

論文 PCa アンボンド PC 柱 S 梁部分架構のリユース実験

掛 悟史^{*1}・高津 比呂人^{*2}・立花 弘^{*3}・島田 安章^{*3}

要旨：本研究では構造部材のリユースを実現するため、柱部材を PCa アンボンド PC 造、梁部材を鉄骨造とした架構形式を提案する。本論では PCa 部材のリユースによる耐震性能への影響を把握するため、部分架構試験体を用いて鉄骨梁ひずみが短期許容応力度時ひずみに到達するまで載荷実験を行い、その後、部材の解体・リユース、再載荷を行うリユース実験を実施した。その結果、部材の解体・リユースを行った場合でも、リユース前後の架構全体の剛性や PCa 部材の剛性は同程度であり、リユースによる影響は確認されなかった。また材端ばねモデルによる架構解析モデルにより、実験値の骨格曲線を精度良く再現することができた。

キーワード：PCa アンボンド PC 柱、鉄骨梁、リユース、解体実験、骨格曲線

1. はじめに

現在、我が国では 2050 年のカーボンニュートラルの実現に向け温室効果ガスの削減が急務となっている。温室効果ガスの 1 つである二酸化炭素の排出量について、日本の産業全体の排出量に対する建設工事の資材に係る排出量は約 1 割を占めており、特にコンクリート製造時の排出量が大きな割合を占めている。材料分野では近年、CO₂吸収型混和材を用いてコンクリートに CO₂を吸収・固定化する技術の開発¹⁾などが精力的に行われている。

構造分野では建築物のホールライフカーボンの削減を行う観点から、構造部材を解体・リユースするサーキュラーエコノミーへの転換が必要となると考えられる。そこで筆者らは既報²⁾において構造躯体の解体・リユースが可能となる構造システムを提案した。提案する構造システムは、柱部材をプレキャストアンボンドプレストレストコンクリート（以下、PCa アンボンド PC）造とし、梁部材を鉄骨造としている。既報²⁾では上記の構造システムの基本的な耐震性能を把握するため静的載

荷実験を実施し、既往の評価式³⁾により層せん断力一層間変形角関係係数線を精度良く評価できることを確認した。

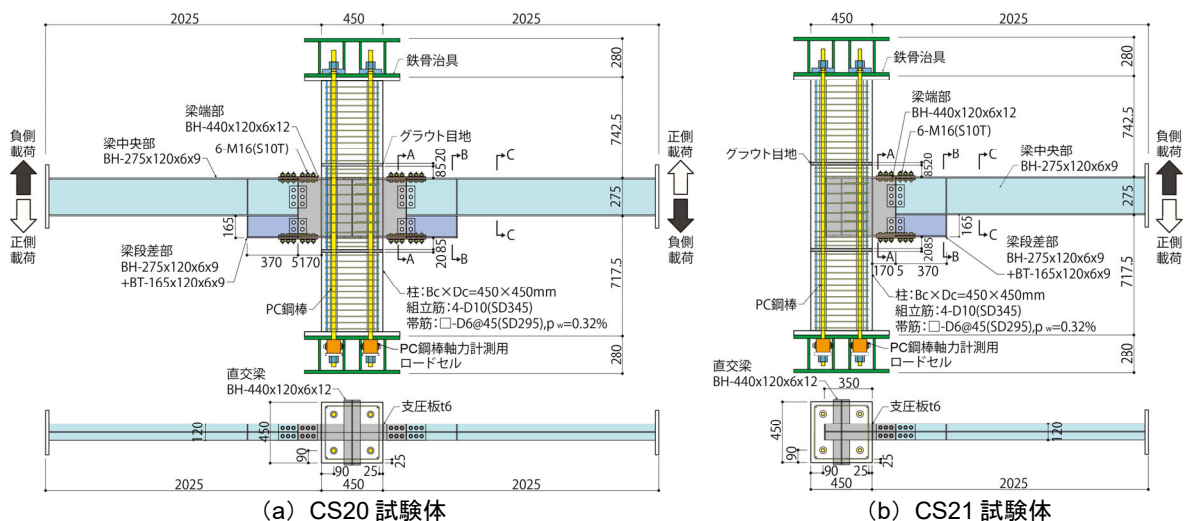
本論では提案する構造システムにおいて、建物が中規模地震を経験した後、建物の移転に伴い部材を解体・リユースし、リユース後の建物が再度中規模地震や大地震を受けた場合の耐震性能を把握するため、部分架構試験体を用いた静的載荷実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

