論文　接合部を有するPC梁のねじり載荷試験と有限要素法解析

何　海明*1・清宮　理*2・白　済鉉*3・増田　明仁*1

要旨：ねじりを受けるプレストレストコンクリート梁（PC梁）の力学的挙動については，不明な点が多いので，静的ねじり載荷試験により基礎的な力学性状を検討した。接合部の有無，せん断補強筋の有無，導入プレストレス量などを主要因子とした小型試験体によるPC梁のねじり試験を行い，その結果から，ねじりを受けるPC梁の変形，ひび割れ，破壊などの基礎的な力学性状を把握した。また，接合部なしの試験体を対象に，3次元の非線形有限要素解析を行い，試験結果との比較検討を行ったところ，最大荷重まで，両者が良く一致した。

キーワード：ねじり，PC梁，接合部，せん断補強筋，載荷試験，有限要素法

1. はじめに

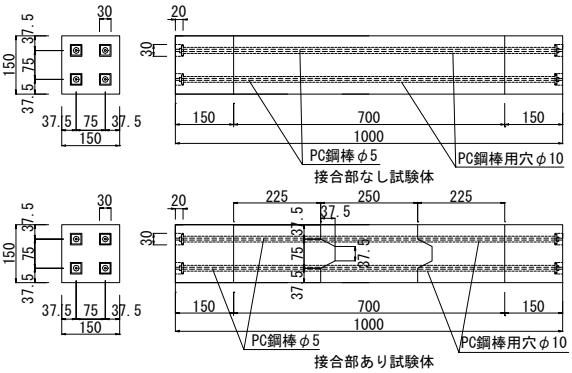
従来コンクリート構造におけるねじりの影響は2次的なものとして一般に無視されてきたが，構造物の大型化や地盤の不等沈下などにより，この影響を考慮しなければならない場合が多くなってきた。例えば，PCセグメント工法式による沈埋トンネル[1)]，共同溝等では，軟弱地盤での不等沈下などにより無視できないねじりモーメントが作用する場合がある。この時セグメント間の接合部の変形[2)]，ひび割れ，破壊などの力学性状を検討する必要がある。また，ねじりを受けるPC梁の力学的性質は曲げ，軸圧縮を受けるPC梁に比べてまだ不明な点が多い。

そこで，本論文では，接合部の有無，せん断補強筋の有無，導入プレストレス量などを主要因子としたPC梁のねじり試験を行い，試験体の変形，ひび割れ，破壊などの力学性状を把握した。なお，汎用プログラム(DIANA)で材料非線形を考慮した有限要素解析を行い，試験結果との一部比較検討を行った。

2. 試験概要

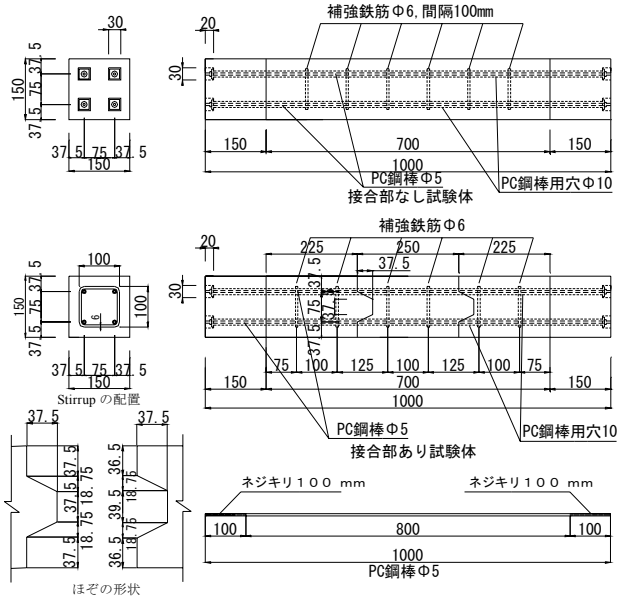
2.1 試験体概要および試験要因

試験体の概要を**図－１，図－２**に，試験体のケース数を**表－1** に示す。接合部の有無，せん断補強筋の有無，導入プレストレス量，ボンド，アンボンドの要因より計 18 体の試験体を製作した。いずれの試験体の基本寸法は，断面 150×150mm で，長さ 1000mm とした。PC鋼棒はSBPRのφ5をφ10のシース穴にかぶり32.5mmで4本を配置した。せん断補強筋はSR295のφ6を100mm間隔で配置した。コンクリートは普通コンクリートを用い，載荷試験時に強度試験を実施した。コンクリートへの導入プレストレス量は0.0,1.0, 1.5, 2.0N/mm^{2}の4種類とした。接合部は薄い鋼製型枠で区切ってコンクリート



