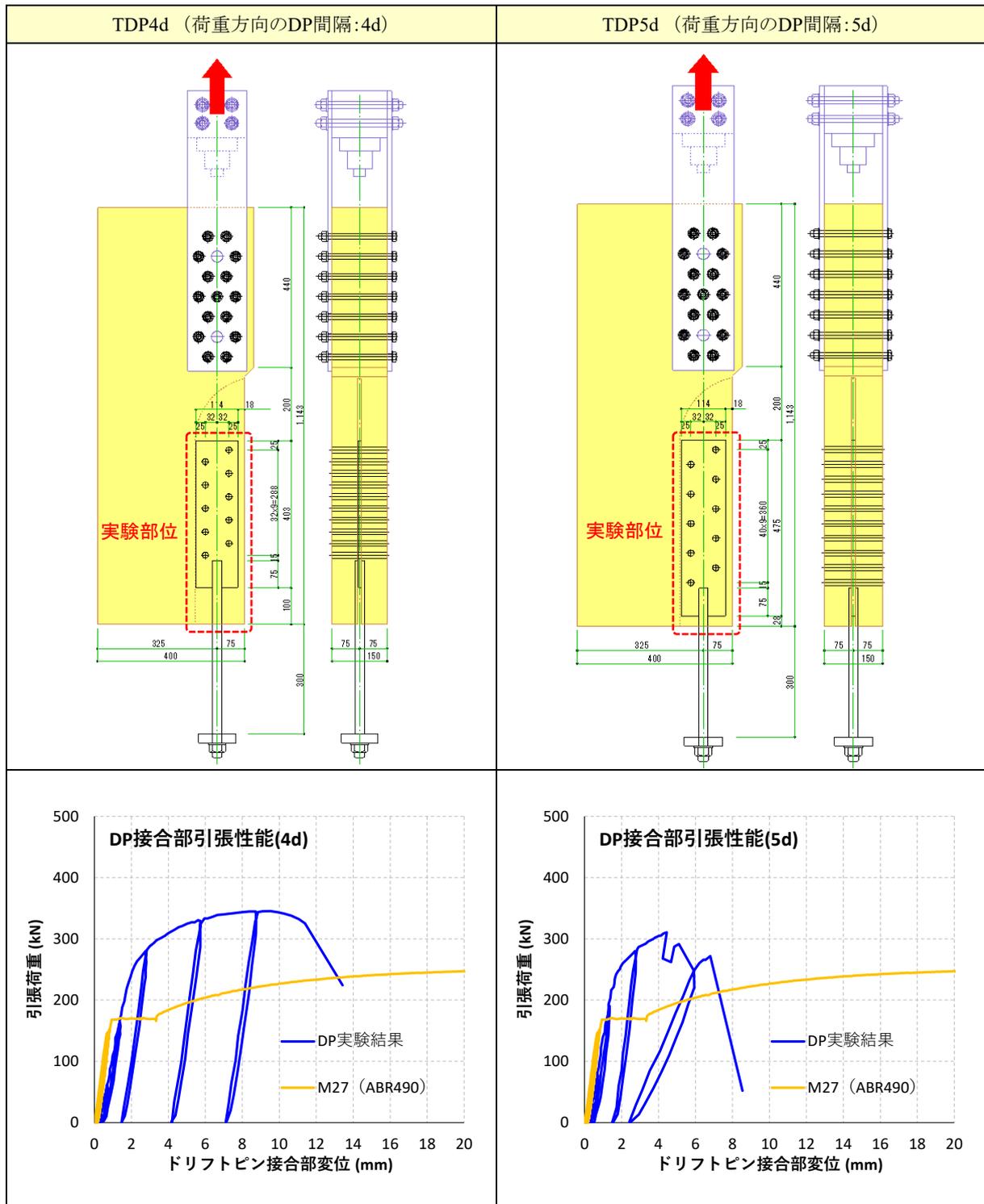
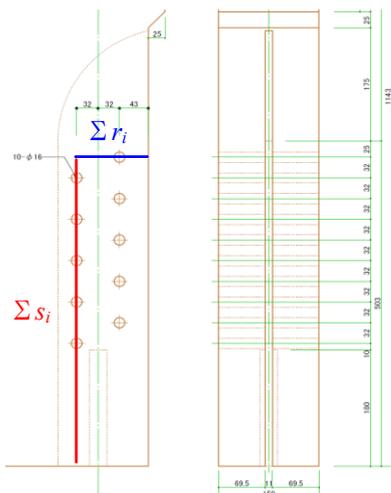
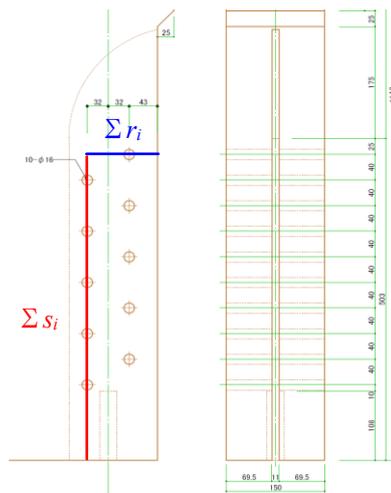
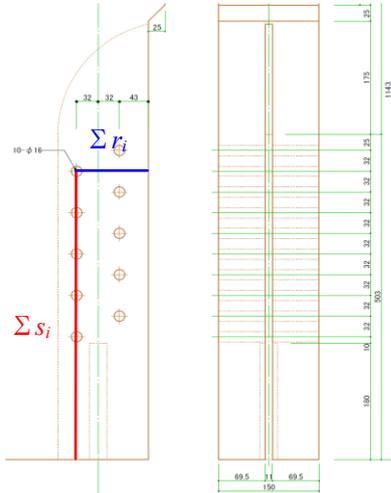
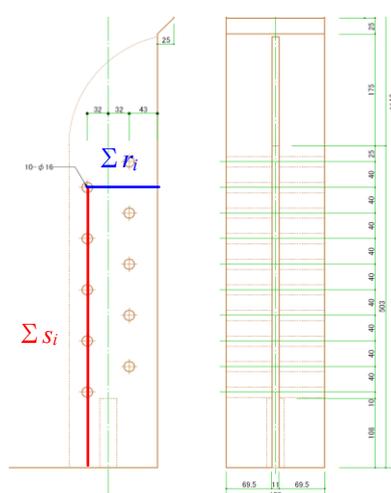


図5.3-1 鋼板挿入ドリフトピン接合部試験体と試験結果

一方、実験に用いたCLTは実性能として基準強度より高い性能であると見込まれることから、CLTの基準強度を用いた論文式(文献⁵⁻²)に基づく計算によるDP接合部全体の終局耐力を算定し、ABRアンカーボルトの上限引張耐力に対する保持性能を確認する。なお、論文式による終局耐力の評価において、ドリフトピンが千鳥配置される場合の集合型せん断破壊モードにおける有効せん断断面積、引張断面積のとり方に関する記載がないため、本検討では論文で想定されている破壊モードのうち、最もクリティカルとなる破壊モードc-2)について、図5.3-2に示す破断面として2ケースを設定する。

	TDP4d (荷重方向のDP間隔:4d)	TDP5d (荷重方向のDP間隔:5d)
破断面1	 $\sum s_i = 478 - 16 \times 5 = 398 \text{mm}$ $\sum r_i = 107 - 16 \times 1 = 91 \text{mm}$	 $\sum s_i = 478 - 16 \times 5 = 398 \text{mm}$ $\sum r_i = 107 - 16 \times 1 = 91 \text{mm}$
破断面2	 $\sum s_i = 446 - 16 \times (4 + 1/2) = 374 \text{mm}$ $\sum r_i = 107 - 16 \times (0 + 1/2) = 99 \text{mm}$	 $\sum s_i = 438 - 16 \times (4 + 1/2) = 366 \text{mm}$ $\sum r_i = 107 - 16 \times (0 + 1/2) = 99 \text{mm}$

注) 破断面1: 千鳥打ちDP群のうち表層ラミナ平行層側の木口から最も遠いDP心までの距離を有効な破壊せん断面とした場合。
 注) 破断面2: CLT内部側のDP列において表層ラミナ平行層側の木口から最も遠いDP心までの距離を有効な破壊せん断面とした場合。

図5.3-2 鋼板挿入ドリフトピン接合部試験体

⁵⁻² 中島昌一, 三木徳人, 秋山信彦, 荒木康弘: 鋼板挿入 CLT ドリフトピン接合部の最大耐力、降伏耐力および初期剛性の推定と実験による検証, 日本建築学会構造系論文集 第 86 巻 第 783 号, 793-803, 2021 年 5 月

文献⁵⁻²では、DP接合部の終局耐力として、図5.3-3に示すCLTの集合型破壊モードのほか、終局強度比(接合部の降伏耐力に対する終局耐力の比率 α で、論文では便宜的に $\alpha=1.5$ とされている)の最小値を採用するとされている。また、実験では挿入鋼板の破断も確認されたことから、挿入鋼板の有効断面部における破断強度についても検定項目に含める。

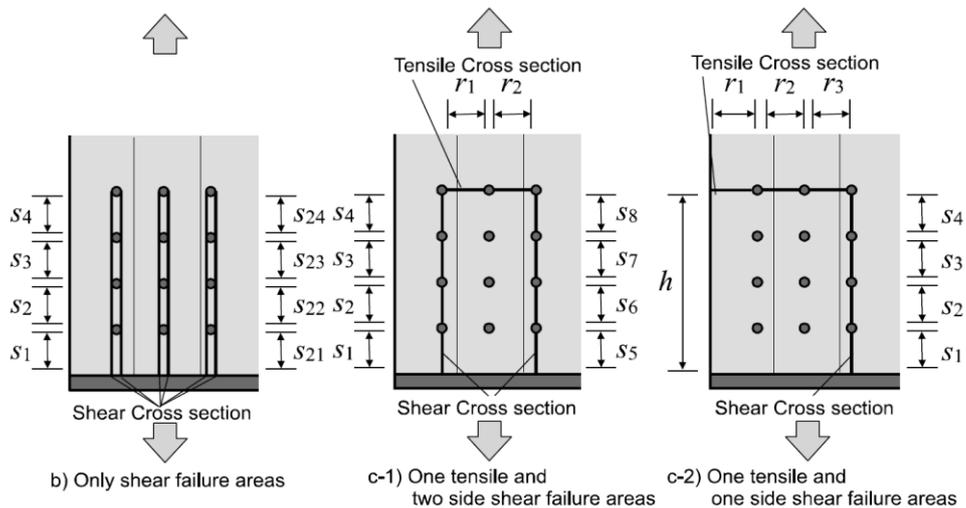


図5.3-3 文献⁵⁻²で想定するDP接合部のCLT集合型せん断破壊モード

また、初期剛性についても同様に論文式を適用し算定する。剛性値に関して、論文では実験値が計算値に対して0.3~0.8倍の範囲で低下することが報告されている。本検討では計算値に対して0.5倍の低減を考慮すると概ね実験値と計算値が整合する結果であった。

論文式による終局耐力および初期剛性の算定値と実験結果を図5.3-4に比較する。終局耐力の算定結果を図5.3-5に示す。グラフ中に示す終局耐力は、破壊面1、2で算定した結果のうち最小値を示す。論文式による終局耐力は、実験値の終局耐力に対して安全側に評価することを確認した。また、ABR490の最大耐力に対してDP接合部耐力が上回ることを確認した。

