

プレキャスト柱および梁をアンボンドより線により圧着した門型架構の力学的性状

京都大学工学研究科 正会員 ○渡邊有香子
 株式会社竹中工務店 非会員 芹澤 好徳
 京都大学工学研究科 正会員 河野 進
 京都大学工学研究科 正会員 西山 峰広

1. はじめに

プレキャスト(以下 PCa と略記)部材同士をプレストレス力により接合する PCaPC 圧着接合工法は、施工の省力化・品質向上等の優位性から普及しつつあるが、これをアンボンドとすることにより更なる工程の単純化・施工ミスの防止を図ることができる。またボンド PCaPC 構造は従来の RC 構造同様スクラップアンドビルドに伴う環境負荷の問題を抱えていたが、アンボンドならばプレストレス力を取り除くことにより、損傷部材のみの交換や廃棄時・用途変更時の部材再利用・再構成が可能な新構造システムの開発も可能である。

プレストレストコンクリート(以下 PC と略記)に関する国土交通省告示改正により、主要耐震部材にもアンボンド PC 鋼材を使用することが可能となる予定である。ただし、アンボンド PC 構造では部材が最大耐力に達したときの変形が大きくなる傾向があるため、終局強度設計法ではなく限界耐力計算法を用いることが義務付けられている。しかし、現時点での研究資料はまだ十分とは言えず、限界耐力計算をする上で未確認な項目を残したままボンド PC 構造に用いていた規定を準用せざるを得ない部分が多い。本研究では、ボンド PC 構造に対して提案された復元力特性モデルを用いた設計によるアンボンド PCaPC 門型架構の載荷実験を行って、架構の安全性および告示で規定される減衰定数の妥当性を検討した。また、アンボンド PC 構造は非常に高い復元性を有するが、エネルギー消費能力に乏しいことが問題点のひとつとされている。そこで、混合より線を用いた PCaPC 構造システムを提案し、これを適用した門型架構の載荷実験によって、復元性を維持したままエネルギー消費を増大させる構法に関しても研究を行った。

2. 混合より線について

混合より線 (Graded Composite Strand, 以下 GCS と略記) とは、図 1 に示すように低強度と高強度の素線から成り、

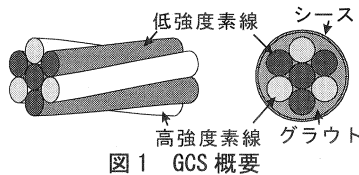


図 1 GCS 概要

図 2 に示すように低強度素線は降伏、高強度素線は未降伏のひずみ範囲でより線が挙動するようプレストレス力を用いることにより、低強度素線がエネルギー消費を、高強度素線が復元性を担う。本研究では、新たにアンボンドの性状を付加した GCS-U を用いた。これは図 3 に示すように、中心に配した 7 本より高強度素線をアンボンドとし、高復元性の実現ならびに緊張材の破断を防止することが特徴の GCS であり、周辺に配した 12 本の低強度素線は周囲のコンクリートと直接付着し、塑性化してエネルギーを消費するものである。