図－1 に試験体形状および配筋詳細を示し、表－1 に試験体諸元を示す。試験体は実物の約 1/2 スケールの十字形およびト形柱梁接合部試験体の 2 体である。両試験体ともに柱はシース管に PC 鋼棒を挿通しグラウト材を充填しない方式の PCa アンボンド PC 造とし、梁は鉄骨造とし、接合部は梁貫通形式の帯筋タイプを採用した。

既報²⁾において、柱面で曲げ降伏破壊となる鉄骨梁とした場合、鉄骨梁降伏時にフランジ周辺の PCa 接合部に



図－1 試験体形状および配筋詳細（単位：[mm]）

*1 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設基盤技術研究部

(正会員)

*2 (株) 竹中工務店 技術本部 技術プロデュース部

(正会員)

*3 オリエンタル白石 (株) PC 建築部

(正会員)

表－１ 試験体諸元

試験体名		CS20 (CS20-R)	CS21 (CS21-R)
試験体形状		十字形	ト形
柱	断面	$B_c \times D_c = 450 \times 450 \text{mm}$	
	PC 鋼材	4- $\phi 32$ (C 種 1 号)	4- $\phi 26$ (C 種 1 号)
	組立筋	4-D10 (SD345)	
	帯筋	$\square\text{-D6@45}$ (SD295) , $p_w = 0.32\%$	
	プレストレスレベル : η_p	0.13	0.10
鉄骨梁	軸力比 : $\eta_N + \eta_p$	0.20	0.12
	端部 (A 断面)	BH-440x120x6x12 (SN490B)	
	段差部 (B 断面)	BH-275x120x6x9 + BT-165x120x6x9 (SN490B)	
接合部	中央部 (C 断面)	BH-275x120x6x9 (SN490B)	
	組立筋	4-D10 (SD345)	
接合部	帯筋	$\square\text{-D6@70}$ (SD295) , $p_{jw} = 0.20\%$	

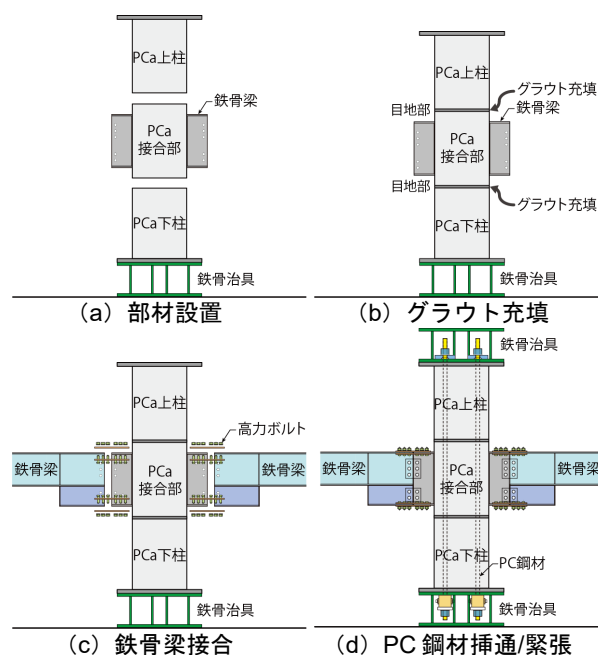
ひび割れが生じた。そこで本論では、大地震後も PCa 部材のリユースを実現させるため、鉄骨梁が曲げ降伏した場合でも、PCa 接合部にひび割れが生じないように塑性ヒンジ位置を意図的に移動させる架構形式を提案する。そのため、鉄骨梁は H 形鋼の端部に T 形鋼を隅肉溶接し断面を切替えた段差梁と PCa 接合部に埋設された H 形鋼とを梁端部で高力ボルト接合している。両試験体とも段差切替え部において曲げ降伏破壊となり、梁端部は実験終了時まで弾性となるように鉄骨サイズを計画した。本試験体では、段差切替え部が全塑性モーメントに到達した時の梁端部の作用モーメントに対する梁端部の曲げ降伏モーメントの比は 1.24 とした。

柱部材は下柱・接合部・上柱の 3 つの PCa 部材から構成されており、各 PCa 部材間にはグラウト目地を設けた。柱軸力を含む柱軸力比については最終破壊時まで目地部の離間が生じないように計画した。CS20 および CS21 試験体はリユース前の試験体名であり、CS20-R および CS21-R 試験体は載荷後、試験体を解体・リユースし、再度加力したリユース後の試験体名である。

