

実験データベースに基づくPC梁部材の構造性能評価手法の予測精度検証

京都大学 正会員 博(工) ○谷 昌典
 京都大学 高橋 毅
 国土技術政策総合研究所 博(工) 坂下雅信

Abstract : Experimental database of 255 prestressed concrete beam specimens was established based on 39 published papers. Prediction accuracy of design equations for flexural capacity, shear capacity and ultimate deformation capacity was examined. Relationship between ultimate deformation capacity and member ductility rank for horizontal load carrying capacity calculation was also discussed. Validity of current of member ductility rank criteria was verified.

Key words : Member ductility rank, Flexural capacity, Shear capacity, Ultimate deformation capacity

1. はじめに

「2009年版プレストレストコンクリート造技術基準解説及び設計・計算例」¹⁾には、保有水平耐力計算における構造特性係数 D_s の算出に用いるPC造部材の部材種別として、RC部材の判定基準を準用したものが示されている。日本建築学会「鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準(案)・同解説」²⁾では、RC部材を対象に部材種別と変形性能の関係について検討が行われ、FA部材、WA部材が有する変形性能の目安が提示された。これを踏まえて、日本建築学会PC耐震設計小委員会およびPC部材構造性能小委員会において「PC造建築物の保有水平耐力計算指針(案)」の原案作成が進められており、RC部材の判定基準を準用するPC部材にも同様の検討が必要となっている。また、日本建築学会「プレストレストコンクリート造建築物の性能評価型設計施工指針(案)・同解説」³⁾では、近年の研究成果や検討結果を踏まえたPC部材の構造性能評価手法が示されたものの、RC部材を対象に行われたような網羅的に収集された実験データに基づく検討⁴⁾は十分であるとは言えない。そこで、本研究ではPC部材に関する実験的研究の既往文献を収集してデータベースを構築し、曲げ終局強度、せん断終局強度、終局限界変形の評価式の予測精度を検証するとともに、現行基準に従って判定した部材種別と終局限界変形の実験値を比較することで、両者の関係について検討を行った。

2. 収集データ概要

本研究では、1976年から2015年にかけて、日本建築学会構造系論文集、コンクリート工学年次論文集、日本建築学会大会学術講演梗概集、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などからPC造梁部材実験に関する39編^{5)~43)}を収集し、246体のPC造梁試験体のデータを抽出して実験データベースを構築した。非対称断面を有し、正負繰返し载荷を受けた試験体9体については、正載荷時と負載荷時を別の試験体としてカウントし、対象試験体数はのべ255体である。コンクリート圧縮強度、せん断補強筋降伏強度、せん断補強筋比、シアスパン比およびプレストレスレベル(有効プレストレス力を部材断面積とコンクリート圧縮強度で除した値)の度数分布を図-1に示す。検討対象が梁部材であることから、コンクリート圧縮強度が 80N/mm^2 を超える試験体はほとんど無く、 $40\sim 50\text{N/mm}^2$ の試験体が最も多い。また、SD295A~SD390相当の降伏強度のせん断補強筋を用いた試験体が大半で、高強度せん断補強筋を使用した試験体は全体の1割程度に留まっており、せん断補強筋比0.6%以下の試験体が全体の約7割を占める。シアスパン比4.0を超える試験体が約半数を占めており、PC部材の特徴である長スパンの試験体が多いことが分かる。プレストレスレベルは0.1~0.15の試験体が最

