

プレキャストセグメント工法による開削トンネルPC圧着接合部の挙動

(株)日本ピーエス 正会員 ○寺口 秀明
 大阪工業大学大学院 小田部 貴憲
 大阪工業大学 正会員 工学博士 井上 晋

1. はじめに

近年、プレキャストセグメント工法は工期短縮と品質向上の社会的要求に応えられる工法として採用が増加している。筆者らは、開削トンネル等の地下構造物にこのプレキャストセグメント工法の導入を検討している。この工法は、プレキャスト部材をプレストレスによる圧着接合で一体化させるものであるが、この種の構造の耐震性能を適切に評価するには接合部の挙動を精度よくモデル化することが重要である。特に動的解析を行う場合、PC圧着接合部をどうモデル化するかについては確立された手法が提示されていないのが現状である。そこで本研究では、動的解析時のPC圧着接合部のモデル化を目的として接合部を取り出したモデル供試体を用いて静的正負交番曲げ載荷実験を行った。ここでは、接合部におけるPC鋼材の配置や付着特性および目地モルタルの有無と変形特性の関係について報告する。

2. 実験概要

2-1. 想定構造物

本実験で想定する構造物は、図1に示すプレキャスト開削トンネル断面である。

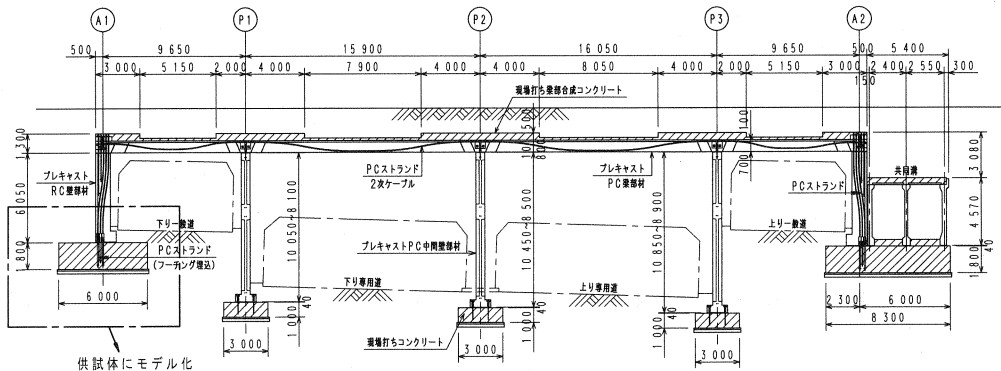


図1 プレキャスト開削トンネル断面図

2-2. 供試体

供試体は、図1の□で囲んだフーチングと端部壁部材との接合部を取り出した部分を1/3にモデル化し、図2に示す寸法で製作した。柱部分とフーチング部分を別々に製作したものを組み立て、PC鋼材を配置、緊張して一体化を図った。既往の研究より、変形は接合部に集中することが予想されるため、接合部のPC鋼材を降伏させないようにアンボンド区間(図2a)参照)を設けてその影響を検討した。PC鋼材の配置は、図2b)に示す集中配置と分散配置の2種類とした。集中配置は、φ17mmPC鋼棒を2本、分散配置は、φ11mmPC鋼棒を4本配置した。

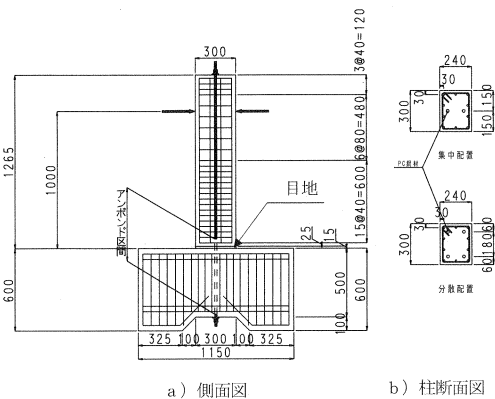


図2 供試体図

導入張力は、PC 鋼材の降伏荷重の 40%程度とし、アンボンド区間を設けた供試体を付着無、設けない供試体を付着有とした。また、目地の有無にも着目し、目地有りでは、15mm のモルタル目地を設け、目地無しではエポキシ樹脂を塗布してから接合した。載荷形式はひび割れ変位で正負各 1 回、以降はすべて漸増 3 回の繰り返しとした。供試体数は、計 6 体で、その諸元を表 1 に示す。なお、接合部のプレストレス量は、想定構造物の接合部応力度 (死荷重時) と同程度となるように決定した。