以上の結果より、M27-ABR490 アンカーボルトの場合は、DP接合部として10-DP16(間隔4d)としてよい。

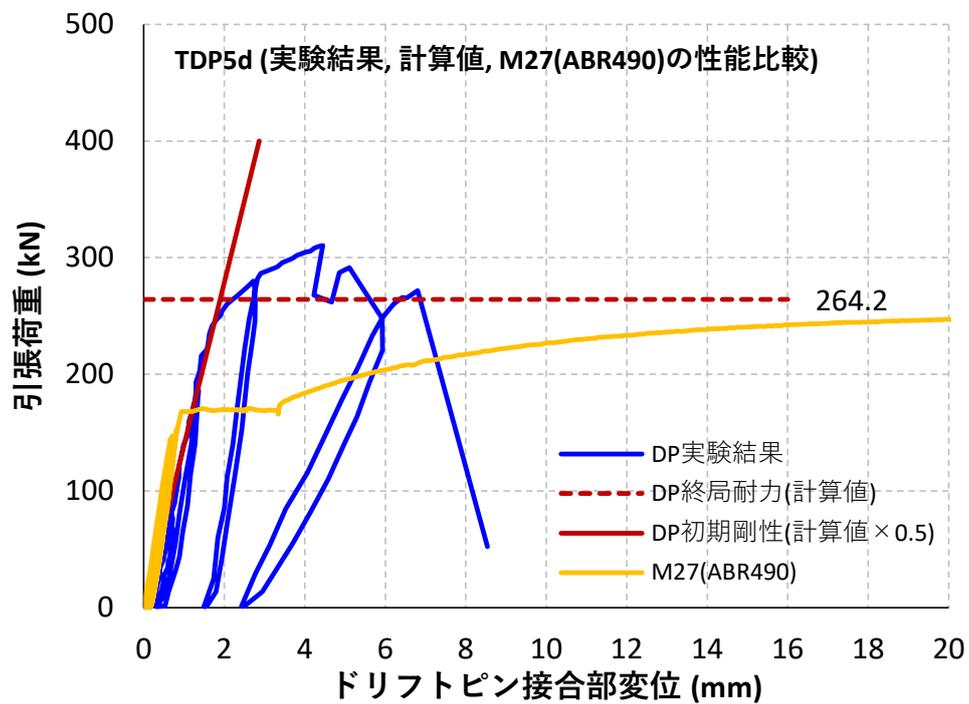
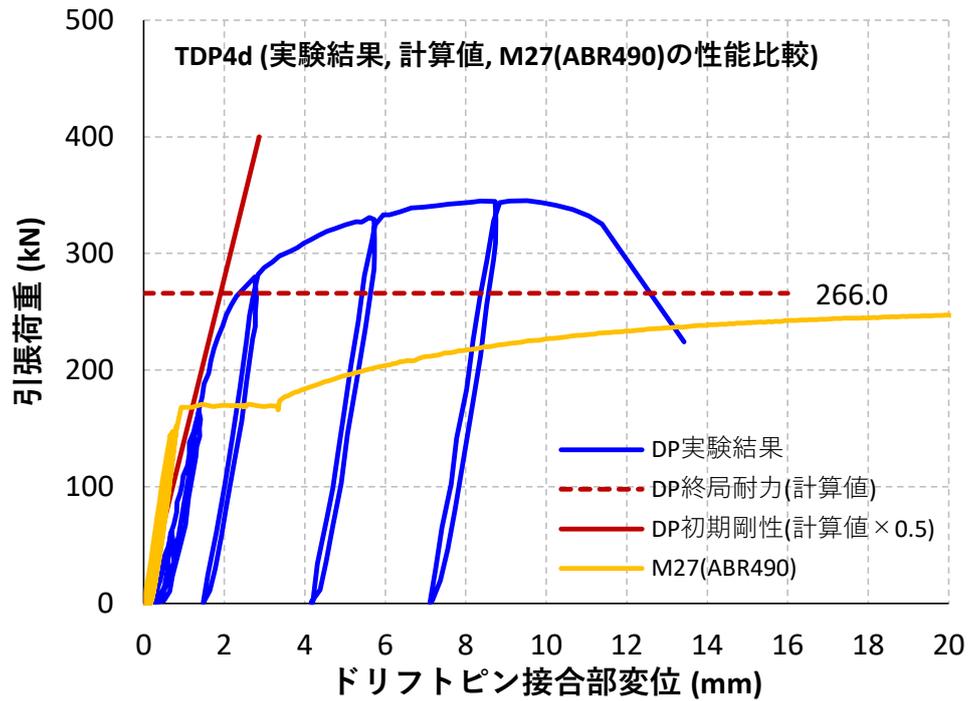


図5.3-4 文献⁵⁻²で想定するDP接合部のCLT集合型せん断破壊モード

計算条件	単位	TDP4d	
		破壊面1	破壊面2
DP径	mm	16	16
CLT厚	mm	150	150
スリット幅	mm	11	11
挿入鋼板	mm	9	9
DP本数	本	10	10
DP間隔	d	4	4
DP間隔	mm	64	64
クリアランス	mm	1	1
DP1本の降伏耐力Py	kN/本	27.2	27.2
DP1本の基準剛性k	knN/mm/本	37.6	37.6
耐力の低減係数	-	1.0	1.0
剛性の低減係数($\alpha \times \beta$)	-	0.5	0.5
【Pus】-鋼板破断	kN	437.6	437.6
挿入鋼板の破断強度	N/mm2	400	400
DP鋼板縁あきL	mm	25	25
DP鋼板縁あきR	mm	25	25
DP列間隔	mm	64	64
DP間最短距離	mm	71.6	71.6
挿入鋼板破の最小断面積	mm2	1094.0	1094.0
【Pug】-CLT集合型破壊		266.0	267.2
Ft	N/mm2	9.22	9.22
Fs	N/mm2	2.70	2.70
DPCLT端空き	mm	190	190
破壊モードb):P1	kN	693.6	693.6
せん断抵抗面長さ	mm	1848	1848
せん断抵抗面厚さ	mm	139	139
せん断抵抗断面積	mm2	256872	256872
破壊モードc-1):P2		354.2	354.2
せん断抵抗面長さ	mm	780	780
せん断抵抗面厚さ	mm	139	139
せん断抵抗断面積	mm2	108420	108420
引張抵抗面長さ	mm	48	48
引張抵抗面厚さ	mm	139	139
引張抵抗断面積	mm2	6672	6672
破壊モードc-2):P3		266.0	267.2
せん断抵抗面長さ	mm	398	374
せん断抵抗面厚さ	mm	139	139
せん断抵抗断面積	mm2	55322	51986
引張抵抗面長さ	mm	91	99
引張抵抗面厚さ	mm	139	139
引張抵抗断面積	mm2	12649	13761
【ruPy】-終局強度比		326.4	326.4
◆DP接合部特性(グラフ)			
Py	kN	272.0	272.0
Pu	kN	266.0	267.2
K1	kN/mm	139.7	139.7
K2(=0.08K1)	kN/mm	11.2	11.2
◆DP接合部特性グラフ			
P0	kN	0.00	0.00
P1	kN	265.99	267.24
P2	kN	400.00	400.00
δ 1	mm	0.00	0.00
δ 2	mm	1.90	1.91
δ 3	mm	2.86	2.86

計算条件	単位	TDP5d	
		破壊面1	破壊面2
DP径	mm	16	16
CLT厚	mm	150	150
スリット幅	mm	11	11
挿入鋼板	mm	9	9
DP本数	本	10	10
DP間隔	d	5	5
DP間隔	mm	80	80
クリアランス	mm	1	1
DP1本の降伏耐力Py	kN/本	27.2	27.2
DP1本の基準剛性k	knN/mm/本	37.6	37.6
耐力の低減係数	-	1.0	1.0
剛性の低減係数($\alpha \times \beta$)	-	0.5	0.5
【Pus】-鋼板破断	kN	451.7	451.7
挿入鋼板の破断強度	N/mm2	400	400
DP鋼板縁あきL	mm	25	25
DP鋼板縁あきR	mm	25	25
DP列間隔	mm	64	64
DP間最短距離	mm	75.5	75.5
挿入鋼板破の最小断面積	mm2	1129.2	1129.2
【Pug】-CLT集合型破壊		266.0	264.2
Ft	N/mm2	9.22	9.22
Fs	N/mm2	2.70	2.70
DPCLT端空き	mm	118	118
破壊モードb):P1	kN	687.5	687.5
せん断抵抗面長さ	mm	1832	1832
せん断抵抗面厚さ	mm	139	139
せん断抵抗断面積	mm2	254648	254648
破壊モードc-1):P2		351.2	351.2
せん断抵抗面長さ	mm	772	772
せん断抵抗面厚さ	mm	139	139
せん断抵抗断面積	mm2	107308	107308
引張抵抗面長さ	mm	48	48
引張抵抗面厚さ	mm	139	139
引張抵抗断面積	mm2	6672	6672
破壊モードc-2):P3		266.0	264.2
せん断抵抗面長さ	mm	398	366
せん断抵抗面厚さ	mm	139	139
せん断抵抗断面積	mm2	55322	50874
引張抵抗面長さ	mm	91	99
引張抵抗面厚さ	mm	139	139
引張抵抗断面積	mm2	12649	13761
【ruPy】-終局強度比		326.4	326.4
◆DP接合部特性(グラフ)			
Py	kN	272.0	272.0
Pu	kN	266.0	264.2
K1	kN/mm	139.7	139.7
K2(=0.08K1)	kN/mm	11.2	11.2
◆DP接合部特性グラフ			
P0	kN	0.00	0.00
P1	kN	265.99	264.24
P2	kN	400.00	400.00
δ 1	mm	0.00	0.00
δ 2	mm	1.90	1.89
δ 3	mm	2.86	2.86

図5.3-5 文献⁵⁻²による終局耐力および初期剛性の算定結果

(2) コブ定着接合部の引張性能

実験対象とした試験体は、M27アンカーボルト(ABR490)を定着するタイプを2仕様、D25異形鉄筋(SD345)を定着するタイプを2仕様、計4仕様とした。各タイプの仕様の違いは、CLTパネルの開き止めの仕様が座付きボルトの場合、長ビスによる場合である。M27アンカーボルトとD25異形鉄筋で明らかな性能差があり、M27アンカーボルトは規格降伏耐力程度までは弾性で挙動したが、その後は両仕様とも耐力が低下し、設計上必要な性能に満たなかった。異形鉄筋は鉄筋のミルシートに対応した降伏耐力(降伏点強度:393N/mm²)、最大耐力(引張強さ:563N/mm²)が確認された。なお、CLTの開き止めの仕様の違いによる耐力性能に与える影響は小さかった。

初期剛性について、各試験体で有効長さ L_e を仮定し、 EA/L_e による算定値と実験結果を比較した。有効長さ L_e について、M27アンカーボルト試験体では試験体下部に設けた鋼板から定着用ナットまでの距離として650mm、異形鉄筋試験体では、埋め込み部分の全長として625mmと仮定した。いずれの試験体も計算値による初期剛性と実験結果の初期勾配が概ね対応することを確認した。なお、異形鉄筋試験体については、試験後に解体して破壊性状を確認したところ、定着部分の中央部付近の鉄筋が塑性化していることが確認された。さらに、変位計などによる定量的な計測はなされていないが、実態としては鉄筋の伸び変形と直列接続要素として、グラウトのCLTへの支圧めり込による変形分、グラウトのせん断変形分が介在していたものと考えられる。これより上記の仮定による剛性値と実験結果が概ね整合したことは偶然と考えられるが、実態性能についての略算的な評価手法としては比較的精度が高い方法とも考えられる。

また、異形鉄筋の試験体2仕様については、引張圧縮繰り返し加力の過程において特段のスリップ性状が見られず、鋼材の特長である紡錘形の履歴特性が得られることが確認された。当該接合部の履歴特性のモデル化においては、図5.3-6に示すような標準トリニアモデルなどのスリップ性状のない特性としてモデル化でき、エネルギー吸収性能の高い接合部形式が可能であると考えられる。

次頁以降の図5.3-7にM27アンカーボルトの結果を、図5.3-8に異形鉄筋の結果をそれぞれ示す。

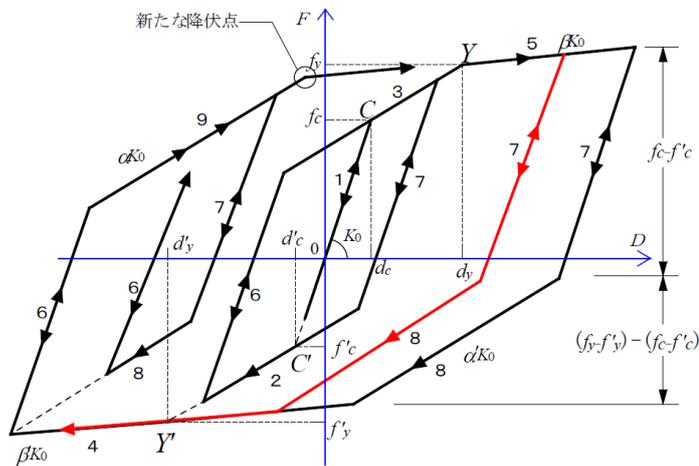


図5.3-6 標準トリニアモデルの履歴特性(例)

(株式会社構造システム/SNAP Ver.8「テクニカルマニュアル」より引用)