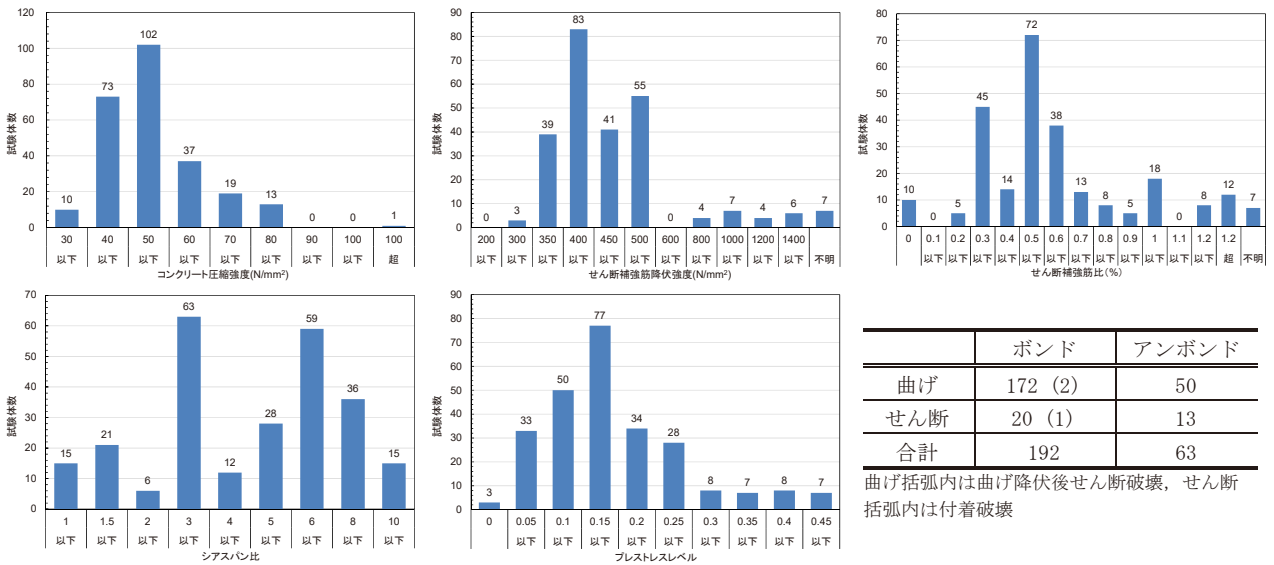


図-1 主要実験変数の度数分布

も多いが、0.3を超えるような試験体やPC鋼材が緊張されていない試験体も含まれている点に注意する必要がある。

3. 曲げ終局強度およびせん断終局強度の予測精度検証

3.1 曲げ終局強度

本節で予測精度検証を行う曲げ終局強度評価式を式(1)³⁾に示す。式(1)は、中立軸位置の一次近似値に基づき、圧縮および引張の鉄筋およびPC鋼材を定義し、引張PC鋼材および圧縮PC鋼材の張力は、それぞれ引張降伏時張力および有効プレストレス力とする曲げ終局強度算定式である。本検討では、部材せいの半分より引張側に位置する主筋およびPC鋼材をそれぞれ引張鉄筋および引張PC鋼材と仮定して、ACIストレスブロックを用いて中立軸位置の一次近似値を計算し、得られた中立軸位置より引張側に位置する鉄筋およびPC鋼材をそれぞれ引張鉄筋および引張PC鋼材として定義して曲げ終局強度を算定した。なお、アンボンドPC部材に対しては竹本式³⁾によりPC鋼材応力増分を算定した。強度の算定には各文献に記載の材料試験結果を用いた。

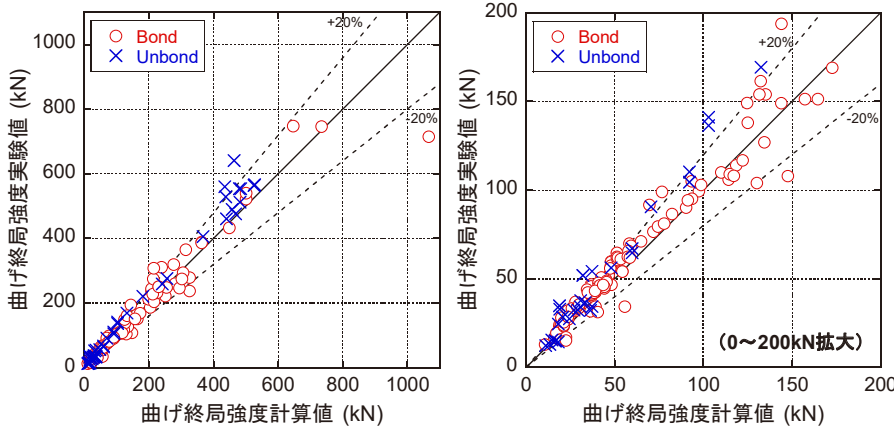
$$M_u = T_{pc} \cdot d_{pa} + T_{py} \cdot d_{pb} + T_{sy} \cdot d_t - C_{sy} \cdot d_c - (T_{pc} + T_{py} + T_{sy} - C_{sy}) \cdot k_2 \cdot x_n \quad (1)$$

