

I-7 落橋防止構造

7.1 基本方針

落橋を防止するための構造は地震時の上部構造、下部構造および支承部等の橋梁全体の挙動を考慮したものでなければならない。

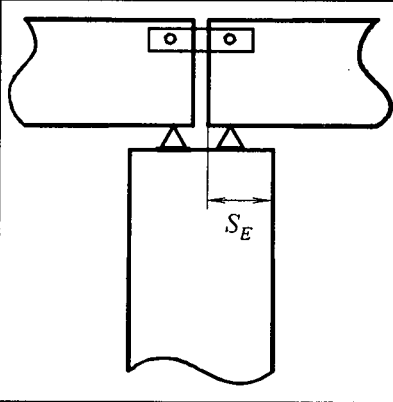
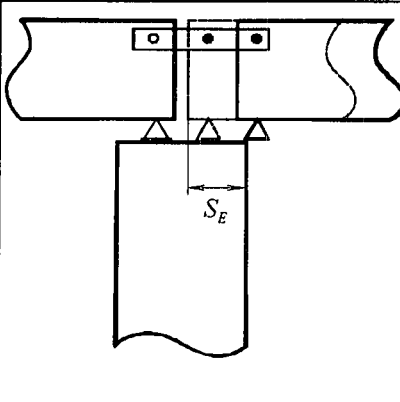
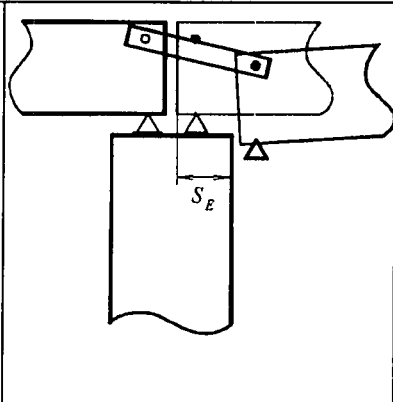
【解説】

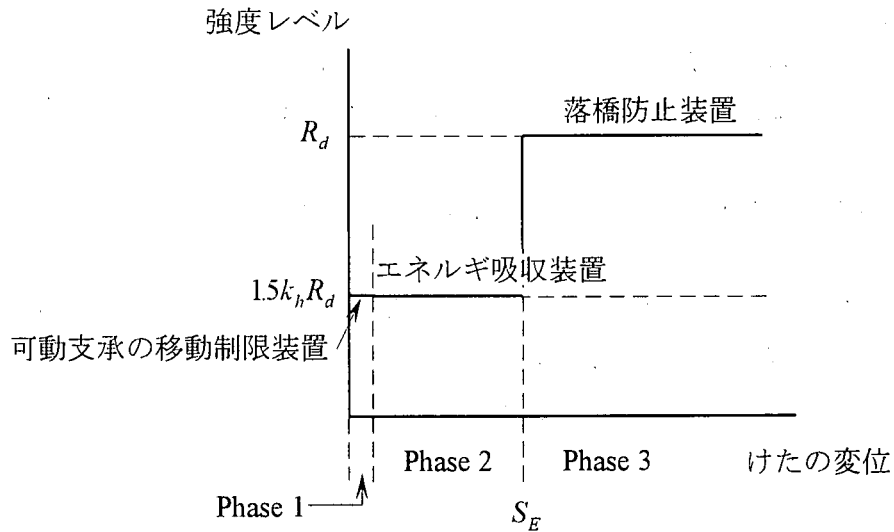
地震時に上部構造が下部構造から落下するいわゆる落橋は上路だけでなく、下路の交通をも遮断する可能性があり地震後の復旧に対して大きな障害となるものである。したがって橋梁が損傷を受ける場合もけたの落下は絶対に避けなければならない。以下の規定は落橋を防止するのに留意すべき事項について示したものである。ここでは地震時の下部構造、支承、および落橋防止構造についての強度について次のような基本的な考え方をしている。