表 1 供試体諸元

供試体名	PC 鋼材配置	付着の有無	目地の有無	コンクリート強度 f'_{ck} (N/mm ²)	プレストレス量 σ_{pc} (N/mm ²)	最大荷重 (kN)		PC 鋼材	載荷形式
						計算値	実測値		
C-B-J	集中	有	有	24	2.78	42.8	50.6	C 種 1 号 ϕ 17 \times 2	漸増 3
C-U-J	集中	無	有	24	2.78	42.8	49.6	C 種 1 号 ϕ 17 \times 2	漸増 3
C-U-N	集中	無	無	24	2.78	42.8	51.0	C 種 1 号 ϕ 17 \times 2	漸増 3
D-B-J	分散	有	有	24	2.78	52.4	55.9	C 種 1 号 ϕ 11 \times 4	漸増 3
D-U-J	分散	無	有	24	2.78	52.4	54.2	C 種 1 号 ϕ 11 \times 4	漸増 3
D-U-N	分散	無	無	24	2.78	52.4	54.1	C 種 1 号 ϕ 11 \times 4	漸増 3

2-3. 使用材料特性

材料特性を表 2~4 に示す。なお、コンクリートは、呼び強度 24N/mm² のレディミクストコンクリートを使用した。実強度は表 4 に示す値となり、バッチ間で若干のバラツキが認められた。

表 2 PC 鋼材の材料特性

種類	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (G Pa)
C 種 1 号 ϕ 11	1362	1427	203
C 種 1 号 ϕ 17	1221	1258	202

表 4 コンクリート・目地モルタルの材料特性

供試体名	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	ヤング係数 (G Pa)
C-B-J	42.8	3.28	7.18	33.3
C-U-J	49.9	2.98	7.58	32.1
C-U-N	42.8	3.28	7.18	33.3
D-B-J	49.9	2.98	7.58	32.1
D-U-J	49.9	2.98	7.58	32.1
D-U-N	42.8	3.28	7.18	33.3
モルタル	65.1	—	—	30.4

表 3 鉄筋の材料特性

種類	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (G Pa)	適用
SD295D6	422	586	203	柱帯鉄筋
SD295D10	384	537	189	フーチング帯鉄筋
SD295D13	367	510	203	柱軸筋
SD295D16	338	497	199	フーチング主鉄筋

2-4. 載荷方法

載荷ステップを図 3 に、載荷方法を図 4 に示す。一般に降伏変位には「 δ_y 」が利用されるが、これは接合面に鉄筋が貫通しているか、PC 鋼材の付着が完全な場合に適用できる。しかし実際は、付着切れを起こすことが知られている。このため PC 鋼材が降伏しないことも想定することにし、荷重制御ではなく変位制御で行うものとし、分散配置ボンドタイプの供試体を基準とした。すなわちひび割れ発生変位 2mm で各 1 回載荷し、その後初降伏変位 16mm の 1/2 の 8mm を基本変位振幅 (= δ) とした。