ここで、 T_{pc} : 圧縮側PC鋼材引張力 (有効プレストレス力) (N), T_{py} : 引張側PC鋼材引張力 (降伏時引張力) (N), C_{sy} : 圧縮側鉄筋降伏時圧縮力 (N), T_{sy} : 引張側鉄筋降伏時引張力 (N), d_{pa} , d_{pb} : コンクリート圧縮縁から圧縮側PC鋼材および引張側PC鋼材の重心位置までの距離 (mm), d_t , d_c : コンクリート圧縮縁から引張鉄筋および圧縮鉄筋の重心位置までの距離 (mm), x_n : コンクリート圧縮縁から中立軸位置までの距離 ($= (q_{pr}/k_1 k_3) D$) (mm), q_{pr} : 鋼材係数 ($= ((T_{pc} + T_{py}) + (T_{sy} - C_{sy})) / (bD\sigma_B)$), b , D : 梁幅, 梁せい (mm), σ_B : コンクリート圧縮強度 (N/mm²), k_1 , k_2 , k_3 : 曲げ圧縮部コンクリートのストレスブロック係数, である。各記号の詳細な定義は文献を参照のこと。

曲げ破壊 (曲げ降伏後せん断破壊含む) 試験体のうち、実験における最大耐力が明らかでかつ曲げ終局強度を計算できた199体 (ボンド155体, アンボンド44体) について、実験最大耐力と式(1)による曲げ終局強度時せん断力計算値の関係を図-2に示す。実験最大耐力は、正負繰返し載荷で正負ともに曲げ破壊した場合には大きい方の値とした。ボンド試験体およびアンボンド試験体の計算値に対する実験値の比はそれぞれ1.10および1.18で、共に計算値が実験値を若干低めに評価し、アンボンド試験体に対してその傾向が強い。また、変動係数は、ボンド試験体の0.14に対してアンボンド試験体では0.18となり、アンボンド試験体の方がわずかに大きい値を示した。

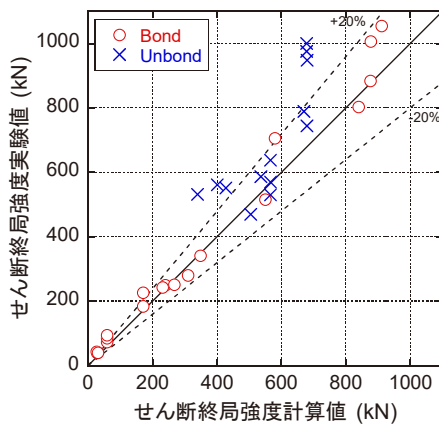
3.2 せん断終局強度

本節で予測精度検証を行うせん断終局強度評価式を式(2)¹⁾に示す。式(2)は、第1項のトラス機構と第2項のアーチ機構の重ね合わせによりせん断終局強度を算定する式であり、文献1)に基づき、圧着部



実/計	ボンド	アンボンド
試験体数	155	44
最大値	1.43	1.85
最小値	0.62	0.79
平均値	1.10	1.18
変動係数	0.14	0.18
±20%以内	0.70	0.64

図-2 曲げ破壊した試験体の曲げ終局強度時せん断力の実験値と計算値の比較



実/計	ボンド	アンボンド
試験体数	20	13
最大値	1.65	1.56
最小値	0.90	0.93
平均値	1.19	1.23
変動係数	0.18	0.17
±20%以内	0.55	0.54

