

5. ラーメン構造物

5.1 アンカー部

5.1.1 現行の設計基準・指針類

道路橋示方書^{1),2)}では鋼製橋脚アンカー部の各部位の具体的な設計法については規定されていない。そのため、鋼製橋脚を建設する機会の多い公団・公社では、表 5.1 に示した設計基準^{3),6)}のなかでそれぞれ独自に鋼製橋脚アンカー部に関する規定を設けている。表 5.2 に各公団・公社の設計規準における鋼製橋脚アンカー部に関する規定事項の概要を示す。これに見られるように、公団・公社の設計規準では鋼製橋脚アンカー各部に要求される性能が明記されるとともに、それらの要求性能を満足する構造細目等（みなし規定）について比較的詳細に定められている。なお、表中に示したようにアンカー部の構造形式として①杭方式、②鉄筋コンクリート方式、③直接定着方式の3種類があり、各公団・公社で採用している構造形式が異なる。また、それぞれの構造形式に応じて照査項目が若干異なるが、福岡北九州道路公社は首都高速道路公団と同様に杭方式を採用しており、照査項目も同じであるため表 5.2 では省略した。

表 5.1 鋼製橋脚アンカー部の具体的な設計法が規定されている設計基準

公団・公社	基準類（発行年月）
首都高速道路公団	鋼構造物設計基準（平成 4 年 4 月）
阪神高速道路公団	構造物設計基準（橋梁編）第 2 編 鋼構造（平成 6 年 5 月）
福岡北九州高速道路公社	設計基準 第 2 部 構造物設計基準（橋梁編）（平成 9 年 10 月）
名古屋高速道路公社	鋼構造物設計基準（平成 11 年 10 月）

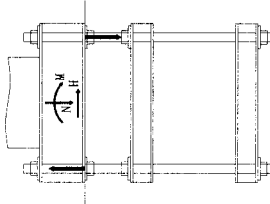
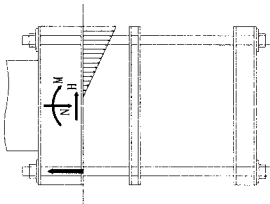
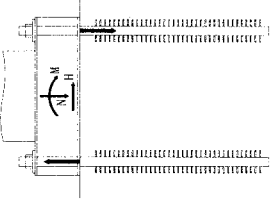
上記規準のうち名古屋高速道路公社の設計規準⁶⁾では、①常時および震度法と②耐震設計の2段階に分けた設計法が示されており、耐震設計に用いる保有耐力の評価法についても記述がみられる。しかし、これを除いて他は常時荷重あるいは震度法レベルの地震荷重に対して許容応力度設計を行うものであり、アンカー部の限界強度・保有耐力を明確に意識した設計法にはなっていない。また、その他の参考資料として、土木学会などで出している設計指針等^{7),10)}があるが、それらにおいてもアンカー部の保有耐力評価法について特に詳細な記述がなされているわけではない。

5.1.2 道路橋示方書に基づくアンカー部の保有耐力評価法

道路橋示方書では細部の設計法に関する規定はないものの、保有耐力についてはV耐震設計編²⁾で「アンカー部は、橋脚の終局水平耐力と同等以上の耐力を有するように設計することを基本とする。」と明確に定められており、その保有耐力の算出方法についても解説が加えられている。また、名古屋高速道路公社の設計規準に定められているアンカー部の保有耐力評価法も基本的には道路橋示方書と同じ方法である。

道路橋示方書に規定されている鋼製橋脚アンカー部の保有耐力評価法は、鉄筋コンクリート断面の破壊抵抗モーメントの算出方法を準用したものである。つまり、ベースプレート下面のコンクリート断面に対し周囲のアンカーボルトを鉄筋に置き換えた鉄筋コンクリート断面として耐力計算を行う。ただし、鉄筋コンクリート断面における破壊抵抗モーメント算出の場合と異なり、アンカーボルトの