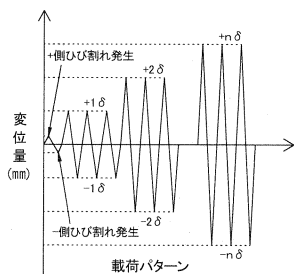


図 3 載荷ステップ

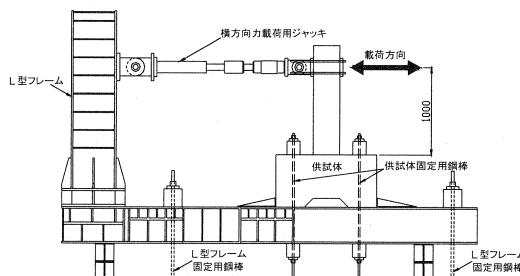
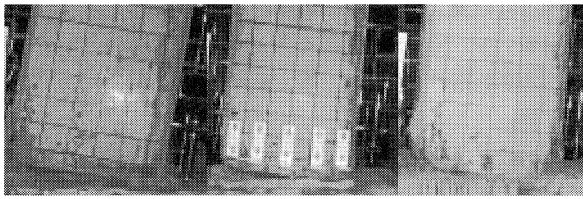


図 4 載荷方法

3. 実験結果

3-1. 損傷状況

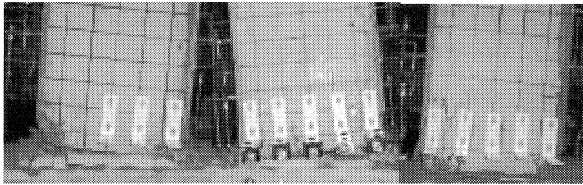
写真1に各供試体の損傷状況を、図5に載荷終了時の損傷及びひび割れ状況を示す。



C-B-J

C-U-J

C-U-N

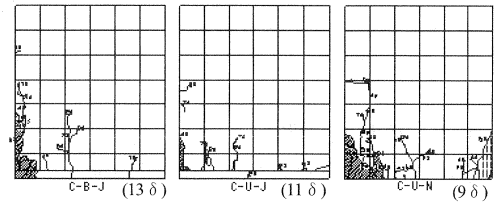


D-B-J

D-U-J

D-U-N

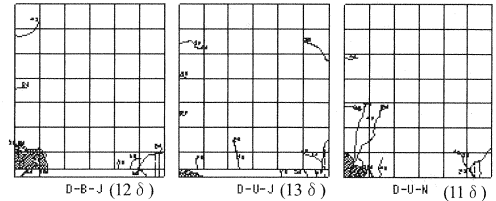
写真1 各供試体の損傷状況



C-B-J (13 δ)

C-U-J (11 δ)

C-U-N (9 δ)



D-B-J (12 δ)

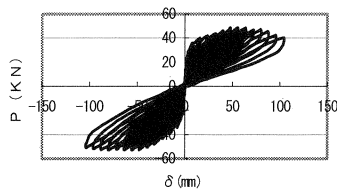
D-U-J (13 δ)

D-U-N (11 δ)

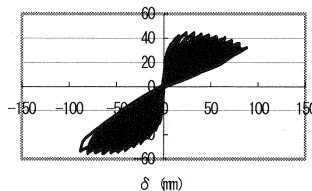
図5 載荷終了時の損傷及びひび割れ状況

3-2. 荷重-変位関係

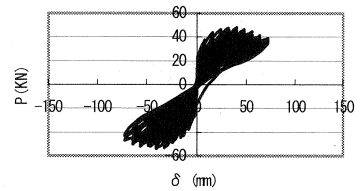
各供試体の載荷荷重と載荷点変位の履歴を図6に示す



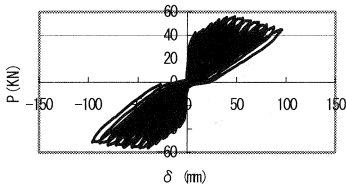
C-B-J



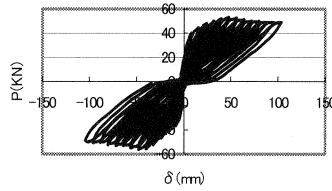
C-U-J



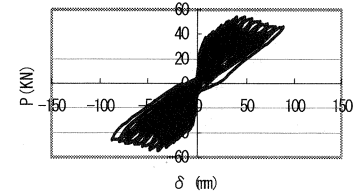
C-U-N



D-B-J



D-U-J



D-U-N

図6 荷重-変位関係

4. 考察

4-1. 損傷状況

損傷状況において、破壊は接合目地部に集中しており、目地部以外でのひび割れの発生はほとんど認められなかった。また曲率も測定したが目地の開口に変位が集中したため、柱部分には確認できる曲率はほとんど発生しなかった。

