

6 章 部材の評価

6.1 一般

- (1) 部材の耐震性能評価にあたっては、設計地震動と構造物の種類に応じて部材に要求される耐震性能を明確にし、その性能を満足することを照査するものとする。
- (2) 部材の耐震性能は、構造物に要求される耐震性能のほか部材特性と損傷レベルを考慮して設定するものとする。
- (3) 部材特性としては、少なくとも以下に示す項目に着目するものとする。
 - ① 部材力-変形関係
 - ② 部材耐力
 - ③ 変形性能
 - ④ 残存耐力
- (4) 損傷レベルは、部材機能と復旧の難易を考慮して設定するものとする。

【解説】

構造物に必要な耐震性能としては機能の確保、安全性、および復旧の難易などが挙げられる。しかし、具体的な耐震性能については設計地震動レベルと構造物の種類によって異なり、そのため構造物を構成する部材に対しても、その要求性能は一般にこれらの違いにより異なる。例えば、レベル2地震動に対する高架橋の柱部材の耐震性能としては、鉛直支持力および水平抵抗力を保持しながらかつ所要の変形性能を有していることが要求されるが、開削トンネルの中柱に対しては、鉛直支持力と変形性能に比べて水平抵抗力の重要性はさほど高くない。したがって、設計地震動レベルと構造物の種類に応じ、復旧の難易を考慮してコンクリート部材に要求される耐震性能を明確にし、これを照査することが大切である。

すなわち、構造部材の力学的特性を正確にあるいは安全側に考慮して求められた構造物の地震時挙動に対して、力学的観点から構造物の機能や安全性に関わる照査を行うとともに、その際に想定される部材の損傷の観点から構造物の機能や安全性ならびに復旧に関わる照査を行うことが重要である。

6.2 部材の損傷レベルの照査

部材の損傷レベルの照査は、応答値が損傷レベルに対応した部材性能を一定の安全係数を有して超えないことを確認することにより行うものとする。

【解説】

一般に、部材の損傷レベルは以下の式により照査することができる。

$$\gamma_i S_d / R_d \leq 1.0 \quad (\text{解 6.2-1})$$

$$S_d = \gamma_a S(F_d) \quad (\text{解 6.2-2})$$

$$R_d = R(f_d) / \gamma_b \quad (\text{解 6.2-3})$$

ここに、 S_d : 設計応答値

R_d : 部材の損傷レベルに応じた設計部材性能

$S(F_d)$: 設計荷重 F_d に対する応答値

$R(f_d)$: 設計材料強度 f_d に対する部材性能

γ_i : 構造物係数

γ_a : 構造解析係数

γ_b : 部材係数

応答値 $S(F_d)$ は、一般に非線形解析法により計算される部材の変形量、断面力などであり、 $R(f_d)$ は、部材の損傷レベルに応じた変形量、断面力などの設計部材性能である。ここで、構造物係数 γ_i は構造物の重要度などによって異なる。構造解析係数 γ_a は、1.0~1.3 の範囲の値が用いられることが多い。使用する力学モデルとその検証の程度あるいは対象とする変位レベルにより異なる。部材係数 γ_b は 1.0~1.3 の範囲の値が用いられることが多い。対象とする限界値が変形量か断面力（及びその破壊モード）かによっても異なる。

6.3 鉄筋コンクリート部材

6.3.1 部材特性のモデル化

- (1) 部材特性のモデル化にあたっては、コンクリートや鉄筋など構成材料の力学的特性およびこれらの複合作用であるコンクリート部材の力学的特性を適切に考慮しなければならない。
- (2) 部材特性のモデル化には、対象とする部材の種類に応じて以下に示す事象を反映させるのがよい。
 - ① コンクリートのひび割れ
 - ② 鉄筋の降伏
 - ③ コンクリートの圧壊
 - ④ 鉄筋の座屈やはらみ出し
 - ⑤ 交番応力による材料特性の変化
 - ⑥ 鉄筋の破断

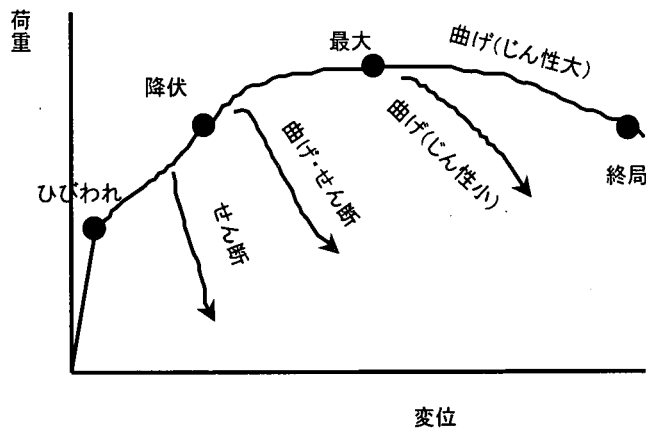
【解説】

(1)および(2)について

コンクリート部材は、部材の形状や破壊形態によって損傷に至る過程や損傷状況が異なる。そのためあらかじめ破壊形態を含めた部材特性を明確にしておかなければならない。

部材特性のモデル化は、一般に地震時を想定した部材の交番荷力実験の結果をもとに検討するのがよい。実績があり信頼できる解析結果をもとにしてもよい。ここでは、交番荷重下の荷重-変位包絡線について力学的特性と損傷の観点から述べる。具体的な荷重-変位履歴関係については、7章で示される。

一例として、一定の軸力下で曲げモーメントとせん断力の組み合わせ交番力を受ける鉄筋コンクリート柱部材（棒部材）の荷重-変位包絡線について説明する（解説図 6.3.1-1 参照）。



解説図 6.3.1-1 鉄筋コンクリート棒部材の破壊モードと荷重－変位関係包絡線

せん断破壊しないようにせん断補強鉄筋（または帯鉄筋）や中間帯鉄筋が十分に配置されたものでは、部材は延性的な破壊モードを示す。荷重－変位関係の包絡線はコンクリートのひびわれや柱筋の降伏時を境にその勾配は比較的明確に変化する。一般に柱断面における圧縮側被りコンクリートが剥離する前に荷重は最大荷重に達する。最大荷重を経たあとは、変形が増加するにつれて荷重が低下するいわゆる軟化域となる。荷重がある値まで低下した時の変位を終局変位と定義し、その荷重の大きさとしては降伏荷重値あるいは最大荷重の 0.8 倍の値が一般に用いられる。終局変位を部材降伏時の変位で除したものが変位靱性率である。

一方、せん断補強鉄筋が十分に配置されないものでは、曲げ降伏する前にせん断破壊する場合があります。脆性的な破壊モードとなる。せん断補強鉄筋がある程度以上配置される場合には、せん断ひびわれが生じても荷重の増加を示し、せん断補強鉄筋が降伏したのち圧縮縁コンクリートがずれ破壊を起こして部材が破壊する。これに対してせん断補強鉄筋が著しく少ない場合には、斜めひびわれの発生と同時に破壊に至ることがある。

部材諸元や加力条件によっては柱筋が降伏した後に斜めひびわれが進展してせん断破壊する場合があります。その場合は幾分延性的な破壊となるが、多くの場合荷重の繰返しに耐えられない。

曲げ破壊モードの場合でもせん断補強鉄筋（または帯鉄筋）や中間帯鉄筋の量が十分大きくないと、靱性率は大きくなりません。

軸力が大きいと一般に靱性率は低下する。せん断に加えてねじりが同時に作用すると一般に靱性率は低下する。中空断面は、中実断面の場合に比べてせん断とねじりに対し敏感である。

規準類における鉄筋コンクリート棒部材の部材特性の取り扱いを、以下に紹介する。

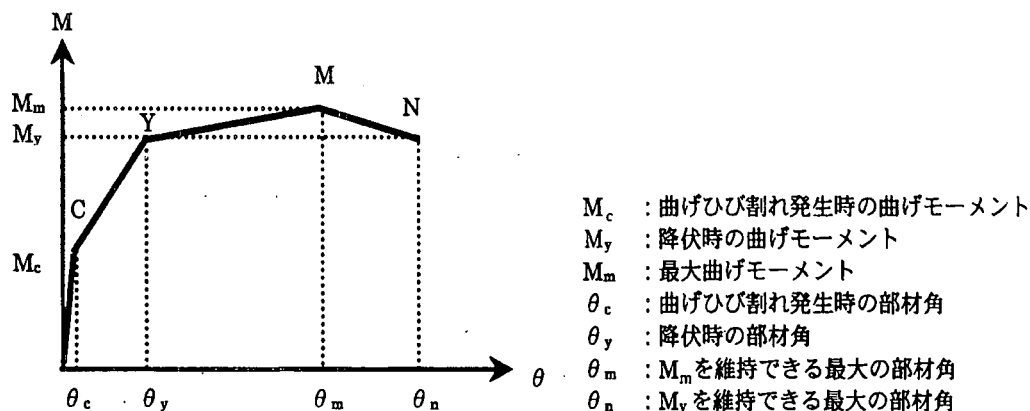
① 運輸省・鉄道構造物等設計標準耐震設計編（平成 11 年）¹⁾

部材が曲げ耐力に達するときの部材のせん断耐力と設計せん断耐力の大小関係を調べ、それによって破壊モードがせん断破壊か曲げ破壊かを判断する。

曲げ破壊型の場合、荷重と変形関係の包絡線を計算する方法が、せん断スパン比 1.5 以上でかつ作用軸力が釣合軸力以下の場合について述べられている。ただし、荷重としては曲げモーメントが、変形としては部材角または曲率が用いられている。

すなわち、解説図 6.3.1-2 において、 M_c 値はコンクリートの縁引張り応力度がコンクリートの設計曲げ強度に達する時の値、 M_y 値は引張り鉄筋が降伏するときの値、 M_m 値はコンクリートの圧縮ひずみが 0.0035 に達するときの値、 M_{on} 値は M_y 値と同じとして求められる。変形としての部材角に関しては、 θ_y 値は M_y 時の弾性変形による部材回転角と鉄筋の拔出しによる部材回転角の和として、 θ_m 値は M_m 時の弾性変形と塑性ヒンジによる部材回転角および鉄筋の拔出しによる部材回転角の和として、 θ_{on} 値は M_{on} 時の弾性変形と塑性ヒンジによる回転角および鉄筋の拔出しによる部材回転角の和として

求められる。



解説図 6.3.1-2 鉄筋コンクリート部材の荷重-変位関係包絡線の模式図

② 土木学会コンクリート標準示方書（平成8年）²⁾

部材が曲げ耐力に達するときの部材各断面のせん断力と設計せん断耐力の大小関係を調べ、破壊モードがせん断破壊か曲げ破壊かを判断する。

曲げ破壊型部材の荷重-変位関係包絡線の模式図が、じん性率の算定方法の解説として部材降伏と終局変位に着目し例示されている。

③ 道路橋示方書耐震設計編（平成8年）³⁾

橋脚の曲げ耐力をせん断耐力あるいは交番加力の影響を考慮したせん断耐力と比較し、その大小によってせん断破壊型、曲げ損傷からのせん断破壊移行型、および曲げ破壊型のいずれの破壊モードであるかを判断する方法が示されている。

曲げ破壊型部材のモデル化した荷重-変位関係包絡線（完全弾塑性型）が、実験結果を基に部材降伏と終局変位に着目して例示されている。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，1999.
- 2) 土木学会：平成8年制定 コンクリート標準示方書 耐震設計編，1996.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.