表 5.2 公団・公社の設計基準におけるアンカー各部に関する規定事項の概要

	(a) 要求性能	(b) 検証方法	京神高専道路公社 鋼構造物設計基準 (平成 4 年 4 月) 【①杭方式】 アンカーボルトとアンカーフレームにより圧縮力および引張力に抵抗する。	阪神高専道路公社 鋼構造物設計基準 (補強編) (平成 6 年 5 月) 【②鉄筋コンクリート方式】 圧縮力に対してはベースプレート下面のコンクリートで抵抗し、引張力に対してはアンカーボルトおよびアンカーフレームで抵抗する。	名古屋高速道路公社 鋼構造物設計基準 (平成 11 年 10 月) 【③直接定着方式】 スタッドを用いたアンカーボルトのみで圧縮力および引張力に抵抗する。
(1) 一般	鋼柱に作用する力を基礎構造物に円滑に伝達できる構造としなければならない。				
(2) 種類	①杭方式 ②鉄筋コンクリート方式 ③直接定着方式				
(3) 使用材料					
(4) アンカー部		道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 10.4 アンカー部の耐震設計			① 照査応力度 ① アンカーボルト軸力
(4-1) アンカーボルト	ベースプレートより伝達される軸力およびベースプレートとフーチングの相対変位により生じるせん断力に対して安全であること		① アンカーボルトの設計		① 材質・ボルト径 ② 合成応力度により設計 ③ 公称径 D の上限値 ④ 設置間隔：2D 以上 ⑤ ボルト径・スタッド径・スタッドピッチ ⑥ 設計定着長 ⑦ 実埋め込み ⑧ アンボルト長
(4-2) ベースプレート部	① アンカーボルト軸力による圧縮力、アンカーボルトと脚柱フランジの偏心による曲げモーメント、およびせん断力に対して安全であること ② 変形が小さいこと		① アンカーボルトの引張応力度およびコンクリートの圧縮応力度 ② 水平力によるアンカーボルトのせん断応力度 ① ワッシャーの大きさ ② リブの配厚・間隔 ③ リブの取厚 ④ リブと柱の接合 ⑤ アンカーボルト用孔の縁端距離 ⑥ 角柱における溶接 ⑦ グラウト ⑧ 柱の内側補強		① 設計方法 ② ベースプレートの有効幅 ③ ベースプレートとワッシャー、ワッシャーとナットとの溶接 ④ ベースプレート板厚 ⑤ 作用応力度 ⑥ リブ高さ・脚柱との溶接
(4-3) アンカーフレーム	ベース部から作用する力を確実にフーチングコンクリートに伝達できる構造としなければならない。		① アンカーフレームのフランジ幅 ② 腹板断面 ③ ダイヤフラム ④ フランジ板厚 ⑤ アンカーボルトの穴径		
(4-4) フーチングコンクリート	① アンカーフレームによる引き抜き、押し抜きせん断に対して安全であること (杭方式・R C方式の場合) ② コーン破壊と付着破壊の両者に対して安全であること (直接定着方式)		① 押抜きせん断面 ② 引抜きせん断面 ⑤ せん断抵抗面のとり方		① コーン破壊の照査 ② ベースプレート下面のコンクリート ③ フーチング補強筋
備考		福岡北九州道路公社についてもほぼ同様			

降伏ひずみないしはコンクリートの圧縮強度に達した時点のひずみを限界ひずみとし、この限界ひずみに到達した時点をもって終局耐力としている。

道路橋示方書に基づいたアンカー部の保有耐力評価法の概要を図 5.1 に示す。平面保持の仮定と材料の応力-ひずみ曲線とに基づいて、限界ひずみ到達時の断面力を計算する単純なモデルによる方法であるが、コンクリートの応力-ひずみ曲線に非線形性があるため、一般に図 5.2 に示したような繰り返し計算を要する。つまり、中立軸を適当に仮定しながら平面保持の条件からひずみ分布を求め、これと応力-ひずみ関係とから応力分布を計算する。計算された応力分布より求まる軸力が想定した軸力になるまでこのプロセスを繰り返す。最終的に軸力が収束した時点の応力分布から保有耐力が計算される。