2.2 試験体製作手順および材料試験結果

試験体は図－２に示す手順に従い組立てた。まず PCa 柱と鉄骨梁を内蔵した PCa 接合部をそれぞれ製作した。次に PCa 下柱を鉄骨治具上に固定し、その上に PCa 接合部および PCa 上柱を順に設置した後、目地部に無収縮グラウトを充填した。なお、目地部は解体を容易とするためメッシュ筋や繊維混入グラウトは採用していない。その後、切替え部を有する梁部材を高力ボルトにて接合し、試験体に設置したシース管内に PC 鋼棒を挿通し、所定のプレストレス力を導入した。

表－２にコンクリートおよびグラウトの材料試験結果を示し、表－３に鋼材および鉄筋の材料試験結果を示す。コンクリートおよびグラウトは実験時の目標強度が 60 N/mm^2 となるように調合を決定し、実験時の圧縮強度はコンクリートで 59.5～63.4 N/mm^2 、グラウトで 75.6～77.1 N/mm^2 となった。また鉄骨梁については SN490B 材を使用した。



図－２ 試験体組立手順

表－２ コンクリート・グラウトの材料特性

試験体名	材料	f'_c [N/mm ²]	ϵ_B [$\times 10^{-6}$]	E_c [N/mm ²]	σ_{sp} [N/mm ²]
CS20	コンクリート	59.5	2483	3.33×10^4	3.83
	グラウト	75.6	5113	2.56×10^4	3.19
CS20-R	コンクリート	63.4	2597	3.29×10^4	2.60
	グラウト	76.5	5733	2.23×10^4	3.65
CS21	コンクリート	61.5	2584	3.28×10^4	3.81
	グラウト	75.6	5113	2.56×10^4	3.19
CS21-R	コンクリート	63.2	2529	3.46×10^4	3.05
	グラウト	77.1	5867	2.26×10^4	2.69

f'_c : 圧縮強度, ϵ_B : 圧縮強度時ひずみ
 E_c : ヤング係数, σ_{sp} : 割裂引張強度

表－３ 鋼材・鉄筋の材料特性

種別	σ_y [N/mm ²]	E_s [N/mm ²]	σ_u [N/mm ²]	使用箇所
PL-9 (SN490B)	342	2.04×10^5	512	フランジ
PL-6 (SN490B)	411	2.05×10^5	537	ウェブ
PL-12 (SN490B)	366	2.05×10^5	527	梁端フランジ
D10 (SD345)	374	1.78×10^5	550	組立筋
D6 (SD295)	370*	1.85×10^5	532	帯筋

σ_y : 降伏点, E_s : ヤング係数, σ_u : 引張強さ
 *0.2% オフセット耐力

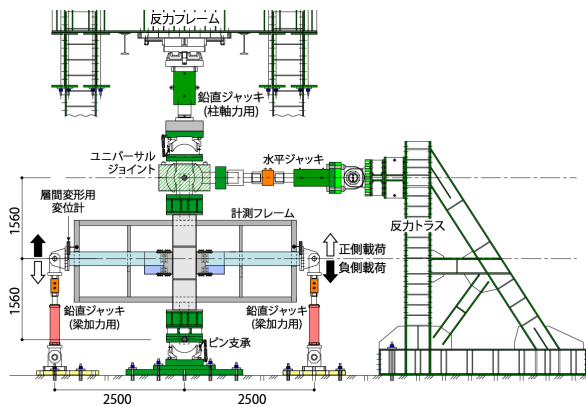
2.3 実験順序および荷重方法

表－４に実験順序を示し、図－３に荷重装置を示す。本実験では前述の手順にて組立てた試験体について、柱および梁部材端部にピン支承を設置し、プレストレス力と試験体上部の鉛直ジャッキによる軸力の合計値が所定の軸力となるように鉛直ジャッキを制御した。また実験中においても軸力比が一定となるように鉛直ジャッキを制御した。柱軸力導入後、上柱部材の先端の水平変位が 0 となるように水平ジャッキを制御しながら、左右梁端部の鉛直ジャッキにより梁部材に正負漸増繰り返し荷重を行った。加力スケジュールは層間変形角 $R=\pm 1.0, \pm 2.0$,

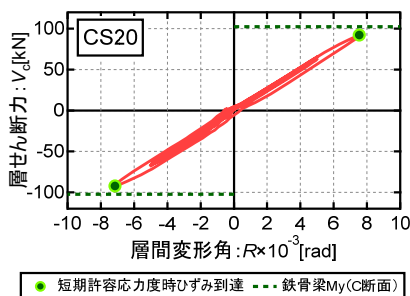
表－４ 実験順序

実験ステップ	実施内容
Step1	試験体組立（図－２参照）
Step2	鉄骨梁の切替え部が短期許容応力度時ひずみ ^{*1} に到達するまで加力
Step3	PCa 部材解体・グラウト研り
Step4	解体後の試験体を用いた再組立
Step5	層間変形角 $R=50 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで加力