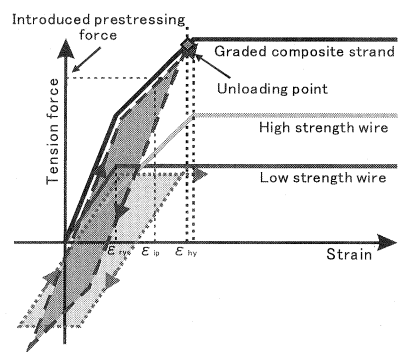


図 2 GCS 挙動概念

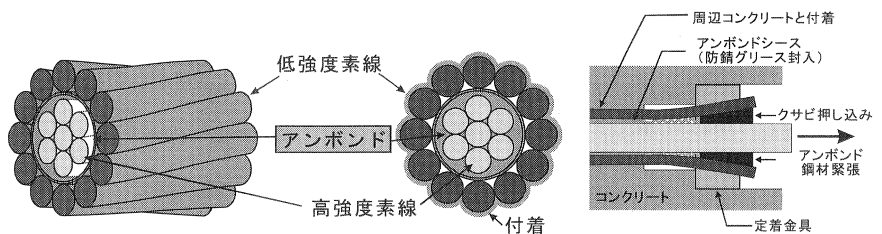


図 3 GCS-U 概要

3. 実験の目的

限界耐力計算の要点となる以下の5点に関する検討を目的として、門型骨組の正負交番漸増荷重実験を行った。

- (1) 架構の安全性
- (2) 終局に至るまでの損傷状況
- (3) 告示により提案されている減衰定数の妥当性
- (4) ボンド PC に関して提案された部材復元力特性モデルを用いた荷重増分解析の、アンボンド架構への適用性
- (5) 混合より線の使用によるエネルギー消費能力の改善

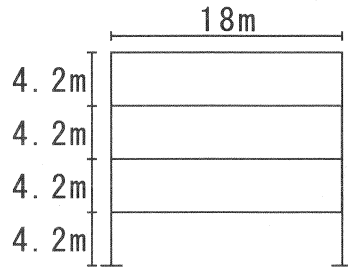


図4 想定建物軸組図

4. 実験概要

4.1 想定建物

想定建物は図4に示す4層1スパンのアンボンドPCaC造、柱断面は900mm角、梁断面は1050×750mmとし、限界耐力計算法を用いて設計を行った。非線形増分解析にはSAP2000を用い、各部材を線材に置換し、柱梁接合部は剛、柱脚は固定と仮定した。材端にはボンドPCに対して文献^[3]で提案されたトリリニア型の非線形バネ要素を適用した。損傷限界状態は梁または柱のいずれか一箇所に降伏ヒンジが発生したとき、安全限界状態は最大層間変形角が1/50に達したときとした。

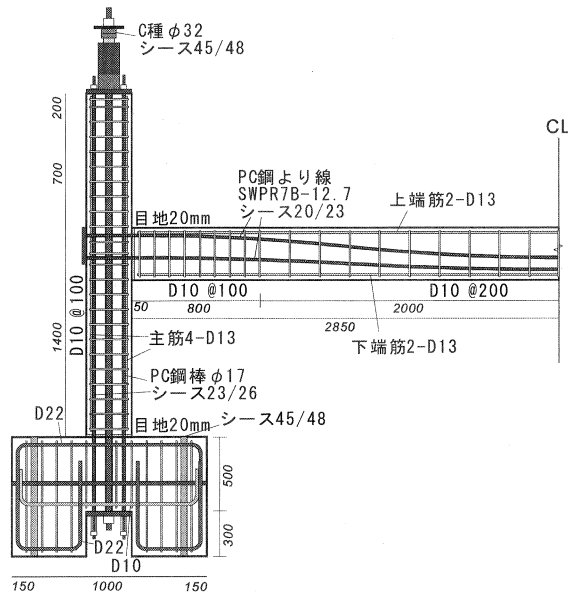


図5 試験体図 (単位: mm)

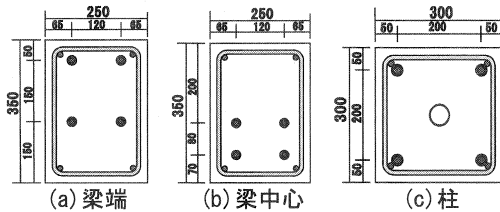


図6 試験体断面図 (単位: mm)

表1 コンクリートの材料特性

種類	圧縮強度 (MPa)	圧縮強度時ひずみ(%)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
GRACOM2階柱	60.9	0.250	3.42	29.8
その他のコンクリート	61.0	0.236	3.10	30.2

表2 目地モルタルの材料特性

梁		柱
圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)
49.6	3.36	60.5

表3 普通鉄筋の材料特性

種類	降伏強度 (MPa)	降伏強度時ひずみ(%)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
D10	347	0.225	464	173
D13	356	0.192	498	185
D22	373	0.232	569	182