6.3.2 損傷レベルの評価

鉄筋コンクリート部材の損傷レベルは、部材の力学的特性および以下に示す損傷に関わる事象を考慮して設定するのがよい。

- ① 鉄筋の降伏
- ② 残留ひび割れ
- ③ 残留変形
- ④ コンクリートの剥落
- ⑤ コンクリートの圧壊
- ⑥ 鉄筋の座屈やはらみ出し
- ⑦ 鉄筋の破断

【解説】

a) 鉄筋コンクリート棒部材

「6.3.1 部材特性のモデル化」で述べた部材特性と部材の損傷レベルは、部材の種類毎に互いに密接な関係がある。解説図 6.3.1-1 における鉄筋コンクリート部材の曲げ破壊モードの場合について、一般的な損傷形態を述べると次のとおりである。

部材降伏まではひびわれが生じても除荷後は変形がほぼ元に戻り、生じていたひびわれもほぼ閉じる。再使用においては、初期剛性が小さいことを除けば部材性能の低下は無いと考えてよい。いったん部材が降伏するとひびわれと変形が残留する。その程度は、それまで経験した最大変位の大きさに影響を受ける。鉄筋の大きな塑性ひずみの繰返しを受けた部材を鉄筋の取替えなしで使用すると、次の大きな地震動を受けた際に十分な耐震性能を発揮できないことがある。

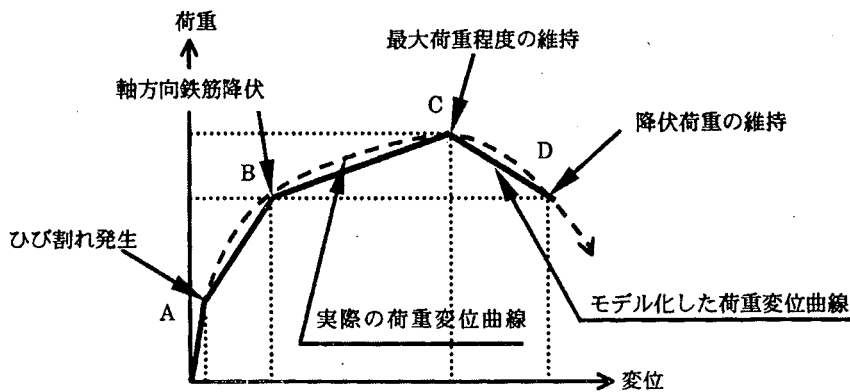
荷重が最大に達する頃に、部材断面の圧縮縁のかぶりコンクリートの一部が圧壊し剥離する。このとき、既に柱筋の座屈が始まっている。

鉄筋コンクリート棒部材の損傷レベルに関する規準類の取り扱いを以下に紹介する。

① 運輸省・鉄道構造物等設計標準耐震設計編（平成 11 年）¹⁾

低軸力下の曲げ破壊型鉄筋コンクリート柱部材に対し、解説図 6.3.2-1 に対応して次のような損傷レベルが紹介されている。

- 損傷レベル 1：荷重変位曲線の包絡線上の B 点までの範囲
 - 損傷レベル 2：荷重変位曲線の包絡線上の C 点までの範囲
 - 損傷レベル 3：荷重変位曲線の包絡線上の D 点までの範囲
 - 損傷レベル 4：荷重変位曲線の包絡線上の D 点以降の範囲
- 損傷と補修工法の例が解説表 6.3.2-1 のように示されている。



解説図 6.3.2-1 鉄筋コンクリート部材の荷重－変位関係包絡線と損傷の発生時期

解説表 6.3.2-1 鉄筋コンクリート部材の損傷と補修工法の例

	荷重変位曲線の包絡線上の特性	損傷状況の例	補修工法の例
A点	コンクリートに曲げひびわれが発生する時点の変位		無補修
B点	軸方向鉄筋が引張り降伏ひずみに達する時点の変位	曲げひび割れ	無補修（場合により耐久性上のひび割れ補修）
C点	最大水平抵抗荷重程度を維持する最大変位	曲げひび割れまたは曲げひび割れとせん断ひび割れ ひび割れ幅の拡大、かぶりコンクリートの剥離	必要によりひび割れ注入・断面修復
D点	降伏荷重を維持する最大変位	かぶりコンクリートの剥落、内部コンクリートの損傷、軸方向鉄筋の座屈、帯鉄筋の変形	ひび割れ注入、断面修復、必要により帯び鉄筋等の整正
D点以降		かぶりコンクリートの剥落、内部コンクリートの損傷、軸方向鉄筋の座屈や場合により破断、帯鉄筋の変形や場合により破断	ひび割れ注入、断面修復、帯鉄筋等の整正、軸方向鉄筋の座屈が著しい場合は部材の取替え

損傷レベルの分岐点に対応するものは、降伏変位時、最大荷重時、降伏荷重を維持する最大変位であり、これらの値の算定法は前述「6.3.1 部材特性のモデル化」の解説で紹介したとおりである。

最大荷重時や終局時の部材回転角を増加させる要因としては、帯鉄筋比の増加、帯鉄筋降伏強度の増加、引張り鉄筋比の減少、軸応力度の減少などである。

② 土木学会コンクリート標準示方書（平成8年）²⁾

損傷レベルとしては、下記の3つの状態を一般に想定している。構造物の種類に応じた耐震性能には言及されていない。部材の応答値に制限を設けることにより、間接的に構造物の耐震性能を確保するというスタンスに立っている。

耐震性能Ⅰ：地震後も機能が健全で補修をしないで使用可能

耐震性能Ⅱ：地震後に機能が短期間で回復でき、補強を必要としない

耐震性能Ⅲ：地震によって構造物全体系が崩壊しない

このうち耐震性能Ⅰの照査はレベル1地震動に対して行う。すなわち、鉄筋およびコンクリートに発生する応力度が、材料の設計強度以下であることを照査するものとし、鉄筋の設計強度としては規格降伏強度を、コンクリートの設計圧縮強度としては設計規準強度を用いてよいとしている。

耐震性能Ⅱの照査は、構造物の地震時の応答変位または残留変位が制限値以下であることを確かめることにより行う。対象部材に対して、部材が曲げ耐力に達するときの部材各断面のせん断力と設計せん断耐力の大小関係を調べ、破壊モードがせん断破壊か曲げ破壊かを判断する。曲げ破壊モードのときは、部材の設計塑性率が部材の設計靱性率よりも小さいことを確認する。せん断破壊モードのときは、部材の設計せん断力が設計せん断耐力よりも小さいことを確認する。これは、脆性的な破壊モードを避けるとともに、最大荷重後の降伏荷重を維持する最大変位に着目している。

耐震性能Ⅲの照査は、構造物が崩壊しないことを確かめることにより行うものとしている。

解説に耐震性能Ⅱの照査で用いられる設計靱性率の算定式が示されている。これによればじん性率は“設計せん断耐力”と“部材が曲げ耐力に達するときの部材のせん断力”の比が大きいほど大きく、また作用軸応力度が大きいほど小さくなる性質を有している。ここで、“設計せん断耐力”は、交番加力の影響を考慮してコンクリートが受け持つ設計せん断耐力を割り引いた値である。部材諸元のレベルでいえば、設計靱性率を増加させる要因は、せん断スパンの増加、軸方向鉄筋比の減少、側方筋率

の増加，横方向鉄筋比の増加，軸方向鉄筋降伏強度の減少，軸応力度の減少などである．中空断面部材は適用範囲外である．

設計靱性率の算定式は，阪神淡路大震災より前に行われた実験データをもとにしているので，帯鉄筋量が多い柱部材に対しては設計靱性率が過大評価になる場合があるといわれている．これについて，幸左ら⁴⁾により阪神淡路大震災以後の道路系および鉄道系の柱部材の実験データをもとにした評価式が提案されている．

③ 道路橋示方書耐震設計編（平成8年）³⁾

構造物としての橋梁の損傷レベルは，次のように考えている．

供用期間中に発生する確率が高い地震動に対し：

健全性を損なわない．

供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動に対し：

重要度が標準的な橋では，致命的な被害を防止する．重要度が高い橋では，限定された損傷にとどめる．

大きな強度を有する地震動に対しては海溝型と直下型とに分け，地震入力波形の繰返し数の違いによる部材特性（変形能）の相違を考慮している．

橋脚においては，発生確率の高い地震動に対してコンクリートおよび鉄筋ともにそれぞれ設計規準強度と規格降伏点よりも小さい許容応力度以下におさめ，部材として弾性範囲になるようにしている．

発生確率は低いが大きな強度の地震動に対しては，曲げ耐力をせん断耐力あるいは交番加力の影響を考慮したせん断耐力と比較しその大小によって，せん断破壊型，曲げ損傷からせん断破壊移行型，および曲げ破壊型のいずれの破壊モードであるかを判断する．せん断破壊型または曲げ損傷からせん断破壊移行型の場合には，それぞれせん断耐力および交番加力の影響を考慮したせん断耐力と比較することにより照査を行う．

曲げ破壊型の場合は，応答変位量が許容塑性率（安全率を見込んだ終局変位）以下であることを検討することにより照査する．ここで応答変位量はエネルギー一定則を用いて計算される．残留変位量に関する照査も別途行う．これは，脆性的な破壊モードを避けるとともに，最大付近で荷重が低下し始めるころの変位に着目し，重要度の高い橋梁に対してはかぶりコンクリートが大きく剥離する前の状態に抑え，一般の橋梁に対してはかぶりコンクリートが大きく剥離するかしないかという程度に損傷を抑えていることに相当している．また，残留変位量に対する照査は，復旧性を考慮したものである．

許容塑性率は，“終局変位と降伏変位の差”と“降伏変位”の比の1次式を用いて計算される．終局変位は降伏変位と同様，断面の曲率を橋脚高さ方向に2回積分して計算により求める．曲げモーメントと曲率の関係には，ひび割れ時，降伏時，終局時などを折点とする折線を用いる．橋脚の曲げモーメント分布は高さ方向に直線分布と考え，曲率分布には橋脚の基部の塑性ヒンジ長を考慮する．塑性ヒンジ長は，せん断スパン比の関数となっている．断面の曲率は，鉄筋とコンクリートの応力-ひずみ曲線および平面保持の仮定を用いて計算する．コンクリートの応力-ひずみ曲線において，コンクリートのピーク応力度とそのときのひずみ量は横拘束筋の体積比の関数となっており，横拘束筋の拘束効果が反映されている．