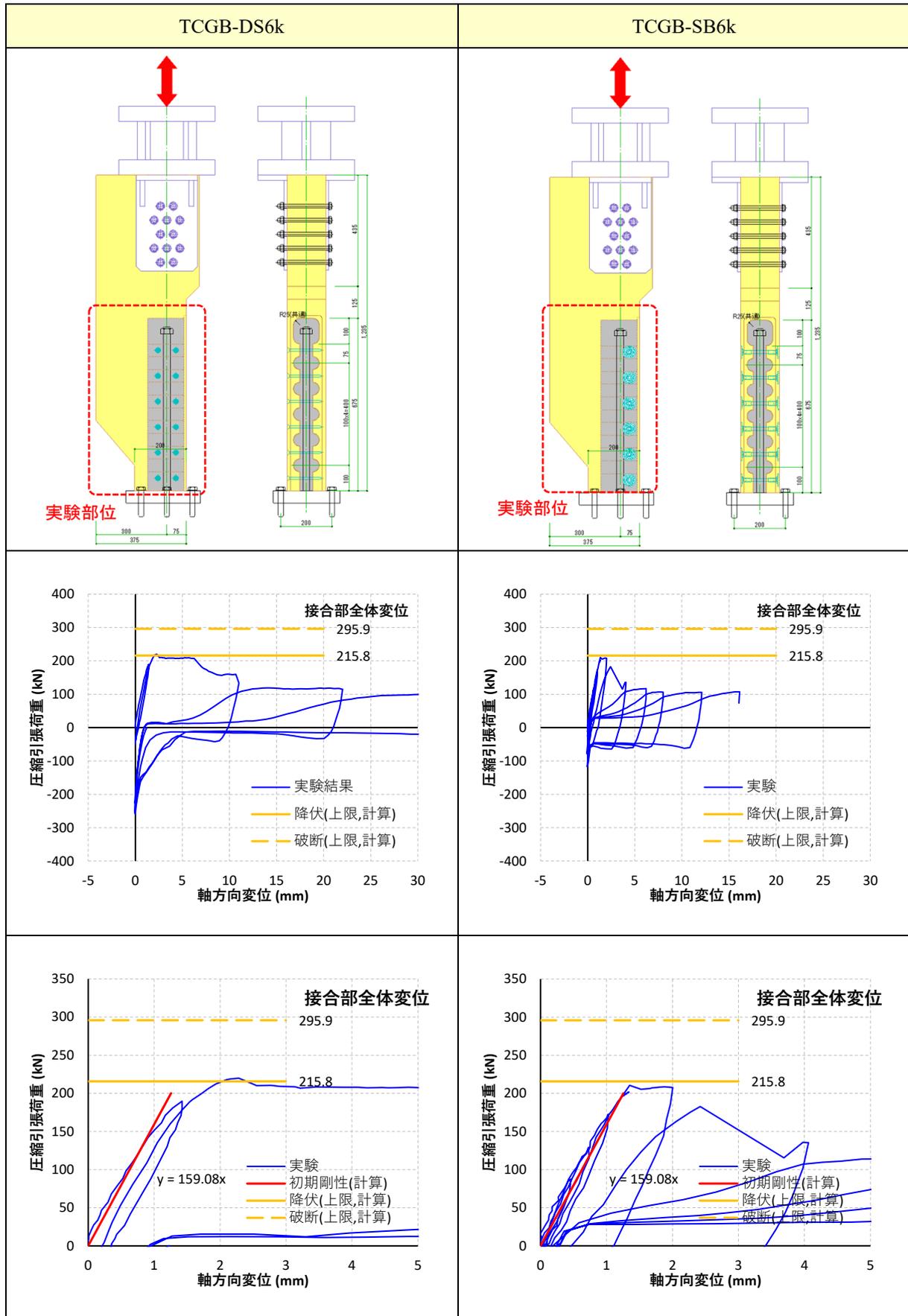


図5.3-7 CLTコブ定着接合部の実験結果 / M27アンカーボルト仕様

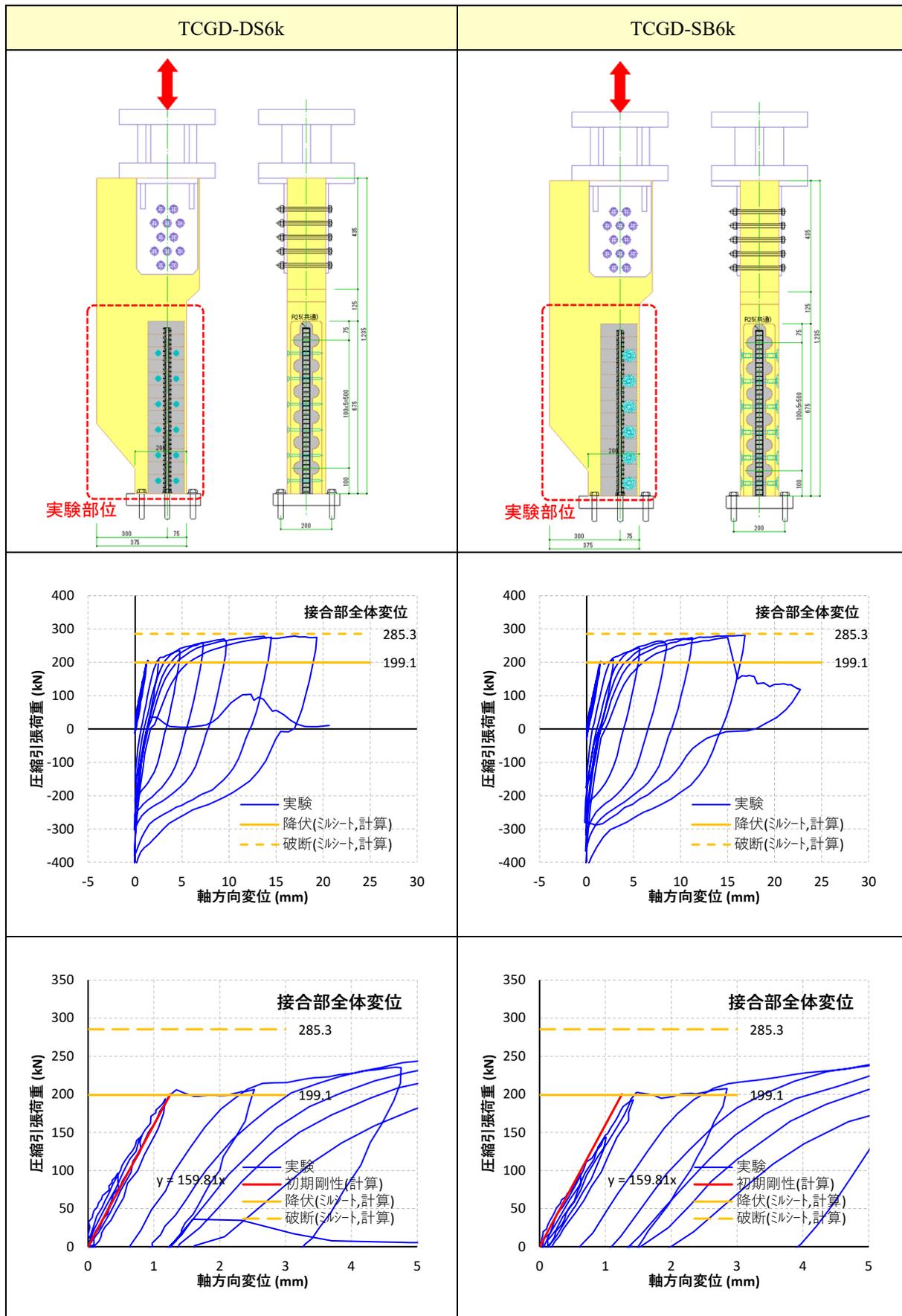


図5.3-8 CLTコブ定着接合部の実験結果 / D25異形鉄筋仕様

(3) 異形鉄筋アンカー引張実験

アンカーボルトの代用として異形鉄筋をRC基礎に定着する場合について、耐力及び変形性状を確認することを目的として実施した。アンカーに用いた異形鉄筋はD25(SD345)、先端をJ型に折り曲げた形状とし、RC部分への有効埋込長さを625mmとした。試験体概要を図5.3-9に示す。実験では異形鉄筋に引張力を作用し、異形鉄筋とRC基礎との相対変位を計測した。

実験結果の荷重変位関係と、異形鉄筋のミルシートに基づく降伏耐力及び破断耐力を図5.3-10に示す。また、応力度－ひずみ関係を図5.3-10に示す。応力度－ひずみ関係のグラフには、ミルシートによる降伏点強度、引張強さに加えて、規格降伏点強度の1.1倍(=357.5N/mm²)、文献⁵⁻¹による推定上限破断強度(=606N/mm²)および鋼材の弾性係数E(=205000N/mm²)を併記した。

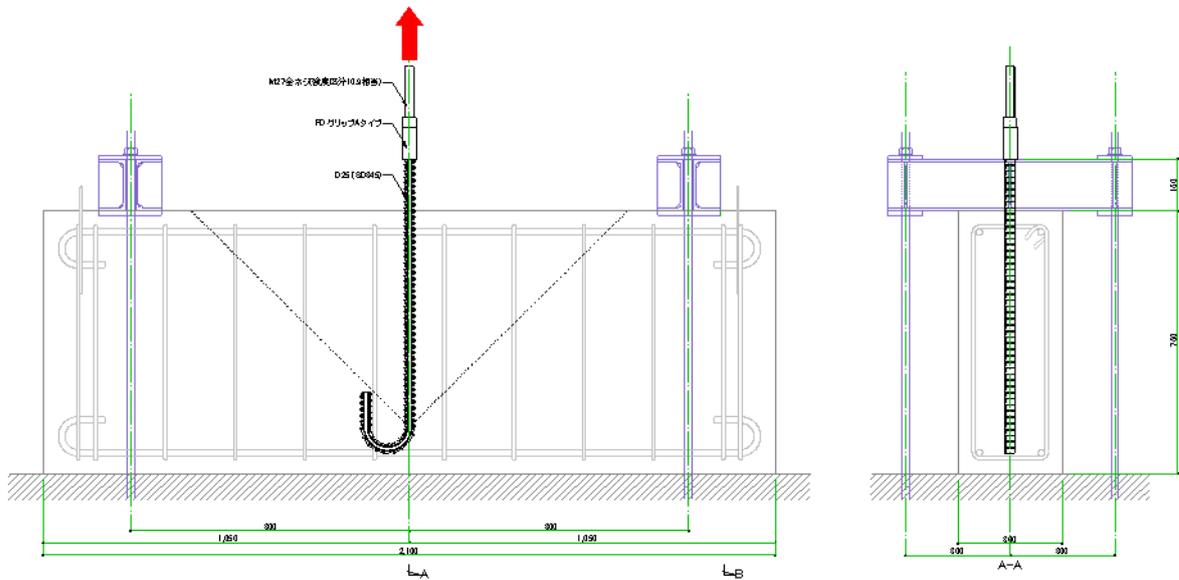


図5.3-9 異形鉄筋引張実験 試験体構成図

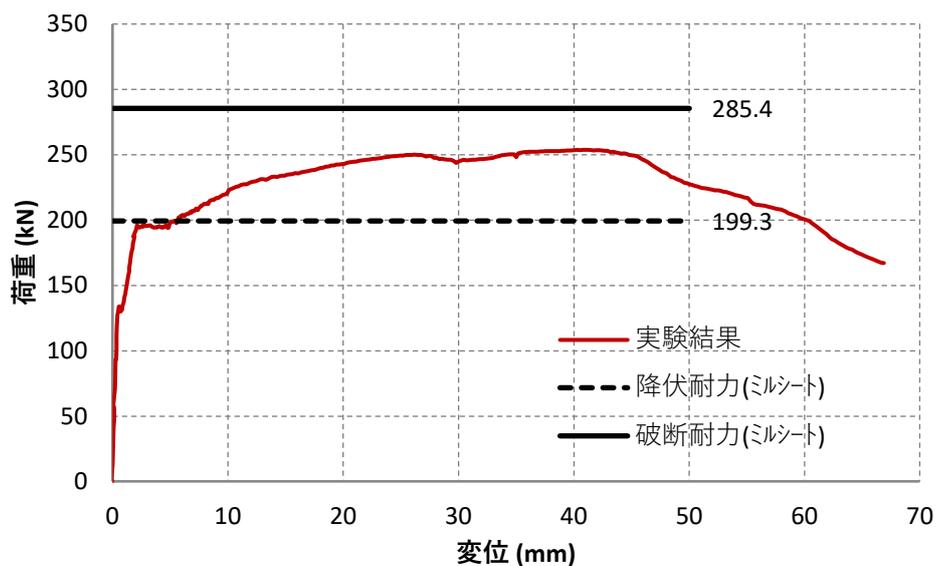


図5.3-10 異形鉄筋引張実験 荷重－変位関係

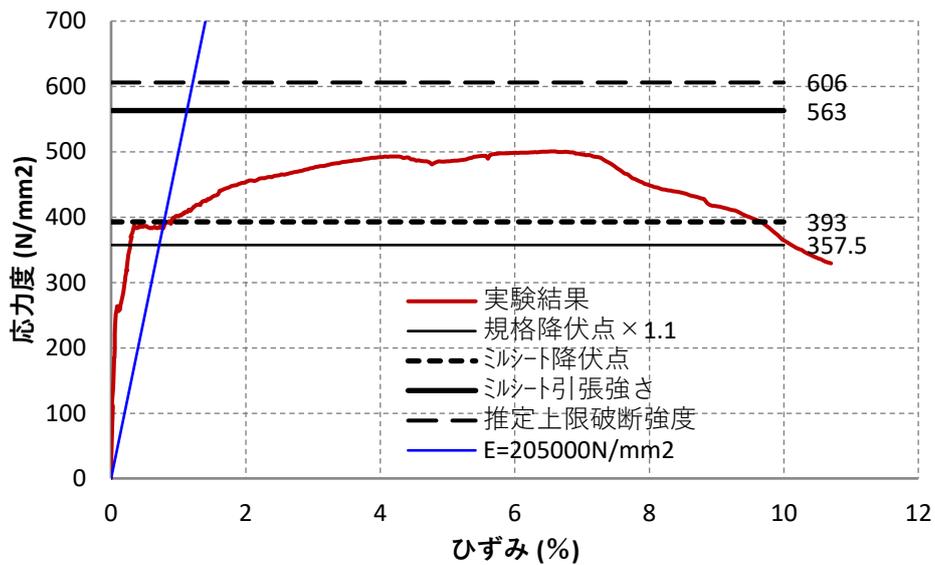


図5.3-11 异形鉄筋引張実験 応力度—ひずみ関係

図5.3-11より、実験結果で確認された降伏強度とミルシートによる降伏点強度は一致したが、破断強度に到達する前に最大応力度が低下した。実験ではRC部材の側面にひび割れが発生し、最終的には异形鉄筋の付着が切れてRC部から抜け出す破壊性状が見られたことによるものと考えられる。初期剛性は鉄筋の引張応力度が260N/mm²程度までは鋼材の弾性係数より高い傾向が見られたが、それ以降は剛性が低下しているため、この時点から鉄筋の付着破壊が切れたものと考えられる。