- ・ 供用期間内に1、2回おこる程度の通常の地震動（レベル1）に対しては支承の移動制限装置によって機能の完全な保持を行う。（表-解7.1のPhase 1）
- ・ まれに起こるような大地震動（レベル2a）に対してはけたのかかり(S_E)および地震の衝撃力の緩和とけたの運動エネルギーを減衰させるためのエネルギー吸収装置を設けることによりけたの逸脱を防ぐ。（表-解7.1のPhase 2）また供用期間内にほとんど発生しないような極大地震（レベル2b）に対してはさらにけたをつり下げることのできる落橋防止装置によってけたの落下を防止する。（表-解7.1のPhase 3）
- ・ エネルギー吸収装置の強度レベルを上げると、橋脚に過大な地震力が作用し悪影響を及ぼす可能性があるため、エネルギー吸収装置の強度レベルは可動支承部、固定支承部に応じて強度レベルを設定する。すなわち可動支承部においては図-解7-1(a)に示すように移動制限装置の強度レベルに（レベル1の設計水平震度の1.5倍）におさえ、固定部においては支承の強度レベルにおさえる。

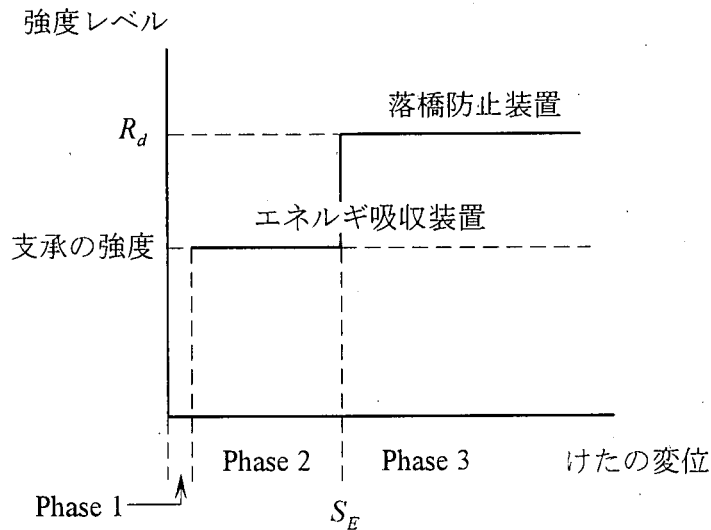
道路橋示方書・同解説V（耐震設計編）で規定されている落橋防止装置はけたの下部構造からの逸脱を防ぐ機能を持つものとけたが下部構造から完全に逸脱した場合にけたを支持できるも

表-解7.1落橋防止に対する考え方

		
Phase 1	Phase 2	Phase 3
Level 1	Level 2a,b	Level 2b
可動支承の移動制限装置 または固定支承	S_E + エネルギー吸収装置	S_E + 落橋防止装置
機能の完全な保持	エネルギー吸収装置によるけた移動の制限および衝撃力の緩和	けたが下部構造から逸脱した場合の安全性の確保



(a) 支承可動部における落橋防止構造の強度と有効範囲



(b) 支承固定部における落橋防止構造の強度と有効範囲

図-解7.1 落橋防止構造の機能形態

この明確な区別をしていないが、それぞれに要求される機能をあきらかにするためにここでは呼称を分けて規定するものとした。表-解7.1にあるように Phase 2に相当するけたの過大な移動に対し地震による衝撃力を緩和するものとして前者をエネルギー吸収装置、Phase 3で機能する後者を落橋防止装置と呼ぶことにする。なお、免震支承等のようにレベル2bの地震力まで耐えうるような強度を持つ支承を用いる場合など、図-解7.1での各部材の強度の仮定とは異なるときは適切な配慮のもとに Phase 2の対策を省略する等の措置をとって良い。

落橋防止のための設計は本来は上部構造と下部構造およびその接合部等の地震時の挙動を的確に把握しそれを反映させたものでなければならない。その意味において以下の規定に加えて橋梁全体の地震時の動的な挙動も確認し安全性を照査しておくことが望ましい。