許容塑性率を増加させる要因は，軸方向鉄筋比の減少，側方筋率の減少，横方向鉄筋比の増加，コンクリート強度の増加，柱筋降伏強度の減少，軸応力度の減少などである．許容塑性率の式は，中実断面のみならず中空断面の橋脚にも使用されることを想定している．

b) 鉄筋コンクリート面部材

部材厚さの4倍以上の水平方向の長さを持ち，断面力を受ける壁状の部材をここでは面部材と呼ぶ．面部材に面外方向の地震力が作用するような場合には，その挙動は柱などの棒部材と同様であるので，

棒部材として損傷レベルを照査してよい。

面部材が面内力を受ける場合は、構造物の耐震性能を満足するように損傷レベルを設定し、損傷を表すことのできる照査指標を用いて損傷レベルを照査するのがよい。損傷レベルとしては、下記のようなものが想定される。

損傷レベル1：補修を必要としない程度の軽微な損傷。

損傷レベル2：場合によって補修を必要とする損傷。

損傷レベル1に対する部材特性上の事象としては、応答せん断力が鉄筋降伏時耐力やコンクリートの圧縮耐力に対して一定の安全率を有する限界値に達する場合が考えられる。損傷レベル2に対しては、応答せん断力が一定の安全率を有して設計せん断耐力以下であることが考えられる。

土木学会コンクリート標準示方書²⁾では、これらに対応するものとして、鉄筋コンクリート壁のそれぞれ耐震性能Ⅰおよび耐震性能Ⅱに対する照査法が定められている。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，1999.
- 2) 土木学会：平成8年制定 コンクリート標準示方書 耐震設計編，1996.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.
- 4) 幸左，鈴木：耐力比を用いた RC 橋脚のじん性率評価式の検討，土木学会構造工学論文集 Vol.44A, pp.1383-1390,1998.

6.4 プレストレストコンクリート部材

6.4.1 部材特性のモデル化

- (1) 部材特性のモデル化にあたっては、コンクリート、鉄筋、PC鋼材など構成材料の力学的特性、プレストレス量およびこれらの複合作用であるコンクリート部材の力学的特性を適切に考慮しなければならない。
- (2) 部材特性のモデル化には、対象とする部材の種類に応じて以下に示す事象を反映させるのがよい。
 - 1) コンクリートのひび割れ
 - 2) 鉄筋やPC鋼材の降伏
 - 3) コンクリートの圧壊
 - 4) 鉄筋の座屈やはらみ出し
 - 5) 交番応力による材料特性の変化
 - 6) 鉄筋やPC鋼材の破断

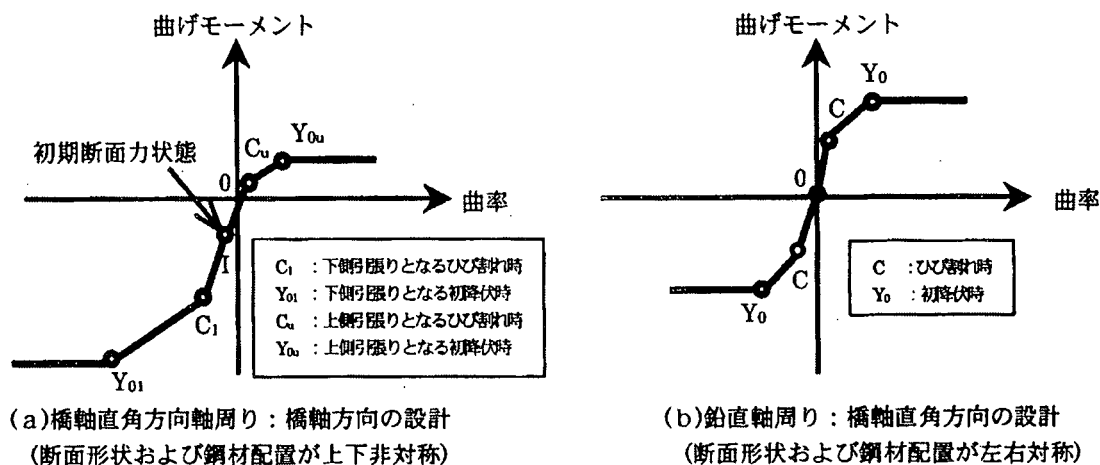
【解説】

プレストレストコンクリート橋脚のようにPC鋼材が部材断面に対称に配置される場合には、主軸方向の荷重－変位関係包絡線は正載荷側と負載荷側で同様のものとなるが、桁のようにPC鋼材が断面内で偏在する場合には、これが異なることに留意する必要がある。

橋脚に関しては、プレストレストコンクリート技術協会の「プレストレストコンクリート橋脚の耐震設計ガイドライン（平成11年11月）」¹⁾に多くの実験データが紹介されており、荷重－変位関係包絡線の模式図が解説図6.4.1-1のように示されている。プレストレスの量にもよるが一般的には、鉄筋コンクリートに比べてひび割れ発生荷重が大きいこと、適当なPC鋼材を配置した場合には、鉄筋コ

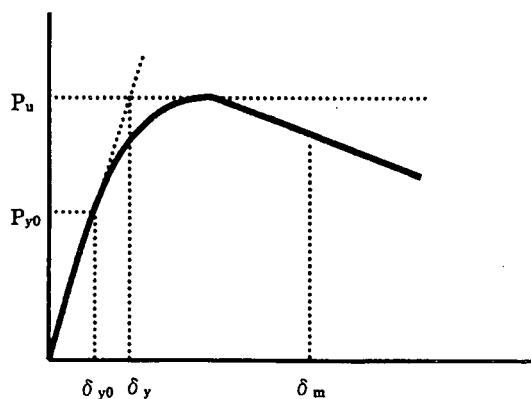
ンクリートにおけるような柱筋の座屈による最大耐力以降の急激な耐力低下がなく、なめらかな耐力低下を示すことが特徴といえる。

なお、同ガイドラインは、曲げ破壊型になるような十分な帯鉄筋を配置した橋脚を対象としている。また、耐震性能の評価手法として道路橋示方書の鉄筋コンクリート橋脚と整合性が採られており、荷重-変位関係包絡線（完全弾塑性型）が、部材降伏と終局変位に着目して示されている。



解説図 6.4.1-1 プレストレストコンクリート橋脚の荷重-変位関係包絡線の模式図

桁に対する曲げモーメント-曲率関係包絡線としては、プレストレストコンクリート技術協会の「PC 構造物耐震設計規準（案）」²⁾に解説図 6.4.1-2 に示すようなモデル図が紹介されている。また、PC 鋼材が断面内で上縁または下縁に偏在する桁の鉛直方向加力実験結果と、コンクリートのひび割れ、鉄筋降伏、PC 鋼材比例限界、コンクリートの圧縮限界ひずみを考慮した計算結果と比較検討したものに、大塚ら³⁾の研究がある。



解説図 6.4.1-2 プレストレストコンクリート箱桁の曲げモーメント-曲率関係の模式図

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート技術協会：プレストレストコンクリート橋脚の耐震設計ガイドライン，1999.
- 2) プレストレストコンクリート技術協会：PC 構造物耐震設計規準（案），2000.
- 3) 大塚，岡田，角本，堤：PC 箱桁の復元力特性に関する交番載荷実験，プレストレストコンクリ

6.4.2 損傷レベルの評価

プレストレストコンクリート部材の損傷レベルは、部材の力学的特性および以下に示す損傷に関わる事象を考慮して設定するのがよい。

- ① 鉄筋やPC鋼材の降伏
- ② 残留ひび割れ
- ③ 残留変形
- ④ コンクリートの剥落
- ⑤ コンクリートの圧壊
- ⑥ 鉄筋の座屈やはらみ出し
- ⑦ 鉄筋やPC鋼材の破断

【解説】

適切な帯鉄筋を配置した条件下においては、一般の鉄筋コンクリート部材と比較してかぶりコンクリートの剥落時期や軸方向鉄筋の座屈が荷重-変位関係包絡線の変化に大きな影響を与えないことが知られている。そのため、鉄筋コンクリートの場合におけるように部材特性と明確に対応させることは必ずしも容易ではない。今後、この観点からの実験データの整理が必要となろう。残留変形については、一般に鉄筋コンクリート部材に比べて小さいことが知られている。

プレストレストコンクリート棒部材の損傷レベルに関する規準類の取り扱いを以下に紹介する。

① プレストレストコンクリート技術協会・プレストレストコンクリート橋脚の耐震設計ガイドライン (平成11年11月)¹⁾

地震動の強さと発生確率の大小および橋の重要度ランクに応じた橋脚の耐震性能が損傷レベルとの関係で次のように定められている。ここで損傷は、かぶりコンクリートの剥離、軸方向鉄筋の座屈、最大荷重の80%まで低下、という順番に生じることを前提にしている。

耐震性能Ⅰ：健全性を損なわない(損傷レベル1)

耐震性能Ⅱ：限定された損傷にとどめ、地震後の供用性能を確保する(損傷レベル2)

耐震性能Ⅲ：耐震性能Ⅱより大きな損傷を許容するが、地震後の供用性を確保する(損傷レベル3)

耐震性能Ⅳ：耐震性能Ⅲより大きな損傷を許容するが、地震後の供用性を確保する(損傷レベル4)

耐震性能Ⅴ：損傷を限定し、大きな被害を防止する(損傷レベル5)

耐震性能Ⅵ：倒壊を防止する

許容塑性率に関しては、実験データをもとに曲率靱性率を15と考え、これを道路橋示方書の鉄筋コンクリート橋脚の場合と同様の方法で変位靱性率に換算し、安全率を用いて算定するようにしている。安全率は上述の耐震性能と関係づけられている。

② プレストレストコンクリート技術協会・PC構造物の耐震設計規準(平成11年12月)²⁾

地震動の強さと発生確率の大小および構造物の重要度ランクに応じて選定されるプレストレストコンクリート構造物の耐震性能が次のように定められている。

耐震性能Ⅰ：地震後の構造物や部材の機能が健全で、補修を必要としないで供用可能。

耐震性能Ⅱ：地震後の構造物や部材の機能が期待でき、軽微な補修で機能回復が図れる。

耐震性能Ⅲ：耐震性能Ⅱよりは大きな損傷を許容するが、地震後の構造物や部材の機能が期待

でき、補修や補強で機能回復が図れる。

耐震性能Ⅳ：機能回復は期待できないが構造物全体は崩壊しない。

また、部材の健全度レベルが解説表 6.4.2-1 のように示されている。橋梁における耐震性能と部材種別毎の健全度レベルの関係が解説表 6.4.2-2 のように例示されている。プレストレストコンクリート構造物の健全度レベルの評価指標と限界値が解説表 6.4.2-3 のように紹介されている。