図－１　せん断補強筋無し試験体（単位 mm）

*1 早稲田大学大学院　理工学研究科建設工学専攻　（正会員）
*2 早稲田大学　理工学部建設工学科教授　工博　（正会員）
*3 早稲田大学　理工学部建設工学科助手　工博



図－２　せん断補強筋有り試験体（単位 mm）

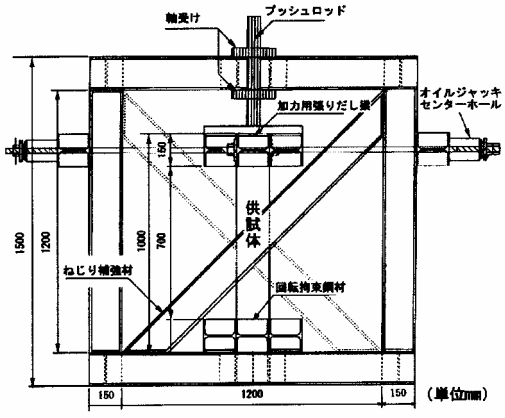
表－１　試験体のケース数

試験体 No.	接合部	せん断補強筋	プレストレス (N/mm^2)	グラウト注入	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
1	無し	無し	0	無し	28.0	2.83
2	無し	無し	1.0	無し	28.0	2.84
3	無し	無し	2.0	無し	28.1	2.86
4	無し	無し	0	有り	28.1	2.87
5	無し	無し	1.0	有り	28.2	2.89
6	無し	無し	2.0	有り	28.3	2.91
7	有り	無し	0	無し	28.3	2.91
8	有り	無し	1.0	無し	28.4	2.93
9	有り	無し	2.0	無し	28.4	2.93
10	有り	無し	0	有り	28.5	2.94
11	有り	無し	1.0	有り	28.6	2.95
12	有り	無し	2.0	有り	28.6	2.96
13	無し	有り	0	無し	25.8	2.73
14	無し	有り	1.0	無し	26.1	2.74
15	無し	有り	1.5	無し	26.3	2.76
16	有り	有り	0	無し	26.6	2.78
17	有り	有り	1.0	無し	26.8	2.80
18	有り	有り	1.5	無し	27.1	2.81

を打設し，表面は無処理である。接合部の形状および詳細寸法は**図－２**に示す。

2.2　載荷方法および測定方法 [3) 4)]

図－３に載荷装置の概要を示す。載荷方法として，上部支圧板の張りだし梁の載荷治具を介して油圧ジャッキにより加力し，両端に大きさが等しく方向が逆向きのねじりモーメントを与えた。ジャッキによる力により試験体に加えられる偶力の腕の長さ L は，0.5m とした。すなわち，ジャッキにより大きさ P の荷重を加えることによって，試験体に加えられるねじりモーメントの大きさは，P・L（kN・m）である。載荷の時，二台のジャッキの引き込み量がほぼ等しくなるように注意しながら，静的に荷重を単調増加させた。試験体にねじりを加え，ひび割れが生じた載荷状況を**図－４**に示す。

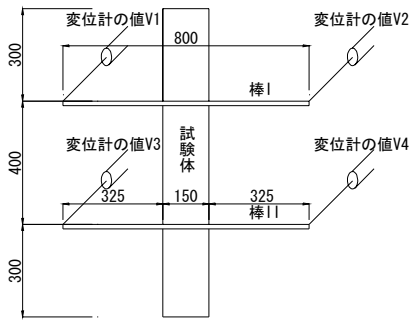


図－３　載荷装置の概要（単位 mm）

図－４　載荷状況

図－５にねじり率の計測するための変位計の設置位置を示す。V_1 と V_2 の変位の差，V_3 と V_4 の変位の差からそれぞれの回転角を求め，これらの回転角度の差から，単位長さあたりの回転

角度の変化量としてのねじり率を求めた。試験体のコンクリート表面には三軸のひずみゲージ（接合部無し試験体に 6 点，接合部有り試験体に 12 点），PC 鋼棒には，一軸ひずみゲージを 2 枚 1 組として PC 鋼棒の中央（測点 2）と 1/4 の所（測点 1）の 2 箇所，せん断補強筋には，一軸ひずみゲージ 1 枚を 6 本のせん断補強筋の一辺の中央に貼付し（S－1～S－6），コンクリートと鋼材のひずみ量を測定した。