塑性変形性能としては、最大応力度の80%に低下する時点でのひずみが概ね10%であり、ボルト (ABR490)と同等の塑性変形能力がある。

异形鉄筋アンカーはスリーブ接合、CLTグラウト接合のいずれに対しても適用性が高く、それらを組み合わせることによるローコスト化が期待できる。

5.3.2 圧縮実験

(1) 試験体仕様

実験対象とした試験体は、既製品スリーブを用いる場合、CLTコブ定着とする場合の2種類とし、それぞれの仕様としてCLT壁端部に設定する圧縮剛性と終局圧縮耐力を確認することを目的とした。既製品スリーブを用いる試験体では、アンカーボルト側をM27ボルトとする仕様、D25異形鉄筋とする仕様の2仕様を設定した。CLTへの固定は鋼板挿入ドリフトピン接合（ドリフトピン間隔4d）とし、挿入鋼板に溶接するボルトはM27（強度区分10.9）とした。コブ定着とする試験体でも既製品スリーブ試験体と同様に、定着するアンカーをM27ボルトの仕様とD25異形鉄筋の2仕様とした。コブ定着の個数については、前掲の引張実験では6箇所としたが、本実験では圧縮耐力性能への影響が小さいと判断した上で、試験体製作上の都合により5箇所とした。CLTの開き止めの仕様は、実験②において開き止めとしての拘束効果が最も小さいと考えられる長ビス仕様とした。

(2) 加力・計測方法

加力は1000kNジャッキを用い、試験体CLTの上部木口面を加力点とした。いずれの試験体もアンカー心をCLT側面から75mmの位置としているが、アンカー心を加力点とする場合に加圧面のCLTが先行破壊する懸念があったため、加力心をアンカー心から100mmした位置として加圧板の接触面積を確保した。加力は一方向圧縮载荷とした。また、偏心加力による試験体の転倒を抑えるため、CLT上部に水平反力を確保する治具を設置するとともに、水平反力を確保した高さでの試験体の水平変位も測定した。試験実施状況を図5.3-12に示す。

接合部の変位は、M27アンカーボルトの場合は挿入鋼板の上端、D25異形鉄筋の場合はコブ定着部の上端からそれぞれ試験体下部の鋼板までの相対変位として計測した。相対変位はアンカー心の位置で計測した。また、試験機の加力心における加圧板と試験体下部の鋼板までの全体変位も併せて計測した。

コブ定着による試験体では、試験体上部（CLT側面）に設置した変位計が、圧縮荷重が700～800kN以降、CLT表層ラミナの座屈により、接合部変位が適切に得られなかった。このため、加力心で計測した全体変位を参照し、初期すべりや加力面でのめり込み剛性による剛性低下の影響を補正することとし、接合部変位による初期剛性にキャリブレーションにより補正後の荷重変位により評価することとした。なお、加力心とアンカー心が100mm偏心していることの影響については、試験体の水平変位の計測による試験体の傾きが最大荷重時に概ね1/300～1/500程度であったため、影響は無視できる程度として補正対象としなかった。



図5.3-12 圧縮実験 試験体・変位計設置状況

(3) 実験結果及び分析方法

既製品スリーブを用いた試験体では、いずれの仕様も試験機の上限荷重1000kNに到達した。試験体CSBでは1000kNに到達した段階で試験を終了したが、概ね弾性的な挙動を示し試験体の外観上はCLTのくびれ部分に若干のシワが寄る程度で大きな損傷等は見受けられなかった。試験体CSDでは、1000kN付近で荷重が一定となり、変位が6mm程度まで増大する結果が得られた。本試験体も、CLTのくびれ部分で表層ラミナにわずかに割れが生じたが、計測データに対応する明らかな塑性化部位を特定するには至らなかった。

CLTコブ定着による試験体では、両試験体とも850kN程度を最大荷重として、その後は荷重低下がみられた。荷重低下の要因は、最上段のコブ定着部付近を起点とするCLT表層ラミナの局部座屈であった。両試験体ともにCLT開き止めにより面外変形が拘束されていない箇所でCLT表層ラミナの局部座屈が生じているため、今回破壊が生じた部分にも開き止めを設けることで改善が図られるものと考えられる。

また、各試験体で得られた接合部圧縮性能の分析として、試験体の全断面がCLT母材による断面と仮定した場合の終局圧縮耐力 N_u 及び圧縮剛性 K_{CLT} と本実験結果を比較した。終局圧縮耐力 N_u は、CLTの圧縮基準強度 F_c (=12.42N/mm²)に、CLT断面が最小部の断面積 A_{min} (=150mm×200mm)を乗じたものとし、372.6kNとした。圧縮剛性 K_{CLT} は各試験体の EA/L により算定した。その際のヤング係数 E は6400N/mm²、断面積 A_i 及び軸方向長さ L_i は、試験体の各部形状に応じて以下とし、各部の直列剛性として評価した。

CLT上部: A_1 (=150mm×400mm), L_1 =668mm(試験体CSB,CSD), L_1 =375mm(試験体CDB,CDD)

CLTテーパ部: A_2 ={150mm×(400+200)/2mm}, L_2 =200mm(各試験体共通)

CLT下部: A_3 (=150mm×200mm), L_3 =100mm(各試験体共通)

いずれの試験体も実験による最大耐力は終局圧縮耐力 N_u を上回った。CLTコブ定着による試験体では、全断面CLT母材と仮定した圧縮剛性 K_{CLT} と補正後の荷重変位関係の剛性が概ね一致した。このことから、構造設計モデルに設定する当該接合部の圧縮剛性は、接合部の領域を含めてCLT母材としてモデル化して差し支えない(直列接続となる接合部剛性としては剛)と考えられる。既製品スリーブを用いた試験体では、補正後の荷重変位関係が全断面CLT母材と仮定した圧縮剛性 K_{CLT} より低い傾向が確認された。この結果を受けて、接合部の領域を含めてCLT母材としてモデル化した上で、接合部圧縮剛性 K_{JNT} として考慮する必要と考えられる。既製品スリーブを用いた仕様において、接合部圧縮剛性 K_{JNT} は下式により設定した。

$$K_{JNT} = \frac{K_{CLT} \cdot K_{TST}}{K_{CLT} - K_{TST}}$$

K_{JNT} : 解析モデル設定用の接合部圧縮剛性

K_{CLT} : 全断面CLTと仮定した場合の圧縮剛性

K_{TST} : 実験の荷重変位関係による圧縮剛性

各試験体について、加力実験で得られた接合部の荷重変位関係、CLTの基準強度に基づく終局圧縮耐力 N_u 、各種圧縮剛性、損傷観察記録の結果について、図5.3-13～図5.3-16に示す。

