

軟鋼部材を取付けた実鋼製門型ラーメン橋脚の耐震性照査

On seismic performance of real scaled steel portal framed bridge piers reinforced by mild steel members

北海学園大学土木工学科	正 員	杉本博之	(Hiroyuki Sugimoto)
北海学園大学大学院	○学生員	村部剛史	(Tsuyoshi Murabe)
北武コンサルタント(株)	正 員	渡辺忠朋	(Tadatomo Watanabe)
(株)東光コンサルタンツ	フェロー	高久達将	(Tatsumasa Takaku)
山口大学社会建設工学科	正 員	古川浩平	(Kohei Furukawa)

1. まえがき

一般的に鋼製橋脚は、延性に富んだ構造物であり脆性破壊等の急激な破壊形態は発生しずらいと考えられていた。しかし兵庫県南部地震では、それまで地震被害の少なかった鋼製橋脚において、局部座屈や亀裂等による倒壊や破壊が発生した。その後、平成8年度の道路橋示方書・耐震設計編の改訂¹⁾の際には、この経験を踏まえて鋼製橋脚の耐震設計について新たに見直しが行われた。この耐震設計基準では、基本的に震度法や地震時保有水平耐力法により耐震設計するとされている。しかしコンクリートを充填しない鋼製橋脚は、構造部材の非線形履歴特性に基づくエネルギー一定則の適用が十分検討されていない部材と明記され、耐震設計は動的解析法(時刻歴応答解析法)を行うのが望ましいとされている。また時刻歴応答解析に用いる非線形域(塑性域)の諸数値は、対象とする構造物と同等の構造細目を有する供試体から求める必要がある。そのため、各研究機関で鋼製橋脚の塑性域における研究や実験が数多く行われている。しかし土木鋼構造物は、比較的薄肉構造であり座屈後の挙動が難解、不安定であることから設計上なかなか評価できず、特に終局状態の挙動が複雑である。従って、これらの実験結果から求められた終局状態を算出する各限界ひずみ式は、それぞれ用いるパラメータ(R_F : 幅厚比パラメータ、 λ_s : 細長比パラメータ等)が多種多様である。そのため、各式を用いて任意断面の骨格曲線を比較した場合、終局点にばらつきが生じる。この結果、限界ひずみ式の違いにより、構造物のエネルギー吸収能力の評価が必ずしも同一とならないことが指摘されるため、鋼製橋脚の塑性域については未だに研究段階にある。

そこで、大きな強度をもつ地震動(タイプⅠ及びタイプⅡ)を受けた場合考慮する鋼製橋脚の塑性域での評価を避けるために、応答値を弾性域に抑える構造モデルの検討を行った。構造モデルは、橋脚本体の外側に極低降伏点鋼(軟鋼)を用いた部材を取付けたものであり、取付部材のエネルギー吸収で橋脚本体を弾性域に抑えるものである。既に、実験供試体形式のラーメン橋脚は、取付部材により時刻歴応答解析の最大応答値を弾性域に抑えることが可能であった²⁾。その後の研究として、本研究は、実構造形式のラーメン橋脚により取付部材の効果を再度、検討したものである。尚、本研究における非線形動的解析(時刻歴応答解析)についての計算プログラムは、汎用動的解析システムTDAPⅢを使用した。