図-3 せん断破壊した試験体のせん断終局強度の実験値と計算値の比較

材におけるトラス機構せい j_0 は、PC鋼材が丸鋼棒の場合は0（トラス機構無視）、PC鋼材がより線または異形鋼棒の場合はPC鋼材間の距離とした。また、強度の算定には各文献に記載の材料試験結果を用い、せん断補強筋の降伏強度の上限値は390N/mm²とした。

$$Q_u = b_0 j_0 p_{vw} f_y + \frac{b_0 D}{2} (v F_c - 2 p_{vw} f_y) \tan \theta \tag{2}$$

ここで、 b_0 ：重心軸位置での断面幅（mm）、 j_0 ：圧縮鉄筋と引張鉄筋の重心間距離（mm）、 p_v ：せん断補強筋比（ ≤ 0.012 ）、 f_y ：せん断補強筋の降伏点強度（N/mm²）、 D ：断面せい（mm）、 v ：コンクリート圧縮強度の有効係数、 F_c ：コンクリート圧縮強度（N/mm²）、 θ ：トラス角度、である。各記号の詳細な定義は文献を参照のこと。

せん断破壊試験体のうち、実験における最大耐力が明らかでかつせん断終局強度を計算できた33体（ボンド20体、アンボンド13体）の実験最大耐力と式(2)によるせん断終局強度計算値の関係を図-3に示す。実験最大耐力は、正負繰返し載荷で正負ともにせん断破壊した場合には大きい方の値とした。ボンド試験体およびアンボンド試験体の計算値に対する実験値の比はそれぞれ1.19および1.23で、ともに計算値が実験値を低めに評価する結果となった。また、変動係数はボンド試験体とアンボンド試験体でほぼ同程度となった。しかし、せん断破壊した試験体は曲げ破壊試験体に対して大幅に少なく、今後の更なる実験データの充実が望まれる。

4. 部材種別および終局限界変形角の予測精度検証

PC造部材の部材種別判定基準は表-1に示す通りで、RC部材と同じ基準が示されている。これは、RC造部材との連続性を勘案したものとされているが、PC造部材にRC造部材の判定基準を準用するにあたって、実験結果など用いた変形性能に関する検証は行われていない。そこで、表-1の部材種別判定基準の妥当性を検証するため、構築したデータベースの223体を対象に、部材種別と変形性能の関係

表-1 PC部材の部材種別判定基準¹⁾

条件		部材種別				
		FA	FB	FC	FD	
柱 および はりの 区分	破壊の形式	せん断破壊, 付着割裂破壊及び圧縮破壊その他の構造耐力上支障のある急激な耐力低下のおそれのある破壊を生じないこと			FA, FB, または FCのいずれにも 該当しない場合	
	柱	h_0/D	2.5 以上	2.0 以上		—
		σ_0/F_c	0.35 以下	0.45 以下		0.55 以下
		p_t (%)	0.8 以下	1.0 以下		—
		τ_u/F_c	0.1 以下	0.125 以下		0.15 以下
はり	τ_u/F_c	0.15 以下	0.2 以下	—		

について検討を行った。なお、PC部材の履歴吸収エネルギーの性状は、プレストレスが大きくなるに従ってRC部材とは異なるものとなるため、RC部材と D_u 値が同一なPC部材に要求すべき変形性能には検討の余地がある。しかし、現状では十分な知見が無いため、ここでは、一つの考え方として、文献2)に示される「部材種別FAと同等の変形性能を有する柱部材」の目安となる限界変形角2.0%を基準とした。本検討では、曲げおよびせん断終局強度はそれぞれ式(1)および式(2)により算出した。