解説表 6.4.2-1 プレストレストコンクリート構造物における部材の健全度レベル

部材の健全度レベル	部材の状態	
	力学的状態	補修・補強イメージ
健全度レベル 1	無損傷と考える状態 (弾性的挙動レベル)	補修不要
健全度レベル 2	損傷箇所が限定され、かつ耐力・変形能力とも十分に有する状態	ほとんど補修を必要としない状態
健全度レベル 3	損傷が限定され、耐力が安定し、変形能力に余裕がある状態	補修・補強により使用可能な状態
健全度レベル 4	耐力・変形能力ともほぼ限界の状態	部材の取り替えが必要

解説表 6.4.2-2 プレストレストコンクリート橋梁における耐震性能と限界状態ならびに部材の健全度レベルの関係

耐震性能	部位	構造物全体としての限界状態			
		上部工	下部工	耐力に係わる付属物(支承)	供用性に係わる付属物(伸縮継手)
耐震性能 1	健全	健全	健全	健全	健全
	健全度レベル 1	健全度レベル 1	健全度レベル 1	健全度レベル 1	健全度レベル 1
耐震性能 2	限定された損傷 軽微な補修必要	限定された損傷 軽微な補修必要	限定された損傷 軽微な補修必要	限定された損傷 軽微な補修必要	限定された損傷、 補修必要
	健全度レベル 2	健全度レベル 2	健全度レベル 2	健全度レベル 2	健全度レベル 3
耐震性能 3	限定された損傷 軽微な補修必要	大きな被害なし 補修・補強必要	大きな被害なし 補修・補強必要	大きな被害なし 補修・補強必要	取り替え必要
	健全度レベル 2	健全度レベル 3	健全度レベル 3	健全度レベル 3	健全度レベル 4
耐震性能 4	大きな被害なし	倒壊はなし	大きな被害	破壊	
	健全度レベル 3	健全度レベル 4	健全度レベル 4	健全度レベル 4	—

解説表 6.4.2-3 部材種別と健全度レベルの評価指標と限界値

部材	健全度レベル			
	1	2	3	4
PC 上部 構造部材	ひび割れは生じるが、補強鉄筋やPC鋼材の降伏はないレベル	補強鉄筋は降伏するが、PC鋼材が降伏しない状態 補修必要なし	PC鋼材は降伏するがコンクリートの剥離は生じない状態。最大耐力時	コンクリートは圧壊して、かぶりコンクリート剥離するがPC鋼材には余裕があり耐力は急激には低下しない。
	補強鉄筋初降伏未満	PC鋼材の比例限界程度(8000 μ 程度) 注1) 注2)	コンクリートの圧縮ひずみが2000 μ またはPC鋼材が0.2%永久ひずみに対する荷重程度 注2)	
PC 下部 構造部材	ひび割れは生じるが、残留ひび割れがほとんど生じないレベル。	鉄筋は降伏するが、復元力特性は原点指向を示し、残留ひび割れが小さい状態	かぶりが剥離するが、耐力に影響しない。健全度レベル2よりは損傷が大きいが復元力特性は原点指向を示し、残留ひび割れは大きくない状態	鉄筋は座屈するが耐力は急激には低下しない。
	鉄筋初降伏未満 $\mu < 1$ 注3)	$\mu = 2$ 程度	PC鋼材降伏レベル $\mu = 4$ 程度	$\mu = 6$ 程度
RC 下部 構造部材	ひび割れは生じるが、残留ひび割れがほとんど生じないレベル。	鉄筋は降伏するが、残留ひび割れはあまり大きくない程度	2よりは損傷が大きいが残留ひび割れはあまり大きくない程度	かぶりコンクリートが大きく剥離、鉄筋座屈直前
	鉄筋初降伏未満 $\mu < 1$	$\mu = 2$ 程度	$\mu = 4$ 程度	$\mu = 6$ 程度

注1) PC および PPC 上部構造部材の内、検討する曲げモーメントに対して中立軸より引張り側に PC 鋼材が配置されていない場合には、限界値を補強鉄筋の降伏未満とする。

注2) 限界値は、PC 鋼線および PC 鋼より線の場合を示す。

注3) μ は部材のじん性率を示す。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート技術協会：プレストレストコンクリート橋脚の耐震設計ガイドライン，平成 11 年 11 月
- 2) プレストレストコンクリート技術協会：PC 構造物耐震設計規準（案），平成 12 年 12 月

6.5 鉄骨鉄筋コンクリート部材

6.5.1 一般

鉄骨鉄筋コンクリート部材とは、鉄骨が埋め込まれた鉄筋コンクリート部材であり、鉄筋コンクリート部材と比べ、部材の耐力や変形性能を向上させることができる。これは、コンクリートが鉄骨の局部座屈を抑制する、鉄骨により部材のせん断耐力が増加する等によるものである。

【解説】

鉄骨鉄筋コンクリート部材とは、鉄骨が埋め込まれた鉄筋コンクリート部材であり一般に、鋼断面

と鉄筋コンクリート断面の合成効果を期待する。

鉄骨部材には、様々な形状の部材があるが、ここでは載荷試験等が多く行われ、部材の耐力や変形性能が定量的に把握されている H 形鋼を用いた鉄筋鉄骨コンクリート部材について記述する。

6.5.2 部材特性のモデル化

鉄骨鉄筋コンクリート部材では、以下に示す部材の損傷状態等を考慮して、部材の破壊形態の判定を行い、その破壊形態に応じて部材の変形性能のモデル化を行う。

部材の破壊形態の判定は一般に、部材が有するせん断耐力と曲げ耐力に達するときに部材に発生する最大せん断力を比較することによって行う。

- 1) コンクリートのひび割れ
- 2) 軸方向鋼材の降伏等の材料の非線形特性
- 3) かぶりコンクリートの剥離
- 4) 軸方向鋼材の座屈

【解説】

(1) 鉄骨鉄筋コンクリート部材の破壊形態

鉄骨鉄筋コンクリート部材の破壊形態の判定においては、部材に発生する最大せん断力は実際の曲げ耐力から求める必要があるため、曲げ耐力の算定には、全ての軸方向鋼材（軸方向鉄筋および軸方向鉄骨）を考慮し、かつ引張鋼材の実際の降伏強度を考慮した材料強度を用いるとともに、破壊断面の相違による曲げ耐力の増加等の影響を考慮する必要がある。

鉄道設計標準^リでは、鉄筋鉄骨コンクリート部材の破壊形態は、以下の式により判定している。

$$\text{曲げ破壊モード} : V_{mu} / V_{yd} \leq 1.0 \quad (\text{解 6.5.2-1})$$

$$\text{せん断破壊モード} : V_{mu} / V_{yd} > 1.0 \quad (\text{解 6.5.2-2})$$

ここに、 V_{mu} ：部材が曲げ耐力に達するときのせん断力。この場合、曲げ耐力は、鋼材の実引張降伏強度を用い、かつ断面内のすべての軸方向鋼材を考慮して算出する。

V_{yd} ：設計せん断耐力

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{wd} + V_{sd} \quad (\text{解 6.5.2-3})$$

ここに、 V_{cd} ：せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断力。

V_{wd} ：せん断補強鉄筋により受け持たれる棒部材の設計せん断耐力。

V_{sd} ：鉄骨部材により受け持たれる棒部材の設計せん断耐力。

(2) 鉄骨鉄筋コンクリート部材の変形性能

曲げ破壊モードの部材の変形性能については一般に、曲げひび割れ点、曲げ降伏点、曲げ最大耐力点を考慮したテトラリニア型の復元モデルにより表される。

せん断破壊モードの部材の変形性能については、曲げ降伏前にせん断破壊する部材では、曲げ降伏点までは、曲げ破壊モードの部材のテトラリニア型の復元モデルを準用できる。ただし、曲げ降伏後せん断破壊する部材では、降伏時においてせん断ひび割れの影響が大きいと考えられるため、変形性能を別途適切にモデル化する必要がある。

変形性能のモデル化においては、鉄骨鉄筋コンクリート部材の形式、想定する部材寸法、部材形状、せん断スパン、軸力範囲等のモデルの適用範囲を明確にしつつ、軸方向鋼材の抜け出しや塑性ヒンジの発生の影響についても考慮する必要がある。

鉄骨鉄筋コンクリート部材には、埋め込み形式、被服充填形式、被覆形式などの種々の形式があり、

それぞれの形式において部材の変形性能を適切に評価するには今後、弾性域を越えたレベルでの鋼とコンクリートとの力の伝達メカニズム、特に、繰返し荷重下における挙動に関する研究が必要である。なお、繰返し載荷実験などにより信頼できるデータが得られ、それに基づいて適切な解析モデルが得られている場合には、それによって部材のモデル化を行っても良い。

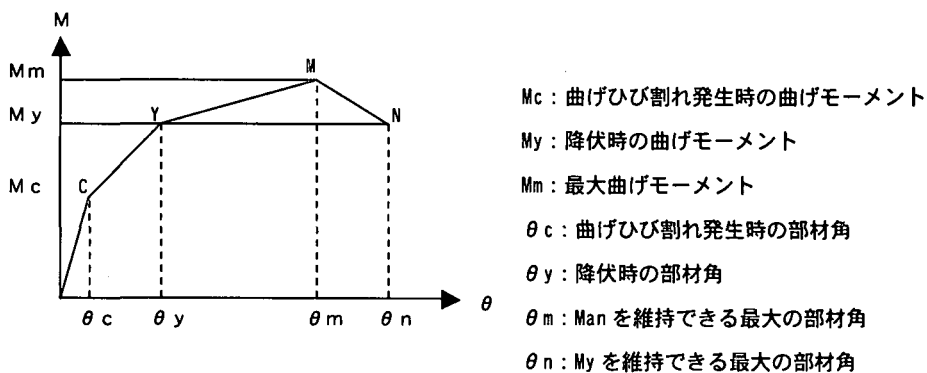
鉄道設計標準¹⁾では、鉄筋鉄骨コンクリート部材の部材特性のモデル化は、以下の通り行われている。この方法は、充腹型鉄骨を鉄筋とともに用いる構造を対象としており、作用軸力は、鉄道構造物の鉄骨鉄筋コンクリート橋脚における通常の軸力範囲を想定したものである。

