

梁端拡幅部で圧着接合されたアンボンド PCaPC 梁部材の 構造性能に拡幅部の長さが及ぼす影響

Effect of Length of Widened Part on Structural Performance of Precast Concrete Beams Post-tensioned by Unbonded Tendons at Widened Beam End

R&D センター 松永 健太郎 KENTARO MATSUNAGA
R&D センター 下平 悠夏 HARUKA SHIMODAIRA
R&D センター 新上 浩 HIROSHI SHINJO
R&D センター 田野 健治 KENJI TANO

梁端拡幅部で圧着接合する形式のアンボンド PCaPC 梁部材の曲げせん断実験を実施した。梁主筋や圧着用の PC 鋼棒の鋼材量は変えずに拡幅部の長さを変えることで曲げ余裕度を変化させ、梁端部ではなく拡幅部先端で塑性ヒンジを発生させるヒンジリロケーション梁とした。

梁主筋の拡幅部内への定着長さを確保することで、拡幅部の損傷が抑制され、曲げ余裕度が 1 に近くても変形性能の優れた梁部材となることが明らかになった。

キーワード：アンボンド、ヒンジリロケーション、定着長さ、圧着、曲げ余裕度

Three unbonded precast prestressed concrete beams whose parameter was widened beam end length were constructed and tested. A hinge relocation beam that generates a plastic hinge at the tip of the widened part, not at the end of the beam, was used. By securing the development length of the longitudinal rebar into the widened part, the damage of the widened part was suppressed, and the beam member had excellent deformation performance even if the flexural capacity ratio was close to 1.

Key Words: Unbonded, Hinge-relocation, Development length, Assembled, Flexural capacity ratio

1. はじめに

アンボンドプレキャストプレストレストコンクリート（以下、アンボンド PCaPC）構造は大きな変形性能と高い復元性能を有しており、減衰は大きくないが、免震や制震構造と組み合わせることで、両者の構造的機能を分離できるため、地震時の損傷を抑制することができる。将来的にはプレキャスト部材をリユースすることも可能であり、LCCO₂ の削減に寄与できる構造種別の一つであると考えられる。しかし、免震基礎や免震デバイスを含めた建物全体のリユースは、現状では技術的なハードルが高い。そこで、本報告では、免震や制震構造と組み合わせずに、ヒンジリロケーションで減衰を付加させて耐震構造とした、アンボンド PCaPC 梁部材の曲げせん断実験について報告する。

2. 対象とする工法の概要

本報告で対象とする工法は、梁端部の拡幅部で圧着接合する形式のアンボンド PCaPC 工法（以下、本工法）であり、その概要を図-1 に示す。プレキャスト梁部材は端部に拡幅部を設けた、いわゆるダンベル型の梁である。アンボンド PC 鋼材を用いて、柱を介してこの拡幅部同士を圧着接合することで、架構を構築するものである。プレキャスト梁部材内には主筋とせん断補強筋が配されており、梁主筋は圧着面を貫通せず、機械式定着金物を用いて拡幅部内の圧着面の手前で定着されている。そのため、圧着面である梁端部は純粋なアンボンド PC、リロケート部（拡幅部の先端位置）は RC 断面である。プレキャスト梁部材を、無損傷でリユース、または多少の補修をしてリマニュファクチャリングする場合には、リロケート部の曲げひび割れ耐力および曲げ降伏耐力を補うために、PC 鋼より線などを用いて梁をプレテンシ

コンクリート部材とする場合もある。本報告では、塑性ヒンジを梁端部ではなく拡幅部先端で発生させるヒンジリロケーション梁を実験対象とした。プレキャスト梁部材と柱梁接合部の間には、母材よりも圧縮強度の大きい目地モルタルが打設される。