梁部材の部材種別判定に用いる指標は、表-1に示す通り、破壊形式および(せん断応力度 τ_u) / (コンクリート圧縮強度 F_c) (以下、せん断応力度比)のみである。そこで、実験で得られた限界変形角 R_u とせん断応力度比およびせん断余裕度 Q_{su}/Q_{mu} の関係を図-3および図-4にそれぞれ示す。なお、文献によって限界変形点の定義が異なるため、最大耐力の80%まで低下した点とした結果を中空印、80%を超える耐力で限界変形を定義(最大耐力の80%まで低下しなかった試験体も含む)した結果を中実印でそれぞれ図中に示している。図-3より、せん断応力度比の増加に伴って限界変形角が全体的に低下する傾向が若干見られるが、せん断応力度比は最大でも0.143であり、FA部材とFB部材の閾値である0.15を超えた試験体は存在しなかった。すなわち、全試験体がせん断に対する保証設計(せん断余裕度 ≥ 1.3)でFAまたはFD部材と判定され、FBおよびFC部材と判定された試験体は存在しなかった。また、図-4より、せん断余裕度の増加に伴って、限界変形角の下限値が増加する傾向が確認された。なお、図-5に示すせん断余裕度-せん断応力度比関係からも、せん断応力度比ではなくせん断余裕度の閾値でFA部材かどうか判定される傾向にあることが分かる。

ここで、FA部材と判定された試験体118体(限界変形角が不明な試験体除く)のうち、最大耐力の80%まで耐力低下した点で定義した限界変形角が2.0%を下回った試験体が4体、最大耐力の80%まで耐力低下せずに荷重を終了し、その時の変形角が2.0%を下回った試験体が1体存在した。具体的には、前者はSR10-q3-Pw2¹²⁾, SR8-q3-Pw2¹²⁾, q3-Pw2¹¹⁾, SR4-q3-Pw4¹²⁾であるが、プレストレスレベル0.4前後と梁としては極めて大きく、せん断補強筋比も低い(SR10-q3-Pw2, SR8-q3-Pw2, q3-Pw2 : 0.2%, SR4-q3-Pw4 : 0.4%)という共通点がある。また、後者はq1-Pw6¹¹⁾で、同シリーズの試験体でせん断補強筋が少ないq1-Pw4およびq1-Pw2は部材角3%を上回る大変形まで最大耐力の80%以上の水平荷重を保持しており、q1-Pw6も荷重を継続すれば同様に大変形まで水平荷重を保持したと推察される。なお、前述の4体のような高プレストレスレベルの梁部材が通常の設計で用いられる可能性は低いと考えられるが、プレストレスの影響を勘案して、柱部材と同様の判定項目を追加することが望ましい。また、FA部材試験体で限界変形角が「部材種別FAと同等の変形性能を有する梁部材」の変形性能の目安である2.5%²⁾に満たない試験体は、前述の5体に加えて7体存在したが、前述の試験体同様にプレストレスレベルが高めの試験体もしくはせん断補強筋比が低めの試験体であり、通常の設計の範囲では大半のFA部材試験体が十分な変形性能を有していると言える。なお、本検討で得られた知見を保有水平耐力計算に適用するにあたっては、文献2)と同様に崩壊形に適用範囲を設けることが望ましい。

また、曲げ破壊試験体について、文献1)の終局限界部材角評価式(式(3))による計算値と限界変形角実験値と比較する。検討対象は、曲げ破壊試験体のうち水平荷重が最大耐力の80%に低下した点で