表4 PC鋼材の材料特性

	0.2%永久伸びに対する荷重(kN)	破断荷重 (kN)	弾性係数 (GPa)
PC鋼棒φ17	271	289	200
PCより線φ12.7	175	195	193
GCS-U外周普通素線	14.2	15.0	195

4.2 試験体

試験体詳細を図5および図6に示す。試験体は、想定建物の2階柱反曲点以下を1/3スケールに縮小したものである。梁のPC鋼材は、長期荷重時の曲げモーメントをキャンセルするよう曲線配置した。PC鋼材の有効プレストレス力 P_{eff} は梁: 105.3kN/本(PC鋼より線φ12.7)、柱: 143.6kN/本(PC鋼棒φ17)とした。

4.3 実験パラメータ

実験パラメータは梁のPC鋼材種別とし、アンボンドPCより線を用いた「UNBOND」、およびGCS-Uを用いた「GRACOM」の2体の試験体を用意した。2体の試験体その他の配筋・断面形状はすべて共通である。なお、UNBONDには梁端に目地が存在するが、GRACOMはGCS-U周辺素線に付着を要するため目地を作らず、柱梁接合部より上部を打ち継いだ。

4.4 使用材料特性

材料特性を表1~4に示す。

4.5 計測方法

計測項目は以下のとおりである。()内は測定手段を示す。

- ・水平荷重(ロードセル)
- ・柱軸力(ロードセル)
- ・梁端中心高さ位置および基礎水平変位(変位計)
- ・部材各部分の変形(変位計)
- ・PC鋼材緊張力(カラナット)
- ・普通鉄筋およびPC鋼材のひずみ(抵抗線ひずみゲージ)

4.6 荷重方法

図7に荷重装置を示す。基礎はPC鋼棒によって耐力床と緊結した。水平加力用ジャッキの両側にはピンを取り付け、軸力用ジャッキ上部には球面軸受けを挟んだ。また、長期荷重時の等分布荷重によるモーメントを再現するため、配力ビームを用いて6.0tonのおもりを梁の4点に作用させた。水平荷重 Q は両側柱とも同じ大きさを作用させた。柱の軸力は荷重増分解析の結果より、変動軸力として $N = 122 \pm 0.51Q$ kNが作用するよう制御した。荷重は梁端中心高さ位置で計測した水平変位により制御し、図8に荷重履歴を示すように、層間変形角0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 7.5%で正負2回ずつの静的繰り返し荷重を行った。

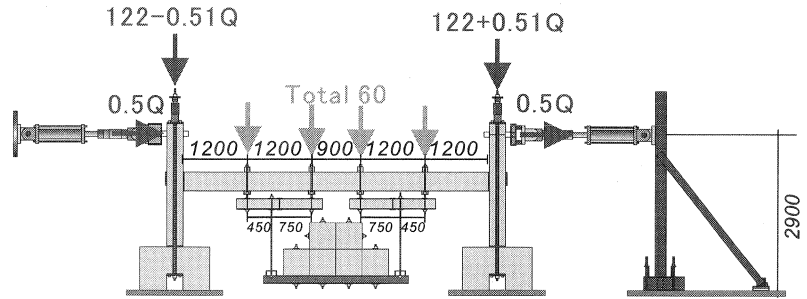


図7 荷重装置 (単位: kN, mm)

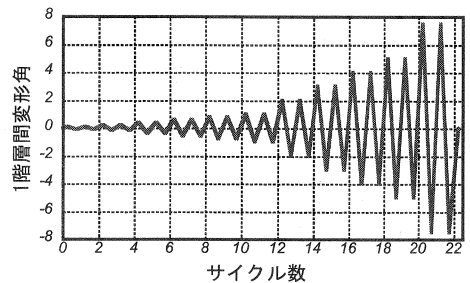


図8 荷重履歴

5. 実験結果

以下に実験結果を示す。

5.1 損傷状況

図9に層間変形角(以後 R と略記)7.5%荷重終了時の損傷状況を示す。図中の数字はひび割れ発生時の層間変形角およびサイクル数である。両試験体のひび割れ性状を比較すると、GRACOMの方が本数が多いが