図－５　ねじり率の計測

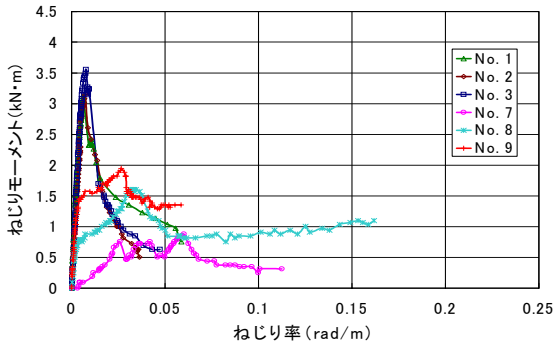
3. 試験結果

3.1 ねじりモーメントとねじり率

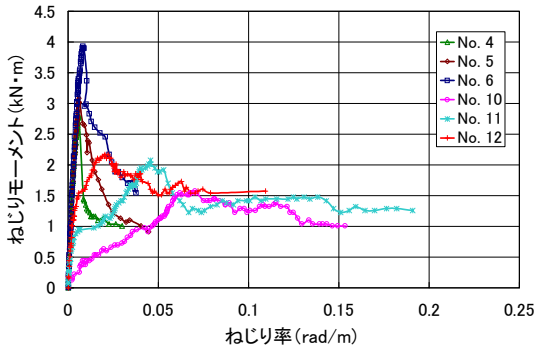
表－２に試験結果の一覧表，**図－６**にせん断補強筋無し，アンボンドの試験体，**図－７**にせん断補強筋無し，ボンドの試験体，**図－８**にせん断補強筋有り，アンボンドの試験体のねじりモーメントとねじり率の関係をそれぞれ示す。プレストレス導入量が増すとともに最大ねじりモーメントはいずれの試験体においても増す結果がでた。接合部無し試験体では，15%～26%大きくなり，接合部有り試験体では，付着の有無によりかなり異なった。接合部無しの試験体では，ねじりモーメントとねじり率はおおよそ比例関係を保ちながら増加し，その後も傾きがやや緩やかになりつつも増加した。曲線の傾きが緩やかになった時点に，微小なひび割れが発生し始め，試験体のねじり剛性が低下し，曲線の傾きが緩やかになったと考える。また， この段階においては，ひずみ量が小さいので，鉄筋によって分担されるねじり抵抗は，コンクリート断面の分担するねじり抵抗に比較すると無視できると考えた。載荷荷重は鉄筋の影響を無視したコンクリート断面に弾性理論式を適用して求

表－２　試験結果一覧表

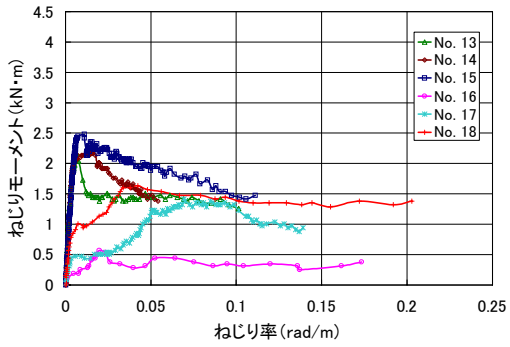
試験体 No	最大ねじりモーメント kN・m	ひび割れ発生ねじりモーメント kN・m	最大荷重時のねじり率 rad/m	初期ねじり剛性 kN・m^2	破壊の状況
1	2.80	2.08	0.00625	727.02	ひび割れ発生後，脆性的に破壊
2	3.08	2.66	0.00725	578.29	ひび割れ発生後，脆性的に破壊
3	3.55	3.13	0.00766	599.30	ひび割れ発生後，脆性的に破壊
4	3.11	2.35	0.00600	710.39	ひび割れ発生後，脆性的に破壊
5	3.14	2.52	0.00600	710.79	ひび割れ発生後，脆性的に破壊
6	3.93	3.42	0.00822	695.01	ひび割れ発生後，脆性的に破壊
7	0.88	0.48	0.06016	23.81	接合部でのコンクリートのせん断破
8	1.60	1.16	0.03128	307.86	接合部でのコンクリートのせん断破
9	1.95	1.79	0.02666	549.34	接合部でのコンクリートのせん断破
10	1.57	1.51	0.07028	35.32	接合部でのコンクリートのせん断破
11	2.07	1.57	0.04563	316.47	接合部でのコンクリートのせん断破
12	2.17	1.73	0.02209	557.79	接合部でのコンクリートのせん断破
13	2.17	1.67	0.00650	681.11	ひび割れ発生後，脆性的に破壊
14	2.20	1.76	0.01613	579.82	ひび割れ発生後，脆性的に破壊
15	2.48	1.92	0.01094	669.01	ひび割れ発生後，脆性的に破壊
16	0.57	0.55	0.01975	26.05	接合部でのコンクリートのせん断破
17	1.41	1.31	0.06941	199.18	接合部でのコンクリートのせん断破
18	1.63	1.60	0.04225	299.60	ねじり率 0.2 まで載荷荷重ほぼ保持