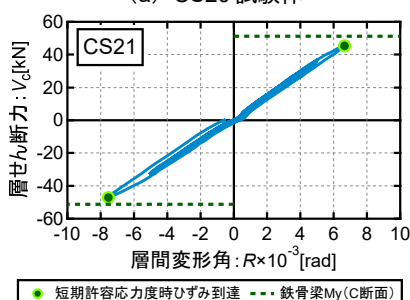
*1 規格降伏点 (325N/mm^2) をヤング係数実験値で除したひずみ



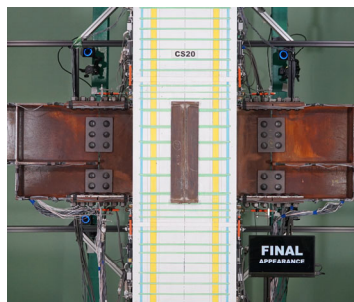
図－３ 荷重装置



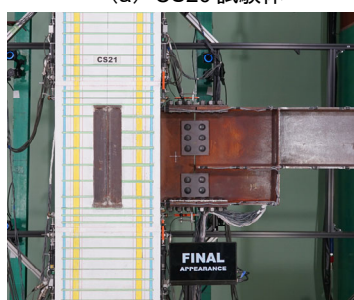
(a) CS20 試験体



(b) CS21 試験体



(a) CS20 試験体



(b) CS21 試験体

図－４ 層せん断力-層間変形角関係

写真－１ 実験終了時損傷状況

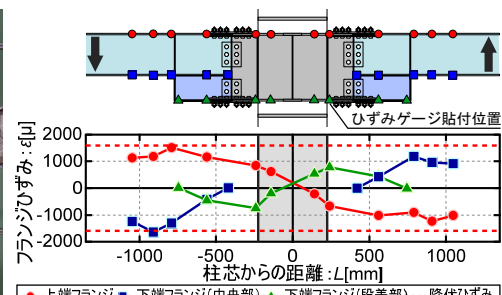
$\pm 3.3, \pm 5.0, \pm 7.5, \pm 10, \pm 15, \pm 20, \pm 30, \pm 40$ および $\pm 50 \times 10^{-3} \text{rad}$ を各 2 サイクル計画した。層間変形角は柱頭柱脚のピン支承位置で固定した計測フレームに変位計を設置し、梁端部の変形を計測し、梁長さで除して求めた。

なお、本研究では中規模地震に対して鉄骨梁は許容応力度設計とした部材のリユースを想定しており、最初に鉄骨梁のひずみ計測値が短期許容応力度時ひずみに到達するまで上記の加力スケジュールに従い荷重を実施する。ここで、短期許容応力度時ひずみは実務設計時に使用する鉄骨部材の規格降伏点を基に算定した。その後、荷重装置から試験体を取り出し、PCa 部材について 4 章で後述する解体実験を実施し、目地部のグラウト材を研り作業により除去する。そして同一 PCa 部材を用いて前述の手順にて再度試験体を組立て、再度加力スケジュールに従い正負漸増繰り返し荷重を実施する。本論では表－４に示す Step2 と Step5 の構造実験の結果より部材のリユース前後による耐震性能への影響を確認する。

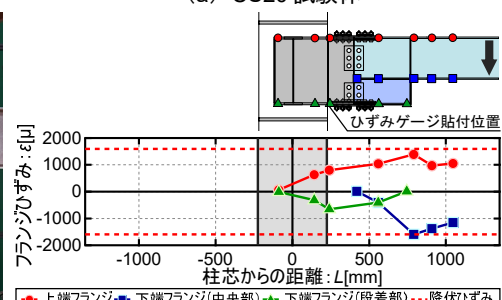
3. 部材リユース前の実験結果

3.1 履歴特性および損傷状況

図－４に各試験体のリユース前の層せん断力-層間変形角関係曲線を示す。同図には段差梁切替え部のひずみが短期許容圧縮応力度時ひずみに到達したときの点および、規格降伏点を用いた鉄骨梁の曲げ降伏モーメント計算値 M_y を示す。両試験体ともに荷重終了時まで線形の履歴特性を示し、 $R=7.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ の荷重サイクルにおいて鉄骨梁の段差切替え位置での圧縮側ひずみが降伏ひずみ（規格降伏点をヤング係数実験値で除したひずみ）に到達したことから荷重を終了した。写真－１に CS20 および CS21 試験体の荷重終了時の損傷状況を示す。部材