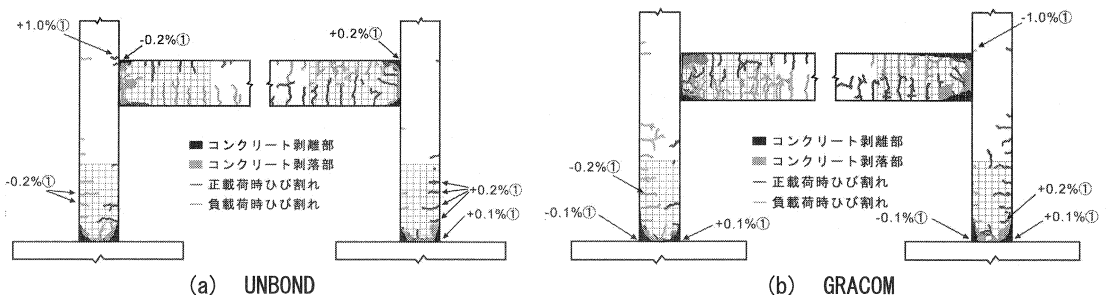


図9 損傷状況

大きな差異は見られなかった。柱の外側および梁の下側に比較的多数のひび割れが発生したが、梁端目地および柱脚付近のコンクリートの大変形に伴う圧壊・剥落以外に大きな損傷は生じなかった。また、両試験体とも残留ひび割れ幅は非常に小さく、 $R = 1.0\%$ 時には目視不可、 0.2mm に達したのは $R = 2.0\%$ 時であった。

5.2 水平荷重一層間変形角関係

図10に水平荷重一層間変形角関係を示す。図中には6.2節に述べる解析結果を併せて示している。両試験体ともPC構造特有のS字型で復元性の高い履歴性状を示し、除荷時の残留層間変形角は $R = 3.0\%$ 時でも $1/600$ 未満に抑えられた。履歴ループはGRACOMの方が若干膨らみ、エネルギー消費が増大したことが窺えるが、GCS-U周辺素線に貼付したひずみゲージによる測定が不良であったため、エネルギー消費が低強度素線降伏により生じたものかどうかは確認できなかった。最大耐力後の耐力低下はGRACOMの方が大きい、極端な耐力低下ではなく、安定した履歴ループとなっている。 $R = 7.5\%$ 時の両試験体の耐力はほぼ同じである。これはGRACOMの低強度素線が附着劣化を起こしてアンボンド化し、終局時にはストランドの張力が両者で等しくなったためと考えられる。

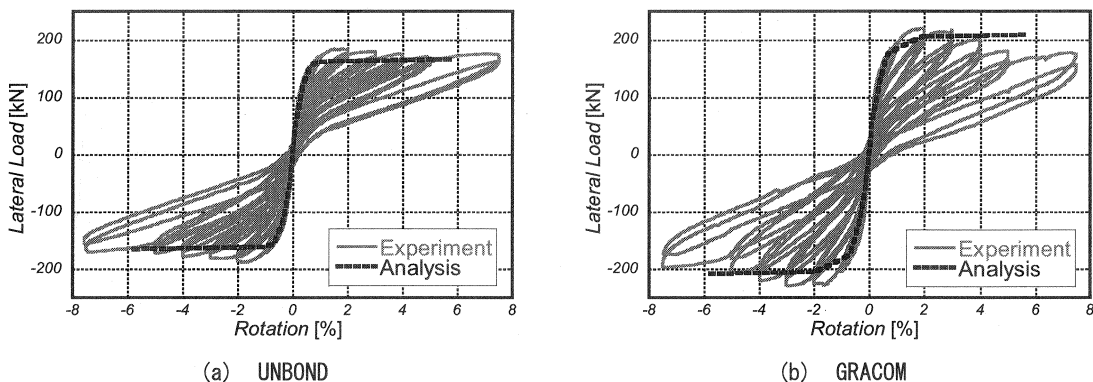


図10 水平荷重一層間変形角関係

5.3 PC鋼材張力

図11および12にPC鋼材張力一層間変形角関係を示す。いずれの鋼材も降伏荷重には達していない。両試験体とも梁に関しては載荷終了時も張力はほとんど低下しなかったが、柱に関しては $R = 2.0\%$ 以降に張力低下が発生し、 $R = 7.5\%$ 時の残存張力は $50 \sim 60\%$ であった。これは載荷の進行に伴い柱脚塑性ヒンジ部のコンクリートが圧壊して柱に軸縮みを生じ、結果としてプレストレス力が低下したものと考えられる。

