

弾塑性部材を利用する鋼製橋脚の耐震設計について

○北海学園大学 正員 杉本博之 北海学園大学 学生員 村部剛史
北武コンクリート 正員 渡辺忠朋 東光コンクリート 正員 高久達将

1. まえがき

現行の道路橋示方書¹⁾の耐震設計は、橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動に対しては、従来の震度法で、橋の供用期間中に発生する確率は低い大きなエネルギーを持つ地震動に対しては地震時保有水平耐力法あるいは動的解析法で設計するよう定められている。後者の地震動は、タイプⅠ及びタイプⅡの地震動があり、設計水平震度の標準値で表すとタイプⅠは1、タイプⅡは2と従来の値と比べるとかなり大きな地震動に対応できることが求められている。

これらに対し、従来の構造物が単独でその弾性領域のみで対応するのは、主に経済的な理由により非現実的なことであるので、構造物の解析は、静的、動的を問わず塑性領域を考慮することが求められるようになった。そのとき問題となるのは、終局状態の評価である。

RC 構造物では、従前より終局状態に対する実験の蓄積があり、設計にも取り入れられてきた経緯があるので、例えばタイプⅡの地震動に対する耐震補強、耐震設計も合理的になしうる。設計の実務において、大きな困難があるということは聞こえてこない。

一方、鋼構造物においては、新耐震設計基準に対する設計法が、設計の実務において、広く普及し受け入れられている状況とは思えない。理由は、終局状態の評価がまだ研究段階にあり設計実務で使える形で提案されていないことにあると思われる。土木の鋼構造物は比較的薄肉構造であり、終局状態の挙動が複雑である。また、座屈後の挙動が難解、不安定であることにより設計上なかなか評価できず、エネルギー吸収能力において必ずしも優位性が保てないことなども指摘される。

これらの現状を背景とし、本論文では、鋼製橋脚に厚肉の完全弾塑性部材を取り付けることにより、鋼製橋脚本体は弾性状態を保ちながらタイプⅠおよびⅡの地震動に対しては両部材の複合作用によりエネルギーを吸収するシステムを検討した。目的は、比較的簡単な構造システムの提案により、解析、設計を簡単にするにある。現状では、種々解決しなければならない問題点はあるが、可能性は示されており、鋼製橋脚本体は弾性、取り付け部材は完全弾塑性と解析上のあいまいさは介在せず、なおタイプⅠおよびⅡの地震動に対しても対応可能になりうるものである。

本研究の非線形動的解析は、日本電子計算機より提供を受けたT D A PⅢを用いた。

2. 構造本体と取り付け部材

本研究においては、鋼製門型ラーメン橋脚(以下、鋼製橋脚と略する)を主な対象とするが、基礎的な研究のために単柱においても考察を加えた。それらの構造本体と取り付け部材の関係を図-1および図-2²⁾に示した。水平地震力は、構造上部に面内に作用する。図中、白抜きの部分が構造本体であり、黒抜きの部分が取り付け部材を表す。構造本体と取り付け部材の関係を表す平面図を図-3に示した。取り付け部材は、図に示すように、断面図心軸は一致させ構造本体の側面に取り付けるものとする。取り付け部材は直接あるいはガセットを介して本体に取り付けられる。取り付け部の構造も重要であるが、本研究は、基礎的な考察を主な目的としているので、構造詳細は今後の課題とする。

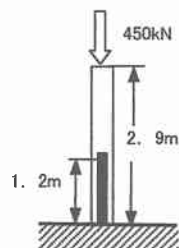


図-1 単柱と取り付け部材

Study on seismic design of steel piers using elasto-plastic members

By Hiroyuki SUGIMOTO, Tsuyoshi MURABE, Tadatomo WATANABE & Tatsumasa TAKAKU

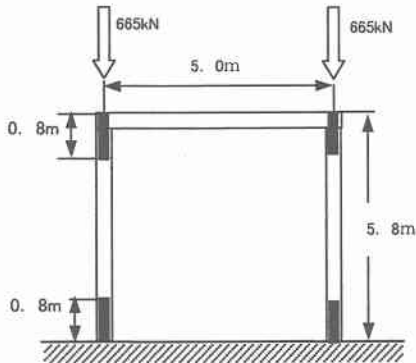


図-2 鋼製橋脚と取り付け部材

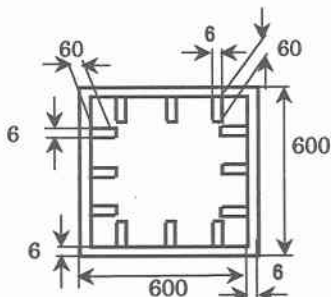


図-4 柱断面(単位mm)