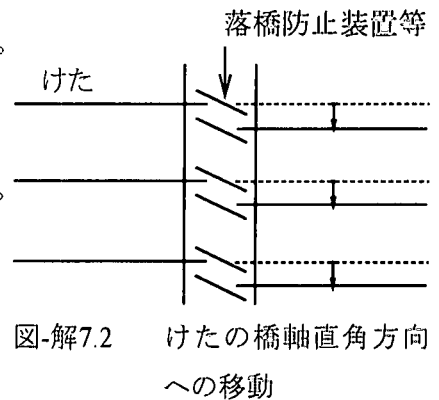
7.2 一般

地震時にけた端部において落橋を防止するために次の処置を講じなければならない

- (1) けたと下部構造の橋軸方向の過大な相対変位が生じないように可動支承には7.3に規定する移動制限装置を設ける。
- (2) けた端部から下部構造縁端までのけたの長さおよび掛け違いのけたの長さとして7.4の規定を満足するものを設ける。
- (3) けたの橋軸直角方向の移動に対して7.5で規定する移動制限装置を設置する。
- (4) 7.6で規定するエネルギー吸収装置を設置する。
- (5) 7.7で規定する落橋防止装置を設置する。

【解説】

- (1) 道路橋示方書・同解説V（耐震設計編）¹⁾の規定による。
- (2) 7.1に述べたように落橋防止対策の基本となるものである。けた端から下部構造頂部縁端までの長さ(S_E)の確保による方法は橋梁の他の部位に及ぼす影響が小さい。その意味でできる限り長く取っておくことが望ましい。
- (3) 兵庫県南部地震においては橋軸直角方向の移動が落橋を防止するための装置を破壊に至らしめたと考えられる例が見られたこと（図-解7.2参照）、また斜橋や曲線橋ではけたと下部構造の相対変位は複雑であるためにすべての橋梁について橋軸直角方向についても移動制限装置を設置するものとした。なお、橋軸方向の落橋防止装置等を保護する意味で橋軸直角方向の移動制限装置についてはけた移動量を極力抑えるように設計するのがよい。
- (4) レベル2a,bを想定した大地震動においては S_E の確保による方法を基本としながらも、表-解7.1と図-解7.1に示すように地震力による衝撃力の緩和とけたの運動エネルギーを減衰させるためのエネルギー吸収装置を設置するものとする。
- (5) レベル2bに相当する地震動に対しては、万一けたが下部構造から完全に逸脱した場合にもけたを支持することができる落橋防止装置を設ける。



7.3 可動支承部における移動制限装置

可動支承の移動制限装置は次の規定によるものとする。

- 1) 移動制限装置による可動支承の移動制限量は可動支承の移動可能量とする。
- 2) 移動制限装置の設計に用いる設計水平震度はレベル1の設計水平震度 k_h の1.5倍とする。

【解説】

道路橋示方書・同解説V（耐震設計編）の規定による。「復旧仕様」²⁾によると支承の強度は通常地震において許容応力の範囲内にあり、まれに起こる大地震に対しては終局強度の範囲内であることを要求している。したがって通常地震（レベル1）では移動制限装置がけたの移動を拘束することにより落橋を防止することを想定する。なお7.6の規定を満たせばこれはエネルギー吸収装置も兼ねることができる。

7.4 けた端から下部構造頂部縁端までのけたの長さおよびかけ違い部のけたの長さ

橋軸方向のけた端部から下部構造頂部縁端までのけたの長さおよびかけ違い部のけたの長さは（レベル2b）地震時の橋脚頂部の最大変位をもとに決定するのが望ましいが式7.1の値以上としても良い。

$$\left. \begin{array}{l} \ell \leq 100 \text{ の場合 } S_E = 70 + 0.5\ell \\ \ell > 100 \text{ の場合 } S_E = 80 + 0.4\ell \end{array} \right\} (7.1)$$