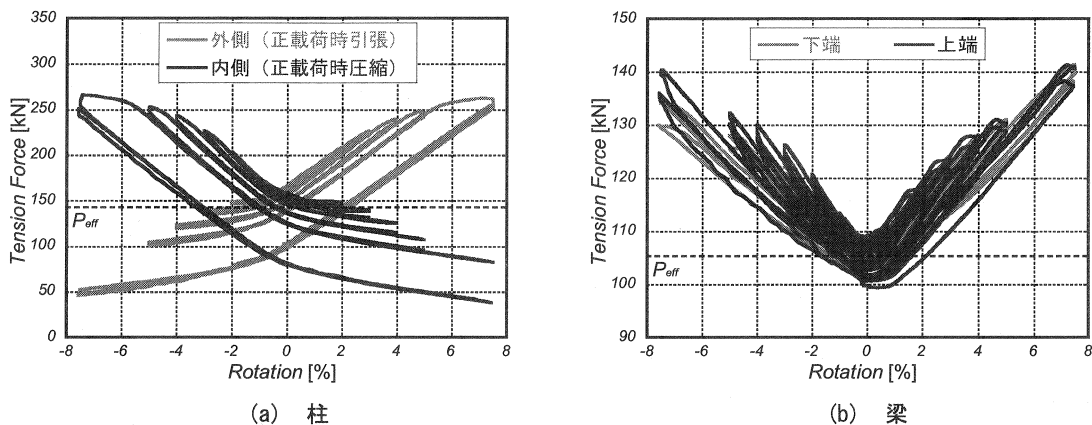


図11 PC鋼材張力一層間変形角関係 (UNBOND)

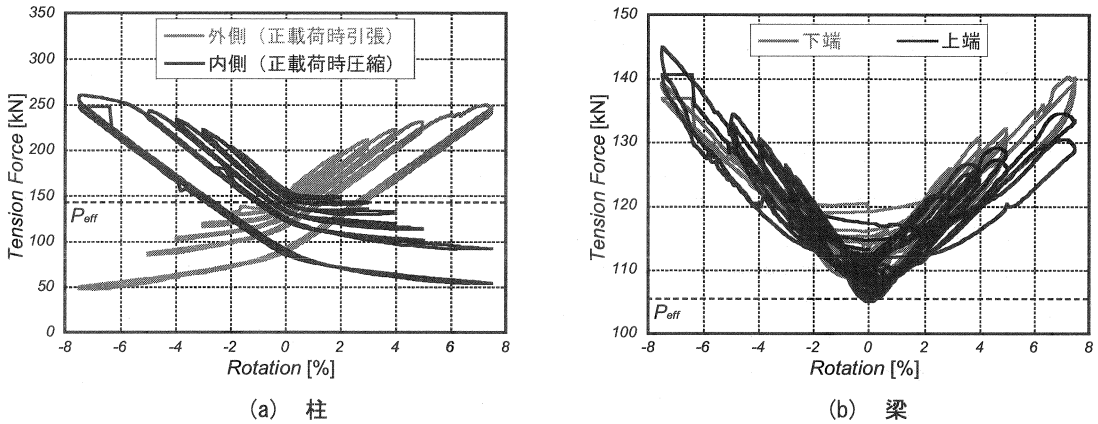


図 12 PC 鋼材張力-層間変形角関係 (GRACOM)