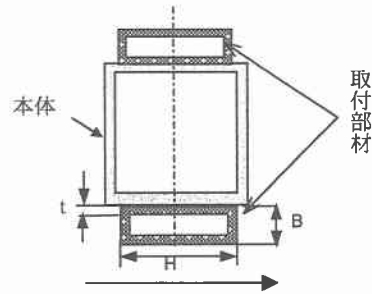


図-3 本体と取り付け部材の平面図

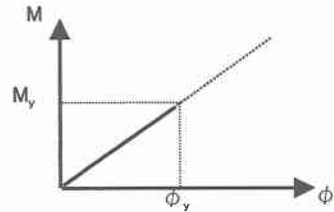


図-5 構造本体のM-φ関係

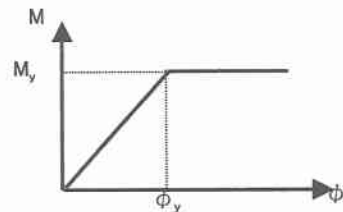


図-6 取り付け部材のM-φ関係

構造本体の柱断面を図-4²⁾に示した。正方形箱型断面とし、フランジ、ウェブそれぞれ3本の補剛材で補剛されている。これは、単柱も鋼製橋脚も同じ断面とする。梁部材は、左右の剛域(60cm)とその中間部の3要素に分割される。柱断面は、上部は上から60cmの剛域、5cmの2要素、10cmの5要素に分割され、基部は、下から5cmの2要素、10cmの5要素、取り付け部材の長さに応じた1要素に分割される。その中間部は1部材としている。この構造本体と柱両側面の取り付け部材とは、取り付け部材の長さの範囲において、柱部材の軸線上の節点を共有しているものとして解析モデルを構築している。

本研究においては、構造本体は弾性の範囲で挙動するとし、取り付け部材は厚肉の完全弾塑性部材としている。これらの部材の曲げモーメント M と曲率 ϕ の関係をモデル化したものを図-5と図-6に示した。

図中、 M_y は降伏モーメント、 ϕ_y は降伏曲率である。構造本体の作用曲げモーメントは、弾性範囲内に抑えることとする。その可能性は次節で検討される。取り付け部材は、厚肉断面とし図-6に示すように完全弾塑性の関係があるとする。取り付け部材は、本体構造の完成後に取り付けられると考えているので、上部構造からの死荷重は、構造本体が支持することになり、取り付け部材の降伏モーメントの算定において軸力の影響を考慮する必要はない。

3. 数値計算による検討

本研究の可能性を、数値計算により検討した。

図-2に示す鋼製橋脚が当面の課題であるが、より基礎的な考察のために図-1に示す単柱構造も検討した。それぞれ検討結果を説明する。計算は、TDAPⅢを用いて非線形動的解析を行っている。入力地震波は、阪神淡路大震災で観測された、神戸海洋気象台原波形（NS成分）記録³⁾を用いた。

3-1 単柱の場合

単柱の構造は、図-1に示すとおりである。取り付け部材の長さはこの場合1.2mに固定している。

検討した断面諸元を表-1に、計算結果を表-2および図-7、8に示した。表中Kは弾性領域の曲げ剛性である。本体の断面は図-4に示したものであり、降伏モーメントは、1069kN・mとなる。これに対し、取り付け部材は、表-1の①～⑥の断面を与えて検討した。降伏応力度は、①～⑤は本体構造と同じであり、⑥は若干少なく設定している。表-2には、取り付け部材と単柱基部の作用最大モーメント、その値に達した時刻(sec)、および水平荷重作用点の最大水平変位を示している。また、最右欄には、本体基部の作用最大モーメントとその降伏モーメントとの比(M_y 比率)が示されている。取り付け部材③～⑥で本体構造の作用曲げモーメントは降伏モーメント以下になっており、⑥の場合は、取り付け部材は塑性領域に入っている。取り付け部材なしでは、本体基部には、4062kN・mの作用モーメントが働くので、効果はあると考えられる。