図－６　ねじりモーメントとねじり率の関係
（せん断補強筋無，アンボンド）



図－７　ねじりモーメントとねじり率の関係
（せん断補強筋無，ボンド）

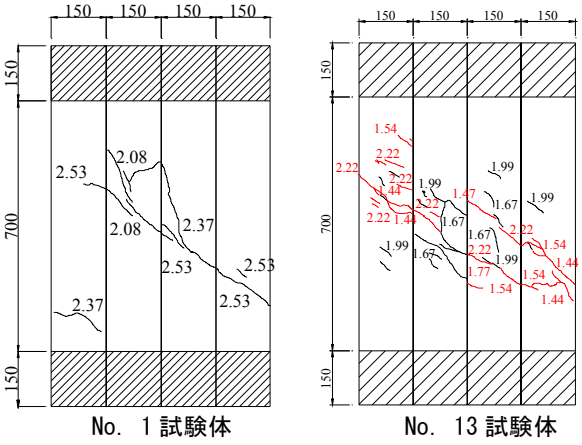


図－８　ねじりモーメントとねじり率の関係
（せん断補強筋有，アンボンド）

めた値とほぼ一致した。せん断補強筋無しの試験体は最大荷重を境にねじりモーメントは急激に減少し，ひび割れの伸展と伴って，耐力を急激に失った。一方，せん断補強筋有りの試験体は最大荷重を超すと，せん断補強筋の働きで，ねじりモーメトがせん断補強筋無しの試験体よりはるかに緩やかに減少し，ある程度落ちた後，大きさを保ちながらねじり率のみが増加を続けて，一定の残存耐力を持つことがわかった。接合部有り試験体では，プレストレス導入量の有無によって，荷重-ねじり率関係が異なり，最大荷重まで曲線が連続せず，段差を生じた。主に接合部の遊間の影響と接合部でのひび割れによる剛性の大きいな低下が原因と考える。せん断補強筋有りのNo. 18試験体のみは最大荷重を超えてもねじりモーメントがあまり落ちずに，ねじり率の増加を続けた。接合部有りの試験体は最大荷重を超すと接合部が破壊し，ねじりモーメントが急激に減少し，破壊に至った。

3.2　ひび割れ発生状況および破壊状況

図－９に接合部無し，せん断補強筋無しの試験体 No. 1 と接合部無し，せん断補強筋有り試験体 No. 13 のひび割れ図を示す。接合部無しの各試験体の最終破壊状況はほぼ同じパターンである。最大荷重付近に肉眼で観測できるひび割れが発生し，位置はほぼ試験体の中央であった。接合部無し，せん断補強筋無しの試験体では，

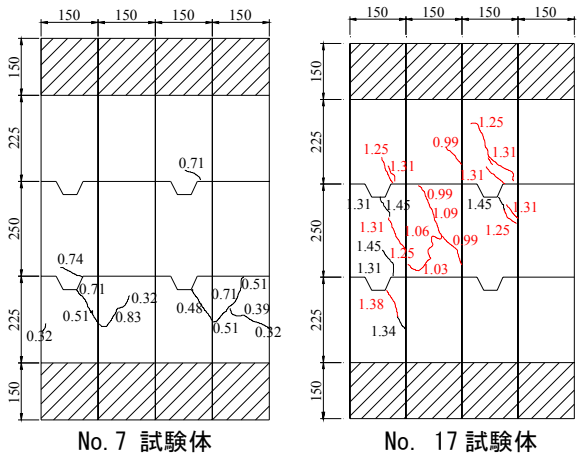


図－９　接合部無し試験体のひび割れ展開図

上記のひび割れが発生後，載荷と伴って，ひび割れが進展し，最後は試験体の 4 面につながって，破壊に至った。接合部無し，せん断補強筋有りの試験体では，上記のひび割れが発生した直後，試験体の 4 面にわたって，真ん中付近に集中した数多くのひび割れが発生し，載荷と伴って，各ひび割れも進展し，最後に試験体の 4 面に貫いたひび割れが形成し，終局を迎えた。載荷試験から，プレストレスの導入量によって，