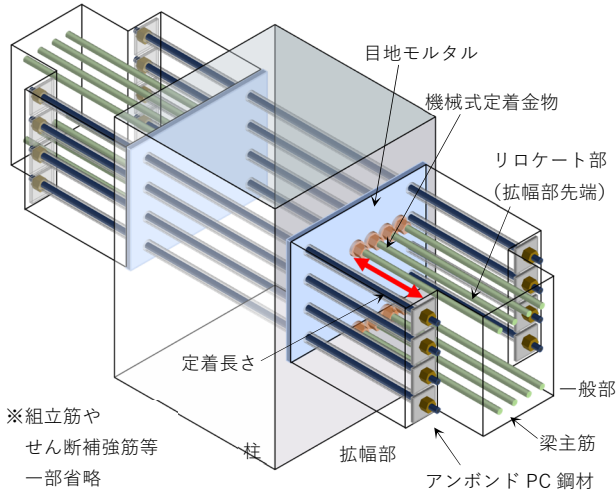


図-1 アンボンド PCaPC 工法の梁端の圧着部概要

3. 実験計画

(1) 試験体概要

試験体一覧を表-1 に、試験体形状および配筋を図-2 にそれぞれ示す。試験体は梁端に拡幅部を設けた変断面の片持ち梁 3 体であり、拡幅部の長さをパラメータとした。試験体の縮尺は約 1/2 であり、梁端部から荷点までのシアスパンは 1,400mm で共通である。梁主筋は梁端で機械式定着金物を用いて拡幅部内に定着し、S-1.3 の定着長さ（拡幅部先端から機械式定着金物の定着板の内側までの距離）のみ日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」¹⁾（以下、RC 規準）16 条および 17 条における必要定着長さ l_{ab} を両方満足していない。梁とスタブの間の厚さ 20mm の目地に無収縮モルタルを打設し、PC 鋼棒で拡幅部をスタブと圧着接合させた。拡幅部の梁せい方向の外周補強筋量は一般部と同等以上とした。PC 鋼棒のプレストレスによって拡幅部先端の入隅部に発生する梁幅方向の剥裂応力に対し、梁幅方向の外周補強筋量は文献²⁾から PC 鋼棒の有効プレストレ

表-1 試験体一覧

| 試験体名 | 一般部 | | | | 拡幅部 | | | | | | | 曲げ余裕度 | | | | |
|-------|------------|-------------|-------|-------------|------------|-------------|------------------------------|-----------------|----------------------|---------------|---------------|--------------------------------|-------------|-----|----|------|
| | 幅 b (mm) | せい D (mm) | 主筋 | 補強筋 | 幅 B (mm) | せい D (mm) | 拡幅部長 [定着端間距離 L_{pc}] (mm) | 定着長さ l_a (mm) | 必要定着長さ l_{ab} (mm) | | | | PC 鋼棒 | 補強筋 | | |
| | | | | | | | | | [l_a/l_{ab}] | | | | | 内周 | 外周 | 先端部 |
| S-1.3 | | | | | | | 260 [$L_{pc}=1425$] | 190 | 405 [0.47] | 324 [0.59] | 284 [0.67] | 2+2+2+2 - $\phi 17$ (C種) | 2-D6 @45 | | | |
| M-1.2 | 310 | 450 | 4-D19 | 2-D6 @50 | 590 | 450 | 350 [$L_{pc}=1515$] | 280 | 382 [0.73] | 306 [0.92] | 268 [1.04] | | | | | 1.19 |
| L-1.0 | | | | | | | 500 [$L_{pc}=1665$] | 430 | 421 [1.02] | 337 [1.28] | 295 [1.46] | | | | | 1.05 |

※1: RC 規準¹⁾16 条部材内定着の安全性確保に関する検討による必要定着長さ（標準フックを設けていないため、降伏強度を 2/3 倍しない）、※2: RC 規準¹⁾17 条 ($\alpha=1.25$) による必要定着長さ