ここに

ℓ : 支間長 (m) S_E : 図7.1に示すもの (cm)

ただし両側の支間長が異なる場合には大きい方をとるものとする。

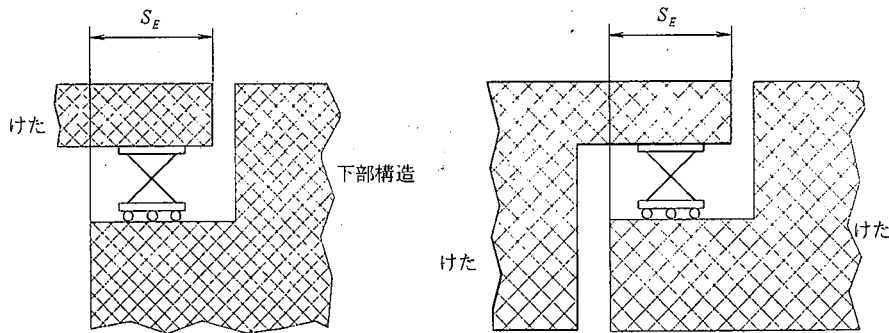


図7.1 けたのかかりおよびかけ違いの長さ

【解説】

式(7.1)は道路橋示方書・同解説V（耐震設計編）に準じているが、（レベル2b）地震時の橋脚頂部での最大変位をもとに決定するのが望ましい。その場合には S_E は当然橋脚の高さにも依存し、斜橋、曲線橋については特別な考慮が必要である。

7.5 橋軸直角方向への移動制限装置

橋軸直角方向への移動制限装置は次の規定によるものとする。地震時に橋軸方向のエネルギー吸収装置および落橋防止装置を保護しかつその機能に悪影響の無いように留意するものとする。

(1) 移動制限装置の設計に用いる設計水平震度は k_h の1.5倍とする。

【解説】

7.3の規定に準じた。特に支障がないかぎり橋軸方向のエネルギー吸収装置等を保護するためにけたの橋軸直角方向の動きは極力抑えると良い。

7.6 エネルギー吸収装置

エネルギー吸収装置は次の規定を満足するものとする。ただしこれらの装置がけたの移動や回転を拘束することにより地震時に橋梁の他の部位に悪影響を及ぼさないように留意するものとする。

(1) エネルギー吸収装置は原則として次に示す構造とする。

- 1) けたと下部構造を連結する構造
- 2) 2連のけたを相互に接続する構造

3) 下部構造に突起を設ける構造

(2) エネルギー吸収装置は固定支承部では支承の強度、可動支承部では移動制限装置の強度と同等の強度を持つものとする。

(3) エネルギー吸収装置は衝撃に対する抵抗性を有するためにけたが下部構造にかかっている限り機能するだけの変形能を有することが望ましい。

【解説】

(1) エネルギー吸収装置は表-解 7.1 と図-解 7.1 に示されているように、支承の破壊等の予期せぬ事態が起こった場合でもけたが下部構造に対して大きな相対変位を起こさないようにしかつ地震エネルギーや衝撃等を吸収することを期待して設置されるものである。したがってエネルギーや衝撃を吸収するものであれば

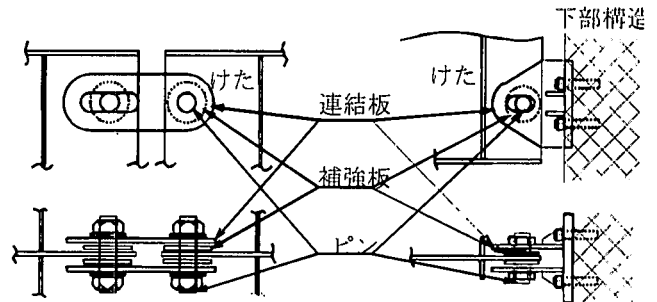


図-解7.3 けた間を連結するエネルギー吸収装置

構造上は従来の落橋防止装置（例えば図-解 7.3）に類似したものでよい。なお3)のように落橋防止壁等の突起を設ける構造では破壊時に破片等が落下し二次的な被害を及ぼさないように留意すべきである。

