

PC 梁部材の各種限界状態についての試案

阿波野 昌幸*

1. はじめに

PC 梁部材の各種限界状態に関する試案を示す。まず、2 節に PC 構造建物の各種限界状態を示し、3 節に PC 部材の各限界状態における建物の限界層間変形角についてその標準値の目安を提案する。さらに、4 節では部材あるいはその構成材料の各限界状態において満足すべき損傷状況を提示するとともに、今後の課題も併せて示す。

2. 各種限界状態の設定

2.1 使用限界状態

使用限界状態とは、建物に想定される限界地震動が入力された後、建物の使用目的に対し、継続使用に耐え、建物機能が確保される限界の状態である。言い換えれば、この状態に対する構造性能の目標は「機能の確保、および居住性・日常安全性の確保」である。なお、この限界以下の場合には建物の被災度は「軽微」となる。

2.2 修復限界状態

修復限界状態とは、建物に想定される限界地震動が入力された後の損傷に対して、適用可能な技術でかつ妥当な経費および期間で修復を行えば、構造物の継続使用を可能とすることができる限界の状態である。言い換えれば、この状態に対する構造性能の目標は「財産の保全」である。補修レベルにより、修復限界状態Ⅰと修復限界状態Ⅱの2段階に分けることとする。修復限界状態Ⅰはひび割れ補修程度の比較的容易な補修で修復できる状態で、被災度は「小破」、修復限界状態Ⅱはコンクリート補修や少し大規模な補修・補強が必要な状態で、被災度は「中破」となる。

2.3 安全限界状態

安全限界状態とは、建物に想定される限界地震動が入力された後の破壊や大変形等に対して、建物の安全性が損なわれず、その内外の人命に対する安全性を確保する限界の状態である。言い換えれば、この状態に対する構造性能の目標は「人命の保護」である。建物の被災度は「大破」

であり、補修・補強による再使用はほぼ不可能な状態にある。

3. 各限界状態における限界層間変形角

3.1 限界層間変形角の標準値の提案

PC 造建物の地震応答における水平変形に対して、2 節の各限界状態についての標準限界層間変形角の目安を表 - 1 のように提案する。これは 2004 年度の日本建築学会大会の PC 構造部門のパネルディスカッション¹⁾でも紹介され、日本建築学会の「PC 構造耐震設計小委員会」内で提案されたものを参考にまとめなおしたものである。

PC 構造物はプレストレスレベル λ (PC 部材の曲げ耐力に対する PC 鋼材の寄与率) によって履歴復元力特性が大きく変わることが知られている。したがって限界値の設定においても、この特性を反映すべきであり、限界値をプレストレスレベルにかかわらず一意に定めることは適当ではない。また、通常の PC 造建物では梁に PC 部材を用いるが、鉛直部材の柱や耐震壁などには RC 造部材を用いることも多く、PC 部材の性状が必ずしも建物全体の性状とはならないことも知られている。表 - 1 は架構の降伏型を考慮して、RC 柱降伏型の場合は、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説(2004.1)」(以後、「RC 造指針」と称す)に示されている RC 構造物の限界層間変形角の標準値を準用している。また、PC 梁降伏型の場合には、 λ に応じて限界値を変えることとするが、 $\lambda < 0.5$ の場合は、RC の挙動と大差がないため連続性を考慮して、RC 構造物の限界層間変形角を採用した。

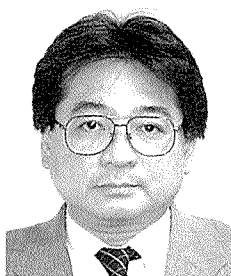
3.2 使用限界状態

使用限界状態は、PC 造架構の構造躯体の状態によって決まることは少なく、2 次部材(非構造部材)、設備機器、什器などの要求性能によって規定されることが多いので、他構造と同程度の限界変形角 $1/200$ を使用限界変形角とするのが妥当であろう。しかし、 λ が大きくフルプレストレスに近い PC 造部材の場合、最大変形角として $1/100$ 程度を経験しても高度な復元性を有し、残留変形、残留ひび割れがほとんど発生しないことが実験や解析で確かめられている。したがって、非構造部材や設備機器に問題がなければ鉄骨造と同程度の $1/120$ まで限界層間変形角を許容してもよいとした。