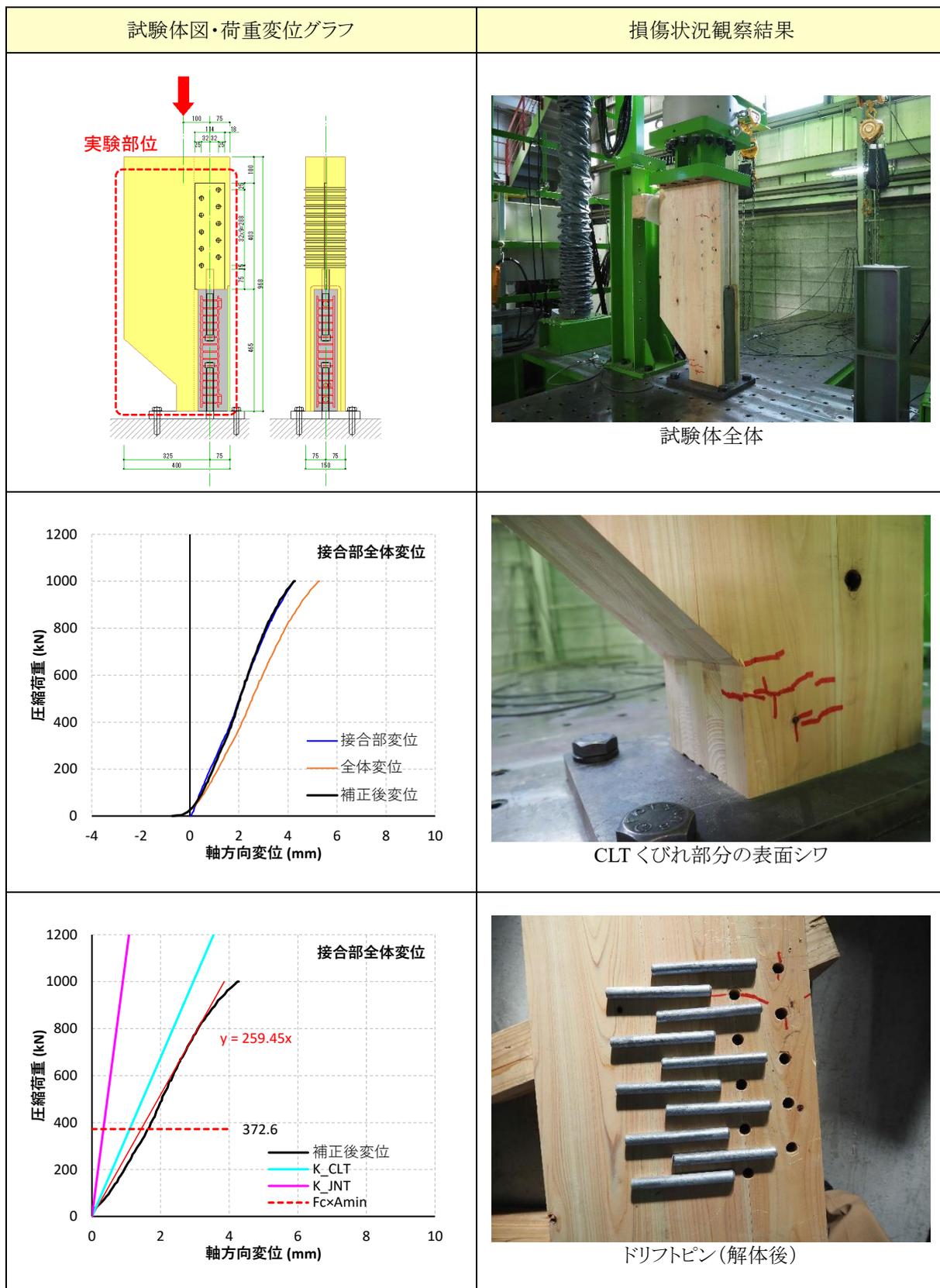


図5.3-13 圧縮実験結果 試験体CSB

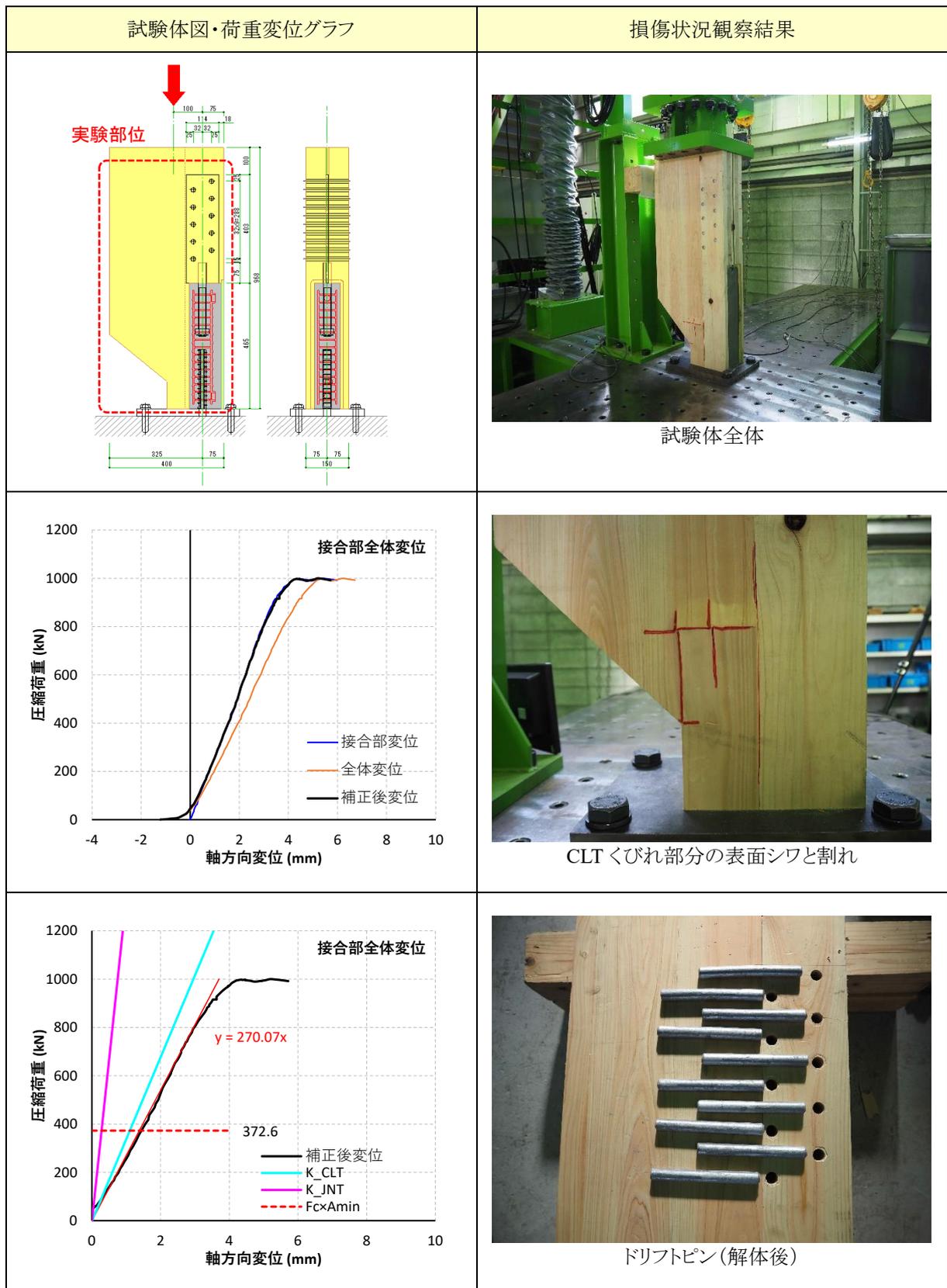


図5.3-14 圧縮実験結果 試験体CSD

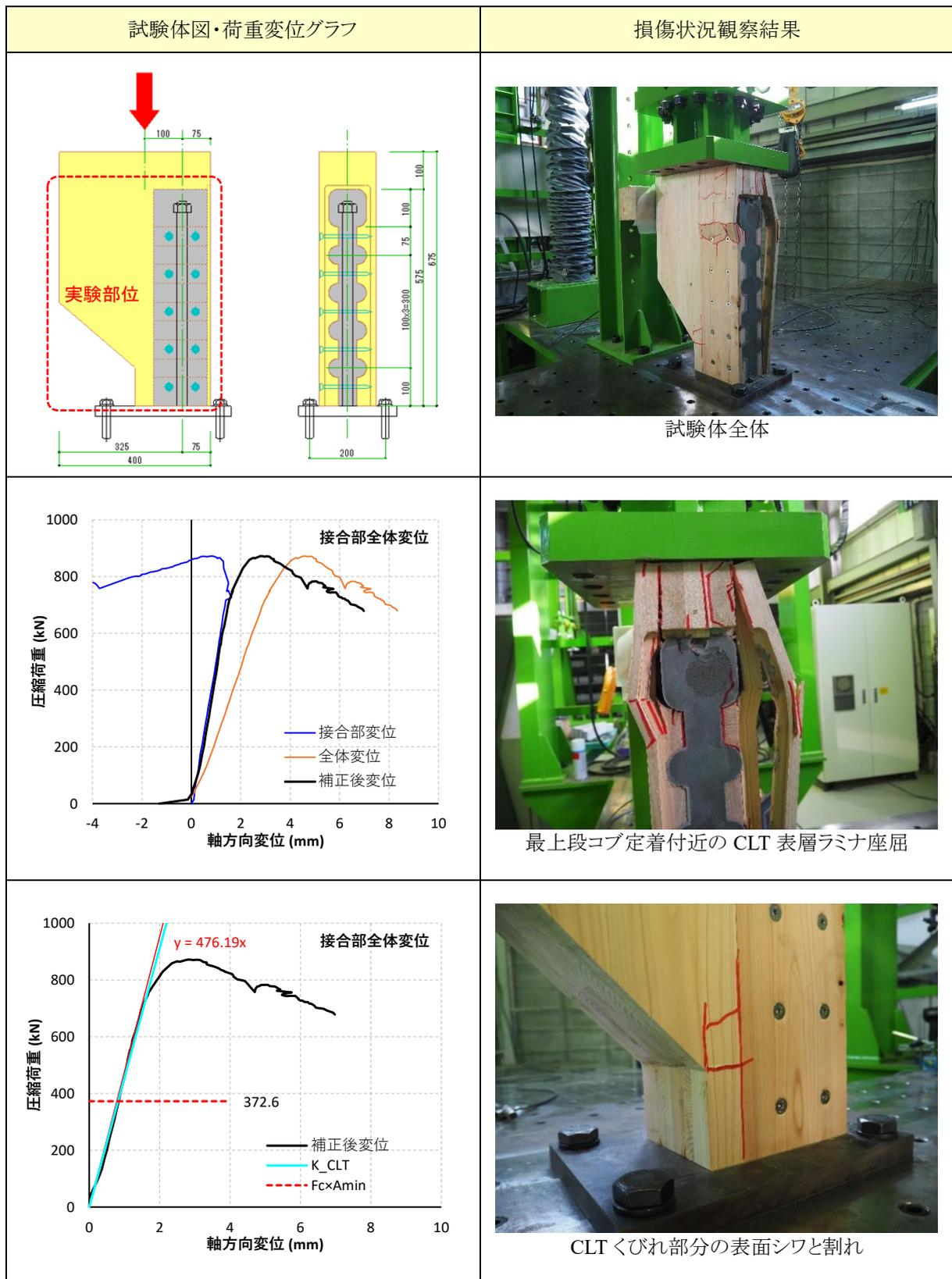


図5.3-15 圧縮実験結果 試験体CDB

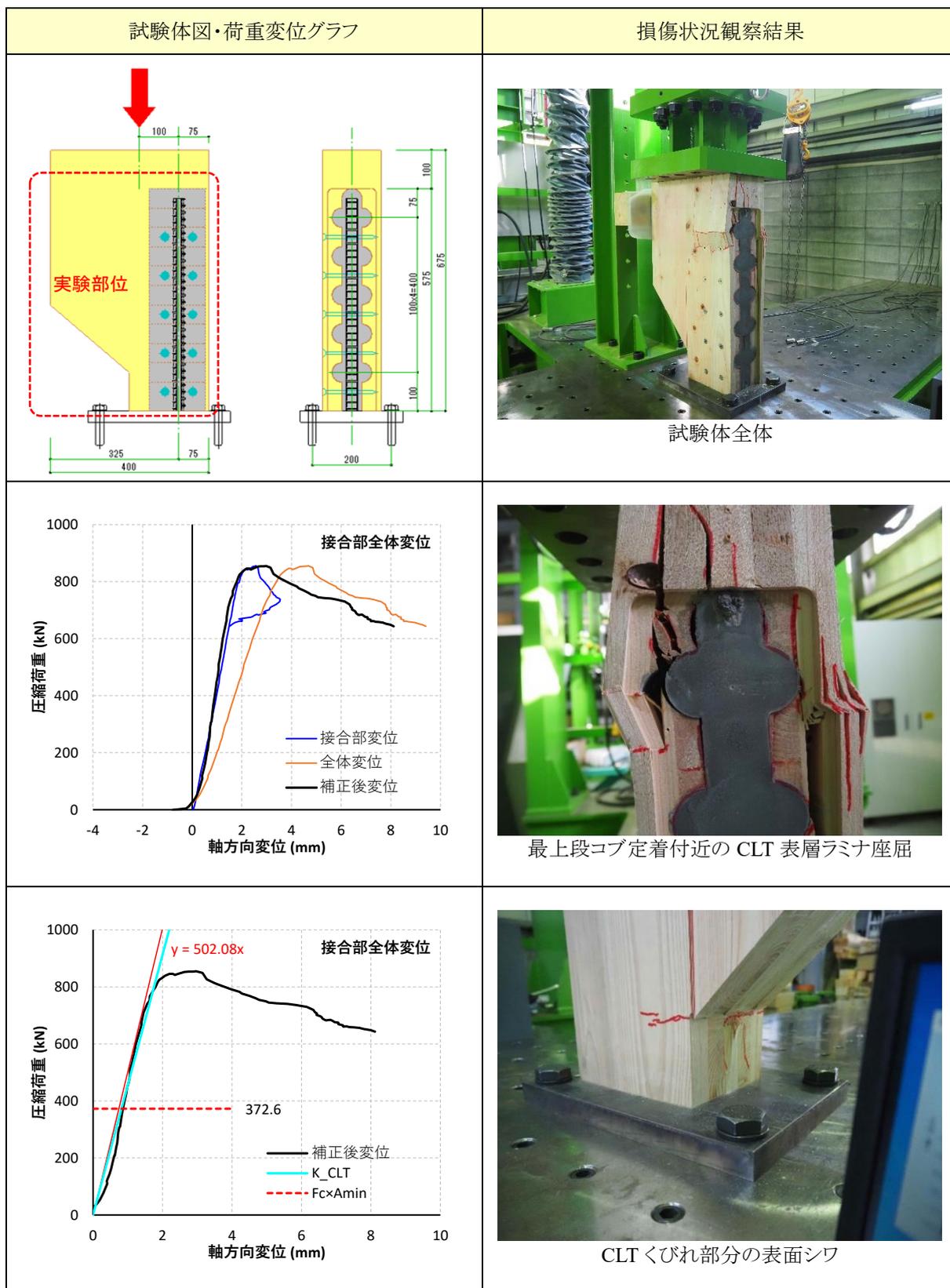


図5.3-16 圧縮実験結果 試験体CDD

5.3.3 せん断実験

(1) 試験体仕様

実験対象とした試験体は、既製品スリーブを用いる場合、CLTコブ定着とする場合の2種類とし、それぞれの仕様としてCLT壁端部に設定するせん断剛性と終局せん断耐力を確認することを目的とした。既製品スリーブを用いる試験体では、アンカーボルト側をM27ボルトとする仕様、D25異形鉄筋とする仕様の2仕様を設定した。グラウト注入部にはRC部材へのせん断伝達用の掘り込み部(せん断キー)を設け、せん断キーの部分に既製品スリーブの設置レベル調整のためのスペーサー(パンチングメタル)を設けた。CLTへの固定は鋼板挿入ドリフトピン接合(ドリフトピン間隔4d)とし、挿入鋼板に溶接するボルトはM27(強度区分10.9)とした。コブ定着とする試験体でも既製品スリーブ試験体と同様に、定着するアンカーをM27ボルトの仕様とD25異形鉄筋の2仕様とした。コブ定着の個数については、前掲の引張実験では6箇所としたが、本実験では圧縮耐力性能への影響が小さいと判断した上で、試験体製作上の都合により5箇所とした。CLTの開き止めの仕様は、座付きボルト片側タイプとした。グラウト注入部とRC部材の間には既製品スリーブ試験体と同寸のせん断キーを設けたが、パンチングメタルスペーサーは設けなかった。

(2) 加力・計測方法

加力は200kNジャッキ(壁試験機)を用い、試験体CLTの側面木口面を加力点とした。接合部に生じる応力が純せん断に近づくよう、加力点の高さは試験実施上可能な限り低い位置となるよう配慮し、RC部材の天端から300mmとした。また、CLTのロッキングを抑えるためにH形鋼(H-150)による治具をCLT上部に設置し、この位置でのCLTの浮き上がり変位も測定した。接合部のせん断変位 δs は、いずれの試験体もCLTの水平変位からRC部材の水平変位を引いた相対変位として計測した。

(3) 実験結果

既製品スリーブを用いる試験体では、2仕様とも概ね弾性的な挙動を示し試験機の上限荷重200kNに到達した。その時の δs は5mm程度であった。また、RC部材にクラックが生じたが耐力低下要因とはならなかった。せん断キー内に設けたパンチングメタルによってグラウトモルタルせん断面での耐力が向上したものと考えられる。なお、最大荷重時にCLTパネルが6mm程度浮き上がる挙動が見られた。

CLTコブ定着による試験体では、加力点荷重が130~150kN程度までは弾性的な挙動を示したが、その後120kN程度まで荷重が低下した。荷重低下の要因として、グラウトせん断キー部分のせん断破壊が想定される。本実験で使用したグラウトモルタルの規格圧縮強度 F_c は100N/mm²であり、本実験と並行して実施したテストピースによる圧縮強度もそれをやや上回る値を確認している。既往の検討に基づき、せん断強度を $F_c/7$ とすれば14.3N/mm²であるが、せん断キー部分の断面積を50mm×(150-9)mmとし、さらにアンカーボルト又は異形鉄筋の断面積を減じて得た有効せん断断面積 A_s に14.3N/mm²を乗じて計算したせん断耐力と比較した。計算によるせん断耐力に対して、荷重低下前のピーク荷重は1.7~1.8倍程度高かったが、CLTとRC部材間の摩擦抵抗力も含まれると考えられる。その後、緩やかな二次勾配で再度荷重が上昇し、上限荷重200kNに到達した。その時の δs は40~45mm程度であった。損傷状況について、外観上はRC部材にクラックが確認された程度であったが、実験後に試験体を解体したところ、グラウトモルタルのせん断面で破壊し、ABRアンカーボルト及び異形鉄筋アンカーともに荷重方向に残留変形が生じており、実験終了時の δs と概ね対応する損傷を確認した。荷重変位関係で確認した緩やかな二次勾配は、アンカー筋が変形したことで引張抵抗力が生じたことによるものと考えられる。また、最大荷重時にCLTパネルが12mm程度浮き上がる挙動が見られた。