(2) エネルギー吸収装置は強度とエネルギー吸収能の双方で設計するものとする。図-解 7.4 にその概念図を示す。なおエネルギー吸収装置は最大荷重点までを機能範囲とする。機能範囲を最大荷重点までとしたのは、一般に鋼材を使った部材では最大荷重点を越えた後の挙動は様々な不整の影響を受けやすく予測が難しいためである。エネルギー吸収装置はレベル 2a,b 程度の地震に対し支承の破壊した場合に機能するものであるが、

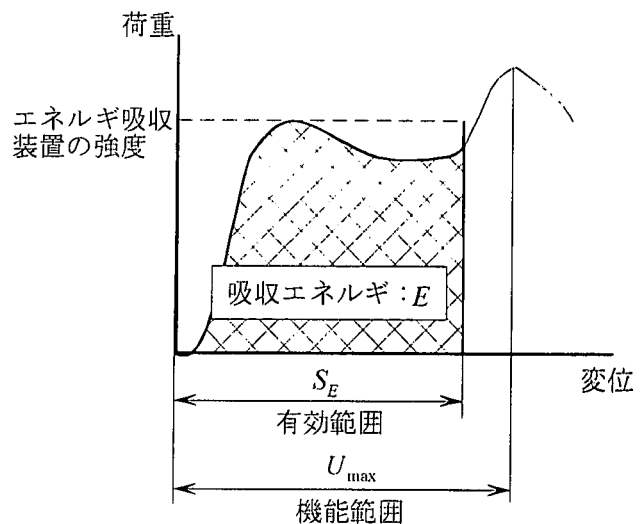


図-解7.4 エネルギー吸収装置の設計概念

その強度が大きすぎると下部構造に過大な力を伝達し悪影響を及ぼす可能性がある。このためにその強度は固定支承部では支承の強度、可動支承部では移動制限装置の強度と同等とした。ただし強度としてはけたが下部構造にかかっている範囲、言い換えればエネルギー吸収装置の有効範囲内（表-解 7.1）での最大強度と考えて良い。

エネルギー吸収装置はヒューズメンバーとして考える。したがって規定する強度は塑性変形も含めた終局強度として良い。多主げた橋等で複数のけたにエネルギー吸収装置を設置する場合にはそれぞれの分担についてはけたの床版面上での回転も考慮するべきである。(図-解7.5)つまり設計荷重等をそれぞれに均等に振り分けるのではなく、次式を用いて割り増しをする必要がある。

$$P_e = \frac{\mu P}{n} \quad (\text{解 7.1})$$

ここに

P_e : エネルギー吸収装置 1 基あたりの設計荷重

P : 7.6(2)で規定するけたけた 1 本あたりの荷重 (固定支承部では支承の強度、可動支承部では移動制限装置の強度)

n : 対応するけた一本あたりエネルギー吸収装置の数

μ : 安全率

- (3) エネルギー吸収装置は表-解7.1と図-解7.1に示すように支承の破壊後もけたが下部構造にかかっているかぎり機能するだけの変形能を持つことが望ましい。すなわち図-解7.4で $U_{\max} > S_E$ でなければならない。エネルギー吸収装置の衝撃に対する抵抗性の照査の方法としては次のような条件式を用いることもできる。

$$\mu \frac{1}{2} \frac{Mv^2}{n} < E \quad (\text{解7.2})$$

ただし

M : けたの支点反力に相当する質量

v : 地震時に想定されるけたと下部構造の最大相対速度

n : 対応するけた 1 つ当たりのエネルギー吸収装置の数

μ : 安全率

E : エネルギー吸収装置 1 基当たりの吸収エネルギー (エネルギー吸収装置が有効範囲内で変形するのに必要なエネルギー (図-解7.4参照))