図 - 1 に実験から得られた最大変形角 R_p (%) と残留変形角 R_r (%) の関係³⁾を示す。同図の R_p (%) と R_r (%) の関係は式(1)で表される³⁾。

$$R_r = 0.3 (1.1 - \lambda) R_p^{(3+\lambda)/2} \dots\dots\dots(1)$$

表 - 1 に示すように、「RC 造指針」による RC 造の使用



* Masayuki AWANO

(株)日建設計 構造設計部門
構造設計主管 工学博士

表 - 1 各限界状態における限界層間変形角の標準値の目安

架構の降伏型 ν *3	終局プレスト レス率 λ	鋼材の種類 *1	使用限界	修復限界 I	修復限界 II	安全限界
0.0 (PC 梁降伏型)	1 ~ 0.75	アンボンド・丸鋼棒	1 / 120	1 / 75	1 / 50	(1 / 30) *2
		PC 鋼より線				
		異形鋼棒				
	0.75 ~ 0.5	アンボンド・丸鋼棒	1 / 150	1 / 80	1 / 60	(1 / 40) *2
		PC 鋼より線				
		異形鋼棒				
	0.5 ~ 0.0	アンボンド・丸鋼棒	1 / 200 *a	1 / 100	1 / 75	1 / 50
		PC 鋼より線				
		異形鋼棒				
1.0 (RC 柱降伏型)	0.0		1 / 200	1 / 100	1 / 75	1 / 50

- * a : 解析結果および実験結果から、異形 PC 鋼材降伏は $R = 1/200$ 程度なのでこの値とした。
- * b : 使用限界がこの部材角であれば、いずれの PC 鋼材も降伏に至る確率は低いと考えられるので、この規定は、むしろ λ による残留変形から決まる可能性がある。
- * 1 : 使用グラウト材は通常の範囲 ($F_g > 20 \text{ N/m}^2$) のもの、導入率も通常の範囲とする。
- * 2 : 実験からは変形能力はこの値以上あるが設計の対象としない。
1/50 以上の値を用いる場合は架構の P- Δ 効果の考慮など特別な検討が必要。
- * 3 : ν の考え方を入れると限界状態が RC 柱で決まる場合が多くなる。
 $\nu = 0.5$ (PC 梁と RC 柱の降伏が半分ずつ) だと限界変形を決めるのは難しい

限界の限界層間変形角は 1 / 200 であることから、 $\lambda = 0 \sim 0.5$ の PRC 部材に対しては、RC との連続性から使用限界の変形角を 1 / 200 とし、それに対する残留変形角は、図 - 1 あるいは式 (1) より、 $\lambda = 0.5$ では 0.054 % となる。これとほぼ同程度の残留変形角となる、 $\lambda = 0.75$ での最大変形角は同図より約 1 / 150 であり、また、 $\lambda = 0.9$ での最大変形角は約 1 / 120 であることから、表 - 1 に示す使用限界の最大変形角を 1 / 150 ($\lambda = 0.5 \sim 0.75$)、1 / 120 ($\lambda = 0.75 \sim$

1.0) と提案した。表 - 2 は、表 - 1 で提案した各限界状態の変形角と終局プレストレス率 λ により (1) 式から決まる残留変形角を示している。使用限界の残留変形角を見ると、 λ が大きく限界変形角を大きくとった PC、PRC 部材の残留変形角が RC 部材 ($\lambda = 0$) のそれを上回らないことを表 - 2 は示す。また、同表の使用限界状態の最下欄に示すように、使用限界の残留変形はおおむね 0.05 % (1 / 2 000) ~ 0.10 % (1 / 1 000) 程度とみなすことができる。