各試験体について、加力実験で得られた水平荷重- δs 変位、水平荷重-CLTパネルの浮き上がり変位、損傷観察記録の結果について、図5.3-17~図5.3-20に示す。

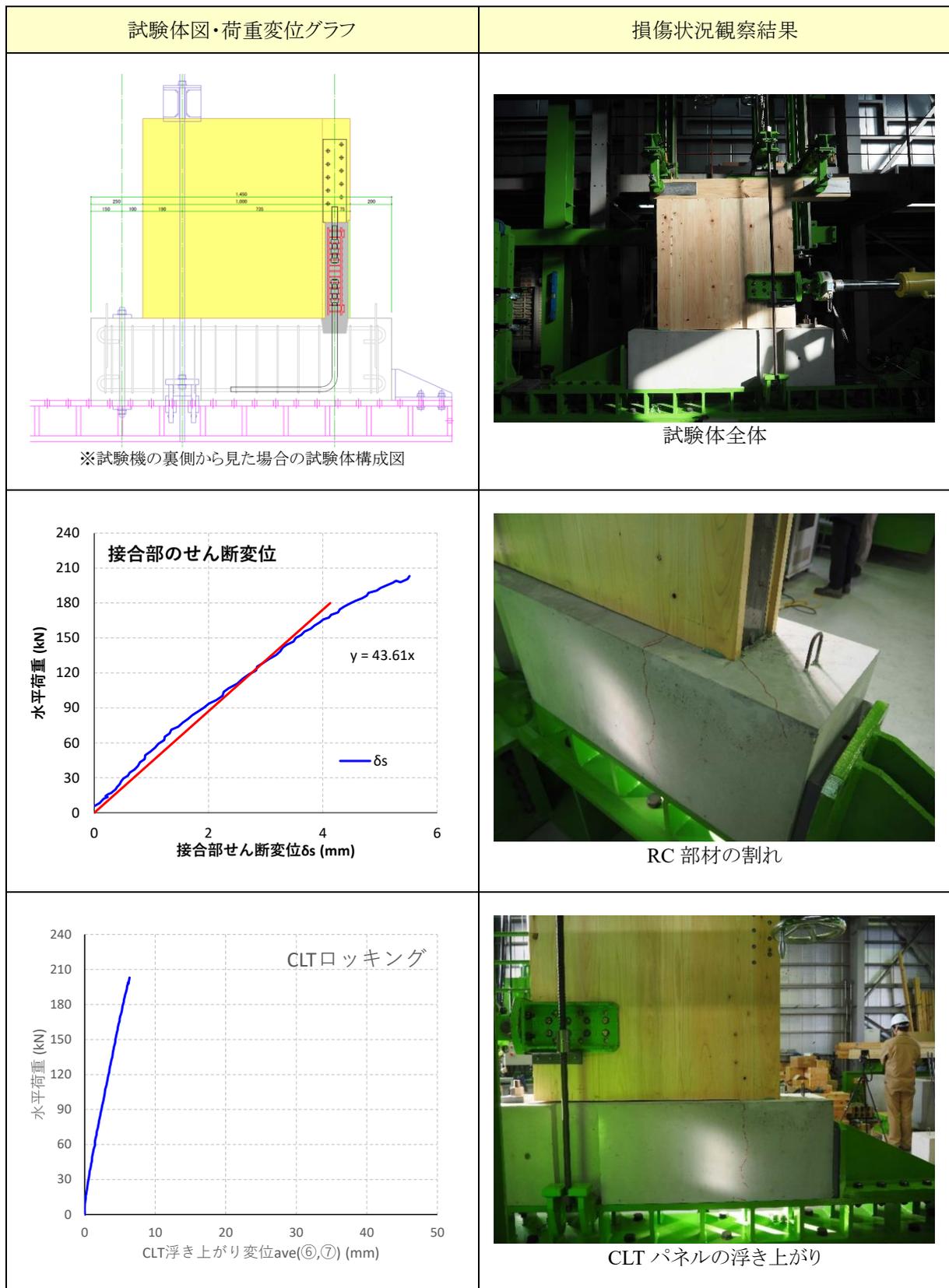


図5.3-17 せん断実験結果 試験体SSB

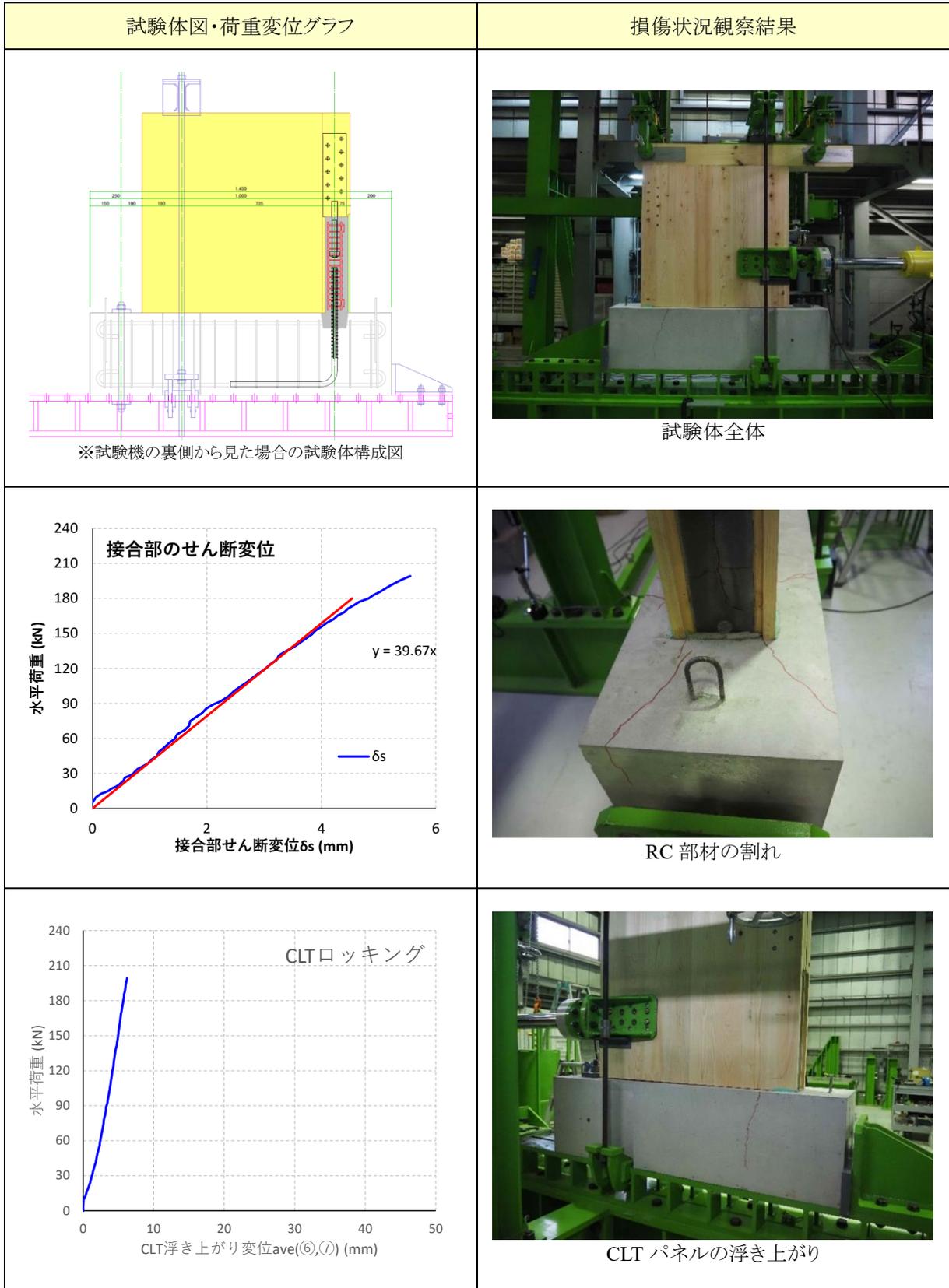


図5.3-18 せん断実験結果 試験体SSD

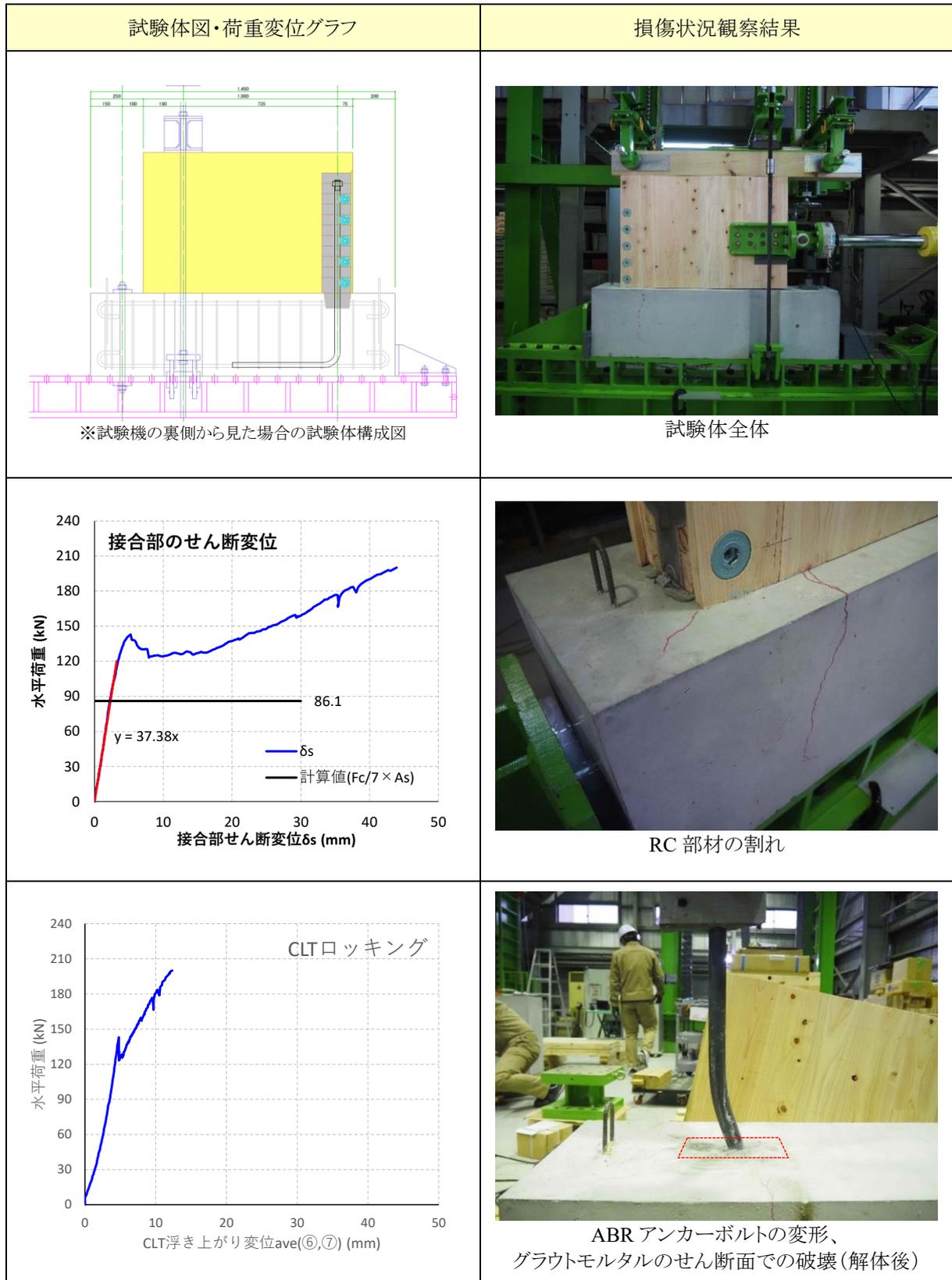


図5.3-19 せん断実験結果 試験体SDB

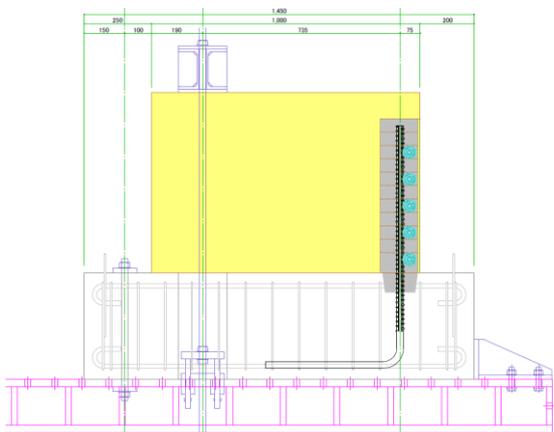
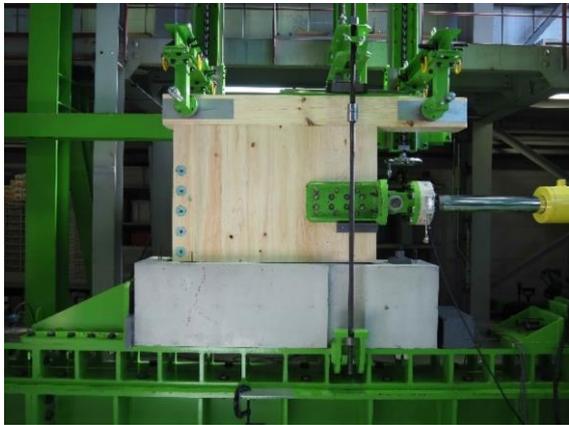
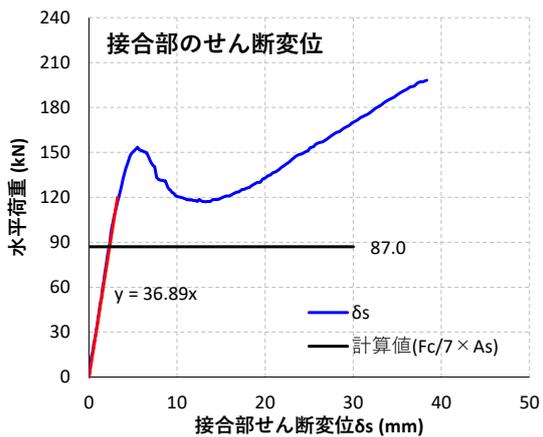
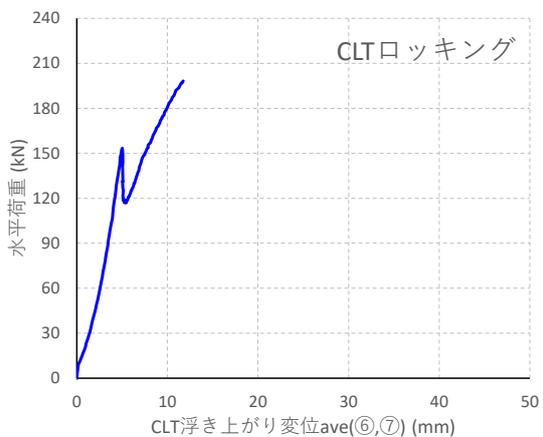
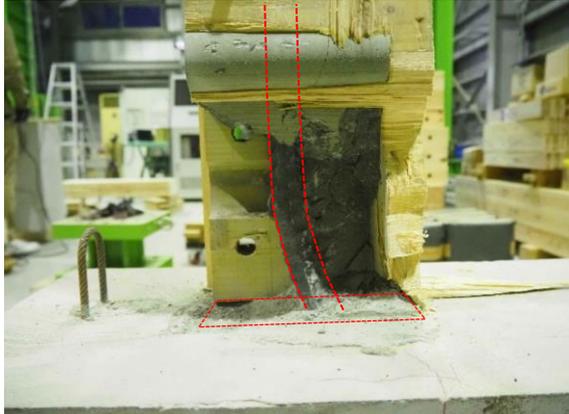
試験体図・荷重変位グラフ	損傷状況観察結果
 <p>※試験機の裏側から見た場合の試験体構成図</p>	 <p>試験体全体</p>
 <p>接合部のせん断変位</p> <p>水平荷重 (kN)</p> <p>接合部せん断変位δ_s (mm)</p> <p>$y = 36.89x$</p> <p>δ_s</p> <p>計算値($F_c/7 \times A_s$)</p> <p>87.0</p>	 <p>RC 部材の割れ</p>
 <p>CLTロッキング</p> <p>水平荷重 (kN)</p> <p>CLT浮き上がり変位ave(⑥,⑦) (mm)</p>	 <p>异形鉄筋アンカーの変形、 グラウトモルタルのせん断面での破壊(解体後)</p>

図5.3-20 せん断実験結果 試験体SDD

5.4 設計用特性の設定

5.4.1 引張特性

(1) 設定方法

GJ接合部の引張特性のモデル化は、前項までの評価結果をもとに接合部の仕様に応じて設定する。本項では、図5.4-1に示す既製品スリーブ+鋼板挿入ドリフトピン接合によるGJ接合部を対象に、モデル化の方法を例示する。

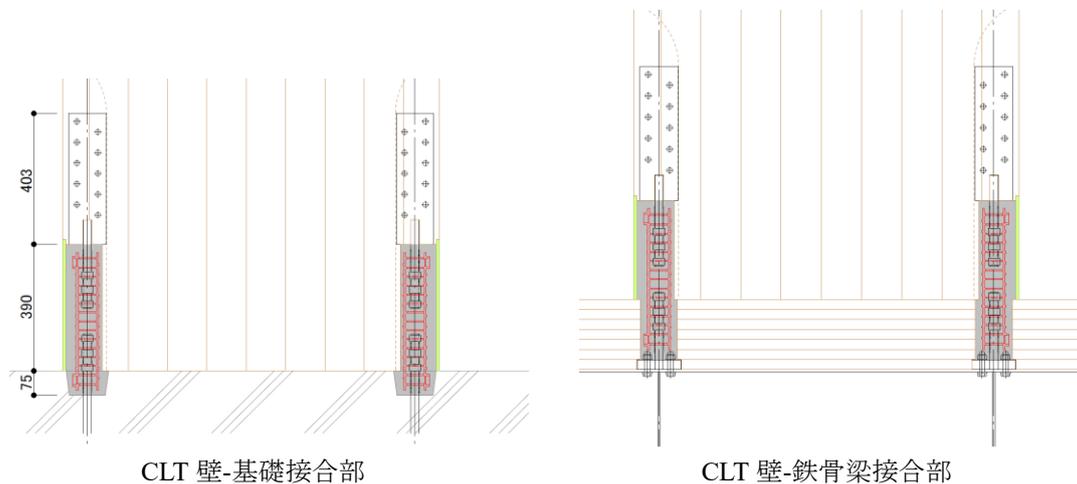


図 5.4-1 既製品スリーブによる GJ 接合部の構成

GJ 接合部全体の剛性 K_j は、接合部を構成する各要素の剛性の直列剛性として評価する。図 5.4-1 の接合部の場合は、①DP 接合部剛性 k_1 、②羽子板ボルト（スリーブ上側ボルト）の軸剛性 k_2 、③アンカーボルト（スリーブ下側ボルト）の軸剛性 k_3 の 3 要素の剛性を考慮する。

$$K_j = \frac{k_1 k_2 k_3}{k_2 k_3 + k_1 k_3 + k_1 k_2}$$

ここで、各要素の剛性 $k_1 \sim k_3$ は以下のように設定する。

k_1 : 文献⁵⁻¹による計算による剛性値に 0.5 を乗じて得た値

k_2 : 羽子板ボルトの有効長さ L_2 (挿入鋼板端からスリーブ内の定着ナットまでの距離)、ボルトの軸断面 A_2 、鋼材のヤング係数 E による軸剛性 ($=EA_2/L_2$)