(a) 部材端部の曲げモーメントと部材角の関係を用いる場合

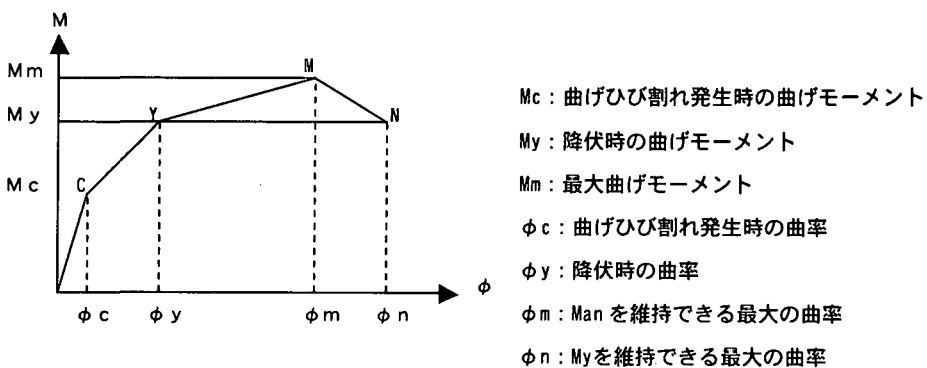
曲げモーメントの分布が直線的に変化する部材は、部材の非線形性を部材端部の曲げモーメントと部材角の関係として表し、解説図 6.5.2-1 のようにテトラリニアモデルにより表している。

(b) 部材断面の曲げモーメントと曲率の関係を用いる場合

曲げモーメントの分布が曲線的に変化する部材は、部材の非線形性を材軸直交方向の各断面の曲げモーメントと曲率の関係として表し、解説図 6.5.2-2 のようにテトラリニアモデルにより表している。



解説図6.5.2-1 部材端部の曲げモーメントと部材角の関係



解説図6.5.2-2 部材断面の曲げモーメントと曲率の関係

参考文献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，1999。

6.5.3 損傷レベルの評価

(1) 鉄骨鉄筋コンクリート部材の損傷レベルの評価に用いる指標は、部材の破壊形態が曲げ破壊モードとなる場合は、鉄骨鉄筋コンクリート部材の特性に応じた評価指標を用い、部材の破壊形態がせん断破壊モードとなる場合は、せん断耐力を評価指標とする。

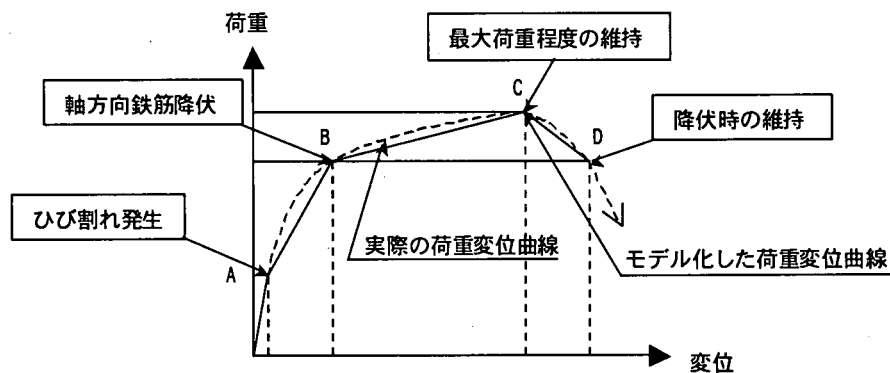
(2) 部材の損傷レベルは、鉄骨鉄筋コンクリート部材の特性、損傷および補修工法等を考慮しつつ定義し、その損傷レベルと評価指標の関係から、部材の損傷レベルの評価を行う。

【解説】

部材の破壊形態が曲げ破壊モードとなる場合の損傷レベルの評価指標は、鉄筋コンクリート部材と同様に、部材の変形（部材角または曲率）を評価指標とする。部材の変位を解析により直接算定することが可能な場合には、変位を直接評価指標とすることができる。しかし、設計実務において評価指標は非線形解析に用いる部材の非線形情報と一致していることが望ましいことから、一般に部材角または曲率を評価指標とする場合が多い。

部材の破壊形態がせん断破壊モードとなる場合の損傷レベルの評価指標は、鉄筋コンクリート部材と同様に、部材の変形と関連付けることが現状では困難であることから、部材のせん断耐力を評価指標とする。

鉄道設計標準¹⁾では、鉄筋鉄骨コンクリート部材の損傷レベルの評価は、以下の通り行われている。



A点：コンクリートにひび割れが発生する時点の変位

B点：軸方向鉄筋が引張降伏ひずみに達する時点の変位で、残留変位が小さく、マクロ的には弾性的挙動を呈するので、残留ひび割れ幅も比較的小さい。

C点：最大水平抵抗荷重程度を維持する最大変位で、場合によりかぶりコンクリートの剥離し、残留ひび割れ幅も増加する。

D点：B点相当の水平抵抗力を維持する最大変位で、軸方向鉄筋の座屈が顕著になり、場合により鉄骨フランジの局部座屈も発生する。作用軸方向によっては軸方向変形も生じる。

解説図6.5.3-1 鉄骨鉄筋コンクリート部材の荷重変位曲線の包絡線（低軸力下）

(a) 部材角を評価指標とする場合

柱部材のように曲げモーメント分布が直線的に変化する部材は、部材角を評価指標として損傷レベルに関する評価を行う。

(b) 曲率を評価指標とする場合

梁部材のように曲げモーメント分布が曲線的に変化する部材は、部材断面の曲率を評価指標とし

て損傷レベルに関する評価を行う。

損傷レベル1：荷重変位曲線の包絡線上のB点までの変位

損傷レベル2：荷重変位曲線の包絡線上のC点までの変位

損傷レベル3：荷重変位曲線の包絡線上のD点までの変位

損傷レベル4：荷重変位曲線の包絡線上のD点以後の変位

解説表6.5.3-1 鉄骨鉄筋コンクリート部材の特性(損傷および補修工法の関係)

	荷重変位曲線の包絡線上の特性	損傷状況の例	補修工法
A点	コンクリートに曲げひび割れが発生する時点の変位		無補修
B点	軸方向鉄筋が引張降伏ひずみに達する時点の変位	曲げひび割れ	無補修(場合により耐久性上のひび割れ注入)
C点	最大水平抵抗荷重程度を維持する最大変位	曲げひび割れまたは曲げひび割れとせん断ひび割れ、ひび割れ幅の拡大、かぶりコンクリートの剥落	必要によりひび割れ注入、断面修復
D点	降伏荷重を維持する最大変位	かぶりコンクリートの剥落、内部コンクリートの損傷、軸方向鋼材の局部座屈、帯鉄筋の変形	ひび割れ注入、断面修復、要により帯鉄筋等の修正
D点以降		かぶりコンクリートの剥落、内部コンクリートの損傷、軸方向鋼材の局部座屈や場合により軸方向鉄筋の破断、帯鉄筋の変形や場合により破断	ひび割れ注入、断面修復、帯鉄筋等の修正、軸方向鋼材の座屈が著しい場合は部材の取替え

参考文献

- 2) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，平成11年10月，鉄道総合技術研究所
- 3) 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物，平成9年度，土木学会
- 4) 鉄骨鉄筋コンクリート柱の変形性能の定量評価に関する研究，1999.4，土木学会論文集 No.619
- 5) SRC 部材の変形性能と復元力特性，1999.4，鉄道総研報告

6.6 コンクリート充填鋼管(CFT)部材

6.6.1 一般

コンクリート充填鋼管（以下、CFT と呼ぶ。）部材とは、内部にコンクリートを充填させた鋼管部材であり、コンクリートを充填しない鋼管部材と比べ、部材の耐力や変形性能を向上させることができる。これは、充填コンクリートが鋼管の局部座屈を抑制する、鋼管の拘束効果によって充填コンクリートの圧縮強度が増加する等によるものである。

【解説】

CFT 部材とは、内部にコンクリートを充填した鋼管部材であるが一般に、鋼断面とコンクリート断面の合成効果は期待しない。なお、合成効果に期待する場合には、スタッドやダイヤフラム等の構造細目やコンクリートの充填性について十分な配慮が必要である。

鋼管部材には、円形、矩形等様々な形状の部材があるが、ここでは載荷試験等が多く行われ、部材の耐力や変形性能が定量的に把握されている円形鋼管を用いた CFT 部材について記述する。

6.6.2 部材特性のモデル化

CFT 部材では、鋼管の降伏や充填コンクリートの降伏等の材料の非線形特性や、以下に示す部材の損傷状態等を考慮して、部材の変形性能のモデル化を行う。

- ① 充填コンクリートの破壊
- ② 鋼管の局部座屈
- ③ 塑性ヒンジの発生
- ④ 鋼管の部材端部の抜け出し

【解説】

(1) CFT 部材の破壊形態

CFT 部材の破壊形態は一般に、曲げ破壊がせん断破壊に先行する曲げ破壊モードとなるため、破壊形態の判定は行わない。なお、せん断耐力を算定する必要がある場合は、せん断に対する鋼とコンクリートの協働作用について未だ不明な点が多いことから、鋼管部材のみでせん断力を負担するものとする。

(2) CFT 部材の変形性能

CFT 部材の変形性能については一般に、曲げ降伏点、曲げ最大耐力点を考慮したトリリニア型の復元モデルにより表される。

変形性能のモデル化においては、CFT 部材の形式、想定する部材寸法、部材形状、せん断スパン、軸力範囲等のモデルの適用範囲を明確にしつつ、充填コンクリートの破壊、鋼管の局部座屈、塑性ヒンジの発生、鋼管の部材端部の抜け出しの影響についても考慮する必要がある。なお、鋼管内部にスタッドを採用したり、リブ付の鋼管などの特殊な部材を採用したりする場合には別途、それらの影響も考慮する必要がある。

CFT 部材の種々の形式・形状に対して、部材の変形性能を適切に評価するには今後、弾性域を越えたレベルでの鋼とコンクリートとの力の伝達メカニズム、特に、繰返し荷重下における挙動に関する研究が必要である。また、矩形断面の場合は、円形断面に比べ形状の差による鋼管の局部座屈抵抗の違いから一般に、変形性能は劣ることが実験により確認されている。しかしながら、矩形断面の変形性能の定量的な算定手法については、試験データ等に限りがあり、一般的な手法を示すに至っていない。