3.3 修復限界状態

修復限界状態では、残留変形、あるいは残留ひび割れ幅が重要な評価対象である。フルプレストレスに近い PC 構造では復元性が高く、地震後の残留変位あるいは残留ひび割れ幅は小さいことが実験的研究や地震被害調査で明らかとなっている。この特長は PC 構造の RC 構造に対する優位性を示すものであり、修復限界状態として RC 構造に比べて大きな変形角まで許容できると考えられる。

RC 造の修復限界 I の限界層間変形角は「RC 造指針」では 1 / 100 と規定されており、 $\lambda = 0 \sim 0.5$ の PRC 部材に対しては RC との連続性から、修復限界 I の最大変形角を 1 / 100 とした。それに対する残留変形角は、図 - 1 あるいは式 (1) より、 $\lambda = 0.5$ では 0.18 % である。これとほぼ同程度の残留変形角となる、 $\lambda = 0.75$ での最大変形角は同図より約 1 / 80 であることから、表 - 1 に示す修復限界 I の最大変形角を 1 / 80 ($\lambda = 0.5 \sim 0.75$) と提案し、 $\lambda = 0.75 \sim 1.0$ については、これよりやや大きめの最大変形角 1 / 75 とした。なお、表 - 2 の修復限界 I の欄より、 $\lambda > 0$ の PC 部材の残留変形角は、RC 部材 ($\lambda = 0$) のそれを上回らないことが示されている。また、同表の修復限界 I の最下欄に示すように、修復限界 I の残留変形はおおむね 0.17 % (1 / 600) ~ 0.33 % (1 / 300) 程度とみなすことができる。

次に、RC 造の修復限界 II の限界層間変形角は 1 / 75 と規定されており、 $\lambda = 0 \sim 0.5$ の場合には RC との連続性から、修復限界 II の最大変形角を 1 / 75 とした。そのときの残留変形角は、図 - 1 あるいは式 (1) より、 $\lambda = 0.5$ では

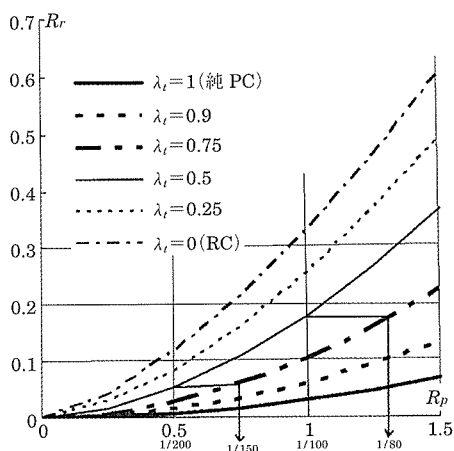
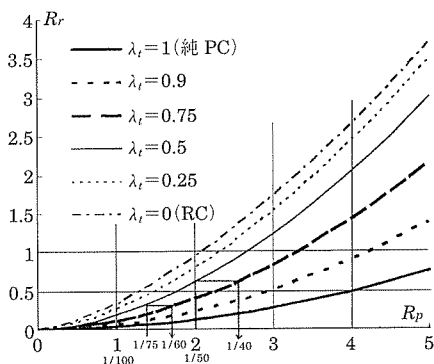


図 - 1 最大変形角と残留変形角の関係

表 - 2 各限界状態の限界変形角に対する残留変形角

λ	使用限界		修復限界 I		修復限界 II		安全限界	
	限界変形角	残留変形角	限界変形角	残留変形角	限界変形角	残留変形角	限界変形角	残留変形角
1 ~ 0.75	1 / 120	0.021 ~ 0.075	1 / 75	0.054 ~ 0.18	1 / 50	0.12 ~ 0.39	1 / 30	0.33 ~ 1.00
0.75 ~ 0.5	1 / 150	0.049 ~ 0.089	1 / 80	0.16 ~ 0.27	1 / 60	0.27 ~ 0.44	1 / 40	0.59 ~ 0.90
0.5 ~ 0.0	1 / 200	0.054 ~ 0.12	1 / 100	0.18 ~ 0.33	1 / 75	0.30 ~ 0.51	1 / 50	0.61 ~ 0.93
おおむねの残留変形角		0.05 (1 / 2 000)		0.17 (1 / 600)		0.33 (1 / 300)		0.50 (1 / 200)
		0.10 (1 / 1 000)		0.33 (1 / 300)		0.50 (1 / 200)		1.0 (1 / 100)