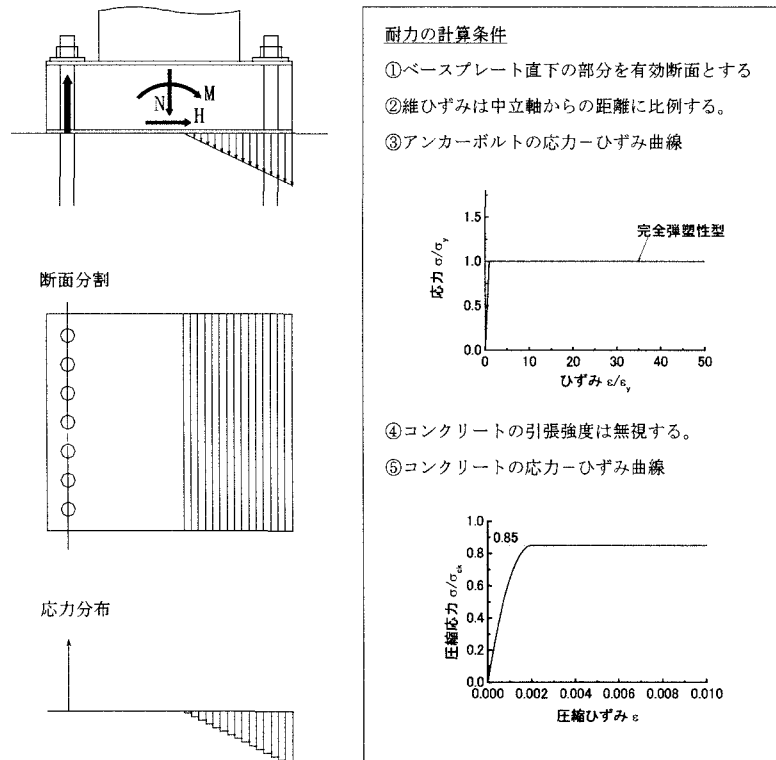


図 5.1 道路橋示方書に基づいたアンカー部の保有耐力評価法

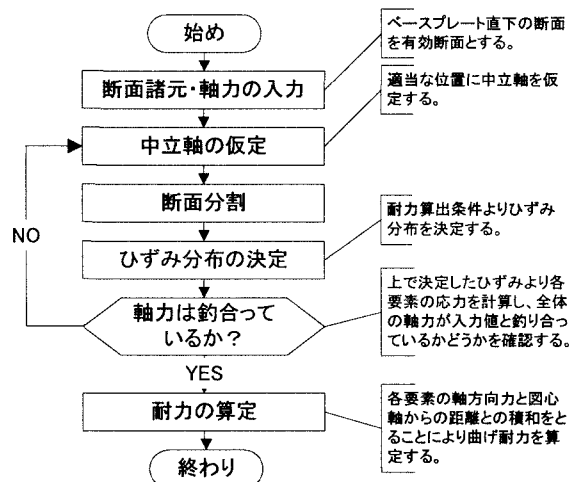


図 5.2 道路橋示方書に基づいたアンカー部の保有耐力計算の流れ

5.1.3 アンカー部の保有耐力評価法に関する最近の研究

(1) 研究の概観

鋼製橋脚アンカー部に関する最近の研究^{11)・28)}を、対象としている構造形式と内容とにより分類すると概ね表 5.3 のようになる。構造形式としては①杭方式、②RC方式、③直接定着方式とに分類され、それぞれについて円形断面と矩形断面とがある。また、内容的には、Ⅰ)実験的研究、Ⅱ)終局挙動のモデル化に関する研究、Ⅲ)地震時挙動に関する研究の3つに大きく分類される。Ⅰ)とⅡ)については単調荷重と繰返し荷重という分類も可能である。

この表によると、一部の断面形状のものについて研究が実施されていないものがあるが、断面形状による差異を特に考えなければ、全般的に万遍なく研究が行われているといえる。ただし、これらの文献には内容的に一部重複したところも多くみられるし、また、実験的研究の絶対数も必ずしも多いとはいえない状況にある。

なお、表 5.3 の分類にあてはまらない内容について扱った研究として以下のものがある。

- ・ 直接定着方式のスタッド併用アンカーボルトの要素実験 —— 11),13),27)
- ・ 縁端距離の短い杭方式アンカー部に関する実験 —— 20)
- ・ アンカーフレーム構造の簡素化・合理化に関する研究 —— 21),28)

表 5.3 鋼製橋脚アンカー部に関する最近の研究の分類

構造形式／断面形状 内容／荷重方法		①杭方式		②RC方式		③直接定着方式	
		円形	矩形	円形	矩形	円形	矩形
Ⅰ) 実験的研究	単調荷重	14),20)	13),19), 23)		22)	11),13)	
	繰返し	14),17), 20)	14),19), 24)	15),17)	22)	11),12)	
Ⅱ) 終局挙動の モデル化に関する 研究	単調荷重	14),15)	13),19), 23)		22)	27)	
	繰返し	17)	14),24)	17)	25)		
Ⅲ) 地震時挙動に関する研究			17),18)	17),18)	25),26)		

(2) 最近の研究で提案されているアンカー部の保有耐力評価法

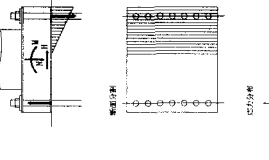
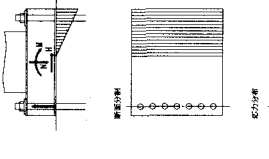
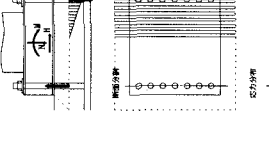
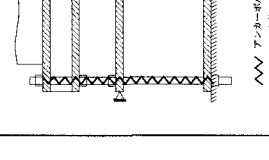
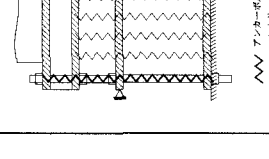
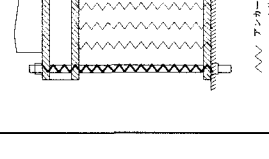
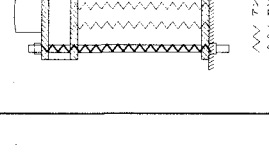
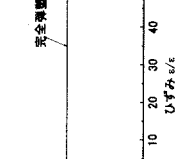
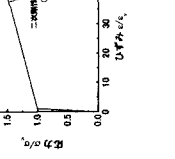
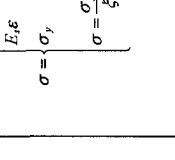
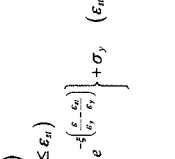
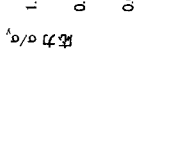
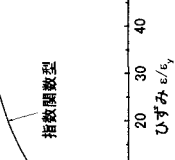
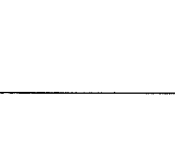
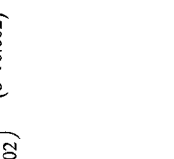
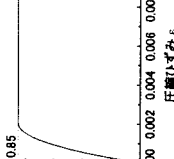
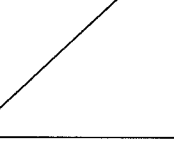
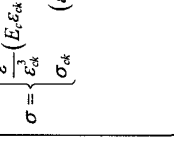
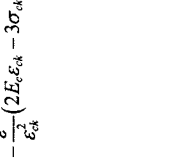
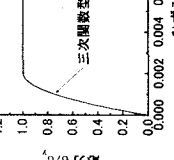
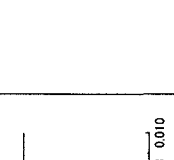
現在までに提案されている鋼製橋脚アンカー部の保有耐力評価法を、道路橋示方書の方法も含めて表 5.4 にまとめた。道路橋示方書以外の方法には大きく分けて①田島らの方法²³⁾、②Component Method¹⁵⁾の2種類がある。