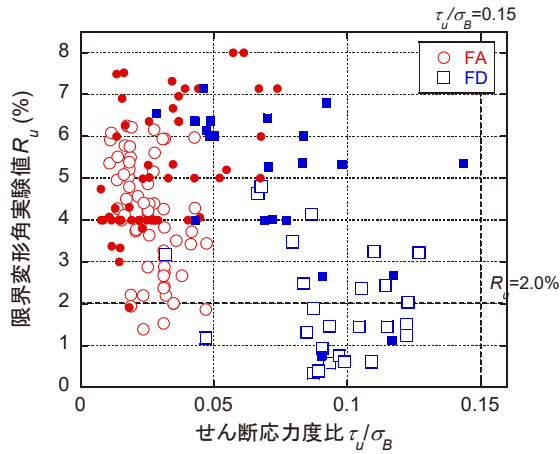


図-3 限界変形角実験値とせん断応力度比の関係

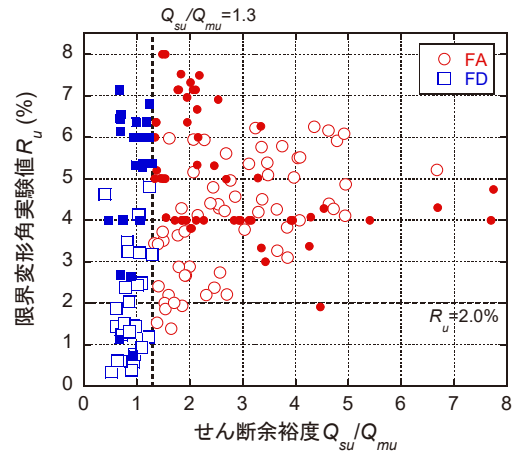


図-4 限界変形角実験値とせん断余裕度の関係

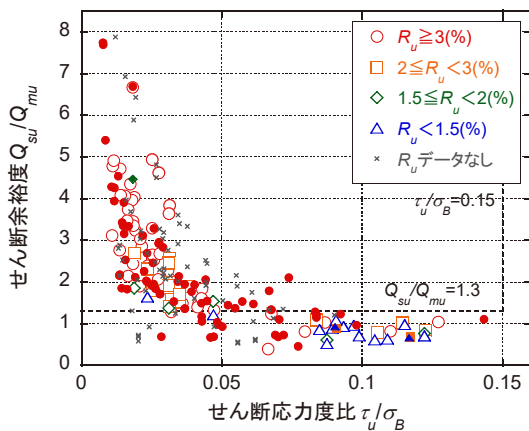


図-5 せん断余裕度とせん断応力度比の関係

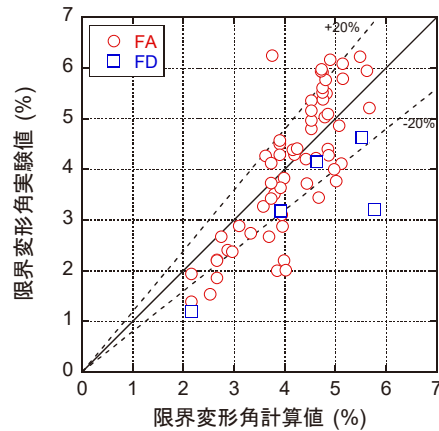


図-6 限界変形角実験値と計算値の関係

限界変形角を定義した試験体67体とした。

$$R_u = \left\{ (5 - 7\eta_g) / 100 \right\} + (0.5 + 15q_c) \cdot p_w \quad (3)$$

ここで、 η_g : プレストレスレベル, q_c : 圧縮筋の鋼材係数, p_w : 曲げ拘束筋比, である。各記号の詳細な定義は文献を参照のこと。

限界変形角の実験値と式(3)による計算値の関係を図-6に示す。(実験値) / (計算値)の平均値は0.95, 変動係数は0.23となり, 計算値が実験値を若干高めに評価したが, 比較的良好な精度で限界変形角を予測できることが分かった。

5. まとめ

PC部材の実験データベースを構築し, 曲げ終局強度, せん断終局強度, 終局限界変形の評価式の予測精度を検証するとともに, 現行基準で判定した部材種別と限界変形角の実験値を比較することで, 両者の関係について検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- 曲げ破壊試験体199体 (ボンド155体, アンボンド44体) の曲げ終局強度時せん断力の実験値と計算値を比較した。計算値に対する実験値の比の平均値および変動係数は, それぞれ1.10および0.14 (ボンド), 1.18および0.18 (アンボンド) となり, アンボンド試験体の方がわずかに予測精度が悪いものの, いずれも比較的精度良く曲げ終局強度を予測できることを確認した。
- せん断破壊試験体33体 (ボンド20体, アンボンド13体) のせん断終局強度の実験値と計算値を比較した。計算値に対する実験値の比および変動係数は, それぞれ1.19および0.18 (ボンド), 1.23および0.17 (アンボンド) となり, いずれも精度良くせん断終局強度を予測できることを示した。
- せん断応力度比の増加に伴って限界変形角が全体的に低下する傾向が見られたが, せん断応力度比