0.30 % である。これとほぼ同程度の残留変形角となる、 $\lambda = 0.75$ での最大変形角は同図より約 1 / 60 であることから、表 - 1 に示す修復限界 II の最大変形角を 1 / 60 ($\lambda = 0.5 \sim 0.75$) と提案し、 $\lambda = 0.75 \sim 1.0$ については、これよりやや大きめの変形角 1 / 50 とした。なお、表 - 2 の修復限界 II の欄より、PC 部材の残留変形角が RC 部材 ($\lambda = 0$) のそれより小さいことが示されている。また、同表の修復限界 II の最下欄に示すように、修復限界 II の残留変形はおおむね 0.33 % (1 / 300) ~ 0.50 % (1 / 200) 程度とみなすことができる。

3.4 安全限界状態

安全限界の RC 造の限界層間変形角は「RC 造指針」では 1 / 50 であり、 $\lambda = 0 \sim 0.5$ の場合には RC との連続性から、安全限界の最大変形角を 1 / 50 とした。そのときの残留変形角は、図 - 1 あるいは式 (1) より、 $\lambda = 0.5$ では 0.61 % である。これとほぼ同程度の残留変形角となる、 $\lambda = 0.75$ での最大変形角は同図より約 1 / 40 であることから、表 - 1 に示す安全限界の最大変形角を 1 / 40 ($\lambda = 0.5 \sim 0.75$) と提案し、 $\lambda = 0.75 \sim 1.0$ については、これよりやや大きめの変形角 1 / 30 とした。なお、PC 部材の安全限界の残留変形角が RC 部材 ($\lambda = 0$) のそれとほぼ同程度であることが表 - 2 に示されている。また、同表の安全限界の最下欄に示すように、その残留変形はおおむね 0.50 % (1 / 200) ~ 1.00 % (1 / 100) 程度とみなすことができる。

λ が 1.0 程度の PC 梁では、一般的に部材角 1 / 30 を超えても高い復元性を有し、残留変形も小さいことから PC 構造の特徴を強調するためには、大きな最大層間変形角を許容することも可能であろう。しかし、建物全体としては、P- Δ 効果等の影響や二次部材の変形追随性なども確認する必要があり、1 / 50 を超えるような大きな最大層間変形角を許容する場合には特別な検討が必要であるとした。

4. 各限界状態における部材の(材料)損傷状況

4.1 各限界状態の損傷状況

2 節で設定した PC 梁部材の各限界状態において満足すべき損傷状況、すなわち、部材を構成する普通鉄筋、PC 鋼材、コンクリートなどの材料の損傷あるいは残留変形や残留ひび割れで表される損傷状況の例を表 - 3 のように提案する。同表も表 - 1 と同様、日本建築学会大会 PD で提示されたもの等^{1), 2)} を参考にまとめたものである。

4.2 使用限界状態

使用限界状態では、通常、部材はすべて弾性限内にあり、地震後の残留変形、残留ひび割れはほとんどないものと考えられる。この場合、当然、PC 鋼材は弾性限内におさまらなくてはならない。一方、PC 梁の鉄筋は、等価塑性ヒンジ法およびマクロモデルによる解析結果などに示されるように、部材角 1 / 200 ~ 1 / 100 あたりで通常降伏する。しかし部材としての弾性（非線形弾性）が、 λ が大きい場合には顕

表 - 3 各限界状態で満足すべき部材の(材料)損傷状況(案)