ひび割れの方向が変わるという現象が観測された。プレストレス導入量が 0N/mm^2 の試験体のひび割れの方向は試験体の軸方向との角度がほぼ 45° であり，導入量が増すと，試験体の軸方向との角度が 40° と小さくなった。これは，プレストレスの導入により試験体における主応力の方向が変化したと考えられる。ボンドの試験体およびアンボンドの試験体に関しては，ボンドの試験体は同一条件のアンボンドの試験体に比し，最大ねじりモーメントが大きく，特に接合部有り試験体では，ひび割れも多く，力学的性能が上昇することが明らかになった。

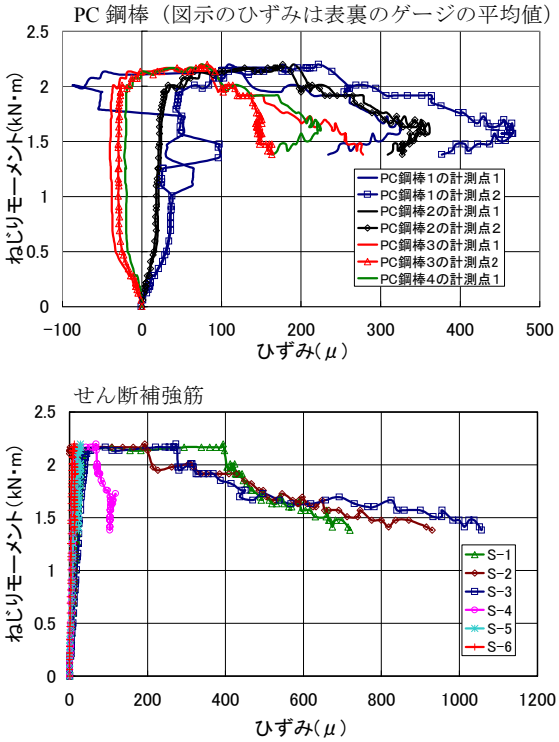
一方，接合部有りの試験体では，ひび割れ発生状況および破壊状況はプレストレス導入量，付着の有無，せん断補強筋の有無により，それぞれ異なった。特に，プレストレス導入量は試験体への影響が著しい。導入量が 0N/mm^2 の試験体の最終の破壊状況はほぼ同じである。ひび割れが接合部に発生し，伸展して，接合部の破壊で耐力を失った。接合部以外の箇所にはひび割れは殆ど発生しなかった。プレストレスの導入により，接合部と接合部の摩擦力が増加する。これにより，ねじりモーメントに対する抵抗は接合部だけでなく，試験体全体となる。ひび割れは試験体全体にわたって発生し，耐力も大幅に上昇する。**図－１０**に接合部有り，せん断補強筋無しの試験体 No. 7 試験体と接合部有り，せん断補強筋有りの試験体 No.17 のひび割れ図を示す。



図－１０ 接合部試験体のひび割れ展開図

3.2 鋼材のひずみ量

図－１１に No.14 試験体の PC 鋼棒，せん断補強筋のねじりモーメントーひずみ図を示す。PC 鋼棒のひずみ量は，各試験体において，最初の載荷段階ではほんの少ししか伸びなかった，そして，最大荷重の付近にひずみ量が大幅に増加した。ただし，載荷終了までは，大きいなひずみ量が計測されなかった。また，ボンドの試験体の PC 鋼棒のひずみ量がアンボンドの試験体よりかなり大きいことがわかった。せん断補



図－１１ No. 14 試験体の PC 鋼棒とせん断補強筋のねじりモーメントーひずみ関係図

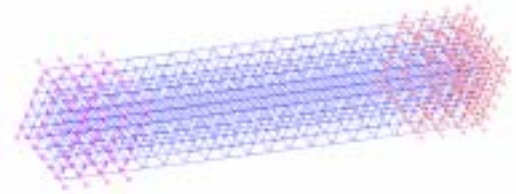
強筋のひずみ量は，最初の載荷段階では PC 鋼棒と同じように，値が小さく，最大荷重の付近からひずみ量が大幅に増加し，載荷終了まで大きいなひずみ量が出た。ねじりモーメントの分担に大きいな役割を果した。