が0.15を超えた試験体は無く、全試験体がせん断に対する保証設計によってFAまたはFD部材と判定された。また、せん断余裕度の増加に伴って、限界変形角の下限値が増加する傾向が確認された。

- ・ 通常の設計範囲を超えるプレストレスレベルの試験体を除外すれば、全試験体で限界変形角が2.0%を上回る変形性能を有することが確認された。
- ・ 限界変形角の計算値に対する実験値の比の平均値は0.95、変動係数は0.23となり、実験値を若干高めに評価したが、比較的良好な精度で限界変形角を予測できることが分かった。

謝辞

本検討を行うにあたり、日本建築学会PC部材構造性能小委員会およびPC耐震設計小委員会の委員各位には多大なるご助力を頂いた。また、日本大学・浜原正行名誉教授、福井剛准教授には一部の実験のデジタルデータを提供頂いた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所ほか監修：2009年版プレストレストコンクリート造技術基準解説及び設計・計算例，2009.9，2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準（案）・同解説，2016.4，3) 日本建築学会：プレストレストコンクリート造建築物の性能評価型設計施工指針（案）・同解説，2015.2，4) 向井ほか：実験データベースを用いた鉄筋コンクリート造部材の構造特性評価式の検証，建築研究資料，No.175，2016.11，5) 本岡ほか：プレストレストコンクリート梁打継端の復元力特性に関する研究，AIJ大会，pp.1377-1378，1976，6) 本岡ほか：プレストレストコンクリート梁打継端の復元力特性に関する研究（その2），AIJ大会，pp.1953-1954，1977，7) 鈴木ほか：プレストレスト鉄筋コンクリート（PRC）のひびわれ限界状態に関する研究，AIJ大会，pp.1803-1804，1978，8) 岡本ほか：プレストレストコンクリート部材の塑性変形能力に関する研究（その3），AIJ大会，pp.1607-1608，1979，9) 岡本ほか：プレストレストコンクリート部材の塑性変形能力に関する研究（その4），AIJ大会，pp.1609-1610，1979，10) 岡本ほか：プレストレスト鉄筋コンクリート部材の力学的性状に関する研究（その2），AIJ大会，pp.2193-2194，1981，11) 本岡ほか：プレストレストコンクリート梁の復元力特性に関する研究（その1～3），AIJ大会，pp.2217-2222，1982，12) 本岡ほか：プレストレストコンクリート梁の復元力特性に関する研究（そのIV），AIJ大会，pp.2557-2558，1983，13) 六車ほか：プレストレスト鉄筋コンクリートはりのせん断抵抗挙動に関する実験研究，JCI大会，Vol.5，pp.453-456，1983，14) 六車ほか：横拘束コンクリートによるコンクリート系部材のじん性改善一片持ち梁によるじん性改善効果の確認一，AIJ大会，pp.1621-1622，1984，15) 本岡ほか：プレストレストコンクリート梁の平均プレストレスがその靱性に及ぼす影響，プレストレストコンクリート，Vol.27，No.2，pp.55-65，1985.3，16) 六車ほか：アンボンドPC不静定梁の力学的性質に関する研究，JCI大会，Vol.8，pp.677-680，1986，17) 渡辺ほか：高一様伸びPC鋼材のPC梁曲げ靱性改善に及ぼす効果，AIJ大会，pp.31-32，1986，18) 阿波野ほか：圧着型および一体型片持ちPC梁の塑性ヒンジ機構に関する実験研究（その3），PCシンポジウム，pp.135-140，1988，19) 岡田ほか：載荷形式が異なるプレストレストコンクリート梁の曲げ部材実験，AIJ大会，pp.971-972，1989，20) 最上ほか：逆対称曲げを受けるアンボンドPC梁の耐力・変形評価 アンボンドPC部材の構造特性に関する研究（その1），AIJ黄表紙，No.411，pp.29-38，1990.5，21) 斎藤ほか：プレキャスト・プレストレストコンクリート梁のせん断性状に関する実験的研究，JCI大会，Vol.2，No.3，pp.937-942，1999，22) 