図-7には、上記の M_y 比率と取り付け部材の断面2次モーメントとの関係、図-8には、 M_y 比率と取り付け部材の降伏モーメントとの関係が示されている。取り付け部材がない場合よりかなり作用モーメントが減少すること、および断面2次モーメントと降伏モーメントの増加に伴い作用曲げモーメントが減少する傾向が見られる。図中白抜きの記号は、取り付け部材が最後まで塑性域に達しなかったケースを示している。

3-2 鋼製橋脚の場合

鋼製橋脚の構造は、図-2に示すとおりである。取り付け部材の長さはこの場合0.8m、1.0m、1.2mの3種類を与えた。

検討した断面諸元を表-3に、計算結果を表-4および図-9、10に示した。本体の断面は図-4に示したものであり、降伏モーメントは、1069kN・mとなる。これに対し、取り付け部材は、表-1の①～⑬の断面を与えて検討した。降伏応力度は、①～⑫は本体構造と同じであり、⑬は若干少なく設定している。表-4には、取り付け部材と単柱基部の作用最大モーメント、その値に達した時刻(sec)、および水平荷重作用点を最大水平変位を示している。また、それぞれの最右欄には、本体基部の作用最大モーメントとその降伏モーメントとの比(M_y 比率)が示されている。取り付け部材⑪と⑫の1.2mと0.8m、および⑬で本体構造の作用曲げモーメントは降伏モーメント以下になっており、⑪の1.2mおよび⑬の場合は、取り付け部材は塑性領域に入っている。取り付け部材なしでは、本体基部には、6939kN・mの作用モーメントが働くので、効果はあると考えられる。

取り付け部材の部材長の影響もかなりあると思われる。3種類の部材長のうち橋脚作用曲げモーメントの降伏モーメントへの割合が1に近づいたのは0.8mと1.2mで前者の方が若干低めの値を与えていた。その関係でケース⑬は部材長0.8mの計算を追加した。部材長により結果に差が現れたのは、動的挙動に対する影響によるものと思われる。

図-9には、上記の M_y 比率と取り付け部材の断面2次モーメントとの関係、図-10には、 M_y 比率と取り付け部材の降伏モーメントとの関係が示されている。取り付け部材をつけることにより、ない場合よりかなり作用モーメントが減少すること、および断面2次モーメントと降伏モーメントの増加に伴い作用曲げモーメントが減少する傾向が見られる。図中白抜きの記号は、取り付け部材が最後まで塑性域に達しなかったケースを示している。

図-11には、入力地震波形を示した。

4. 設計手順

本研究はまだ可能性の検討段階であるが、設計手順について考察を加えることも必要と思われる。目的が

表-1 単柱の検討に用いた断面諸元

CASE	σ_y (N/mm ²)	t (cm)	B (cm)	H (cm)	A(10 ⁻²) (m ²)	I(10 ⁻³) (m ⁴)	K (kN·m ²)	My (kN·m)	$\phi_y(10^{-3})$ (1/m)	
本体	298	-	-	-	1.858	1.0220	214620	1069.0	4.98	
取付部材	①	298	0.0	4.0	40.0	1.6	0.2133	44800	317.8	7.09
	②	298	0.0	4.0	50.0	2.0	0.4167	87500	481.7	5.50
	③	298	0.0	3.0	60.0	1.8	0.5400	113400	520.2	4.59
	④	298	0.0	4.0	55.0	2.2	0.5546	116460	601.0	5.16
	⑤	298	0.0	4.0	52.5	2.1	0.4823	101290	547.5	5.40
	⑥	240	0.0	4.0	52.5	2.1	0.4823	101290	440.9	4.35

表-2 単柱の計算結果

CASE	弾塑性材 Mmax (sec)	単柱 Mdmax (sec)	My比率 (=Md/My)	最大変位 (cm)
単柱	-	4062.1 (11.172)	3.799	5.30
①	317.8 (9.688)	1587.6 (9.690)	1.485	2.23
②	481.6 (10.722)	1248.0 (10.732)	1.167	1.86
③	475.4 (9.376)	907.5 (9.376)	0.849	1.44
④	477.3 (9.368)	887.4 (9.368)	0.830	1.41
⑤	474.6 (9.532)	1014.4 (9.532)	0.949	1.58
⑥	440.9 (9.518)	1070.4 (9.532)	1.001	1.58