なお、繰返し載荷実験などにより信頼できるデータが得られ、それに基づいて適切な解析モデルが得られている場合には、それによって部材のモデル化を行っても良い。

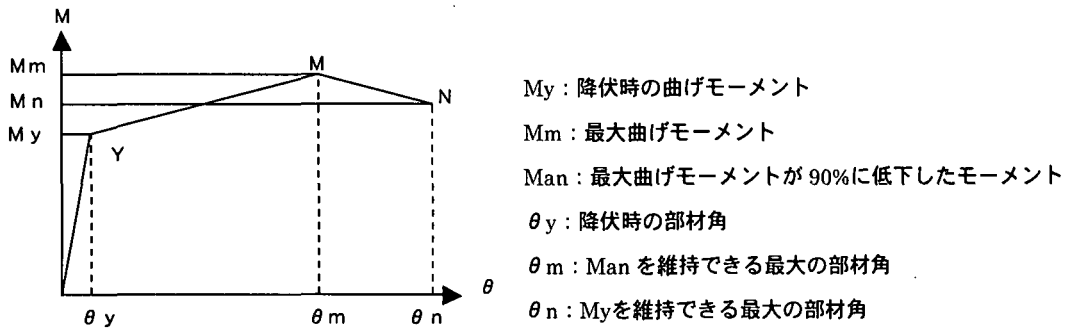
鉄道設計標準^リでは、CFT 部材の部材特性のモデル化は、以下の通り行われている。この方法は、円形鋼管にコンクリートを充填した構造を対象としており、作用軸力は、鉄道構造物の CFT 橋脚における通常の軸力範囲を想定したものである。

(a) 部材端部の曲げモーメントと部材角の関係をを用いる場合

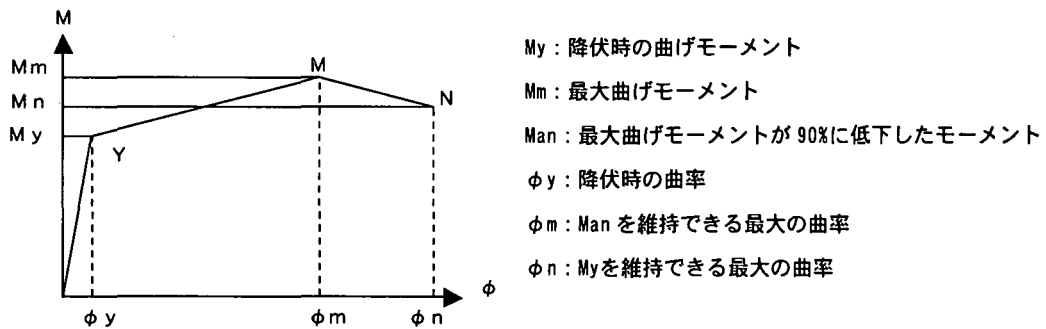
曲げモーメントの分布が直線的に変化する部材は、部材の非線形性を部材端部の曲げモーメントと部材角の関係として表し、解説図6.6.2-1のようにトリリニアモデルにより表している。

(b) 部材断面の曲げモーメントと曲率の関係をを用いる場合

曲げモーメントの分布が曲線的に変化する部材は、部材の非線形性を材軸直交方向の各断面の曲げモーメントと曲率の関係として表し、解説図6.6.2-2のようにトリリニアモデルにより表している。なお、鋼管の部材端部からの抜け出しの影響は、部材端部の曲げモーメントと鋼管の抜け出しによる回転角の関係としてモデル化したバネを部材端に挿入することで表している。



解説図6.6.2-1 部材端部の曲げモーメントと部材角の関係



解説図6.6.2-2 部材断面の曲げモーメントと曲率の関係

道路橋示方書²⁾では、CFT部材の部材特性は、軸力に対しては鋼部材のみで抵抗し、曲げモーメントやせん断力に対しては、充填コンクリートが引張に抵抗せず鋼断面を鉄筋とみなした鉄筋コンクリート部材としてモデル化されている。このモデル化は、コンクリートを充填した片持ち梁部材の水平載荷実験等の結果とよく一致していることが実験的に確認されている。

鋼材の応力度～ひずみ関係のモデル化では、引張側鋼材、圧縮側鋼材とも、最大応力度は設計降伏応力度とし、終局ひずみは5%としており、圧縮部材では、降伏ひずみ以降の応力度低下を考慮している。また、SM570以上の高引張力鋼を用いる場合は、終局ひずみについて慎重な検討が必要とされている。

コンクリートの応力度～ひずみ関係のモデル化では、充填コンクリートに対して鋼管による大きな拘束力を期待できることから、最大応力度は、設計圧縮応力度の2倍の値としている。また、充填コンクリートは、鋼断面とコンクリート断面の合成効果を期待していないことから、充填部の強度が鋼断面と比べて著しく大きくなるように、低強度のコンクリート（基準強度160(kgf/cm²)程度)を使用することとしている。

参考文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，1999.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.

6.6.3 損傷レベルの評価

CFT部材の損傷レベルの評価に用いる指標は、CFT部材の特性に応じた評価指標を用いる。

部材の損傷レベルは、CFT部材の特性、損傷および補修工法等を考慮しつつ定義し、その損傷レベルと評価指標の関係から、部材の損傷レベルの評価を行う。

【解説】

損傷レベルの評価指標は、鉄筋コンクリート部材と同様に、部材の変形（部材角または曲率）を評価指標とする。部材の変位を解析により直接算定することが可能な場合には、変位を直接評価指標とすることができる。しかし、設計実務において評価指標は非線形解析に用いる部材の非線形情報と一致していることが望ましいことから、一般に、部材角または曲率を評価指標とする場合が多い。

鉄道設計標準¹⁾では、CFT部材の損傷レベルの評価は、以下の通り行われている。

(a) 部材角を評価指標とする場合

柱部材のように曲げモーメント分布が直線的に変化する部材は、部材角を評価指標として損傷レベルに関する評価を行う。

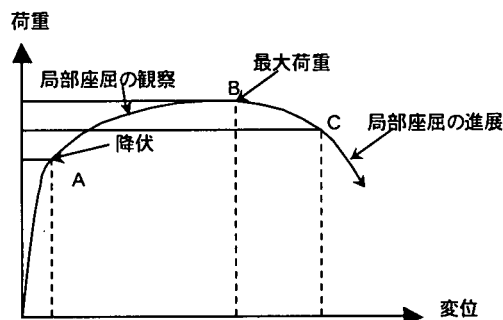
(b) 曲率を評価指標とする場合

梁部材のように曲げモーメント分布が曲線的に変化する部材は、部材断面の曲率を評価指標として損傷レベルに関する評価を行う。

損傷レベル1：荷重変位曲線の包絡線上のA点までの変位

損傷レベル2：荷重変位曲線の包絡線上のB点までの変位

損傷レベル3：荷重変位曲線の包絡線上のC点までの変位



解説図6.6.3-1 CFT部材の荷重変位曲線の包絡線

解説表6.6.3-1 CFT部材の特性(損傷及び補修工法の関係)

	荷重変位包絡曲線上の特性	損傷状況の例	補修工法
A点	45度位置の引張鋼管が降伏する点	無損傷	無補修
B点	ほぼ最大耐力を維持できる最大変形点	局部座屈の発生	場合によっては鋼管の局部座屈の補修程度
C点	最大耐力の90%程度を維持できる最大変形点	局部座屈の進展	局部座屈の進展により修復およびリブ補強

道路橋示方書²⁾では、鋼材が降伏応力度・降伏ひずみに達した点を部材の降伏点、鋼材が終局ひずみに達した点を部材の終局点とし、荷重変位曲線における部材の変位を評価指標として、損傷レベルの評価を行っている。また、荷重変位曲線は、エネルギー一定則の適用性から、完全弾塑性モデルに置き換えてられている。

参考文献

- 3) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 平成11年10月, (財)鉄道総合技術研究所
- 4) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 平成8年12月, 日本道路協会
- 5) 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物, 平成9年度, 土木学会
- 6) CFT 部材の変形性能と復元力特性, 1999.4, 鉄道総研報告

6.7 鋼部材

6.7.1 一般

(1) コンクリートを充填する場合としない場合の差異

鋼部材の限界状態としては座屈, 亀裂及び降伏があるが, コンクリートを充填することにより座屈の発生や進展を遅らすことができ, 耐力及び変形性能を向上させることができる。

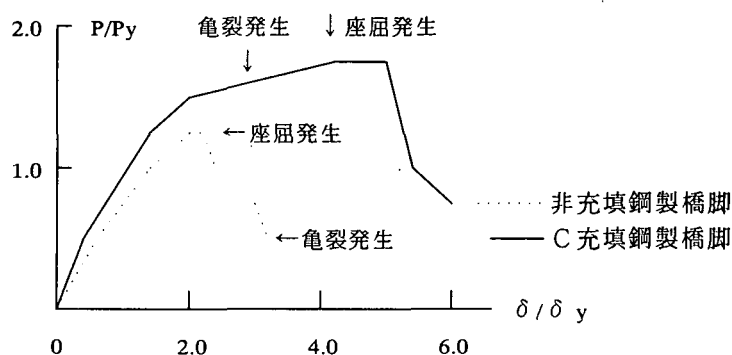
(2) 靱性確保のための幅厚比等の制限

鋼部材の靱性確保のため, 特にコンクリートを充填しない鋼部材にあつては, 幅厚比, 細長比, 補剛材の剛度を適切に取らなくてはならない。

【解説】

(1) について

鋼部材にあつて, 鋼単独で用いる場合と, 中にコンクリートを充填する場合とでは, 最大耐力やエネルギー吸収能力にかなりの違いがある。例えば文献1)によれば, コンクリート充填鋼製橋脚と非充填橋脚の荷重変位曲線は, 解説図 6.7.1-1 に示すような形状になり, 最大耐力及びその時の変位には大きな差違が確認されている。亀裂と局部座屈の発生順序は充填コンクリートの有無によって異なるが, いずれの橋脚においても座屈発生により最大耐力を失っている。いずれにしても, これらを十分考慮して最大耐力や許容靱性率を決めることが重要である。



解説図 6.7.1-1 鋼製橋脚模型実験による荷重変位曲線の概念図

(2) について

鋼部材の靱性確保のため, 特にコンクリートを充填しない鋼部材にあつては, 幅厚比, 細長比, 補剛材の剛比を適切にとらなくてはならないことを規定したものである。補剛版及び補剛材の幅厚比, 細長比, 必要剛度について, 基準類では下記の値が推奨されている。

補剛板の幅厚比 $A_{rc} \leq 0.4$ (文献 2,3) , 0.5 (文献 4) (解 6.7.1-1)

$$A_{rc} = \frac{b_e}{t_{ic}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 \kappa}} \quad (\text{解 6.7.1-2})$$

ここに,

A_{rc} : 補剛版あるいは補剛材の幅厚比

b_e : 補剛材間隔あるいは補剛材幅

σ_y : 鋼材の基準降伏点

E : ヤング係数

ν : ポアソン比 (0.3)

t_{ic} : 補剛版あるいは補剛材の板厚

κ : 座屈係数 (両縁支持の補剛版の場合は 4.0, 片側突出補剛材の場合は 0.43)

細長比 $\lambda \leq 0.5$ (文献 4) (解 6.7.1-3)

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y \cdot L}{E \cdot r}} \quad (\text{解 6.7.1-4})$$

ここに, L : 有効座屈長

r : 断面 2 次半径

補剛材の必要剛比 $\gamma / \gamma^* \geq 3.0$ (文献 4) (解 6.7.1-5)

ここに, γ : 補剛材剛比

γ^* : 線形座屈理論から求められた補剛材の最適剛比

参考文献

- 1) H. Otsuka, S. Egawa, H. Tajima, and K. Takena: Failure Mechanism of Steel Rectangular Piers Under Cyclic Loading, Stability and Ductility of Steel Structures, Proc. of the 5th Int. Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, Vol.1, July, 1997, Nagoya, Japan, pp.213-220
- 2) 土木学会鋼構造委員会鋼構造新技術小委員会耐震設計研究 WG : 鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術, 1996.7.
- 3) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.12.
- 4) 鉄道総合技術研究所 : 鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計, 1999.10.