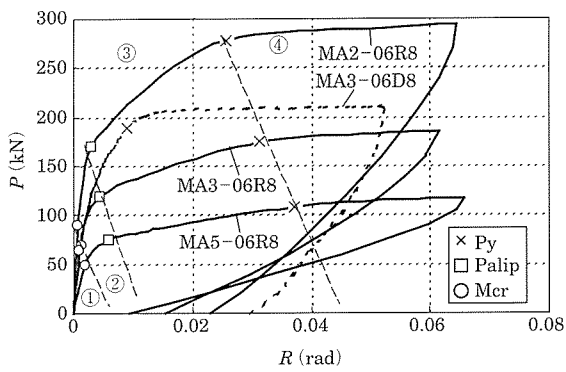
限界状態	具体的な損傷の状態（以下のすべてを満足）				
	λ	鉄筋	PC 鋼材	コンクリート	残留ひび割れ幅
使用限界	1 ~ 0.75	降伏許容 ^{*1}	弾性範囲	F_c 以下 ^{*2}	(0.2 mm 程度以下)
	0.75 ~ 0.5	降伏許容 ^{*1}		0.85 F_c 以下	
	< 0.5	弾性範囲		2 F_c / 3 以下	
修復限界 I	1 ~ 0.75	降伏許容 ^{*1}	弾性範囲	ブレンコンクリートとして	0.2 ~ 1 mm 程度
	0.75 ~ 0.5	降伏許容 ^{*1}		k_1, k_3 ^{*4} が最大となる時の圧縮ひずみ以下	
	< 0.5	わずかに降伏は許容 ^{*3}			
修復限界 II		降伏許容	耐力点 (0.2 % 点)	コアコンクリート部分の圧壊以下	1 ~ 2 mm 程度
安全限界		圧縮筋の座屈前引張筋の破断前	破断前	コアコンクリート部分の k_1, k_3 が最大となる時の圧縮ひずみ以下	—

* 1 : PRC に配筋されている普通鉄筋も、RC とほぼ同程度の変形になれば降伏することが予想されるため、表 - 1 中に示す使用限界 1 / 120 ~ 1 / 150 時には鉄筋は降伏すると考えられる。

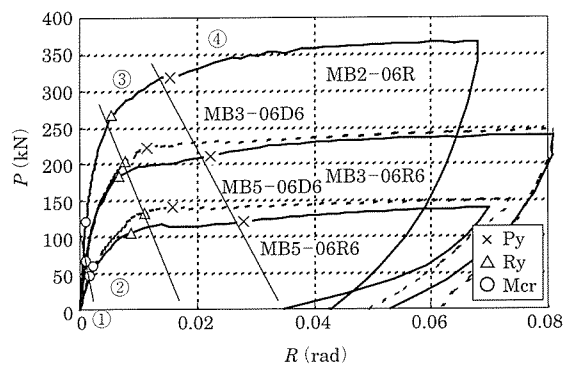
* 2 : 表 - 1 での使用限界 1 / 120 を満足するには、 $\epsilon_r < \epsilon_o$ ($\sigma_c < F_c$) では不足の可能性はある。

* 3 : RC の層間部材角-残留変形率および残留ひび割れ幅関係から類推した (PC のデータから同じ残留変形となる、除荷開始時変形の策定が急務である)

* 4 : 曲げを受けるコンクリートのストレスブロック係数



(柱・梁圧着型 $\lambda=1.0$)



(柱・梁一体型 $\lambda=0.8$)

図 - 2 PC 梁の荷重-変形関係の実験例

著となり、残留変形はほとんど零になる。したがって、PC 的性質が強く復元性のよい $\lambda = 1 \sim 0.5$ の場合には使用限界状態時の普通鉄筋降伏は許容することとした。

使用限界でのコンクリートの状態に対するクライテリアは、RC 部材では短期許容応力度 ($2F_c/3$) であるが、PC 部材では導入プレストレスの影響によって $2F_c/3$ 時は引張鉄筋降伏に先行して発生することがあり、そのときの耐力も降伏時のそれに比べ顕著に小さい。一方、圧縮コンクリートの応力度が $2F_c/3$ を超えても、 λ が大きい場合、部材は優れた非線形弾性を示すので、告示には抵触するが、ここでは λ に対応して $2F_c/3$ より大きい限界応力度を許容する案とした。