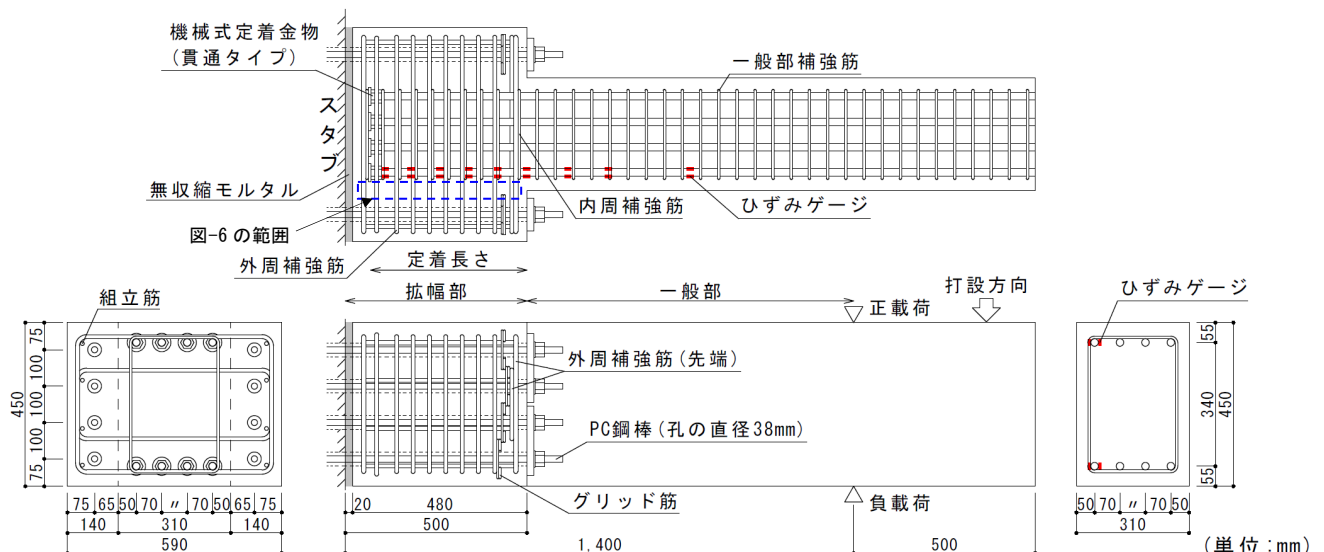


図-2 試験体形状と配筋

ス力の 0.2~0.3 倍の剥裂応力を想定して設定した。

梁端部の曲げ降伏（終局）耐力時せん断力 P_{ey} (P_{eu}) と拡幅部先端の一般部の曲げ降伏耐力時せん断力 P_{ry} の比率 P_{ey}/P_{ry} (P_{eu}/P_{ry}) を曲げ余裕度と称し、その値を 1.0 以上として、拡幅部先端で降伏させるヒンジリロケーションの梁とした。梁端部の曲げ降伏耐力は曲げ終局耐力の 0.9 倍とし、曲げ終局耐力は文献³⁾に基づき算出した。具体的には、引張側 PC 鋼材張力を竹本式（鉛直荷重用）⁴⁾、圧縮側 PC 鋼材張力を載荷開始時の引張力とし、コンクリートの圧縮応力分布には ACI ストレスブロック⁵⁾を用いた。ストレスブロック係数は $k_1=0.85-0.05(\sigma_B-28)/7$ ($0.65 \leq k_1 \leq 0.85$)、 $k_2=0.5k_1$ 、 $k_3=0.85$ とした。ここで、 σ_B はコンクリート圧縮強度(N/mm²)である。一般部の曲げ降伏耐力は、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の等価線形化法に基づく耐震性能評価型設計指針（案）・同解説」⁶⁾に基づいて算出した。

載荷開始時の PC 鋼棒の 1 本あたりの有効プレストレス（平均値）は、PC 鋼棒の規格降伏耐力の 0.65~0.70 倍を目標として、S-1.3 は 167kN、M-1.2 は 164kN、L-1.0 は 169kN とした。コンクリートの目標圧縮強度は 60N/mm² とし、粗骨材の最大寸法は 20mm である。プレストレスレベル η_p は約 0.08 である。コンクリートおよび鋼材の実験時の材料試験結果を表-2 および表-3 にそれぞれ示す。

(2) 載荷概要

載荷装置を図-3 に示す。反力床の上に固定したコンクリートブロックに試験体を 90 度回転させて設置し、スタブを反力床に固定した。梁が上端引張となる向きを正方向として、梁先端部を油圧ジャッキにより水平方向に正負交番で繰り返し載荷した。載荷点の水平変位 δ をシアスパン l で除して変形角 R を算出し、 $R = \pm 1/3200 \text{rad}$ を 1 サイクル、 $\pm 1/1600$ 、 $\pm 1/800$ 、 $\pm 1/400$ 、 $\pm 1/200$ 、 $\pm 1/100$ 、 $\pm 1/75$ 、 $\pm 1/50$ 、 $\pm 1/33$ 、 $\pm 1/25$ 、 $\pm 1/20 \text{rad}$ を 2 サイクルずつ載荷した。