(a) CS20 試験体



(b) CS21 試験体

図－５ フランジひずみ分布（正側最大荷重時）

リユース前の載荷実験において、PCa 柱および接合部にはひび割れ等による損傷は確認されなかった。

3.2 鉄骨梁のひずみ分布

図－5 に鉄骨梁の段差切替え位置での圧縮側ひずみが短期許容圧縮応力度時ひずみに到達した際のフランジのひずみ分布を示す。ひずみはフランジ側面に貼付したゲージより測定した。上端フランジでは段差切替え部の引張ひずみが最も大きく、梁端部側へ進むに従いひずみが減少する傾向を示した。下端フランジでは段差切替え部周辺の圧縮ひずみが最も大きく、段差部の T 形鋼のウェブにより中央部の下端フランジの応力が梁端部側へ伝達されていることが確認された。また PCa 接合部内については、鉄骨梁とコンクリートとの支圧に伴い引張ひずみから圧縮ひずみに移行していることが確認された。

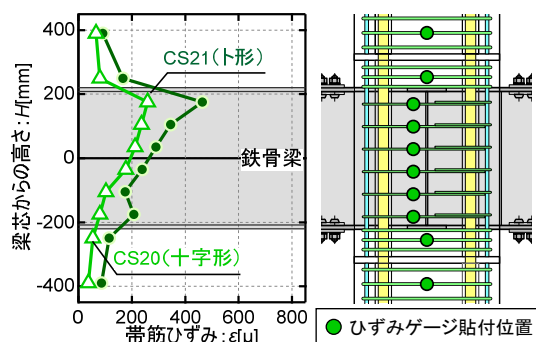
3.3 帯筋の応力度分布

図－6 に鉄骨梁フランジのひずみが短期許容応力度時ひずみに到達した際の各試験体の柱および接合部帯筋のひずみ分布を示す。両試験体ともに鉄骨梁の上端フランジ直下の帯筋のひずみが最も大きくなり、上下の柱に向かうにつれてひずみが減少していく傾向を示した。フランジひずみが短期許容応力度時ひずみに到達した点の帯筋ひずみ最大値は約 260～460 μ であり、降伏ひずみに対して十分小さい値を示した。帯筋ひずみについては T 形接合部の方が大きい値を示す傾向を示したが、この傾向については柱軸力や直交梁の支圧強度の負担率などが十字形接合部と異なることから、今後の課題としたい。

4. PCa 柱部材の解体実験

4.1 実験計画

図－7 に PCa 柱部材の解体方法を示す。3 章で載荷した試験体について、載荷終了後にプレストレス力を解放して PC 鋼棒を取り外し、PCa 上柱または下柱側面に L 形の鉄骨治具を設置する。その後、鉄骨治具と鉄骨梁の間に油圧ジャッキおよびロードセルを設置し、油圧ジャッキを押し出すことでグラウト目地部に曲げモーメントを作用させた。この加力形式の場合、目地部には引張力および偏芯による曲げモーメントが発生することから、引張縁に作用する引張応力度は下式にて算出した。



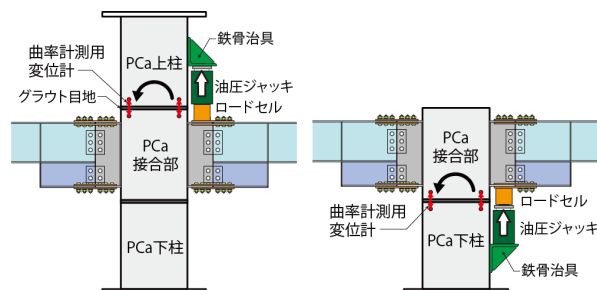
図－6 帯筋のひずみ分布（正側載荷最大荷重時）

$$\sigma_t = \frac{P}{A_e} + \frac{M}{Z_e} \quad (1)$$

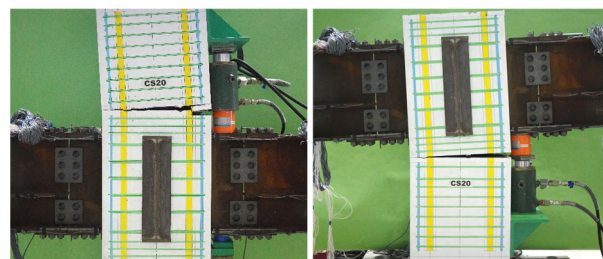
ここで、 σ_t ：引張応力度[N/mm²]、 P ：ジャッキ荷重[N]、 A_e ：シース管による断面欠損を考慮したコンクリート断面積[mm²]、 M ：曲げモーメント[N・mm] ($M=P \cdot e$)、 e ：荷重芯から柱芯までの距離[mm]、 Z_e ：シース管による断面欠損を考慮した断面係数[mm³]である。また目地部の離間挙動を計測するために、図－7 中に示す位置に鉛直方向の変位計を設置し目地部の曲率を計測した。加力は目地部が離間するまで単調載荷とした。