①の田島らの方法は、現行の方法を改良したもので、道路橋示方書と同様にRC断面に置き換えて計算する方法であるが、以下の2点について変更を施すことによって精度の改善を図っている。

- イ) 仮定抵抗断面を、下ベースプレートと上アンカービームの中間断面にする。
- ロ) 鋼材の応力-ひずみ関係に二次剛性を考慮する。

一方、②の Component Method はRC断面として計算する方法ではなく、ベースプレートやアンカーフレームを剛体要素でモデル化するとともに、アンカーボルトおよびコンクリートをこれらの剛体要素において適切な間隔で支持された一軸要素としてモデル化し、これらの要素の集合体としてのマクロな挙動を追跡する方法である。アンカーボルト要素およびコンクリート要素の可動範囲（有効長）を考慮してより実状に則したモデル化を行うため、精度の良い保有耐力の評価が可能である。

表 5.4 アンカー一部の保有耐力評価手法

評価手法 対象とする構造形式 モデル化	道徳補正方法の方法 ²⁾		田島らの方法 ²⁰⁾		Component Method (後藤らの方法) ¹⁵⁾		
	杭方式	RC方式	杭方式	RC方式	杭方式	RC方式	
固定抵抗断面 ベースプレート アンカーボルト	 <p>固定抵抗断面</p>	 <p>RC断面</p>	 <p>RC断面</p>	 <p>杭モデル</p>	 <p>複鉄筋モデル</p>	 <p>単鉄筋モデル</p>	 <p>複鉄筋モデル</p>
	<p>下ベースプレート直下の断面</p>	<p>下ベースプレートと上アンカーボルトの中間断面</p>	<p>下ベースプレートと上アンカーボルトの中間断面</p>	<p>下ベースプレートと上アンカーボルトの中間断面</p>	<p>下ベースプレートと上アンカーボルトの中間断面</p>	<p>下ベースプレートと上アンカーボルトの中間断面</p>	<p>下ベースプレートと上アンカーボルトの中間断面</p>
応力-ひずみ関係	$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & (\varepsilon < \varepsilon_y) \\ \sigma_y & (\varepsilon_y \leq \varepsilon) \end{cases}$  <p>完全弾塑性型</p>	$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & (\varepsilon < \varepsilon_y) \\ \sigma_y + E_s (\varepsilon - \varepsilon_y) & (\varepsilon_y \leq \varepsilon) \end{cases}$  <p>三次関数型</p>	$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & (\varepsilon < \varepsilon_y) \\ \sigma_y \frac{E_s}{E_s} \left[1 - e^{-\frac{\varepsilon - \varepsilon_y}{\varepsilon_s - \varepsilon_y}} \right] + \sigma_y & (\varepsilon_y \leq \varepsilon) \end{cases}$  <p>指数関数型</p>	$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & (\varepsilon < \varepsilon_y) \\ \sigma_y \frac{E_s}{E_s} \left[1 - e^{-\frac{\varepsilon - \varepsilon_y}{\varepsilon_s - \varepsilon_y}} \right] + \sigma_y & (\varepsilon_y \leq \varepsilon) \end{cases}$  <p>指数関数型</p>	$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & (\varepsilon < \varepsilon_y) \\ \sigma_y \frac{E_s}{E_s} \left[1 - e^{-\frac{\varepsilon - \varepsilon_y}{\varepsilon_s - \varepsilon_y}} \right] + \sigma_y & (\varepsilon_y \leq \varepsilon) \end{cases}$  <p>指数関数型</p>	$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & (\varepsilon < \varepsilon_y) \\ \sigma_y \frac{E_s}{E_s} \left[1 - e^{-\frac{\varepsilon - \varepsilon_y}{\varepsilon_s - \varepsilon_y}} \right] + \sigma_y & (\varepsilon_y \leq \varepsilon) \end{cases}$  <p>指数関数型</p>	$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & (\varepsilon < \varepsilon_y) \\ \sigma_y \frac{E_s}{E_s} \left[1 - e^{-\frac{\varepsilon - \varepsilon_y}{\varepsilon_s - \varepsilon_y}} \right] + \sigma_y & (\varepsilon_y \leq \varepsilon) \end{cases}$  <p>三次関数型</p>
コンクリート	支圧を考慮	支圧を考慮	支圧を考慮	支圧を考慮	支圧を考慮	支圧を考慮	支圧を考慮
応力-ひずみ関係	$\sigma = \begin{cases} 0.85\sigma_{dk} \times \frac{\varepsilon}{0.002} \left(2 - \frac{\varepsilon}{0.002} \right) & (\varepsilon < 0.002) \\ 0.85\sigma_{dk} & (\varepsilon \geq 0.002) \end{cases}$ 	$\sigma = \begin{cases} \frac{\varepsilon^3}{E_{sk}} (E_s \varepsilon_{sk} - 2\sigma_{sk}) - \frac{\varepsilon^2}{E_{sk}} (2E_s \varepsilon_{sk} - 3\sigma_{sk}) + E_s \varepsilon & \\ \sigma_{sk} & (\varepsilon \geq \varepsilon_k) \end{cases}$ 	$\sigma = \begin{cases} \frac{\varepsilon^3}{E_{sk}} (E_s \varepsilon_{sk} - 2\sigma_{sk}) - \frac{\varepsilon^2}{E_{sk}} (2E_s \varepsilon_{sk} - 3\sigma_{sk}) + E_s \varepsilon & \\ \sigma_{sk} & (\varepsilon \geq \varepsilon_k) \end{cases}$ 	$\sigma = \begin{cases} \frac{\varepsilon^3}{E_{sk}} (E_s \varepsilon_{sk} - 2\sigma_{sk}) - \frac{\varepsilon^2}{E_{sk}} (2E_s \varepsilon_{sk} - 3\sigma_{sk}) + E_s \varepsilon & \\ \sigma_{sk} & (\varepsilon \geq \varepsilon_k) \end{cases}$ 	$\sigma = \begin{cases} \frac{\varepsilon^3}{E_{sk}} (E_s \varepsilon_{sk} - 2\sigma_{sk}) - \frac{\varepsilon^2}{E_{sk}} (2E_s \varepsilon_{sk} - 3\sigma_{sk}) + E_s \varepsilon & \\ \sigma_{sk} & (\varepsilon \geq \varepsilon_k) \end{cases}$ 	$\sigma = \begin{cases} \frac{\varepsilon^3}{E_{sk}} (E_s \varepsilon_{sk} - 2\sigma_{sk}) - \frac{\varepsilon^2}{E_{sk}} (2E_s \varepsilon_{sk} - 3\sigma_{sk}) + E_s \varepsilon & \\ \sigma_{sk} & (\varepsilon \geq \varepsilon_k) \end{cases}$ 	$\sigma = \begin{cases} \frac{\varepsilon^3}{E_{sk}} (E_s \varepsilon_{sk} - 2\sigma_{sk}) - \frac{\varepsilon^2}{E_{sk}} (2E_s \varepsilon_{sk} - 3\sigma_{sk}) + E_s \varepsilon & \\ \sigma_{sk} & (\varepsilon \geq \varepsilon_k) \end{cases}$ 