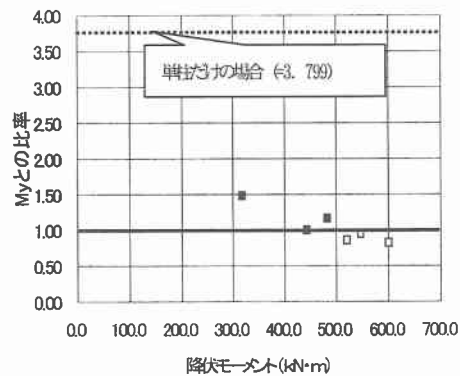
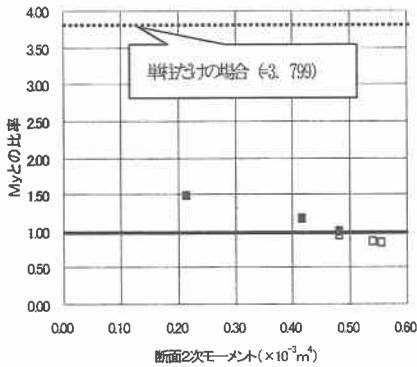


図-7 基部モーメントと断面2次モーメントの関係

図-8 基部モーメントと降伏モーメントの関係

表-3 鋼製ラーメン橋脚の検討に用いた断面諸元

CASE	σ_y	t	B	H	A(10 ⁻²)	I(10 ⁻³)	K	My	$\phi_y(10^{-3})$	
	(N/mm ²)	(cm)	(cm)	(cm)	(m ²)	(m ⁴)	(kN·m ²)	(kN·m)	(1/m)	
本体	298	-	-	-	1.858	1.0220	214620	1069.0	4.98	
取付部材	①	298	3.8	20.0	20.0	2.614	0.1162	24400	346.3	14.19
	②	298	4.0	20.0	20.0	2.720	0.1186	24900	353.4	14.19
	③	298	4.2	20.0	20.0	2.822	0.1207	25350	359.8	14.19
	④	298	3.8	20.0	40.0	4.130	0.7340	154140	1093.7	7.09
	⑤	298	4.0	20.0	40.0	4.320	0.7583	159240	1129.8	7.09
	⑥	298	4.2	20.0	40.0	4.500	0.7814	164100	1164.3	7.09
	⑦	298	3.8	20.0	60.0	5.654	2.1636	454350	2149.1	4.73
	⑧	298	4.0	20.0	60.0	5.920	2.2461	471670	2231.1	4.73
	⑨	298	4.2	20.0	60.0	6.182	2.3258	488420	2310.3	4.73
	⑩	298	8.0	20.0	60.0	10.560	3.3908	712080	3368.2	4.73
	⑪	298	8.0	20.0	65.0	11.360	4.2779	898360	3922.5	4.37
	⑫	298	8.0	20.0	70.0	12.160	5.3050	1114050	4516.8	4.05
	⑬	220	8.0	20.0	67.0	11.680	4.6714	980990	3068.0	3.13