6.7 2 部材特性のモデル化

(1) 損傷形態

鋼部材の耐震性能照査にあたっては、各耐震性能のレベルに応じて鋼部材特有の損傷形態を想定しなくてはならない。損傷形態としては次のようなものがある。

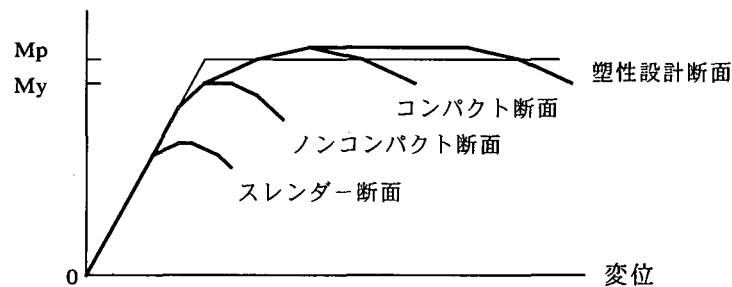
- ① 座屈
- ② 亀裂
- ③ 残留変位

(2) 鋼部材の耐震性能照査にあたっては、鋼部材の力学特性を十分考慮したものでなくてはならない。

【解説】

(1)について

曲げを受ける鋼部材のモーメント-変位関係は、一般に解説図 6.7.2-1 のように表現できる。部材を構成する板の幅厚比が小さく、断面が全塑性モーメントに到達してからあとも十分な変形性能を有する断面を塑性設計断面と呼ぶ。鋼製部材の幅厚比が大きくなるにしたがって、順次、コンパクト断面、ノンコンパクト断面、スレンダー断面と称される部材のモーメント-変形曲線を示すこととなる。コンパクト断面では全塑性モーメントに達した後すぐに耐荷力を失い、ノンコンパクト断面では降伏モーメントに到達した後、耐荷力を失う。スレンダー断面では降伏モーメントに到達することなく耐荷力を失う。許容応力度設計法では主にノンコンパクト断面やスレンダー断面が利用されてきており、最大耐力を示す曲げモーメントから安全率で割り戻したモーメントに対応する応力度を許容応力度として規定している。



解説図 6.7.2-1 曲げを受ける鋼部材のモーメント-変位曲線

(2)について

鋼部材において予想される損傷形態を、3段階の損傷レベルに対して区分して定義すれば、解説表 6.7.2-1 のようになる。想定される損傷形状は、座屈、亀裂、残留変位などであり、それらの程度によって表に示すようなレベルⅠからⅢまでの区分が可能であろう。

解説表 6.7.2-1 損傷レベルと予想される損傷形態(*は C 充填の場合)

部材	想定破壊モード	損傷レベル 1	損傷レベル 2	損傷レベル 3
箱形断面	曲げ	変状なし	パネル局部座屈 小さな残留変位	補剛板全体座屈 微小亀裂* 残留変位
円形断面	曲げ	変状なし	局部座屈 小さな残留変位	象の足座屈 微小亀裂* 残留変位
桁	せん断 屈曲	変状なし	せん断座屈 小さな残留変位	

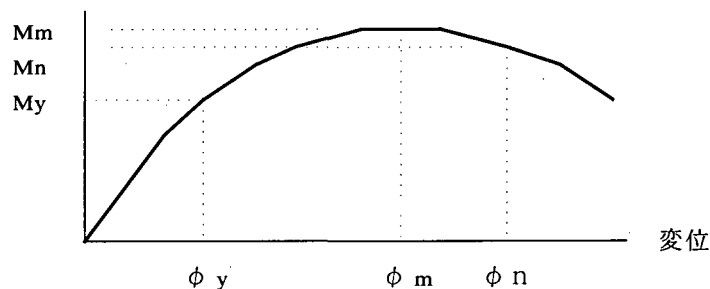
6.7.3 損傷レベルの評価

前項に規定される損傷レベルの照査は、応力、座屈強度、亀裂発生強度、残留変位などを指標に、適切な力学計算によって行うものとする。

【解説】

断面構成部材の幅厚比によって、部材の荷重-変位曲線、あるいはモーメント-曲率曲線は変化する。ここでは前述のコンパクト断面相当の部材に対して、各損傷レベルの照査項目をみている。コンパクト断面のモーメント-曲率曲線は解説図 6.7.3-1 のように書ける。すなわち降伏モーメントを超えてなお荷重は順調に増加し、剛性が徐々に低下しながら最大耐荷力に達した後、負勾配となって耐荷力を失っていく。

損傷レベル 1 に対応するのは、許容応力度以内あるいは降伏応力度以内であることに限られる。損傷レベル 2 は降伏応力を越えて最大耐力までの領域で定義される。損傷レベル 3 は最大耐力を越えてある程度の残存耐力（例えば最大耐力の 90%とか、降伏応力度レベルとか）を保持している領域までを考えるのがよい。解説表 6.7.3-1 は各損傷レベルに対応する照査項目を挙げているが、対象としている断面性能（コンパクト断面かスレンダー断面かなど）によって、同じ損傷レベルの照査項目が異なってくることになる。



解説図 6.7.3-1 コンパクト断面相当の鋼部材のモーメント-曲率関係

解説表 6.7.3-1 損傷レベルに対する照査項目

部 材	想定破壊モード	損傷レベル1	損傷レベル2	損傷レベル3
箱形断面	曲げ	全体座屈荷重 許容応力度 降伏応力度	全体座屈荷重 降伏耐力 最大耐力 残留変位	全体座屈荷重 残存耐力 疲労強度
円形断面	曲げ	全体座屈荷重 許容応力度	全体座屈荷重 降伏耐力 最大耐力 残留変位	全体座屈荷重 耐力 疲労強度
桁	せん断 屈曲	変状なし	せん断座屈荷重	後座屈強度

6.8 その他の部材

6.8.1 一般

構造物を構成する部材には、各部材間を接合する部材が存在する場合がある。また、これらの部材には、複数の材料が用いられている場合も多い。

これらの部材の評価は、構造物全体の振動特性や破壊形態および変形性能に大きく影響するため、部材特性やその損傷レベルを適切に評価する必要がある。

【解説】

その他の部材としては、橋梁の支承部やトンネルのジョイント部等が上げられる。橋梁の免震支承や沈埋トンネルの可とう継手等の構造制御の機能を持つ部材については、「9章 減震・免震・制震構造」にて記述する。

ここでは、橋梁の支承部および落橋防止工について記述する。

6.8.2 支承部

- (1) 支承部は、構造物の耐震性能を満足するように損傷レベルを定め、照査するものとする。
- (2) 支承部は、支承本体、支承取り付け部、けた端部・けた座部に区分し、それぞれについて損傷レベルを照査するものとする。
- (3) 支承部の損傷レベルに対する照査は、「6.2 部材の損傷レベルの照査」に準じて行うものとする。

【解説】

(1)について

支承部は、構造物に要求される耐震性能に応じて損傷レベルを定めるものとする。

支承部の耐震性能を具体的に定めた基準としては、鉄道構造物等設計標準耐震設計⁹⁾がある。以下にその考え方に従った耐震性能を示す。構造物の耐震性能と支承部の損傷レベルの関係を、解説表 6.8.2-1 に示す。ここで、各損傷レベルは解説表 6.8.2-2 に示すような状態とする。

解説表 6.8.2-1 構造物の耐震性能と支承部の損傷レベルの制限

構造物の耐震性能	I	II	III
支承部の損傷レベルの制限	1	2 (3)	3

注；()内は壁式橋脚の橋軸直角方向等のように、耐力が大きくなる場合は採用を許容する

解説表 6.8.2-2 支承部の損傷レベル

損傷レベル		補修の程度
損傷レベル 1	無損傷で健全な状態	無補修
損傷レベル 2	比較的軽微な損傷	必要に応じて補修する
損傷レベル 3	支承部の一部装置の破壊を含む損傷	補修あるいは取替えが必要

(2)について

1) 本ガイドラインでは、支承部を支承本体、移動制限装置、支承取り付け部、けた端部・けた座部に区分し、それぞれについて損傷レベルを照査することとした。各部材は以下の役割を担うものとする。

- a) 支承本体 : 一般の鋼製支承、ゴム支承では、けた等の上部構造からの鉛直力を下部構造に伝達する部材。水平力分散型ゴム支承では、上部構造からの鉛直力および水平力を下部構造に伝達する部材。
- b) 移動制限装置 : 支承部の一部として、ずれ止めのように支承本体と一体に設置する、あるいはストッパーのように支承本体とは別に設置して地震時の移動を制限する装置。
- c) 支承取り付け部 : 支承本体を上部構造物や下部構造物に取り付けるアンカーボルト等の部材。
- d) けた端部・けた座部 : 支承を据え付ける、上部構造側のけた端部と下部構造側の天端部。

なお、橋梁等では、大規模地震時に下部構造から上部構造物が逸脱し、落橋に至るのを防止するため、落橋防止工を設置する。これについては、「6.8.3 落橋防止工」にて記述する。

2) 支承部は、鉛直力および水平力を伝達する機能を有する必要があるため、一般には単独方向の作用力に対して抵抗する個別の部材で構成されている。したがって、支承部を構成する各部材の損傷レベルを定める必要がある。

鉄道設計標準¹⁾では、支承部を構成する支承本体、移動制限装置、支承取り付け部、けた端部・けた座部の損傷レベルは、以下の種別ごとに定められている。

- a) タイプ1部材 : 最大耐力および変形性能の評価が可能な部材で、損傷レベルは解説表 6.8.2-3 に示す3段階とする。

例：鋼製支承のずれ止め、浮き上がり止め、鋼棒、鋼角ストッパー等の曲げが支配的な部材

解説表 6.8.2-3 タイプ1部材の損傷レベル(解説図 6.8.2-1)