4.2 実験結果

写真－2 に CS20 試験体の上柱および下柱の解体状況を示す。上下柱ともに目地部グラウトと PCa 柱との界面において水平方向のひび割れが発生し、上側の部材が剛体回転する挙動を示した。表－5 に各試験体の引張強度の一覧を示す。解体時の引張強度は 0.26～0.59N/mm² となった。文献 3) では圧着型の離間強度 f_i は $f_i=0.24\sqrt{f_c}$ で算定するとされており、コンクリート強度を F_c60 とした場合の離間強度計算値 (0.24 $\sqrt{60}$ =1.86N/mm²) に対して、約 14～32% 程度の強度しか発揮しなかった。なお、本研究での引張強度は既に加力を行った後の試験体の目地部の強度であり、文献 3) で示されている離間強度とは応力条件が異なるため、解体時強度の算定方法については今後の課題としたい。



図－7 PCa 部材解体方法



写真－2 解体状況

表－5 解体時の引張強度一覧

試験体名	部位	引張強度 [N/mm ²]	上下柱引張強度 平均値[N/mm ²]
CS20 (十字形)	上柱	0.30	0.45
	下柱	0.59	
CS21 (T 形)	上柱	0.26	0.32
	下柱	0.38	

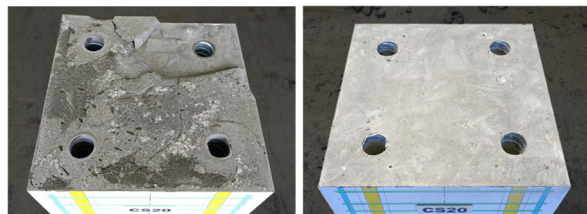
5. リユース実験

5.1 実験計画

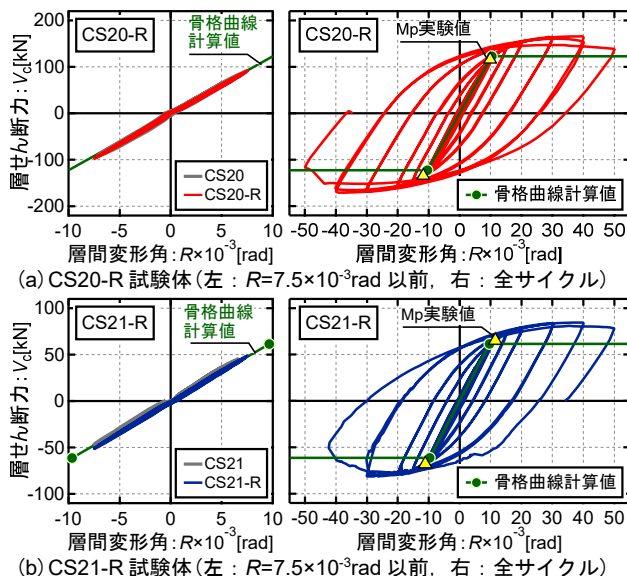
前章で解体実験を行った PCa 部材について目地グラウトを電動ピックを用いて研り、コンクリート表面に付着したグラウトをグラインダーで研磨した（写真－3 参照）。本章では研磨を行った PCa 柱および PCa 接合部を用いて、再度試験体を組立て、目地部にグラウトを充填し PC 鋼棒にてプレストレスを導入した。その後、2.3 節に示した載荷装置に設置し、前述の加力スケジュールに従い正負漸増繰返し載荷を行った。なお、鉄骨梁については最初の加力で使用したものをそのまま使用した。

5.2 履歴特性および損傷状況

図－8 にリユース後の各試験体の層せん断力－層間変形角関係曲線を示す。同図にはリユース前の実験による結果や鉄骨梁の全塑性モーメント M_p の実験値も併せて示す。ここで、 M_p 実験値は文献 4) に倣い、接線剛性が初期剛性の 1/3 になるときの荷重と定義した。また図－9 に実験終了時のひび割れ状況を示す。CS20-R および CS21-R 試験体ともに $R=7.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで線形の履歴特性を示し、その後、段差切替え部において鉄骨梁が曲げ降伏し、剛性が緩やかに低下した。その後は変形に伴い層せん断力が増加し、鉄骨梁の全塑性モーメント計算値の約 1.35 倍の耐力を示し、段差切替え部において圧縮側フランジが局部座屈し耐力が低下した。PCa 接合部では、 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ において上下フランジ角部を起点として接