4. 実験結果

実験値および計算値一覧を表-4 に、荷重 P -変形角 R 関係を図-4 に、最終破壊状況を写真-1 に、下端主筋（負載荷時）および外周補強筋のひずみ分布（図-2 の青破線で示す位置の材軸方向分布）を図-5 および図-6 にそれぞれ示す。梁端部の離間開始点を目視で確認することは困難であるため、表-4 および図-4 には記載しなかった。鋼材の降伏ひずみは降伏強度をヤング係数で除した値とした。いずれの試験体も圧着時に拡幅部先端の入隅部から生じた斜めひび割れが、変形角の増大に伴って材軸心付近まで伸展した。梁端部におけるすべりと

表-2 コンクリートおよびモルタルの材料試験結果

| 試験体 | 梁 | | | 目地モルタル | |
|-------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | 圧縮強度 (N/mm ²) | ヤング係数 (N/mm ²) | 割裂引張強度 (N/mm ²) | 圧縮強度 (N/mm ²) | ヤング係数 (N/mm ²) |
| S-1.3 | 63.1 | 36700 | 4.07 | 123 | 41000 |
| M-1.2 | 69.1 | 37400 | 4.18 | 126 | 42200 |
| L-1.0 | 59.5 | 34900 | 4.37 | 118 | 39400 |

表-3 鋼材の材料試験結果

| 径 | 鋼種 | 降伏強度 (N/mm ²) | 引張強度 (N/mm ²) | ヤング係数 (N/mm ²) | 伸び (%) |
|-----|--------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|--------|
| D19 | SD390 | 423 | 597 | 190900 | 21 |
| D6 | SD295 | 435 | 548 | 195100 | 20 |
| S10 | KSS785 | 844* | 1099 | 194600 | 11 |
| φ17 | C種1号 | 1171* | 1279 | 199900 | 12 |

※0.2%オフセット耐力

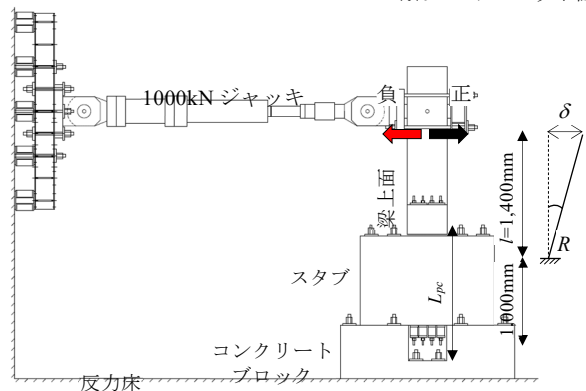


図-3 載荷装置

表-4 実験値と計算値一覧

| 試験体 | 実験値 (kN) | | | 曲げ耐力計算値 (kN) | | | | | | |
|-------|-------------|-------------|-----------|-------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------|-------------------|-------------------|
| | 一般部 (拡幅部先端) | | 最大荷重 | 梁端部 ³⁾ | | | 一般部 (拡幅部先端) ⁶⁾ | | 曲げ余裕度 | |
| | 曲げひび割れ | 主筋降伏 | | 離間 P_{ecr} | 降伏 P_{ey} ^{※1} | 終局 P_{eu} ^{※2} | ひび割れ P_{rcr} | 降伏 P_{ry} | P_{ey} / P_{ry} | P_{eu} / P_{ry} |
| S-1.3 | +48/-51 | +117 / -123 | +120/-126 | 99 | 194 | 215 | 41 | 151 | 1.28 | 1.42 |
| M-1.2 | +34/-45 | - / -140 | +165/-163 | 99 | 195 | 217 | 46 | 164 | 1.19 | 1.32 |
| L-1.0 | +40/-50 | +177 / -174 | +189/-203 | 99 | 201 | 224 | 50 | 192 | 1.05 | 1.17 |

※1: 曲げ降伏耐力 P_{ey} は曲げ終局耐力 P_{eu} の 0.9 倍。※2: 引張側 PC 鋼材張力は竹本式（鉛直荷重用）⁴⁾、圧縮側 PC 鋼材張力は載荷開始時の引張力。