4. 有限要素法による解析

4.1 解析モデルおよび材料特性

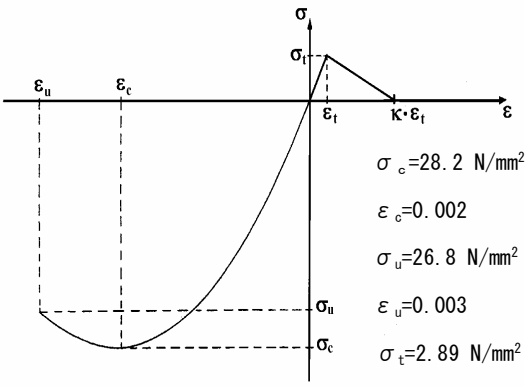
本論文では，接合部無しでボンドの試験体を対象に，材料の非線形を考慮した 3 次元有限要素法解析を行った。**図－１２**に解析モデルを示

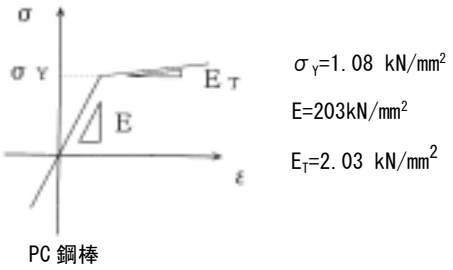
す。使用する要素の種類は，コンクリートにソリッド要素（要素数 500）を，PC 鋼棒には鉄筋



図－１２　解析モデル

要素（要素数 20）を用いた。図－１３にコンクリートと鋼材の応力－ひずみ関係を示す。PC 鋼棒は降伏強度に達するまではヤング係数の弾性挙動をとり，それ以降はヤング係数の 1/100 の剛性で直線的に応力が増加していくバイリニアモデルとした。部材にねじりモーメントの与え方は，試験と同じように，両端から 150mm の範囲で，固定端には X，Y，Z 三方向に拘束をかけ，自由端となる側の 4 面に分布荷重をかけた。

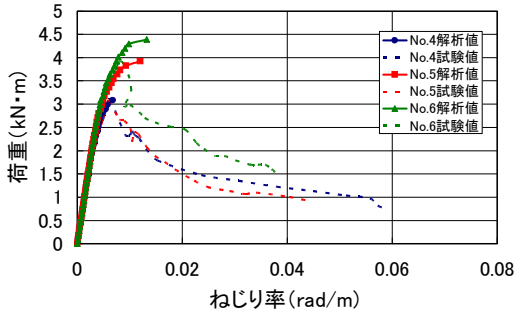




図－１３コンクリートと鋼材の応力－ひずみ関係

4.2　解析結果と試験結果との比較

図－１４にねじりモーメントとねじり率の曲線の試験値と解析値の比較図を示す。No. 4 試験体は試験値と解析値は最大荷重まで良く一致している。No. 5 試験体と No. 6 試験体は，ねじり剛性（曲線の傾き）がほぼ一致したが，解析の値が試験の値より高い結果が出た。



図－１４　試験値と解析値の比較図

5.　まとめ

本論文ではねじりを受ける PC 梁の挙動を把握するため，研究の第一段階として実行した基礎的な載荷試験結果を主に述べている。試験結果より，以下の結論が得られた。(1)プレストレス量が増加すると，ねじり耐力は 14%~26%上昇した。接合部有り試験体にはより効果的であった。(2)接合部を有する PC 梁のねじり耐力は接合部無しの PC 梁より低かった。低下率はプレストレス量 0 N/mm^2 で付着無しの場合は接合部無しの PC 梁耐力の 2～3 割程度で，プレストレス量 0 N/mm^2 で付着の場合は 5 割程度で，プレストレス量有りで付着無しの場合は 5～6 割であった。(3)アンボンド PC 梁はボンド PC 梁より，最大荷重と鋼材のひずみ量が小さく，力学的に性能が落ちた。

参考文献

1)米倉　聡，他：プレキャストセグメント構造沈埋トンネルのねじれに対する検討，土木学会第 55 回年次学術講演会，V-515，2000

2)石橋　重幸，他：PC で連結したブロック梁の耐力性状，土木学会第 55 回年次学術講演会，V-529，2000

3)白　済鉉，清宮　理：鋼部材と合成部材のねじり載荷試験と設計法との比較，鋼構造年次論文報告集，第 7 巻，pp.217-224，1999

4)何　海明，白　済鉉，清宮　理：接合部を有する PC 梁のねじり載荷試験，土木学会第 57 回年次学術講演会，V-612，2002