(3) 各保有耐力評価法の比較

アンカー部の実験モデルの終局挙動（基部モーメントー相対回転角曲線）²³⁾を、各種の保有耐力評価法によりシミュレートしたものを図 5.3 に示す。降伏後の相対回転角が大きい領域では Component Method が最も精度よく実験結果をシミュレートしている。一方、道路橋示方書の方法は相対回転角の大きな領域では実験結果と大きな開きがあることがわかる。

しかしながら、降伏モーメントで比較してみると、表 5.5 に示すように道路橋示方書の方法による評価値が最も実験結果に近く、他の方法ではやや高めに降伏モーメントを評価することがわかる。このため、アンカー部の保有耐力として降伏モーメントを使用する限りは、道路橋示方書の方法に代わる方法を採用する利点はないといえる。

なお、文献 28)ではRC方式と杭方式とで試設計をおこない、各設計方式の問題点および経済性について比較検討を実施しており、参考になる。

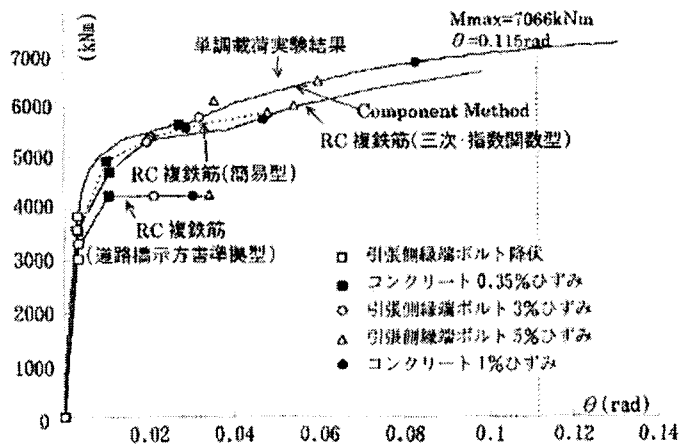


図 5.3 各種の保有耐力評価法による基部モーメントー相対回転角曲線²³⁾

表 5.5 各種の保有耐力評価法による降伏強度（文献 23）をもとに作成）

	実験結果	Component Method	田島らの方法	道路橋示方書の方法
降伏モーメント (kNm)	3007	3874	3586	3284
評価値/実験値	---	1.29	1.19	1.09

5.2 柱・はり部

5.2.1 はじめに

平成7年の兵庫県南部地震以前において、道示ではラーメン構造の柱・はりの設計についての規定はなく、各公団・公社の設計基準においても、道示Ⅱ3.3「軸方向力と曲げモーメントを受ける部材」を用いて設計すること以外明記されていない。