次に参考のために図-解7.3の連結板形式のエネルギー吸収装置に対し式-解7.2を適用したとき許容される相対速度 v を考えてみる。図-解7.6の形式では連結板が変形しピンや取り付け部で破壊しないように十分な強度を持たせて設計してあるものとする。

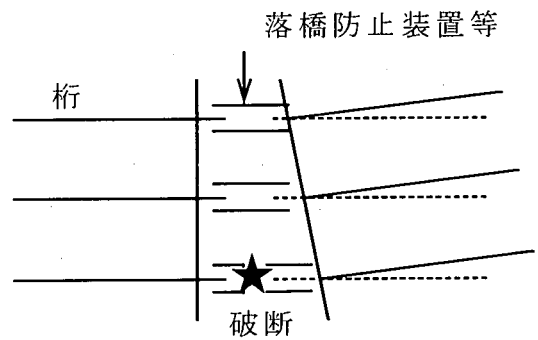


図-解7.5 落橋防止装置等の個別破壊

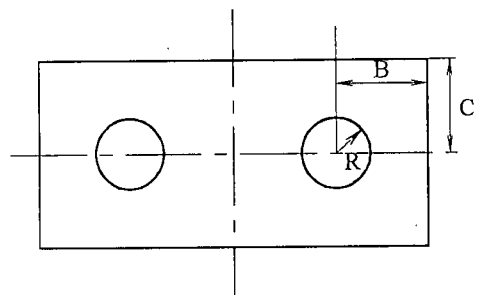


図-解7.6 矩形型連結板

具体的に $R = 25\text{mm}$, $B = 62.5\text{mm}$, $C = 62.5\text{mm}$, $t = 4.6\text{mm}$ 、ピン間距離 165mm 、材質 SS400 (引張強度: $44\text{kgf}/\text{mm}^2$) のものでは静的載荷に対する耐荷力は実験により 334kN 、 $U_{\text{max}} = 46\text{mm}$ 、吸収エネルギーは $E_a = 13.4\text{kJ}$ が得られている。³⁾これは約 2 分の 1 のモデルであるので長さを 2 倍にして仮に実スケールとすると対応する耐荷力は 1336kN 、吸収エネルギーは 107kJ となる。もちろんこのままでは U_{max} は小さいので図-解 7.7 に示すような構造にするなどして必要な機能範囲を得るものとする。仮にこのエネルギー

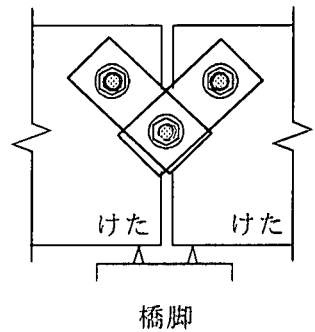


図-解7.7 適用例

吸収装置がけたが下部構造から完全に逸脱したときにけたをつり下げることのできる強度をもつものとする、式-解 7.2 の M はおおよそ 136ton となる。そこでこの M を使って式-解 7.2 から許容されるけたの相対速度 v を求めるとおおよそ $125\text{cm}/\text{sec}$ となる。これは地震時に道路橋に生じる最大応答速度にほぼ相当している。¹⁾すなわち現行の耐震連結装置でも式-解 7.2 をおおむね満足しているものと考えられる。しかしながらけたと下部構造の相対速度には隣接する橋脚の動きも影響すると考えられるため道路橋示方書にある $v = 100\text{cm}/\text{sec}$ の 2 倍程度の $v = 200\text{cm}/\text{sec}$ 程度まで考慮しておくのが望ましい。するとエネルギー吸収装置に要求される吸収エネルギーはおおよそ現行の 4 倍程度になる。

そこで連結板のエネルギー吸収能を増加させる方法として図-解 7.8 にあるようにスリットを設け、ピンがこの部分を通るときの塑性変形による方法を本報告書 II で検討している。このような連結板を用いると強度を保ったまま吸収エネルギーを 3~4 倍程度増加させることができること