写真－3 グラウト目地部 研りおよび研磨状況



図－8 リユース後の層せん断力－層間変形角関係

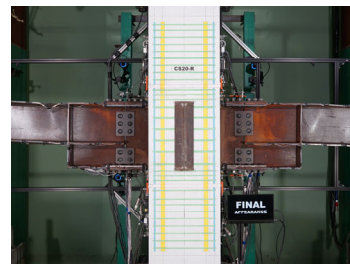
合部側面に水平方向のひび割れが発生し、接合部正面の直交梁の角部にも斜めひび割れが発生した。またグラウト目地部にも一部鉛直および水平方向にひび割れが生じた。いずれのひび割れも $R=50 \times 10^{-3} \text{rad}$ ピーク時においても 0.10mm 以下であった。

また組立筋のひずみについて、PCa 接合部側面の梁フランジ位置に発生した水平方向のひび割れ近傍においてひずみが増加する傾向を示し、CS20-R 試験体で最大 840μ 程度、CS21-R 試験体で最大 580μ 程度のひずみを示した。また帯筋のひずみについては、鉄骨梁の上下フランジに囲まれた範囲の接合部帯筋については実験終了時までに CS20-R 試験体で約 $1000 \sim 1400 \mu$ 、CS21-R 試験体で約 $450 \sim 860 \mu$ のひずみを示し、フランジ外側の PCa 柱および接合部帯筋については CS20-R 試験体では約 $100 \sim 200 \mu$ 、CS21-R 試験体では約 $50 \sim 90 \mu$ のひずみを示し、フランジの内外によりひずみに差が生じた。

5.3 リユースによる影響評価

表－6 にリユース前後の各試験体の架構全体の等価剛性の比較を示す。本論ではリユース前の CS20 および CS21 試験体が $R=7.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ の載荷サイクル中に実験を終了したため、その前の載荷サイクルである $R=5.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ 正負ピーク点と原点とを結ぶ等価剛性を求め、リユース前後による変化を確認する。表－6 より、CS20-R および CS21-R 試験体の等価剛性はリユース前のそれぞれの等価剛性と比べて $\pm 1\%$ の変化しかなく、リユース前後でほぼ同程度の値を示した。

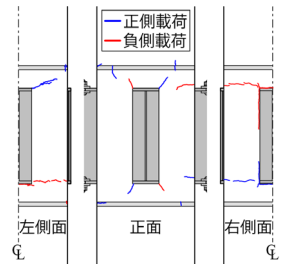
また PCa 部材のリユースによる影響を検討するため、図－10 に各試験体の層せん断力－柱曲げ変形角および接合部せん断変形角関係曲線を示す。柱曲げ変形角は図－10 (a) に示す上下の PCa 柱部材に対して長さ方向に分割して測定した軸方向変位量から曲率、曲げ変形量を算出し、部材長さで除して求めた。また図－10 (b)



(a) CS20-R 試験体

(b) CS21-R 試験体

写真－4 実験終了時損傷状況



(a) CS20-R 試験体

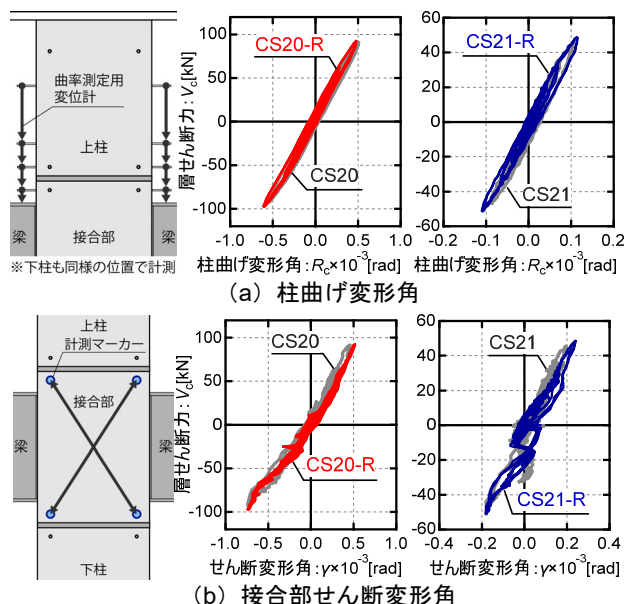
(b) CS21-R 試験体

図－9 ひび割れ状況

表－6 $R=5.0 \times 10^{-3}$ rad ピーク時等価剛性

試験体名	等価剛性[kN/mm]		
	正側	負側	平均
CS20	5.68	6.04	5.86
CS20-R	5.58	6.09	5.83 (0.99)
CS21	3.20	2.92	3.06
CS21-R	3.01	3.15	3.08 (1.01)