しかし、平成8年の道示Ⅴ耐震設計編の改訂で、10章「鋼製橋脚の地震時保有水平耐力と許容塑性率の算定」の解説文に、柱中間部に断面変化を設けると、水平地震力を受けた場合に板厚変化位置において局部座屈が生じやすくなるため、断面変化を設けないことを基準とし、設ける必要がある場合

には、断面変化部の応力度に余裕をもたせることを原則とすると記述された。

この結果、平成8年以降の各公団・公社の設計基準および鋼製橋脚の耐震設計マニュアル²⁾において、柱の中間高さで板厚を変化させないこと（断面一定）を基準とし、設ける必要がある場合には、断面変化部の応力度に余裕をもたせることを原則とすることが明記された。

また、各公団・公社の既設鋼製橋脚耐震性向上工事の設計要領では、地震力を受けた際、橋脚矩体において最初に塑性化させ、じん性をもたせる断面位置（制御断面）として、他の位置（隅角部、橋脚基部およびアンカー部）と比較して補修が容易である橋脚基部に近い柱部（中詰コンクリート直上または中詰コンクリート上端部に最も近い断面変化部）に設定するよう明記されている。

阪神・淡路大震災以降、各研究機関でラーメン構造物の耐震性能向上を目指した研究が行われている。ラーメン構造物の崩壊形式には、疲労による亀裂発生を除外すると、(1) 橋脚基部の曲げ座屈、(2) 隅角部における曲げ座屈とせん断座屈、(3) はりのせん断座屈、に大別される。ここでは、柱とはりの崩壊形式(1)、(3)に注目することとする。

5.2.2 柱・はりの曲げ座屈

前述したとおり、公団・公社の設計要領では、制御断面として、補修が容易である橋脚基部に近い柱部（中詰コンクリート直上または中詰コンクリート上端部に最も近い断面変化部）に設定するよう明記されている。しかしながら、既往の研究によれば、コンクリートが中詰めされていない個所で局部座屈が生じると、大きな塑性率は期待できないことが明らかにされている。一方、コンクリート充填部において鋼板の座屈が生じると、塑性率には大きな向上が見られるものの、橋脚の全高さにコンクリートを充填すると、自重の増加や耐荷力の増加に伴う基礎構造物への影響が大きくなりすぎてしまう問題が生じる。そこで、コンクリート充填部において鋼板の局部座屈が生じる必要最低限のコンクリート充填量を求める研究が行われている。

宇佐美・葛・水谷²⁹⁾らは無補剛矩形断面にコンクリートを部分充填した鋼製橋脚の繰返し弾塑性実験を実施し、コンクリート充填効果を実験的に確認した。

宇佐美・鈴木・Mamaghani・葛³⁰⁾らは、コンクリートを部分充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案を行っている、通常の鋼製橋脚で固有周期が1.4秒位であれば、エネルギー一定則は精度良く適用できることが示されている。

鈴木・宇佐美・伊藤・豊島³¹⁾らは、細長比パラメータの大きな鋼製橋脚を対象としてハイブリッド実験を実施した。その結果、細長比パラメータの大きな鋼製橋脚は、大きな残留変位は生じないものの、応答変位が大きくなることが報告されている。

葛西・宇佐美・葛³²⁾らは、矩形断面鋼製橋脚を対象として、コンクリート充填部と中空断面部とが同時に破壊する場合が橋脚の変形能が最も大きくなることを示し、この時のコンクリート充填高さを最適充填高さと呼んでいる。文献²⁹⁾によれば、幅厚比パラメータ R_f により以下のように最適充填率を提案している、

$R_f = 0.3$ のとき 15～20%

$R_f = 0.4$ のとき 20～25%

$R_f = 0.5$ のとき 25～30%

また、この時の塑性率はおおむね5～10程度と予想しており、細長比パラメータが小さく、コンクリ

ートの強度が高いほど大きな塑性率が期待できるとしている。

名古屋大学で行われた既往の研究では、以下のパラメータが中心的な役割を果たしている。

$$R_f = \frac{b}{nt} \sqrt{\frac{12(1-\nu)}{4\pi^2}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{Q}} \frac{a}{r_s} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$$

ここに、 R_f は幅厚比パラメータであり、 λ は補剛材細長比パラメータである。鋼製橋脚の最大耐荷力や塑性率などは、これらのパラメータを用いて推定されている。

前野・森下・青木・鈴木・梅田・三輪³³⁾らは、実橋脚の1/4縮尺のラーメン試験体を作製し実験を行っている。橋脚基部にはコンクリートを充填しており、最終崩壊状態では基部に曲げ座屈と亀裂が観察されている。

円形断面を有する鋼製橋脚にコンクリートを部分的に充填した研究としては、岸・佐藤・小枝・小室・小野らの研究³⁴⁾、森下・青木・鈴木らの研究³⁵⁾、井浦・折野・石澤らの研究³⁶⁾が報告されている。