5.4 等価粘性減衰定数

図 13 に各試験体第 2 ループ時の等価粘性減衰定数 h_{eq} を示す。告示第 1457 号-第 6 の 2 項に示された計算式 (式(1)) による値を併せて示す。ただし、限界耐力計算では減衰定数 5.0%の加速度応答スペクトルを基準として考えるため、計算には式(1)の第 1 項のみを用いた。

$$h = \gamma_1 \left(1 - 1 / \sqrt{D_f} \right) + 0.05 \quad (1)$$

ただし、 $\gamma_1 = 0.06 + 0.19\sqrt{\eta}$, $\eta = M_r / (M_p + M_r)$, $D_f = \Delta_s Q_d / \Delta_d Q_s$ 。ここに、 h : 減衰定数, M_r : 鉄筋による部材の曲げ強度, M_p : 緊張材による部材の曲げ強度, Δ_d : 損傷限界変位 (4.1 で述べた損傷限界時における想定建物の等価 1 質点縮約モデル水平変位), Q_d : 損傷限界せん断力, Δ_s : 安全限界変位, Q_s : 安全限界せん断力。

$R = 2.0\%$ 以降において、GRACOM の h_{eq} は UNBOND の 1.2 倍程度であり、混合より線のエネルギー消費増大効果が現れている。ただし 5.2 節に述べたように、より線の挙動は未確認である。また、UNBOND の h_{eq} は式(1)の計算値を上回る結果となり、告示の値はアンボンド PCaPC 構造の場合にも妥当であると言える。

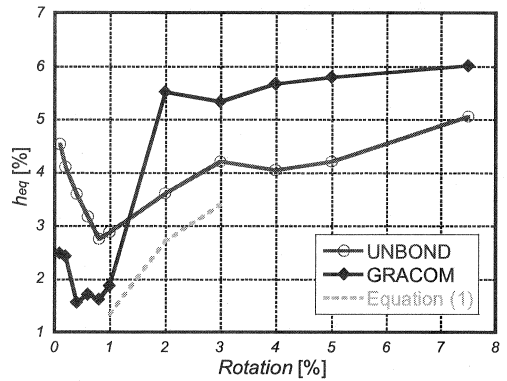


図 13 等価粘性減衰定数

6. 解析

以下では非線形漸増荷重増分解析ソフト SAP2000 を用いて行った解析について、概要および結果を示す。

6.1 解析概要

図 14 に解析モデルを示す。各部材を線材に置換し、材端にはトリリニア型の非線形バネ要素 (図中の○印) を配置した。柱梁接合部は剛、柱脚は固定とした。常時荷重、水平荷重、柱軸力は実験時の荷重状況を再現した。なお材端バネ要素の復元力特性には、ボンド PC 構造を想定して提案された日大モデル^[3]を使用した

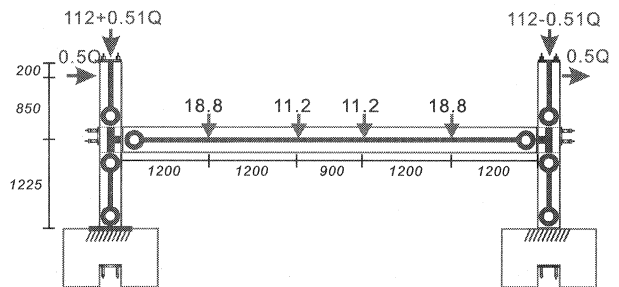


図 14 解析モデル (単位: kN, mm)

なお材端バネ要素の復元力特性には、ボンド PC 構造を想定して提案された日大モデル^[3]を使用した。アンボンド鋼材に関しては文献^[2]より終局時応力 σ_{pu} を式(2)として断面解析に適用し、復元力特性を算定した。

$$\sigma_{pu} = 0.75\sigma_{pe} + 0.25\sigma_{py} \quad (2)$$

ただし、 σ_{py} : PC 鋼材の規格降伏点応力、 σ_{pe} : PC 鋼材有効引張応力。

図 15 に材端復元力特性を示す。梁は下端引張の場合を正、柱は圧縮を受ける場合を正としている。諸数値は材料試験による実測値を、有効プレストレス力は実験開始時のプレストレス力を用いた。柱に関しては設計限界状態($C_b = 0.3$)時の地震力が作用した場合の軸力を考慮した。