写真1・図5より PC 鋼材配置では、分散配置より集中配置の方が柱基部の破壊領域(圧壊・損傷している

領域)が大きくなる傾向が認められた。これは PC 鋼材の配置の影響により有効高さが十分とれず PC 鋼材が降伏する前にコンクリート圧縮領域が終局をむかえたためと考えられる。

PC 鋼材付着の有無では、付着有の方が若干破壊領域が大きくなった。また、目地有に比べ目地無の破壊領域が大きくなっており、荷重-変位関係で最大荷重後の荷重低下の大小との相関が見られた。これは、目地モルタルがクッションとなり、コンクリート圧縮領域の中立軸からの距離を大きくとれた結果と考えられる。それを裏付けるものとして、破壊後の目地モルタルを観察すると、柱と接する側の接合面がわずかに曲面となっていることが見受けられた。

4-2. 荷重-変位関係

荷重-変位関係において PC 鋼材配置については、集中配置は強い原点指向性を示したのに対し、分散配置では載荷荷重が大きくなると残留変位が生じるようになった。これは PC 鋼材の降伏が原因と考えられる。付着の有無については明確な差は認められなかった。これはボンドタイプでも接合部の開口にともない PC 鋼材が接合面の上下で付着切れを起こしアンボンド部分が形成されたためと考えられる。

目地の有無については、有に比べ無の方が最大荷重後の荷重低下が顕著に現れた。

5. 解析

5-1. 剛体モデル法^{1), 2)}

剛体モデル法は、プレキャスト部材をアンボンド PC 鋼材で圧着接合した部材を主な対象に提案された耐力計算法であり、プレキャスト部材は剛体回転を生じ部材の変形はその接合面において中立軸を中心とした回転により生じるとしたものである。その概要を以下に示す。

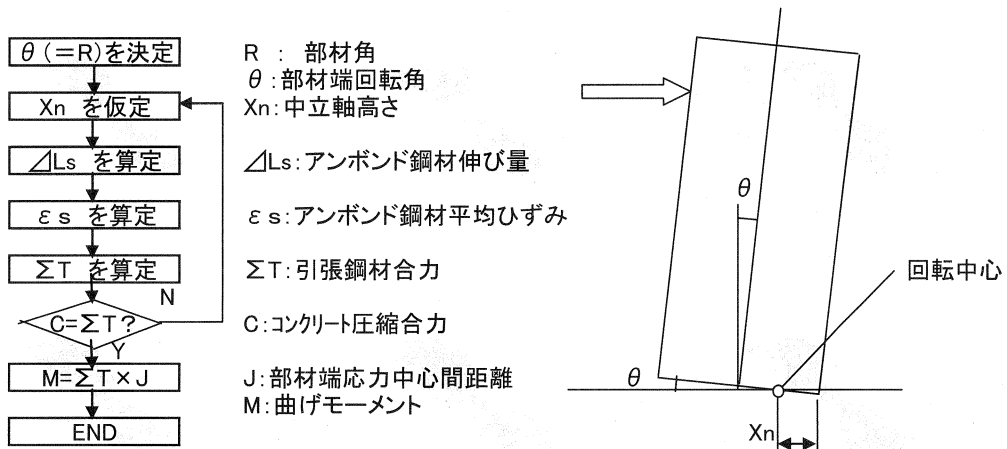


図7 剛体モデル法概要

表5 解析法による中立軸と最大荷重の比較

	分散配置			集中配置		
	ファイバー	剛体モデル	実験値	ファイバー	剛体モデル	実験値
Xn (mm)	27.6	30.9	—	57.6	82.6	—
最大荷重 (kN)	57.5	57.4	54.2	65.5	65.7	49.6

5-2. 解析の比較

表5には、分散配置と集中配置の中立軸と最大荷重について、剛体モデル解析で計算した結果と、その値を確認する意味で、曲げ解析で一般的に用いられるファイバーモデル解析の結果およびアンボンド目地有りタイプの実験値を示す。計算には実験に用いた供試体の実材料特性を使用した。