岸・佐藤・小枝・小室・小野らは、半径48mm、板厚1.5mm、高さ500mmの供試体を用いて、コンクリート部分充填鋼管の動的実験を実施している。コンクリートが充填されていない鋼管柱では、加振方向の一方向にのみ象の脚座屈が発生するのに対し、コンクリート部分充填鋼管では全周に象の脚座屈が生じていることが報告されている。

森下・青木・鈴木らは、コンクリートの充填高さとしてコンクリート上面に設置したダイヤフラムが、円形鋼管柱の耐荷力と変形性能に及ぼす影響を、繰返し載荷実験により調べている。

井浦・折野・石澤らは、半径250mm、板厚4.6~6.0mm、高さ1500mmの供試体を用いて、繰返し漸増実験を実施している。最大耐力推定には、名古屋大学とは異なり以下の無次元モーメント M^* と無次元塑性断面係数 Z^* を用いている。

$$M^* = \frac{P_{\max} L_0}{Et_0^3 \sqrt{1-n_j}}$$

$$Z^* = \frac{Z \sigma_y \sqrt{1-n_j}}{Et_0^3}$$

また、矩形断面と同様にコンクリートの最適充填率の算出方法を提案しており、その妥当性を実験結果と比較している。

5.2.3 はりのせん断座屈

次に崩壊形式(3)であるが、兵庫県南部地震では、ラーメン構造物においてはり部のせん断座屈が観察された。そこで、はりのせん断座屈により地震エネルギーの吸収を計る研究が行われている。

酒造は³⁷⁾⁴⁰⁾、1998年からせん断崩壊型はり部材を有する円形ラーメンに関連して一連の研究を発表しており、以下のような結論を得ている。

- 1) 中間横荷重のある時には、はり中央腹板の塑性せん断変形は好ましくない。

- 2) はり中央腹板がせん断降伏するラーメンは、隅角部が非弾性域に入る可能性が高い。
- 3) 隅角部近傍のはり断面をテーパ構造にして塑性化させることは有効である。
- 4) はり中央腹板をせん断崩壊させることにより、隅角部や柱基部の損傷を軽減することが可能である。

福本・上野谷・中村・小林らは⁴¹⁾、繰返しせん断を受けるプレートガーダーの強度と変形能を実験により調べている。その結果、LY 鋼は SM 鋼よりも高い吸収エネルギーが期待されることが報告されている。

中間はりを有する 2 層鋼製ラーメン橋脚については、酒造・山田³⁸⁾と森下・高久・青木・福本・岡本・松井ら⁴²⁾の報告がある。酒造・山田らによれば、1 層目のはり中央腹板をせん断崩壊させることにより、1 層目の隅角部や柱基部の変形を抑える効果が見られた。なお、柱基部の曲率速度に比べ腹板のせん断ひずみ速度はかなり大きいことに注意を要する。森下・高久・青木・福本・岡本・松井らは実験を通してはり部に極軟鋼を使用する可能性について検討している。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 鋼橋編，1996. 12.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996. 12.
- 3) 首都高速道路公団：鋼構造物設計基準，1992. 4.
- 4) 阪神高速道路公団：構造物設計基準（橋梁編）第 2 編 鋼構造，1994. 5.
- 5) 福岡北九州高速道路公社：設計基準 第 2 部 構造物設計基準（橋梁編），1997. 10.
- 6) 名古屋高速道路公社：鋼構造物設計基準，1999. 10.
- 7) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997. 3.
- 8) 土木学会：鋼構造物の終局強度と設計，1994. 7.
- 9) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART A 一般構造物，1997.
- 10) 日本橋梁建設協会：鋼製橋脚の耐震設計マニュアル，1998. 11.
- 11) Y. GOTO・M. OBATA・H. MAENO・Y. OBAYASHI : A new bond-type anchorage system for steel piers , PSSC, 1992.
- 12) 前野裕文・後藤芳顕・小畑誠・小林洋一・松浦聖：付着型アンカーボルトを用いた鋼脚定着部の耐荷力実験，構造工学論文集，Vol.39A, 1993.
- 13) Y. GOTO・M. OBATA・H. MAENO・Y. OBAYASHI : Failure mechanism of new bond-type anchor bolt subject to tension , Journal of Structural Engineering, vol.119, No.4, 1993.
- 14) 後藤芳顕・日比幸一・上条崇・藤原英之・小畑誠：アンカーフレーム杭方式による鋼脚柱定着部の繰返し載荷実験，構造工学論文集，Vol.41A, 1995.
- 15) 後藤芳顕・上条崇・藤原英之・小畑誠：鋼製橋脚定着部の終局挙動とそのモデル化に関する考察，構造工学論文集，Vol.42A, 1996.
- 16) 宮下敏・後藤芳顕・藤原英之・上条崇：アンカー一部の挙動を考慮した鋼製橋脚の地震時終局挙動の特性，第 2 回 阪神淡路大震災に関する学術講演会論文集，1997.
- 17) 後藤芳顕・宮下敏・藤原英之・上条崇：繰返し荷重を受ける鋼製橋脚アンカー一部の挙動とモデル化，土木学会論文集，No.563/I-39, 1997.
- 18) 宮下敏・後藤芳顕・藤原英之・上条崇：アンカー一部を考慮した鋼製橋脚の地震時挙動と耐震設計，鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集，1997.