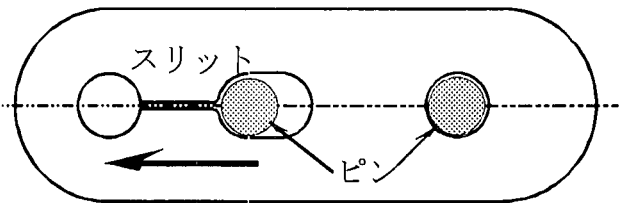


図-解7.8 変形能および衝撃吸収能をたかめた連結板の一例⁵⁾

が確認されている。したがって図-解 7.8 の形式でもエネルギー吸収装置として必要な強度と吸収エネルギーを持たせることは可能である。

なお、図-解 7.6 に示すような単純な矩形連結板の終局強度については詳細な弾塑性解析により次の式が得られているので参考にすることができる。

$$\begin{aligned} \frac{P_u}{t\sigma_u R} &= 11 \frac{B}{R} - 0.3 \text{ ただし } \frac{C}{R} > 0.56 \frac{B}{R} + 0.85 \\ \frac{P_u}{t\sigma_u R} &= 2.0 \left(\frac{C}{R} - 1 \right) \text{ ただし } \frac{C}{R} \leq 0.56 \frac{B}{R} + 0.85 \quad (\text{解7.3}) \\ 2.0 &\leq \frac{B}{R} \leq 4.0, \quad 2.0 \leq \frac{C}{R} \leq 4.0 \end{aligned}$$

ここに

- P_u : 耐荷力
- t : 板厚
- σ_u : 板材の引張り強度

7.7 落橋防止装置

落橋防止装置は次の規定を満足するものとする。ただしこれらの装置がけたの移動や回転を拘束することにより地震時に橋梁の他の部位に悪影響を及ぼさないように留意するものとする。

(1) 落橋防止装置は原則として次に示す構造とする。

- 1) けたと下部構造を連結する構造
- 2) 2連のけたを相互に接続する構造

(2) 落橋防止装置はけたが下部構造から完全に逸脱した場合でもこれを支持できる強度を有するものとする。

【解説】

落橋防止装置は万一けたが下部構造から完全に逸脱した場合にけたを支持するものである。したがってそれ自身は橋梁の非常時以外の荷重状態に関して何ら悪影響を及ぼすものであってはならない。また多主けた等で複数の落橋防止装置を用いる場合の荷重の分配については式-解7.1に準ずるものとする。このとき P_0 が落橋防止装置1基あたりの設計荷重、 P がけたの支点反力となる。

- (1) 道路橋示方書V耐震設計編による。道路橋示方書では落橋防止装置の機能がけたの下部構造からの逸脱の防止と逸脱した場合にけたを支持することの両方になったいたが、ここでは図-解7.1にあるようにけたの支持の機能を持つものを落橋防止装置と呼ぶ。このため道路橋示方書・同解説にあった下部構造に突起を設ける構造は削除した。
- (2) 設計荷重はけたが下部構造から完全に逸脱した場合でも連結装置でけたを支持できるものであるから設計荷重はけた端での支点反力となる。なお、けたとけたを連結する落橋防止装置の場合は支点反力は大きい方をとる。このような場合等で多数の落橋防止装置を用いる場合にはある程度変形能があると荷重の再分配が期待できるので望ましい。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、1994
- 2) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様および復旧仕様の解説、1995.2.
- 3) 小畑 誠、後藤 芳顯、松浦 聖：高速引張時の落橋防止装置連結板の強度特性、土木学会論文報告集、441, I-18, pp97-105, 1992
- 4) 鈴木勝久：鋼道路橋の耐震連結装置の新しい設計法についての研究、名古屋工業大学修士論文、1993
- 5) 後藤芳顯：平成7年度第2回技術講座「阪神大震災から得た教訓と今後の耐震設計—橋梁構造物—」、土木学会中部支部、pp.89-96、1996