k_3 : アンカーボルトの有効長さ L_3 (基礎梁内のアンカーボルト定着板 (基礎接合部) または鉄骨梁フランジに設置する金物鋼板からスリーブ内の定着ナットまでの距離)、ボルトの軸断面 A_3 、鋼材のヤング係数 E による軸剛性 ($=EA_3/L_3$)

アンカー筋に異形鉄筋 D25 (SD345) を用いる場合については、実験③で実施した異形鉄筋引張実験の結果を踏まえ、有効長さとして定着長さ (コンクリート、グラウトモルタルへの埋込み部分) の全長を取ることで差し支えない。ただし 260N/mm^2 までは概ね鋼材の弾性係数 E としてよいが、付着が切れることによる剛性低下を考慮する必要がある。

GJ 接合部全体の終局引張耐力 T_j は、接合部を構成する各要素の部位耐力の最小値として評価する。図 5.4-1 の接合部の場合は、①DP 接合部耐力 T_1 、②羽子板ボルト（スリーブ上側ボルト）の引張耐力 T_2 、③アンカーボルト（スリーブ下側ボルト）の引張耐力 T_3 の 3 要素を考慮する。なお、接合部の靱性確保の観点から、接合部要素③アンカーボルトを塑性化部位と位置づけ、直列接続となる要素①及び②は弾性範囲内に留めることとする。つまり直列剛性として剛性低下要因としてのみ考慮する。

$$T_j = \min.(T_1, T_2, T_3)$$

ここで、各要素の部位耐力 $T_1 \sim T_3$ は以下のように設定する。

T_1 : 文献⁵⁻¹による計算による終局耐力（CLT 集合型破壊，終局強度比）及び挿入鋼板の有効断面積を考慮した降伏引張耐力のうち最小値（部位耐力 T_3 の最大耐力にいたるまで弾性設計）

T_2 : 羽子板ボルトの引張降伏耐力（強度区分 10.9 を適用する等により部位耐力 T_3 の最大耐力にいたるまで弾性設計）

T_3 : アンカーボルトの引張耐力で、塑性化対象部位とする。非線形特性は図 5.4-2 に再掲する実験①により確認した応力度-ひずみ曲線をトリリニアモデルに置換する。トリリニアモデルの初期剛性は $E=205000\text{N/mm}^2$ 、第一折れ点は規格降伏点強度に達する時、第二折れ点は 8%ひずみ時として規格引張り強さに達するものとする。終局ひずみは実験結果に基づき 16%とする。

実験①ABR試験体（No.17～19）応力度-ひずみ曲線

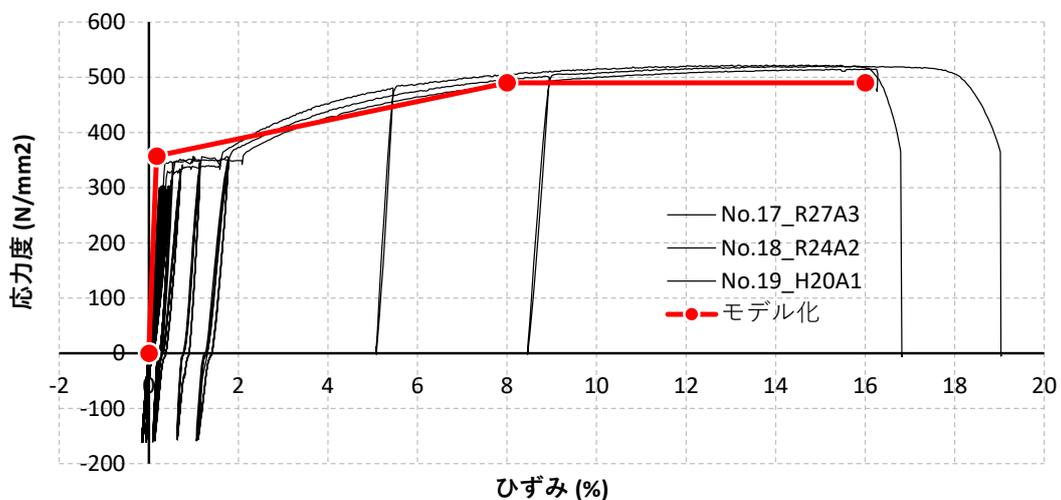


図 5.4-2 既製品スリーブによる GJ 接合部の構成

アンカー筋に異形鉄筋として D25 (SD345) を用い、これを塑性化部位とする場合は、付着耐力による影響を考慮する必要がある。実験③の異形鉄筋引張実験で得られた応力度-ひずみ関係が参考になる。

(2) 引張特性の設定例

前項の設定方法に基づき、既製品スリーブを用い、塑性化部位に ABR アンカーボルト M27、M24、M20 とした GJ 接合部について、モデル化した結果を図 5.4-3、図 5.4-4 に例示する。基礎用はアンカーボルトの有効長さ $L_3=800\text{mm}$ 、鉄骨梁用では $L_3=200\text{mm}$ を設定した。