※括弧内の数値はリユース前の剛性に対する比率

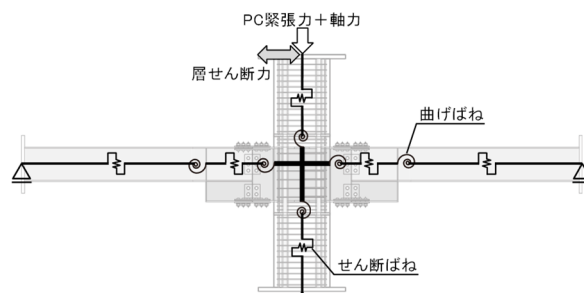


図－10 層せん断力－柱および接合部変形角関係

に示すPCa接合部の対角線上にモーションキャプチャ用のマーカーを設置し、その変位から接合部せん断変形角を求めた。図－10より、柱の曲げ変形角および接合部せん断変形角についても、リユース前後の特性が概ね同程度の挙動を示し、PCa部材単位においてもリユースによる影響は確認されなかった。

5.4 骨格曲線の評価

本節では本構造システムの架構の設計方法を検討するため、図－11に示す架構解析モデルにより層せん断力－層間変形角関係の骨格曲線計算値を求め、実験値との比較を行う。検討するモデルは部材を線材に置換し材端に曲げばねを有するモデルとし、段差切替え部においても曲げばねを有するモデルとした。なお、剛域の設定については、実験終了時まで接合部にひび割れがほとんど発生していなかったことから、柱および梁面に囲われた範囲とした。鉄骨梁の曲げばねは全塑性モーメントにおいて折れ点を有する完全弾塑性モデルとし、アンボンドPC柱についても実験終了時まで目地部の離間が確認されなかったため弾性とした。骨格曲線計算値と実験値との比較を図－8に示す。図－8より、CS20-RおよびCS21-R試験体ともに、初期剛性や全塑性モーメント実験値およびその時の変形角が精度良く評価できることを確認した。



図－11 架構解析モデル

6. まとめ

本研究では、構造部材のリユースを目的として、柱部材にPCaアンボンドPC造、梁部材に鉄骨造を適用した部分架構試験体の静的荷重実験、解体実験およびリユース実験を実施し、以下の知見を得た。

- 1) 鉄骨梁フランジのひずみが短期許容応力度時ひずみに到達するまで荷重を行った後、PCa部材を解体・リユースし、再度荷重を行っても、架構全体の剛性およびPCa部材の挙動は概ね変化しない。
- 2) PCa部材のグラウト目地部の解体時引張強度は $0.26 \sim 0.59 \text{ N/mm}^2$ となり、文献3)で示された圧着型の離間強度と比較して約14～32%程度の強度であった。
- 3) 本論で提案する鉄骨梁段差切替え部に曲げばねを有する架構解析モデルによる骨格曲線計算値により、実験値を精度良く評価できることを確認した。

謝辞

本研究は、国土交通省令和6年度住宅・建築生産性向上促進事業のうち住宅生産技術イノベーション促進事業による補助を受けて実施した成果である。

参考文献

- 1) 西岡由紀子，江口康平，辻大二郎，小島正郎：革新的カーボンネガティブコンクリート CUCO の実現に向けた研究開発 その1 高炉スラグ微粉末を高含有し γ -C2Sを添加したモルタルの高濃度炭酸化養生に関する基礎的検討，日本建築学会大会学術講演会，材料施工，pp.609-610，2023.7
- 2) 掛悟史，高津比呂人，立花弘，島田安章：PCaアンボンドPC柱S梁接合部架構の耐震性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.2，pp.1027-1032，2024.6
- 3) 日本建築学会：古くて新しい・アンボンドPCが紡ぐ未来の空間創造，2021年度日本建築学会大会（東海），構造部門（PC），パネルディスカッション資料，2021.9
- 4) 建築研究所，鋼材倶楽部：鋼構造物の耐震保有性能評価のための標準試験方法と評価基準の提案，1994.12