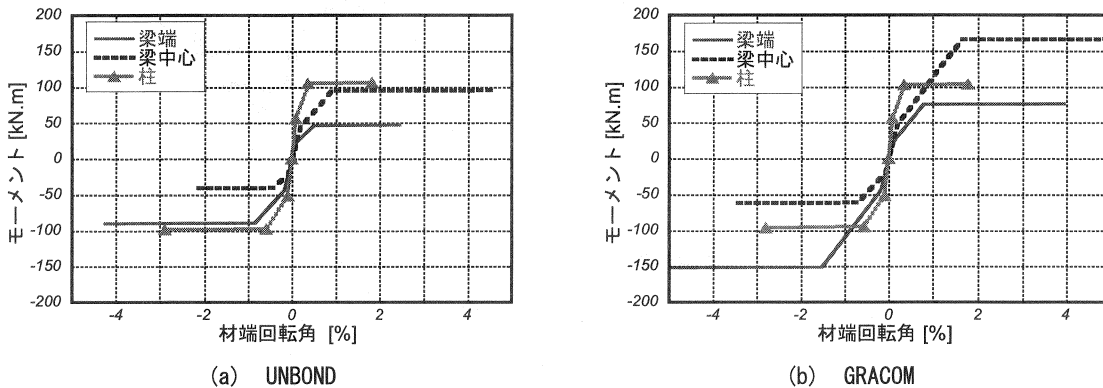


図 15 材端復元力特性

6.2 実験結果と解析結果の比較

図 10 に実験結果と解析結果を示す。初期剛性および降伏に至るまでの変形と耐力は非常に精度良く予測できた。また最大耐力は実験結果が解析結果を UNBOND で 11%, GRACOM で 6% 上回っている。提案された部材モデル^[3]を用いた解析は、アンボンド PCaPC 構造に対しても適用可能である。

7. 結論

本研究における結論は以下のとおりである。

- (1) 限界耐力計算によりボンド PC 構造に準じて設計されたアンボンド PCaPC 架構は、十分な剛性を有し、また $R = 7.5\%$ まで大きな耐力低下を生じず十分な変形能力を有する。
- (2) 損傷は目地部に集中し、残留層間変形角は $R = 3.0\%$ 時に $1/600$ 未満、残留ひび割れ幅は $R = 2.0\%$ 時に 0.2mm 程度と非常に小さく、復元性が良い。ただし柱の PC 鋼材には、 $R = 2.0\%$ 以降で柱脚塑性ヒンジ部のコンクリート圧壊による張力の低下が見られた。
- (3) 告示で規定される減衰定数は、アンボンド PCaPC 構造に対しても妥当な下限値を与える。
- (4) ボンド PC 構造に対して提案された復元力特性モデルは、アンボンド PCaPC 構造にも適用できる。
- (5) 混合より線の使用により、アンボンド PCaPC 構造におけるエネルギー消費能力の増大が可能である。

[謝辞]

本研究の一部は国土交通省建設技術開発費補助金 (研究代表者: 渡邊史夫京都大学教授) を用いて行なわれた。実験に際しては、住友電工スチールワイヤー株式会社および高周波熱錬株式会社から資材の提供を受けた。特に住友電工スチールワイヤー株式会社荒金勝氏からは数々のご助言、ご助力を戴いた。当時学部 4 回生の吉岡典彦氏 (現在新日鉄ソリューションズ株式会社) には研究全般を通して多大なご協力を戴いた。謝意を表する。

[参考文献]

- [1] 日本建築学会: プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 1987 年.
- [2] 日本建築学会: プレストレストコンクリート (III 種 PC) 構造設計・施工指針・同解説, 2003 年.
- [3] 岡田満, 浜原正行, 末次宏光, 本岡順二郎: プレストレストコンクリート曲げ部材の復元力特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, pp. 63-69, 1990 年 4 月.