ファイバーモデル解析は平面保持を仮定して計算するため、PC 鋼材は完全付着を前提としている。一方剛体モデル解析では、アンボンド区間 550mm を考慮して算出したものである。

計算結果をみると解析方法の違いにより中立軸 X_n にはやや差があるが、最大荷重はほぼ同等となった。

5-3. 解析結果と実験結果の比較

解析結果と実験結果を比較すると、最大荷重において分散配置の実験値は解析値の 95%であったのに対し集中配置の方は 75%であった。解析で集中配置の最大荷重が分散配置のそれより大きくなったのは、使用した PC 鋼棒径が太いため、増加張力 T を大きくとれた結果と考えられる。一方、実験では解析よりかなり最大荷重が小さくなったので原因を考察することにする。まず耐力決定プロセスについてみると今回の集中配置の場合は、PC 鋼材が降伏荷重に達する分散配置と違い PC 鋼材が降伏に達する前にコンクリートの圧壊で耐力が決定されることになる。このため実験結果には、実験に使用した供試体のコンクリート強度が大きく影響すると考えられる。また、変形に影響を与える PC 鋼材の付着強度が分散配置より太径のため低下したことも原因と考えられる。

つぎに剛体モデル解析で計算した中立軸高さを実験値から推定した中立軸高さを表 6 に示す。剛体モデル解析では、アンボンド PC 鋼材張力とコンクリート圧縮合力が釣合うまで中立軸を変動させることで曲げ耐力が計算できるが、この中立軸の値の妥当性を確認するために行ったものである。

表より分散配置、集中配置どちらも変位の増加にしたがって中立軸高さが小さくなっていくことがわかる。ただし 3 δ 時において分散配置では、剛体解析の方が実験推定値より中立軸高さが小さいが、集中配置では逆に大きくなっている。

表 6 中立軸高さの比較

	分散配置 (D-U-J)				集中配置 (C-U-J)			
	実験より推定値			剛体	実験より推定値			剛体
	1 δ	2 δ	3 δ	3 δ	1 δ	2 δ	3 δ	3 δ
X_n (mm)	64	50	44	30	80	71	65	75
荷重 (kN)	38.6	43.0	47.4	55.5	35.6	42.2	45.1	61.0

5-4. 荷重-変位関係

図 8 と図 9 は、アンボンドタイプの分散配置および集中配置について、剛体モデル解析の解析値と実験値さらには、剛体モデル解析に PC 鋼材の付着切れとかぶりコンクリートの剥離等を考慮したもの进行比较したものである。

分散配置および集中配置のいずれもが、実験値が解析値を下回っている。これは、先のところでも述べたように、PC 鋼材の付着切れと圧縮部のかぶりコンクリートの剥離等による影響と考えた。その影響を確認するため剛体モデルにおいて、PC 鋼材の付着切れはアンボンド区間を長くすることにより、またかぶりコンクリートの剥離については有効高さを小さくすることにより考慮することとした。その結果、グラフからもわかるように、解析値 (付着切れ等考慮) と実験値とが非常に整合することがわかる。付着切れについては既往の研究から、PC 鋼材の種類によって大きく性能が違うことが報告³⁾ されており、付着応力を定量的に把握することが重要と考える。

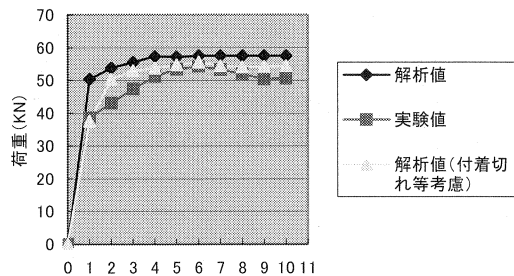


図 8 荷重-変位関係 (分散 D-U-J)