使用限界での残留ひび割れ幅は RC 部材にならうこととした。

PC 鋼材が降伏する部材角は、鋼材量や附着性能、PC 鋼材の断面内での位置などにより大きく変わるが、表 - 1 での使用限界部材角 $1/120 \sim 1/200$ において PC 鋼材が弾性となるための鋼材係数の下限値、あるいは附着性能などをさらに明らかにしていく必要がある。

図 - 2 は附着性能の異なる PC 梁部材の実験より得られた荷重 - 変形関係の一例⁴⁾を示しており、表 - 1 の使用限界部材角の設定のよりどころの一つとしたものである。同図によると、丸形 PC 鋼棒を使用した場合 (図中実線) には PC 鋼材の附着性能の低下に伴い部材角 $1/75 \sim 1/30$ 程度で PC 鋼材が降伏しており、これは、表 - 1 の使用限界部材角 $1/120 \sim 1/200$ では、PC 鋼材が弾性限内にあるとする表 - 3 に符合する。また、図中破線で示す附着性能の優れている異形 PC 鋼材を使用した梁部材では、 $\lambda = 1$ (左側の図) であっても部材角 $1/120$ 程度では PC 鋼材が降伏に至る。したがって、異形 PC 鋼材を使用する場合には λ に関わらず、限界変形角を表 - 1 において $1/200$ としたことと、表 - 3 で PC 鋼材が弾性内にあることが符合する。

圧縮側のコンクリートについては、解析結果や実験結果から、表 - 1 の限界変形角に対して、 $\lambda = 1 \sim 0.75$ で圧縮強度 F_c 以内、 $\lambda = 0.75 \sim 0.5$ で $\sigma_c < 0.85 F_c$ 、 $\lambda < 0.5$ で $\sigma_c < 2F_c/3$ を保証することは難しいという結果も得られている。PC 部材の曲げ圧縮部コンクリートを考えるとき、プレストレスレベル λ や鋼材係数 q_{pr} が大なるほど残留変

形量は小さくなるが、逆にコンクリートの圧縮縁応力度は厳しくなる。故に、横補強筋のコンファインド効果によるコアコンクリートの寄与も考慮したうえでの圧縮縁の限界ひずみの割り増しなど、RC との連続性も含め、さらに λ と q_{pr} と関連づけながら、今後検討する必要がある。

4.3 修復限界状態 I

修復限界状態 I は、ひび割れ補修程度の比較的容易な補修で修復ができ、構造物の継続使用を可能とすることができる程度の損傷である。したがって、修復限界状態 I の損傷状況のクライテリアとしては、普通鉄筋は降伏を許容するが、PC 鋼材は弾性範囲内にとどめプレストレスが確実に確保されている状態とした。また、そのような比較的容易な補修程度ですませるためには、圧縮部コンクリートはプレーンコンクリートのストレスブロック係数 k_1, k_3 が最大となる圧縮縁ひずみ度以下におさめることとした。また、残留ひび割れは RC 部材の規定と同様に $0.2 \sim 1.0$ mm 程度にとどめることをクライテリアとした。

PC 鋼材に着目すると、図 - 2 によれば、前述のように、丸形 PC 鋼棒を使用した場合には部材角 $1/75 \sim 1/30$ 程度で、PC 鋼材が降伏しており、修復限界 I の限界層間変形角 $1/100 \sim 1/75$ では、PC 鋼材が弾性限内にあるとする表 - 3 を満足する。しかし、前述のように、異形 PC 鋼材を使用した場合には部材角 $1/120$ 程度でも降伏する場合があり、これは限界層間変形角 $1/100$ で PC 鋼材が弾性範囲内とする表 - 3 を満足しない。また、解析結果の例においても変形角 $1/75 \sim 1/100$ の場合には、附着性能が低い場合以外では、PC 鋼材が降伏する結果も得られており、必ずしも表 - 3 を満足しない。したがって、修復限界 I での PC 鋼材の状態について、附着性能、プレストレスレベル、鋼材量、シェアスパン比などの条件も含めて、鋼材が弾性範囲以内に収まるための与条件と部材角を今後、詳細に検討する必要がある。