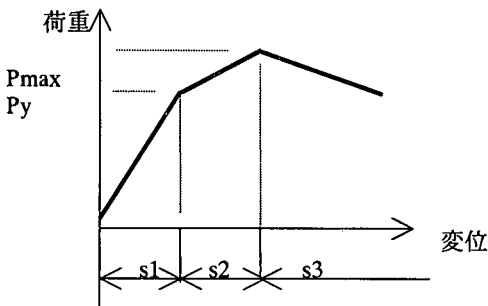
損傷レベル	作用力および変形量の目安
損傷レベル s1	降伏耐力以下
損傷レベル s2	降伏耐力～最大耐力
損傷レベル s3	最大耐力相当の変形を超える変形

b) タイプ2部材：最大耐力あるいは変形性能の評価ができない、または難しい部材で、損傷レベルは、解説表 6.8.2-4 に示す2段階とする。

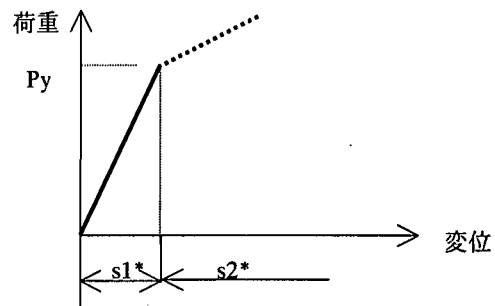
例：鋼製支承本体、鋳鉄製のずれ止め・浮き上がり止め、コンクリート製のけた端部・けた座部等のせん断力が支配的な部材

解説表 6.8.2-4 タイプ2部材の損傷レベル(解説図 6.8.2-2)

	損傷レベル	作用力および変形量の目安
損傷レベル $s1^*$	無損傷	降伏耐力以下
損傷レベル $s2^*$	損傷が著しい、あるいは破壊の状態	降伏耐力以上



解説図 6.8.2-1 タイプ1部材の荷重変位関係



解説図 6.8.2-2 タイプ2部材の荷重変位関係

c) タイプ3部材：ゴム支承の場合で、損傷レベルはせん断ひずみにより、解説表 6.8.2-5 に示す2段階とする。

解説表 6.8.2-5 タイプ3部材の損傷レベル

	損傷レベル	ゴムのせん断ひずみ	
損傷レベル $s1^{**}$	無損傷	一般のゴム支承	200%以下
		水平力分散支承	250%以下
損傷レベル $s2^{**}$	損傷が著しい、あるいは破壊の状態	一般のゴム支承	200%以上
		水平力分散支承	250%以上

3) 支承部の損傷レベルと、支承部を構成する各部材の損傷レベルの制限は、鉄道設計標準では、解説表 6.8.2-6、解説表 6.8.2-7、解説表 6.8.2-8 の通り設定されている。

解説表 6.8.2-6 鋼製支承部の損傷レベルと各部材の損傷レベルの制限

	支承部の損傷レベル	1	2	3
各部材の損傷レベル				
鋼製支承本体		$s1^*$	$s2^*$	$s2^*$
移動制限装置	タイプ1部材	$s1$	$s2$	$s3$
	タイプ2部材	$s1^*$	$s1^*$	$s2^*$
けた端部・けた座部		$s1^*$	$s2^*$	$s2^*$

解説表 6.8.2-7 一般のゴム支承部の損傷レベルと各部材の損傷レベルの制限

支承部の損傷レベル	1	2	3
各部材の損傷レベル			
ゴム支承本体	s1**	s2**	s2**
移動制限装置 タイプ1 部材	s1	s2	s3
けた端部・けた座部	s1*	s2*	s2*

解説表 6.8.2-8 水平力分散型ゴム支承部の損傷レベルと各部材の損傷レベルの制限

支承部の損傷レベル	1	2	3
各部材の損傷レベル			
水平力分散型ゴム支承本体	s1**	s1**	s1**
けた端部・けた座部	s1*	s1*	s1*

(3)について

支承部を構成する各部材の損傷レベルに対する照査は、「6.2 部材の損傷レベルの照査」と同様にして行うものとした。

参考文献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，1999.10.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.12.

6.8.3 落橋防止工

- (1) 落橋防止工は、構造物に要求される耐震性能に応じて損傷レベルを定めるものとする。
- (2) 落橋防止工は、けた掛かり長、変位制限構造、落橋防止構造に区分し、それぞれについて損傷レベルを照査するものとする。
- (3) 落橋防止工の損傷に対する照査は、「6.2 部材の損傷レベルの照査」に準じて行うものとする。

【解説】

(1)について

1) 落橋防止工は、構造物に要求される耐震性能に応じて損傷レベルを定めるものとする。

落橋防止工の耐震性能を具体的に定めた基準としては、鉄道構造物等設計標準耐震設計¹⁾がある。以下にその考え方に従った耐震性能を示す。

構造物の耐震性能と、支承部の損傷レベルと落橋防止工の損傷レベルの関係を、解説表 6.8.3-1 に示す。ここで、各損傷レベルは解説表 6.8.3-2 に示すような状態とする。

解説表 6.8.3-1 構造物の耐震性能と落橋防止工の損傷レベルの制限

構造物の耐震性能	I	II	III
支承部の損傷レベルの制限	1	2 (3)	3
落橋防止工の損傷レベルの制限			
変位制限構造	1	1	2
落橋防止構造	1	1	1

注； ()内は壁式橋脚の橋軸直角方向等のように、耐力が大きくなる場合は採用を許容する

解説表 6.8.3-2 落橋防止工の損傷レベル

損傷レベル	補修の程度
損傷レベル 1 無損傷で健全な状態	無補修
損傷レベル 2 比較的軽微な損傷	必要に応じて補修する
損傷レベル 3 一部装置の破壊を含む損傷	補修あるいは取替えが必要

(2)について

1) 本ガイドラインでは、落橋防止工をけた掛かり長、変位制限構造、落橋防止構造に区分し、それぞれについて損傷レベルを照査することとした。各構造は以下の役割を担うものとする。

- a) けた掛かり長：想定外の地震時に、上部構造が下部構造から逸脱し落橋に至るのを防止するために設けた、けたの掛かり寸法。
- b) 変位制限構造：レベル2地震時に、支承部と補完し合っけたの移動を制限する構造。道路橋においては、タイプAの支承部は、レベル2地震時に支承部と補完し合っけたの移動を制限する構造の設置を規定。ストッパーのように支承本体とは別に設置される。
- c) 落橋防止構造：想定外の地震に、上部構造物が下部構造から逸脱し落橋に至るのを防止する構造。

2) 落橋防止工の損傷レベルについては、鉄道設計標準では、以下の部材種別ごとに定められている。

- a) タイプ1部材：最大耐力および変形性能の評価が可能な部材。損傷レベルは、解説表 6.8.3-3 に示す3段階とする。

例：鋼棒、鋼角ストッパー等の曲げが支配的な部材

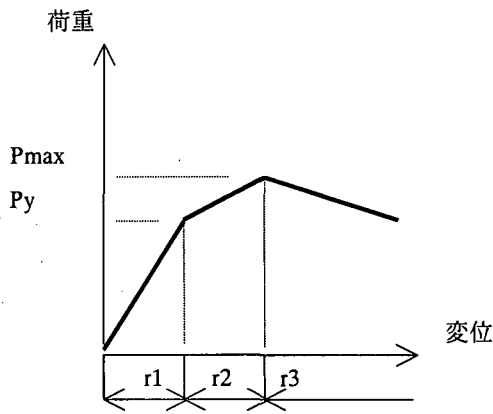
解説表 6.8.3-3 タイプ1部材の損傷レベル(解説図 6.8.3)

損傷レベル	作用力および変形量の目安
損傷レベル r1 無損傷	降伏耐力以下
損傷レベル r2 破壊はしないが場合により、補修が必要	降伏耐力～最大耐力
損傷レベル r3 損傷が著しい、あるいは破壊の状態	最大耐力相当の変形を超える変形

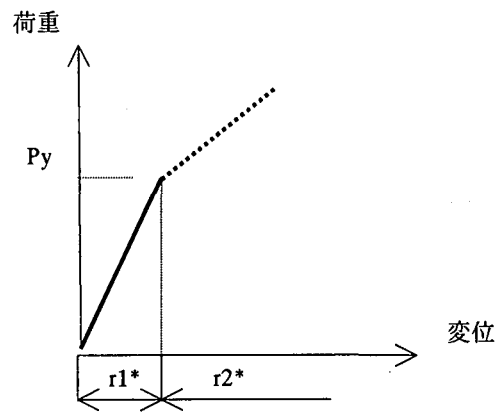
- b) タイプ2部材：最大耐力および変形性能の評価ができない、あるいは難しい部材の損傷レベルは、解説表 6.8.3-4 に示す2段階とする。

解説表 6.8.3-4 タイプ2部材の損傷レベル(解説図 6.8.4)

損傷レベル	作用力および変形量の目安
損傷レベル r1* 無損傷	降伏耐力以下
損傷レベル r2* 損傷が著しい、あるいは破壊の状態	降伏耐力以上



解説図 6.8.3-1 タイプ1部材の荷重変位関係



解説図 6.8.3-2 タイプ2部材の荷重変位関係

c) タイプ3：けた掛かり長の確保による落橋の防止

けた掛かり長とけたずれ量との相対関係により、損傷レベルは解説表 6.8.3-5 に示す2段階とする。

解説表 6.8.3-5 タイプ3の損傷レベル

損傷レベル	損傷レベル	けた掛かり長とけたずれ量
損傷レベル $r1^{**}$	無損傷	けた掛かり長 \geq けたずれ量
損傷レベル $r2^{**}$	落橋の状態	けた掛かり長 \leq けたずれ量

3) 変位制限構造の損傷レベルと構成する各部材の損傷レベルの関係は、鉄道設計標準では、解説表 6.8.3-6 の通り設定されている。

解説表 6.8.3-6 変位制限構造の損傷レベルと各部材の損傷レベルの制限

変位制限構造の損傷レベル	1	2	3
各部材の損傷レベル			
タイプ1部材	$r1$	$r2$	$r3$
タイプ2部材	$r1^*$	$r1^*$	$r2^*$

4) けた掛かり長、落橋防止構造の損傷レベルと、構成する各部材の損傷レベルの関係は、鉄道設計標準では解説表 6.8.3-7 の通り設定されている。

解説表 6.8.3-7 落橋防止構造の損傷レベルと各部材の損傷レベルの制限

落橋防止構造の損傷レベル	1
各部材の損傷レベル	
タイプ1部材	$r1$
タイプ2部材	$r1^*$
タイプ3	$r1^{**}$

(3)について

落橋防止工を構成する各部材の損傷レベルに対する照査は、「6.2部材の損傷レベルの照査」と同様

にして行うものとした。

参考文献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，1999.10.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.12.