中塚ほか：接合形式（圧着型・一体型）とPC鋼材種（丸形・異形）の異なる片持PC梁の耐荷・変形機構と力学性能に関する実験的考察，コンクリート工学論文集，Vol.11，No.3，pp.97-110，2000.9，23) 湯浅ほか：プレキャストプレストレストコンクリート部材のせん断性状に関する実験的研究（その1～3），AIJ大会，C-2，pp.955-960，2001，24) 甲斐ほか：プレテンション方式PCaPC大梁の地震時構造性能（その1，2），AIJ大会，C-2，pp.987-990，2002，25) 大多賀ほか：プレキャストプレストレストコンクリート部材のせん断性状に関する実験的研究（その4～5），AIJ大会，C-2，pp.991-994，2002，26) 中川ほか：圧着型PC梁の塑性ヒンジ機構に関する実験的研究，JCI大会，Vol.25，No.2，pp.721-726，2003，27) 菅田ほか：アンボンドPC圧着工法によるエネルギー吸収型高復元部材の荷重一変形関係に関する実験的検討，AIJ黄表紙，No.584，pp.153-159，2004.10，28) 内田ほか：接合部の影響を考慮したPC梁の復元力特性，AIJ黄表紙，No.575，pp.105-112，2004.1，29) 倉岡ほか：プレストレスト鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れ幅に関する実験的研究，JCI大会，Vol.26，No.2，pp.1663-1668，2004，30) 渡邊ほか：混合より線を用いたPCaPC梁の力学的性状に関する研究，JCI大会，Vol.27，No.2，pp.571-576，2005，31) 市岡ほか：緊張材に混合より線を用いたPCaPC片持ち梁の力学的性状に関する研究，JCI大会，Vol.28，No.2，pp.499-504，2006，32) 李ほか：高強度あばら筋を用いたPCaPC梁のせん断耐力評価に関する研究，PCシンポジウム，pp.257-260，2009，33) 李ほか：高強度せん断補強筋を有するプレキャストプレストレストコンクリート梁のせん断斜張力破壊に関する実験的研究，JCI大会，Vol.32，No.2，pp.493-498，2010，34) 李ほか：高強度せん断補強筋を有するプレキャストプレストレストコンクリート梁のせん断斜張力破壊に関する実験的研究，PCシンポジウム，pp.77-80，2010，35) 李ほか：高強度せん断補強筋を用いたプレキャストプレストレストコンクリート梁の曲げせん断性状に関する研究，AIJ黄表紙，Vol.75，No.653，pp.1335-1342，2010.7，36) 竹中ほか：多数回繰返し載荷を受けるPC梁に関する実験的研究，AIJ大会，C-2，pp.919-920，2012，37) レホアンほか：アンボンドPRC梁の曲げせん断実験における最大耐力評価，PCシンポジウム，pp.109-114，2013，38) 江頭ほか：アンボンド圧着梁のせん断耐力に関する確認実験（その1，2），AIJ大会，C-2，pp.857-860，2013，39) 尹ほか：地震荷重に対する鋼繊維補強コンクリートを用いたプレテンション梁の挙動（その1，2），AIJ大会，C-2，pp.851-854，2013，40) 宮本ほか：スラブ付きアンボンドプレストレストコンクリート梁の曲げ性状に関する実験的研究（その1，2），AIJ大会，C-2，pp.749-752，2014，41) 宮本ほか：アンボンドPCaPC造梁の損傷評価を目的とした実験的研究（その1，2），AIJ大会，C-2，pp.733-736，2015，42) 柳沼ほか：アンボンド圧着梁のせん断耐力に関する実験的研究（その1），AIJ大会，C-2，pp.723-724，2015，43) 柳沼ほか：アンボンドPC圧着梁のせん断耐力に関する実験的研究，AIJ大会，C-2，pp.769-770，2016

（略記：AIJ黄表紙：日本建築学会構造系論文集または日本建築学会構造系論文報告集，AIJ大会：日本建築学会学術講演梗概集，JCI大会：コンクリート工学年次論文集またはコンクリート工学年次論文報告集，PCシンポジウム：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）