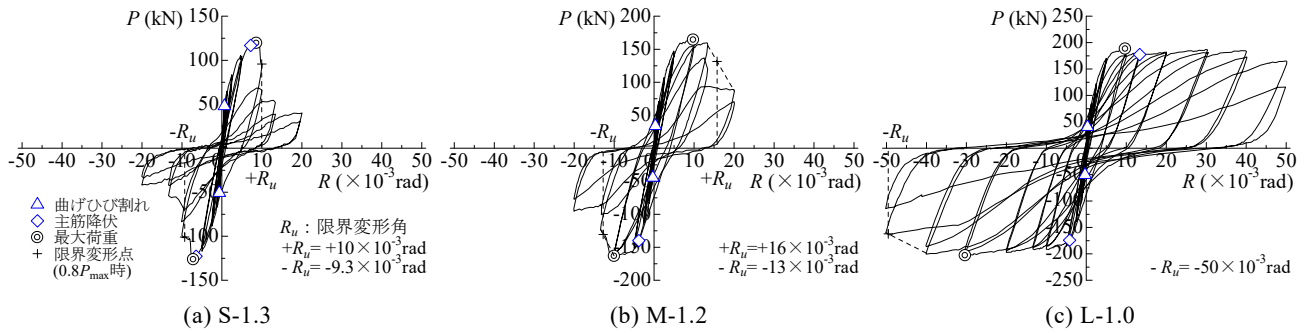


図-4 荷重-変形角関係

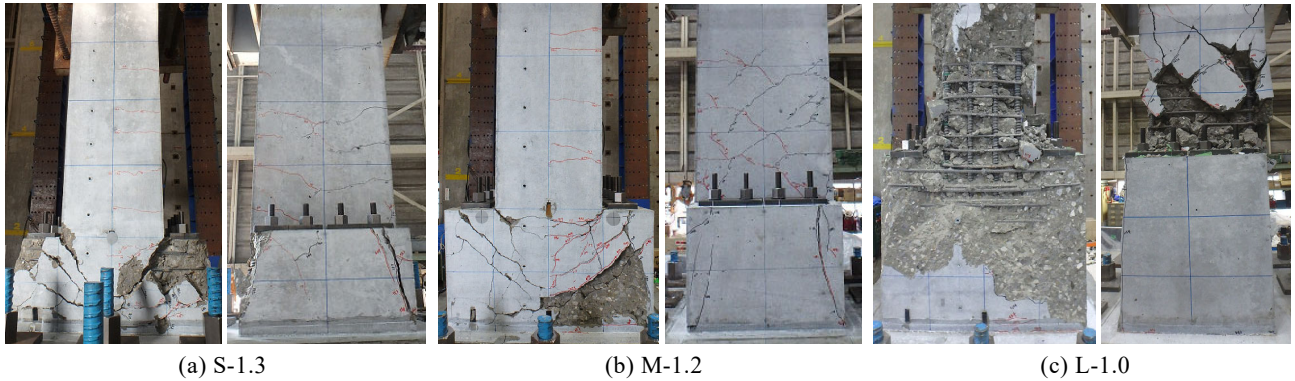


写真-1 最終破壊状況 (左: 梁下面, 右: 側面 (右側が梁上面))