表-4 鋼製橋脚の計算結果

ケース	長さ m	弾塑性材 Mmax (sec)	鋼製橋脚 Mdmax (sec)	My比率 (Md/My)	最大変位 (cm)	ケース	長さ m	弾塑性材 Mmax (sec)	鋼製橋脚 Mdmax (sec)	My比率 (Md/My)	最大変位 (cm)
本体		-	6939 (8.36)	6.491	19.93						
①	1.2	346.3 (7.32)	6368 (9.69)	5.957	18.60	⑦	1.2	2149.1 (9.73)	3347 (9.97)	3.131	12.03
	1.0	346.3 (7.32)	6364 (9.48)	5.953	18.83		1.0	2149.1 (9.97)	1996 (10.19)	1.867	10.15
	0.8	346.3 (7.35)	6345 (9.49)	5.936	19.06		0.8	2149.1 (7.44)	2898 (10.23)	2.711	13.78
②	1.2	353.4 (7.32)	6351 (9.96)	5.941	18.56	⑧	1.2	2231.0 (9.40)	3322 (9.97)	3.108	12.08
	1.0	353.4 (7.32)	6346 (9.48)	5.936	18.80		1.0	2231.0 (9.96)	1991 (10.19)	1.862	10.33
	0.8	353.4 (7.33)	6335 (9.49)	5.926	19.05		0.8	2231.0 (7.45)	2862 (10.22)	2.677	13.90
③	1.2	359.8 (7.32)	6338 (9.96)	5.929	18.53	⑨	1.2	2310.2 (9.40)	3290 (9.96)	3.078	12.11
	1.0	359.8 (7.73)	6330 (9.48)	5.921	17.59		1.0	2310.2 (9.97)	1998 (10.19)	1.869	10.53
	0.8	359.8 (7.33)	6325 (9.49)	5.917	19.03		0.8	2310.2 (7.46)	2812 (10.22)	2.630	13.97
④	1.2	1092.9 (7.21)	3817 (10.24)	3.571	12.10	⑩	1.2	3368.1 (10.25)	2196 (11.47)	2.054	11.79
	1.0	1092.9 (7.22)	3399 (7.50)	3.179	11.68		1.0	3368.1 (9.96)	2264 (10.88)	2.118	13.59
	0.8	1092.9 (6.87)	3756 (7.53)	3.514	13.48		0.8	3368.1 (10.19)	1293 (10.20)	1.210	13.54
⑤	1.2	1129.0 (7.21)	3849 (10.24)	3.600	12.23	⑪	1.2	3922.5 (11.77)	1005 (11.78)	0.940	10.79
	1.0	1129.0 (7.22)	3323 (7.50)	3.108	11.54		1.0	3922.0 (10.31)	2391 (10.87)	2.236	15.10
	0.8	1129.0 (7.25)	3687 (7.53)	3.449	13.38		0.8	3333.0 (10.19)	803 (10.20)	0.751	12.22
⑥	1.2	1163.5 (7.21)	3859 (10.23)	3.609	12.30	⑫	1.2	3756.0 (11.77)	731 (11.77)	0.684	9.78
	1.0	1163.5 (7.22)	3253 (7.50)	3.043	11.42		1.0	4516.8 (10.66)	2093 (10.85)	1.958	15.91
	0.8	1163.5 (7.25)	3622 (7.53)	3.388	13.29		0.8	3174.3 (10.18)	616 (10.18)	0.577	11.20
						⑬	0.8	3067.6 (10.19)	1005 (10.19)	0.940	11.76