4.4 修復限界状態 II

修復限界状態 II は、残留ひび割れ補修に加え、コンクリートの欠損・剥落部の補修を施した後、構造物の継続使用が可能となる程度の損傷である。したがって、修復限界状態 II の損傷状況のクライテリアとして、やや大がかりな補修を施すことを許容するレベルであることから、圧縮部コ

ンクリートはかぶりコンクリートの剥落を許容し、コアコンクリートがその圧縮強度以内におさまることをクライテリアとした。なお、残留ひび割れは、RC部材の規定と同様に1～2mm程度の範囲とした。

PC鋼材が大きく塑性化しプレストレス力が大きく失われる状態は、PC構造の致命的な性能低下をもたらすため、修復限界Ⅱでは鋼材の導入力が大きく失われることは避けなければならない。したがって、現状では、弾性限範囲をわずかに超えたとしても0.2%オフセット点あたりまでのひずみにとどめるべきであるとした。

多くの実験や解析結果では、表-1の修復限界Ⅱの限界層間変形角 $1/50 \sim 1/75$ のような変形角では、ほとんどの部材はPC鋼材が弾性限内を超えているが、そのPC鋼材がどの程度塑性化に至っているか、プレストレス力の減退に至らないかなどについて、さらに、十分に検証する必要がある。

4.5 安全限界状態

安全限界状態は、地震時に生じる破壊や大変形等に対して、建物が崩壊せず、その内外の人命に対する安全性を確保しうる限界の状態である。PC部材の終局限界状態を示す指標点として、引張側PC鋼材の破断、引張鉄筋の破断、圧縮鉄筋の座屈、そして圧縮側のコアコンクリートの圧壊などの終局限界が存在する。これらの限界点では、いずれの現象においても部材断面内での圧縮合力あるいは引張合力が急激に低下し、部材耐力が急低下する。すなわち、PC構造の安全限界点において、PC部材がこれらの終局状態に至らないようにしなければならない。したがって、安全限界状態の損傷状況のクライテリアとしては、表-2、3に示

したように鉄筋・鋼材については、圧縮鉄筋の座屈前、引張鉄筋の破断前、PC鋼材の破断前とし、圧縮側のコンクリートはコアコンクリートが $k_1 k_3$ 最大となる圧縮縁ひずみ度以内とすることとした。

表-1では、安全限界の限界変形角を $1/50 \sim 1/30$ で与えているが、解析結果や実験結果で、このような大きな変形角では、ほとんどのケースでPC鋼材は降伏している。故に、 $1/50$ 程度でPC鋼材が破断するひずみに至らないようにすることがきわめて重要である。PC鋼材は破断に至るまでの伸び能力は普通鉄筋に比べて小さく、また、PC鋼材降伏後の鋼材伸びは付着性能が良好であればわずかな部材角の増大でも著しく進展し、鋼材が破断に至る可能性が高い。したがって、安全限界時にPC鋼材破断が生じないための鋼材種、鋼材係数の下限、初期導入力、鋼材配置などの条件を整理する必要がある。

参考文献

- 1) 日本建築学会プレレストレストコンクリート構造運営委員会：「性能評価型PC規準に向けて—設計手法とその課題—」，大会（北海道）PC構造パネルディスカッション資料，pp.7～10，2004.8
- 2) 日本建築学会PC部材終局性能・設計法小委員会：「プレレストレスト（鉄筋）コンクリート部材の終局性能評価手法，第5章PC梁部材の各種限界状態についての試案」，pp.95～103，2004.1日本建築学会シンポジウム
- 3) 「同上：第3章 3.2 PC部材の残留変形率」，pp.55～60，2004.1日本建築学会シンポジウム
- 4) 阿波野，中塚等：圧着型および一体型片持PC梁の塑性ヒンジ機構に関する実験研究（その1～2），PC技術協会，第7回プレ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.129～134，1997.10

【2005年5月13日受付】