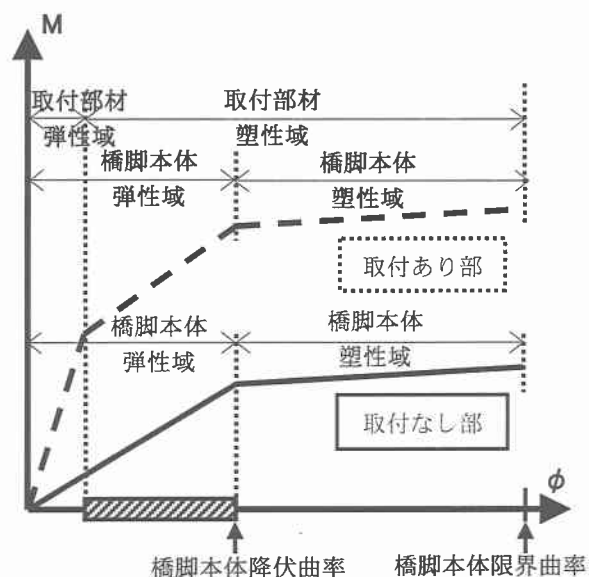


図-1 時刻歴応答解析結果の目標とする範囲

2. 取付部材について

2. 1 取付部材の効果 提案する取付部材の目的について説明する。第一に地震動による損傷部材を、取付部材に誘導できる比較的簡単な構造システムにより、地震で橋脚が被害を受けた場合、取付部材の交換や補修で復旧が済むために復旧作業の容易さにつながる。第二に橋脚本体については、初期状態では取付部材と橋脚本体の剛性で地震動を受け持ち、最終状態では主として取付部材の塑性域で受け持つことで、橋脚本体を弾性域に抑えて損傷を与えないものである。従って、橋脚本体は弾性設計で済むために、従来の震度法で耐震設計が可能となり、設計の簡略化を図ることができる。以上のように復旧作業・設計の簡略化につながる、取付部材による構造モデルについてその可能性を検討する。また、今後の鋼構造物耐震設計法の一提案になることを期待する。取付部材に極低降伏点鋼(軟鋼)を使用したのは、これらの材料が破断ひずみまで大きなひずみ量³⁾を必要とするからである。つまり取付部材の板厚を厚肉にすることで、座屈の影響を無視でき、終局状態である限界ひずみの設定に伴う設計上の問題を考慮せずに扱えるためである。本研究では、より实际的な地震動による構造物と取付部材の効果を知るために、時刻歴応答解析の最大応答曲率から部材の応力・ひずみ状態を照査している。照査する箇所は、取付部材を設けた部分を取付あり部、橋脚本体のみの部分を取付なし部として、それぞれの最大応答値で照

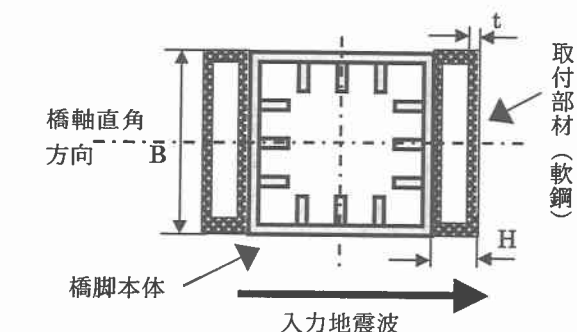


図-2 箱型取付部材モデル

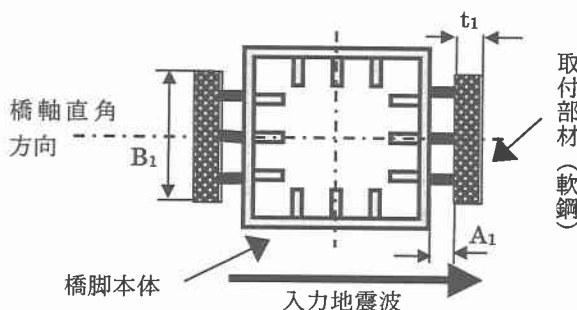


図-3 板型取付部材モデル

査している。ここで取付あり部と取付なし部に期待する最大応答値の範囲について図-1を用いて説明する。図-1は縦軸にモーメント(M), 横軸に曲率(ϕ)をとり, 点線は取付あり部の骨格曲線, 実線は取付なし部の骨格曲線を表している。取付なし部の骨格曲線は, 橋脚本体が降伏となり塑性化, その後限界ひずみ時の限界曲率に達して終局状態(局部座屈)となる。また取付あり部の骨格曲線は, 始めに取付部材が降伏して塑性化する, その後は取付なし部と同様に橋脚本体が降伏, 塑性化して限界曲率に達して終局状態となる。目標とする時刻歴応答解析による最大応答値の範囲は, 取付あり部の取付部材は塑性域そして橋脚本体は弾性域, 取付なし部は常に弾性域である。従って, 図-1の横軸に示した斜線範囲内に時刻歴応答解析の最大応答値を抑えるのが目的である。

実験供試体形式の門型ラーメン橋脚による取付部材の効果²⁾について, 図-2の箱型取付部材モデルと図-3の板型取付部材モデル, 2つの取付部材モデルを橋脚基部に設けて検討した。箱型取付部材モデルは板幅B, 板厚t, 板高H, 取付長L, 計4つのパラメータ, また板型取付部材モデルは板幅B₁, 板厚t₁, 接続間距離A₁, 取付長L, 取付部材降伏応力, 計5つのパラメータとした。それぞれのパラメータを試行錯誤的に与えて計算を行い, 結果では時刻歴応答解析の最大応答値が, 図-1に示した斜線範囲内に抑えることが可能であった。

2.2 骨格曲線 前節の図-1では, 取付あり部と取付なし部の塑性域まで考慮した部材骨格曲線について説明してきたが, 本研究の目的は橋脚本体を弾性域に抑える構造モデルの検討であることから, 部材の塑性化について考慮する必要はないと考えられる。しかし, 時刻歴応答解析によって解析を行う際に, より信頼性の高い解析を行うために, 取付あり部, 取付なし部の柱部材は非線形部材モデルとして解析を行っている。ここで骨格曲線の作成²⁾には, 軸力の釣り合い条件を満足するまで中立軸を算出する方法により, 取付部材や橋脚本体の降伏

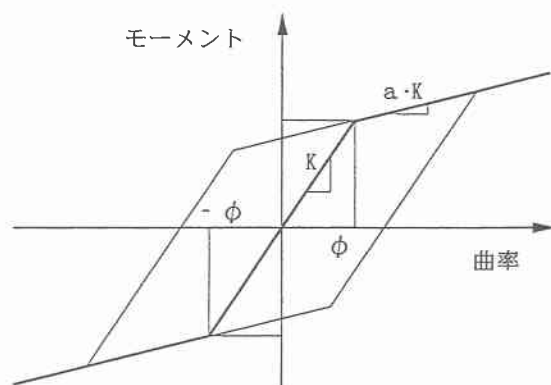


図-4 移動硬化型バイリニアモデル

点はそれぞれの降伏ひずみより, また図-1に示した橋脚本体の終局点は, 宇佐美式⁴⁾の限界ひずみ式の計算結果を用いている。こうして求めた各点を結んでモーメントと曲率関係の骨格曲線とする。この骨格曲線の第一勾配と最終勾配を用いて, 図-4に示した移動硬化型バイリニアモデルの骨格曲線に置き換えたものを, それぞれの部材に与えて時刻歴応答解析を行っている。