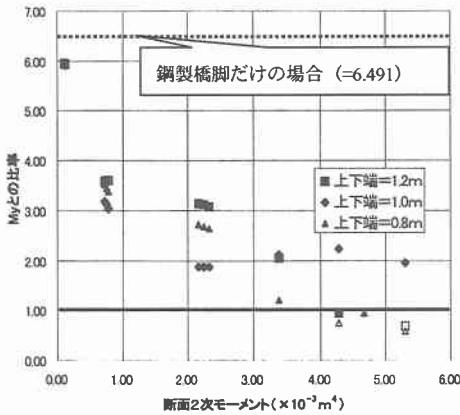


図-9 基部モーメントと断面2次モーメントの関係

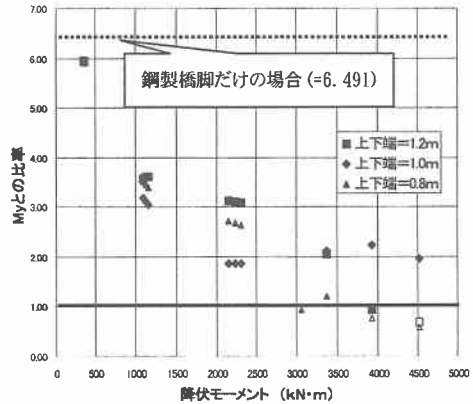


図-10 基部モーメントと降伏モーメントの関係

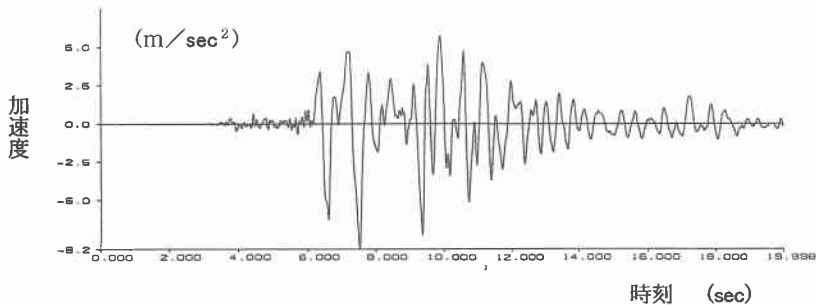


図-11 入力地震波形

設計過程における解析・照査のプロセスの簡素化にあるので、それが複雑では意味がないからである。

設計は2つに分けられる。既存の構造物の補強設計と新規の構造物の設計である。取り付け部材の目的は、強度の補強が主ではなく、挙動が単純である厚肉部材の塑性領域のエネルギー吸収能力の利用にある。そのために取り付け部材の降伏曲率は本体構造の降伏曲率と同じかそれ以下であることが要求される。

まず、補強設計の場合は、補強される部材の降伏曲率を求め、それ以下の降伏曲率を有する厚肉部材を取り付けてエネルギー吸収能力を照査することになる。

また、新規の構造物の設計の場合は、まず従来の震度法で鋼製橋脚本体の断面を決定し、補強設計の場合と同様な考え方により取り付け部材を設計する。この場合、必要があれば本体そのものの若干の設計変更を行い、これらの過程を繰り返すことになる。

以上のような設計方法により、従来の設計法の範囲でタイプⅠおよびⅡレベルの地震動に対応できる構造物の設計が可能になると思われる。

5. あとがき

現行の道路橋示方書では、タイプⅡの地震動に対応できる構造物の設計が要求される。これは、新規に建設構造物のみでなく、既設の構造物に対しても当然適用されるものである。そのために、弾性領域のみでなく、何らかの非線形領域まで考慮した解析法、照査法が必要となってきた。

RC 構造物は、従来から非線形領域を考慮した設計法をとっており、そのための実験的な蓄積も豊富にあった。現行の道路橋示方書に対応する設計は可能であると思われる。

一方、鋼構造物、特に土木における鋼構造物は一般的に薄肉であるため座屈現象およびその後の挙動の解析が難しいといわれている。非線形領域を考慮する解析であれば静的、動的を問わず部材の曲げモーメントと曲率あるいはたわみ角との関係(骨格曲線)は最も重要であり、終局状態を正しく評価するためには骨格曲線の限界値の設定はなされなければならない。タイプⅡレベルの地震動を入力しながら終局状態に言及しない研究も見られるが、本研究はそれらを支持する立場にはない。

どのような設計においても、解析法および照査法が確立されなければ設計などできるはずもない。そこで、本研究では、従来の解析法の能力および設計法の範囲でタイプⅡの地震動に対応できる構造形を考察した。

本研究においては、減衰定数は0.01として計算を行った。道路橋示方書に記述されている値(0.02~0.03)より小さな値のため構造本体の曲げモーメントが大きくなり、その結果取り付け部材の断面もかなり大きな値となった。また、鋼製橋脚の隅角部への取り付けも効果があると思われる¹⁾。これらを含め、まだ検討しなければならない課題を山積しているが、可能性の一部は見出せたと考えられる。

6. 謝辞

本研究は、文部省私立大学学術フロンティア拠点推進事業(積雪寒冷地における災害に強い都市モジュールの開発とシステム構築)および日本橋梁建設協会の援助を受けた。また、山口大学の古川浩平教授および日本電子計算株式会社の松田宏氏のアドバイスを頂いている。末筆ではあるが謝意を表する。

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，1996。
- 2) 西川・村越・高橋・岡本・池田・森下：鋼製ラーメン橋脚の耐力と変形性能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 45A，pp. 235-244，1999。
- 3) 日本橋梁建設協会：鋼製橋脚の耐震設計マニュアル，1998。
- 4) 杉本・満尾・鹿：水平荷重増加のための橋脚補強最適化に関する一考察，構造工学論文集，Vol. 44A，pp. 479-486，1998。