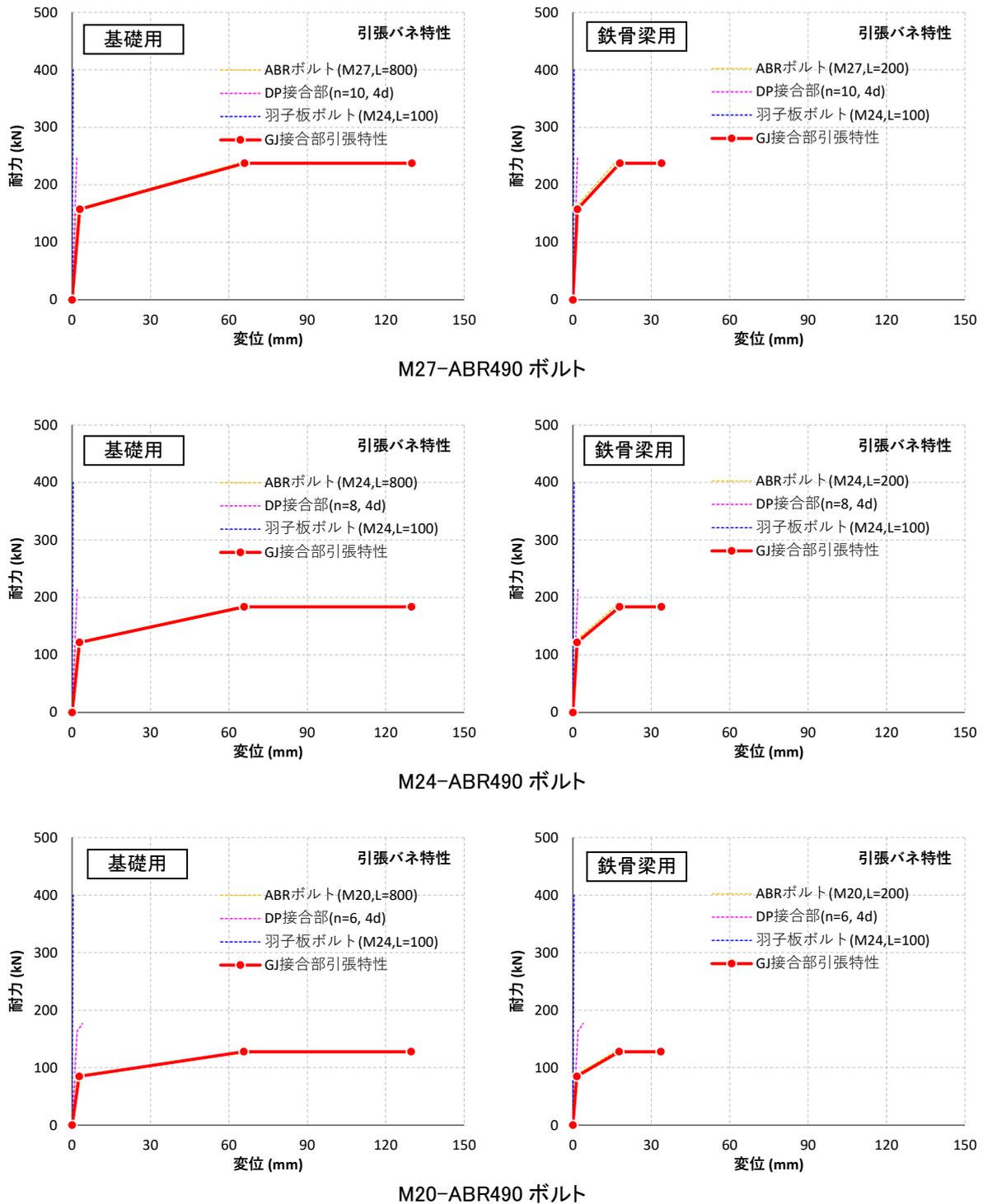


図 5.4-3 GJ 接合部全体の引張特性 モデル化の例(グラフ)

項目	単位	M27		M24		M20	
		基礎部	壁頭壁脚	基礎部	壁頭壁脚	基礎部	壁頭壁脚
◆挿入鋼板DP接合部(パイリニア)	単位	値	値	値	値	値	値
DP径	mm	16	16	16	16	16	16
CLT厚	mm	150	150	150	150	150	150
スリット幅	mm	11	11	11	11	11	11
挿入鋼板	mm	9	9	9	9	9	9
DP本数	本	10	10	8	8	6	6
DP間隔	d	4	4	4	4	4	4
DP間隔	mm	64	64	64	64	64	64
クリアランス	mm	1	1	1	1	1	1
DP1本の降伏耐力Py	kN/本	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2
DP1本の基準剛性k	kN/mm/本	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6
耐力の低減係数	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
剛性の低減係数($\alpha \times \beta$)	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
【Pus】-鋼板降伏	kN	282.8	282.8	282.8	282.8	282.8	282.8
挿入鋼板の降伏強度(=235×1.1)	N/mm2	258.5	258.5	258.5	258.5	258.5	258.5
DP鋼板縁あきL	mm	25	25	25	25	25	25
DP鋼板縁あきR	mm	25	25	25	25	25	25
DP列間隔	mm	64	64	64	64	64	64
DP間最短距離	mm	71.6	71.6	71.6	71.6	71.6	71.6
挿入鋼板破断の最小断面積	mm2	1094.0	1094.0	1094.0	1094.0	1094.0	1094.0
【Pug】-CLT集合型破壊	kN						
引張基準強度Ft	N/mm2	9.22	9.22	9.22	9.22	9.22	9.22
せん断基準強度Fs	N/mm2	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70
DPCLT端空き	mm	190	190	150	150	100	100
破壊モードb):P1	kN	693.6	693.6	537.4	537.4	366.3	366.3
せん断抵抗面長さ	mm	1848	1848	1432	1432	976	976
せん断抵抗面厚さ	mm	139	139	139	139	139	139
せん断抵抗断面積	mm2	256872	256872	199048	199048	135664	135664
破壊モードc-1):P2		354.2	354.2	288.2	288.2	214.6	214.6
せん断抵抗面長さ	mm	780	780	604	604	408	408
せん断抵抗面厚さ	mm	139	139	139	139	139	139
せん断抵抗断面積	mm2	108420	108420	83956	83956	56712	56712
引張抵抗面長さ	mm	48	48	48	48	48	48
引張抵抗面厚さ	mm	139	139	139	139	139	139
引張抵抗断面積	mm2	6672	6672	6672	6672	6672	6672
破壊モードc-2):P3		246.7	246.7	213.7	213.7	176.9	176.9
せん断抵抗面長さ	mm	374	374	286	286	188	188
せん断抵抗面厚さ	mm	139	139	139	139	139	139
せん断抵抗断面積	mm2	51986	51986	39754	39754	26132	26132
引張抵抗面長さ	mm	83	83	83	83	83	83
引張抵抗面厚さ	mm	139	139	139	139	139	139
引張抵抗断面積	mm2	11537	11537	11537	11537	11537	11537
【ruPy】-終局強度比	kN	326.4	326.4	261.1	261.1	195.8	195.8
◆DP接合部特性(弾性)	単位	値	値	値	値	値	値
Py	kN	272.00	272.00	217.60	217.60	163.20	163.20
Pu	kN	246.73	246.73	213.71	213.71	176.93	176.93
K1	kN/mm	139.72	139.72	111.77	111.77	83.83	83.83
K2(=0.08K1)	kN/mm	11.18	11.18	8.94	8.94	6.71	6.71
◆羽子板ボルト(弾性)	単位	値	値	値	値	値	値
ボルト軸径	mm	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0
ボルト降伏強度	N/mm2	900	900	900	900	900	900
ボルト長さ	mm	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
ボルト断面積	mm2	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4	452.4
降伏耐力	kN	407.2	407.2	407.2	407.2	407.2	407.2
適否確認	-	OK	OK	OK	OK	OK	OK
弾性剛性	kN/mm	927.4	927.4	927.4	927.4	927.4	927.4
◆ABRアンカーボルト(弾塑性)	単位	値	値	値	値	値	値
ボルト軸径	mm	24.85	24.85	21.85	21.85	18.20	18.20
ボルト降伏強度	N/mm2	325	325	325	325	325	325
ボルト引張強さ	N/mm2	490	490	490	490	490	490
グラウト定着部	mm	200	200	200	200	200	200
基礎定着部	mm	600	0	600	0	600	0
ボルト長さ(グラウト+基礎)	mm	800.0	200.0	800.0	200.0	800.0	200.0
ボルト断面積	mm2	485.0	485.0	375.0	375.0	260.2	260.2
降伏耐力	kN	157.6	157.6	121.9	121.9	84.6	84.6
破断耐力	kN	237.7	237.7	183.7	183.7	127.5	127.5
弾性剛性	kN/mm	124.3	497.1	96.1	384.3	66.7	266.7

図 5.4-4 GJ 接合部全体の引張特性 モデル化の例 (数値)

5.4.2 圧縮特性

(1) 設定方法

GJ接合部の圧縮特性のモデル化は、前項までの評価結果をもとに実験③の結果に基づき設定する。本項では、図5.4-1に示す既製品スリーブ+鋼板挿入ドリフトピン接合によるGJ接合部を対象とする。5.3.2項で示したように、当該接合部の圧縮剛性は試験体部分の全断面がCLT母材と仮定した場合の軸剛性と直列剛性分（CLTの圧縮剛性分を除去したもの）として評価できるものと考えられる。また、最大耐力は実験で確認された上限の1000kNとする。塑性変形性能については実験では最大6mmまで確認されたが、実験データに対応する塑性化部位が明確でないことから、終局変位の妥当性については今後の検討課題とする。

(2) 圧縮特性の設定例

図 5.4-5 に GJ 圧縮接合部のモデル化の特性を示す。

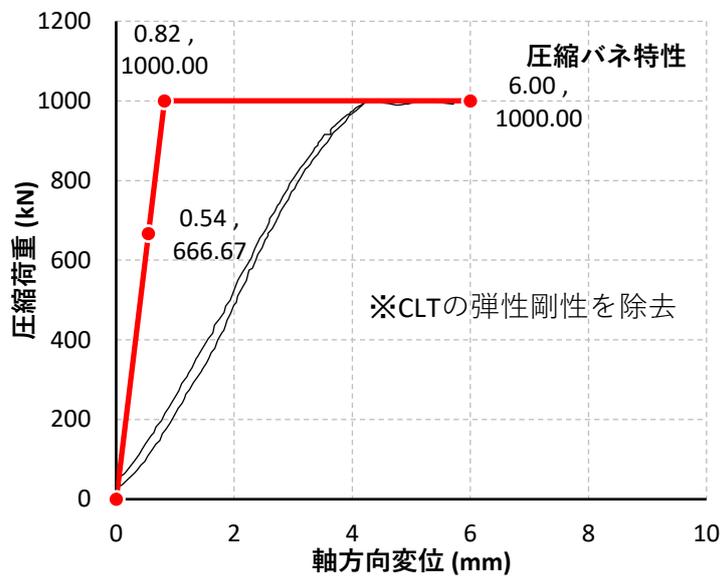


図 5.4-5 GJ 接合部全体の圧縮特性 モデル化の例

5.4.3 せん断特性

(1) 設定方法

GJ接合部の圧縮特性のモデル化は、前項までの評価結果をもとに実験③の結果に基づき設定する。本項では、図5.4-1に示す既製品スリーブ+鋼板挿入ドリフトピン接合によるGJ接合部を対象とする。5.3.3項で示したように、当該接合部のせん断剛性は概ね弾性的な挙動を示し、最大耐力は試験機の上限荷重の200kNまでを確認した。また、実験ではCLT耐力壁の片端（アンカー筋がCLTパネルを押し出す側）のGJ接合部の耐力性能を確認した。反対側の接合部はアンカー筋がCLTから離れる側であることから、部材構成上、反対側のGJ接合部は耐力性能が低下すると見込まれる。CLT壁全体としてのGJ接合部のせん断性能は未検証であるが、実験③で得られたせん断特性を耐力壁のせん断接合性能とすることが安全側の措置と考えられる。また、実験③ではCLT壁-基礎接合部を対象としたが、鉄骨梁との接合部も検証が必要である。次章の検討では、CLT-鉄骨梁接合部も実験③の結果を準用することとした。

(2) せん断特性の設定例

図 5.4-6 に GJ せん断接合部のモデル化の特性を示す。

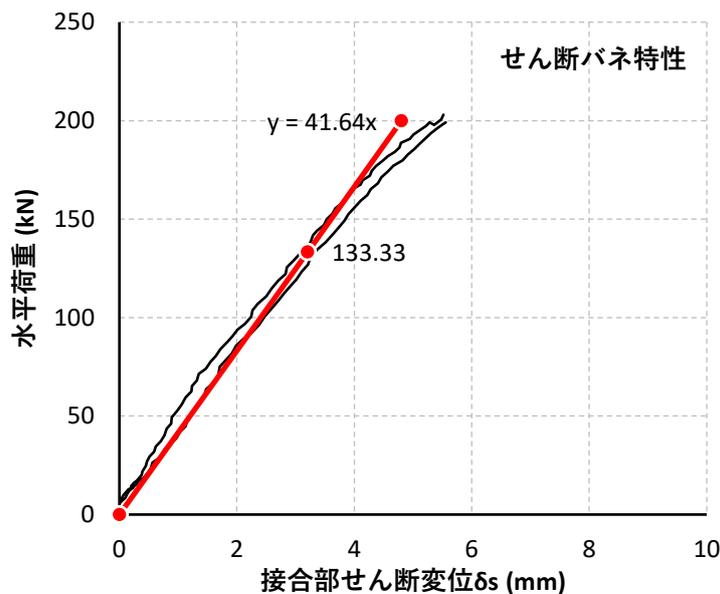


図 5.4-6 GJ 接合部全体のせん断特性 モデル化の例