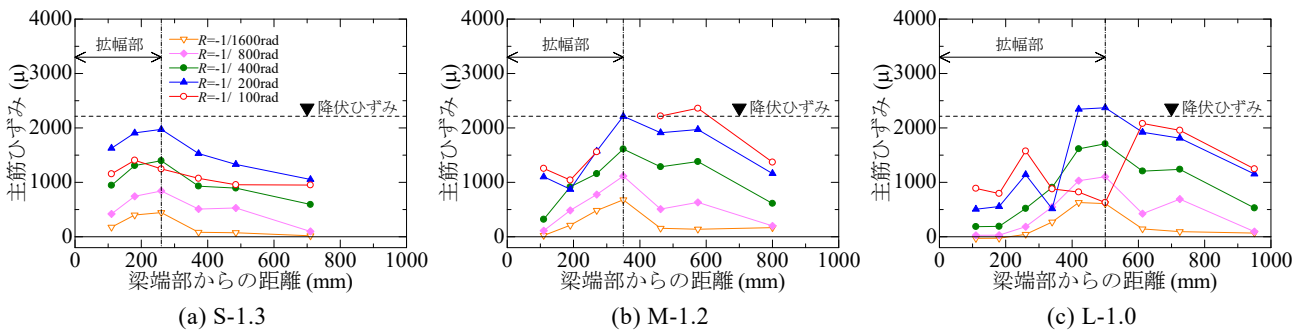


図-5 主筋のひずみ分布

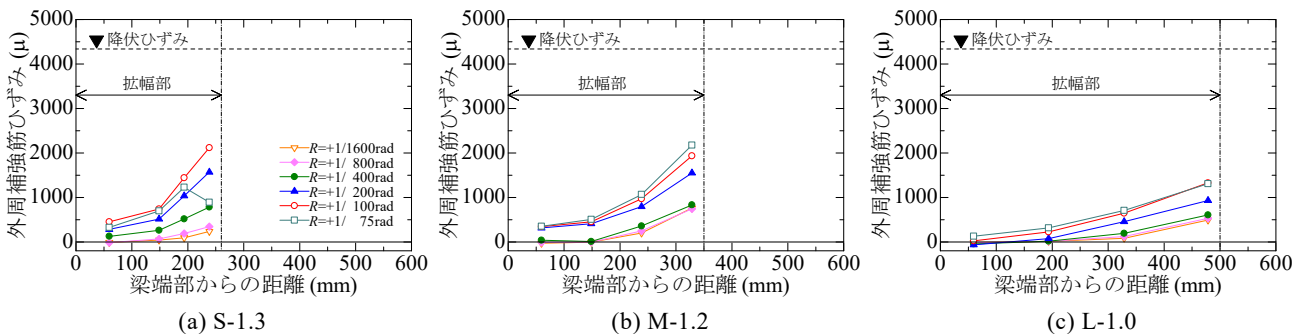


図-6 外周補強筋のひずみ分布

PC 鋼棒の張力変動は荷重終了時まで小さかった。外周補強筋のひずみは降伏ひずみに達することはなかったが、拡幅部先端に向かってひずみが大きくなった (図-6)。

S-1.3 では、拡幅部先端近傍に曲げひび割れが生じた後、梁端部の離間が目視で確認できた。入隅部から梁端部に向かって伸びる斜めひび割れが支配的であり、そのひび割れ幅が拡大し、早期に耐力が低下した。M-1.2 で

は、正荷時には主筋の引張降伏は確認されなかったが、片側の角部の主筋にのみひずみゲージを貼付しており (図-2)、他の主筋は降伏した可能性がある。R=+1/75 rad の荷重時に引張側主筋が拡幅部上面を押し上げるような破壊が見られ、耐力が低下した。L-1.0では、他の2体と比べて、主筋の梁端部近傍のひずみが荷重終了時まで大きくなり、機械式定着金物近傍の拡幅部の損傷は

少なく、主筋が拡幅部上面を押し上げるような破壊は見られなかった。

主筋のひずみは危険断面位置から大きくなり始めた後、拡幅部内のひずみも増大したことから、ヒンジ領域が拡幅部内にも拡大したと考えられる。拡幅部が短いほど梁端部近傍まで主筋のひずみが増大する傾向があり、拡幅部が長いほど優れた変形性能を示した。L-1.0 のように曲げ余裕度 P_{ey}/P_{ry} が 1.0 に近くてもヒンジリロケーションが成立したのは、曲げ余裕度を算定する P_{ey} の時点では、PC 鋼材が降伏していない想定で、梁端部の剛性がある程度残存しており、梁端部の耐力に余裕があるためと考えられる。以上より、主筋端部近傍の拡幅部の損傷が大きいほど早期に耐力低下したことから、曲げ余裕度を大きくするよりも、主筋の拡幅部内への定着長さを十分に確保し、特に入隅部から斜め方向に発生するひび割れを抑制することで曲げ降伏後の変形性能が改善すると考えられる。

5. まとめ

拡幅部の長さをパラメータとして、梁端拡幅部で圧着接合する形式のアンボンド PCaPC 梁の曲げせん断実験を実施した。梁主筋の拡幅部への定着長さを RC 規準 16 条および 17 条により算出された必要定着長さ以上確保することで、拡幅部の損傷は抑制され、曲げ余裕度の大きさに関わらず変形性能の優れた梁部材となった。

謝辞：京都大学大学院 谷昌典准教授には、本実験の実施および結果の検討に至るまで、多くのご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2018
- 2) 谷昌典，松永健太郎，田野健治：梁端拡幅部で圧着接合された PC 梁部材の定着部補強筋設計，第 30 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.171-176，2021.10
- 3) 日本建築学会構造委員会プレストレストコンクリート構造運営委員会：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) 竹本靖：アンボンド PRC 部材の曲げ終局時テンドン応力について，大林組技術研究所報，No.28，pp.49-54，1984
- 5) American Concrete Institute: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-19) and Commentary (ACI 318-19R), 2019
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の等価線形化法に基づく耐震性能評価型設計指針（案）・同解説，2019.3