- 19) 田嶋仁志・半野久光・藤原英之・後藤芳顕：鋼製橋脚アンカー部の終局挙動および終局耐力に関する検討，第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，1998.
- 20) 後藤芳顕・上條崇・藤原英之・小畑誠：縁端距離の短い杭方式による鋼製橋脚アンカー部の繰返し載荷実験，構造工学論文集，Vol.44A，1998.
- 21) 田嶋仁志・半野久光・船本浩二・船越博行・空閑栄慈：支圧板方式アンカーフレームを用いた鋼脚柱定着部の基礎実験，構造工学論文集，Vol.44A，1998.
- 22) 北田俊行・迫田治行・尾立圭巳・堀江佳平・新名勉：鉄筋コンクリート方式で設計された鋼製橋脚定着部の終局強度について，第6回鋼構造シンポジウム論文集，1998.
- 23) 田嶋仁志・半野久光・藤原英之・後藤芳顕：単調載荷条件下での矩形断面鋼製橋脚アンカー部の終局挙動とモデル化，土木学会論文集，No.612/I-46，1999.
- 24) 田嶋仁志・半野久光・藤原英之・後藤芳顕：繰返し荷重下での矩形断面鋼製橋脚アンカー部の終局挙動とモデル化，土木学会論文集，No.612/I-46，1999.
- 25) 迫田治行・北田俊行・尾立圭巳・加賀山泰一：鉄筋コンクリート方式で設計された鋼製橋脚定着部の終局限界状態と非弾性挙動の定式化，鋼構造論文集，第6巻第21号，1999.
- 26) 迫田治行・北田俊行・尾立圭巳・加賀山泰一：基礎定着部の非弾性挙動を考慮した鋼製橋脚の地震応答特性と最大応答値の実用算定法，鋼構造論文集，第6巻第23号，1999.
- 27) 前野裕文・後藤芳顕・上條崇・小林洋一：鋼製橋脚に用いる実大付着型アンカーボルトの力学特性と定着部の挙動評価モデル，構造工学論文集，Vol.46A，2000.
- 28) 阪神高速道路公団・日本橋梁建設協会：平成12年度 鋼構造物の設計に関する調査研究業務 報告概要書，2001. 3.
- 29) 宇佐美勉・葛漢彬・水谷慎吾：コンクリートを部分的に充填した無補剛箱形鋼柱の繰返し弾塑性挙動，構造工学論文集，Vol.39A，pp.249-262. 1999. 3.
- 30) 宇佐美勉・鈴木森晶・Iraj H. P. Mamaghani・葛漢彬：コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案，土木学会論文集，No.525/I-33，pp.69-82，1995. 10.
- 31) 鈴木森晶・宇佐美勉・伊藤義人・豊島径：細長比パラメータの大きなコンクリート部分充填鋼柱の地震時挙動，土木学会論文集，No.537/I-35，pp.77-88，1996. 4.
- 32) 葛西昭・宇佐美勉・葛漢彬：コンクリート部分充填鋼製橋脚の耐震性能，橋梁と基礎，pp.23-29，1997. 9.
- 33) 前野裕文・森下宣明・青木徹彦・鈴木森晶・梅田聡・三輪恭久：コンクリートを柱基部に部分充填した鋼製ラーメン橋脚の耐荷力実験，構造工学論文集，Vol.47A，pp.801-808. 2001. 3.
- 34) 岸徳光・佐藤晶志・小枝日出夫・小室雅人・小野信市：正弦波加振を受けるコンクリート充填鋼管柱モデルの弾塑性応答性状，第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計の応用に関する論文集，pp.185-192，1998. 11.
- 35) 森下宣明・青木徹彦・鈴木森晶：コンクリート充填円形鋼管柱の耐震性能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp.73-83. 2000. 3.
- 36) 井浦雅司・折野明宏・石澤俊希：コンクリートを部分充填した円形鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する研究，土木学会論文集，No.696/I-58，pp.285-298，2002. 1.
- 37) 酒造敏廣：せん断崩壊型はり部材を有する鋼門形ラーメンの非弾性地震応答性状に関する研究，構造工学論文集，Vol.44A，pp.169-178. 1998. 3.
- 38) 酒造敏廣・山田幸：はり中間部腹板のせん断崩壊を伴う鋼2層門形ラーメンの非弾性地震応答解

- 析, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.227-234. 1999. 3.
- 39) 酒造敏廣・山田幸: はり崩壊型門形ラーメンの崩壊メカニズムと非弾性地震応答性状に関する研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.663-673. 2000. 3.
- 40) 酒造敏廣: せん断崩壊型はり部材を持つ鋼門形ラーメンの非弾性地震応答に及ぼすひずみ速度の影響, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.771-782. 2001. 3.
- 41) 福本昤士・上野谷実・中村雅樹・小林泰男: 繰返しせん断を受けるプレートガーダーの強度と変形能, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.143-150. 2000. 3.
- 42) 森下泰光・高久達将・青木徹彦・福本昤士・岡本隆・松井鋭一: 中間はりを有する鋼製ラーメン橋脚の耐荷力と変形性能, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.831-840. 2000. 3.