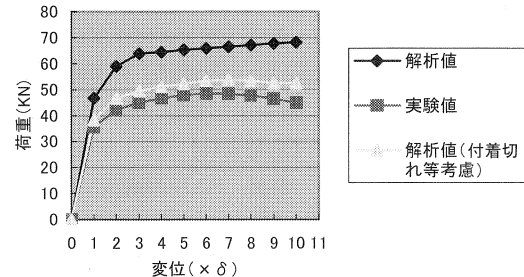


図 9 荷重-変位関係 (集中 C-U-J)

5-5. 動的解析時圧着接合部のモデル化

本実験で想定した構造物でレベル2地震動の動的解析を行ったところ、図10に示す履歴⁴⁾であった。最大回転角で 1.8×10^{-4} radであり、今回行った実験の 1δ の約40分の1である。オーダーとしては非常に小さいので、図10に示す完全弾塑性履歴モデルでよいと考える。

ただし今回の実験で得られた履歴は、図11に示す原点指向型の非線形履歴であったので、接合部の回転角が実験で得られた非線形域となる 1.0×10^{-2} radを超える可能性がある場合はこのモデルを適用するのがよいと考える。

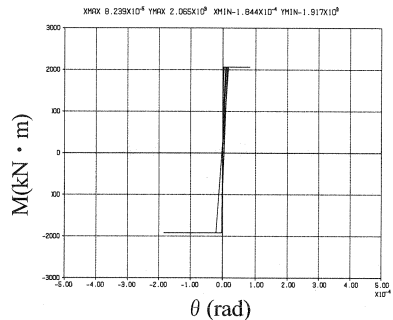


図10 完全弾塑性履歴モデル

6. まとめ

PC鋼材の付着特性、配置、目地の有無をパラメータとしたPC圧着接合の静的正負交番曲げ載荷実験を行った結果、得られた知見は以下のとおりである。

- 1) PC鋼材の付着特性について、今回使用した丸形PC鋼棒の付着性が異形タイプの20~30%程度と低いこともあり、ボンドタイプ、アンボンドタイプで明確な差は認められなかった。
- 2) PC鋼材の配置について、分散配置より集中配置のほうがより強い原点指向性を示した。分散配置の場合は、設計で想定変形量が多い場合、PC鋼材を降伏させないことが重要である。
- 3) 目地モルタルの有無について、モルタル有りの方が部材の損傷が抑えられることが確認できた。
- 4) 動的解析等地震時の挙動を解析する場合、PC圧着接合部は接合部の回転角が 1.0×10^{-2} rad程度までのときは完全弾塑性モデルおよび原点指向型の非線形履歴モデルどちらでもよいが、それ以上の回転角が予想される場合は、原点指向型の非線形履歴モデルとするのがよい。

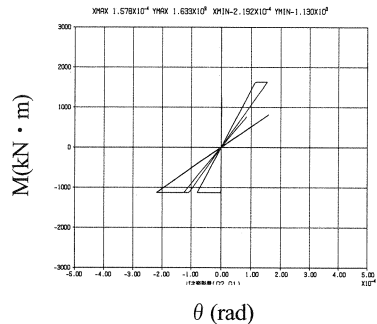


図11 原点指向型非線形履歴モデル

[謝辞]

本実験の実施に際して、当時大阪工業大学大学院の田辺睦氏（現：㈱ピーエス三菱）はじめ井上研究室の学生の方々には多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 岡本 晴彦、太田 義弘：切欠き付きプレキャスト梁による合成梁を用いたアンボンド PC 梁・柱圧着架構の地震荷重下における力学性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2, pp. 1003-1004, 2000. 9
- 2) 日本建築学会：PC 部材力学挙動予測法小委員会、プレストレスト（鉄筋）コンクリート構造部材の設計法—現状と将来—【追補資料】、2001年3月
- 3) 岡本 晴彦、是永 健好：PC 圧着構造における最近の研究動向、プレストレストコンクリート Vol. 45, No. 4, July 2003
- 4) 安藤 功ほか：プレキャストセグメント工法を用いた開削トンネルの耐震性の検討、土木学会第58回年次学術講演会講演概要集、V334、2003年9月