3. 実構造形式の鋼製門型ラーメン橋脚

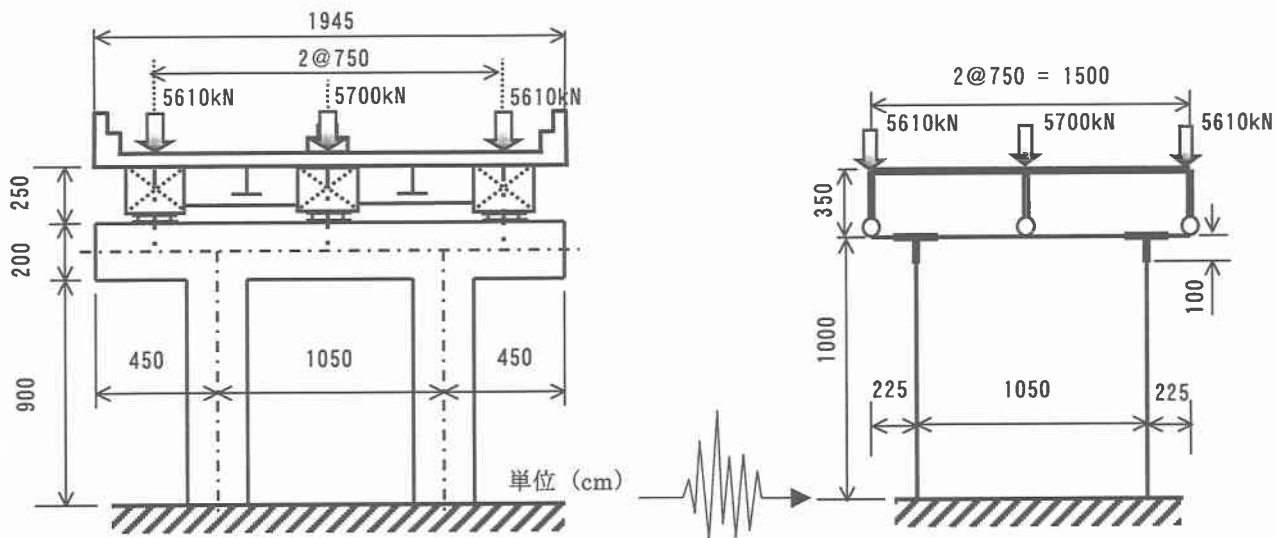
実構造形式の鋼製門型ラーメン橋脚を図-5に示した。図-5の左図は構造モデルである, 橋脚高さ9.0m, 橋脚の柱中心間隔10.5m, 使用鋼材SM490Y(降伏応力 $\sigma_y = 360\text{N/mm}^2$)の一層門型ラーメン橋脚である。上部工載荷重量として3支点到5610kN, 5700kN, 5610kN, 合計で16920kN載荷されている。時刻歴応答解析では, 構造モデルを図-5の右図に示した棒部材モデルに置き換えて入力している。基礎部分は直接基礎, 上部構造と隅角部は剛とした部材を与え, また上部構造と橋脚間の支承部分はヒンジとした。橋脚本体の柱断面は, 図-6に示した補剛材付の箱型断面である。この柱断面は, 構造物の固有周期から設計水平震度を求める修正震度法を満足したものであり, 断面決定には試行錯誤的に各断面寸法や補剛材本数を変化させて静的解析を行って求めた。

4. 時刻歴応答解析

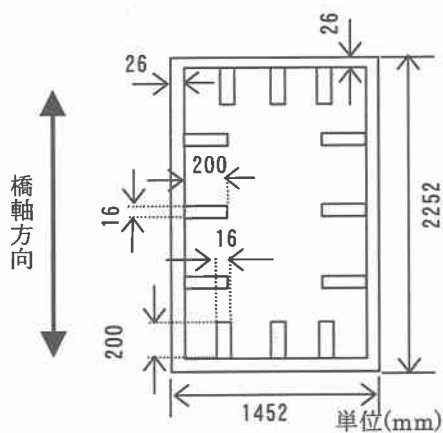
時刻歴応答解析に用いた諸条件について説明する。使用した地震波は, 道路橋示方書のタイプII地震波のI種地盤に相当する神戸海洋気象台波形(NS成分)であり, 入力方向は図-5に示す通り面内方向で行った。また数値積分法はNewmark- β 法で $\beta = 1/4$, 計算時間間隔は0.002secとして行い, 減衰については要素別減衰, として部材の減衰比は0.02とした。

5. 取付部材のない構造による計算結果

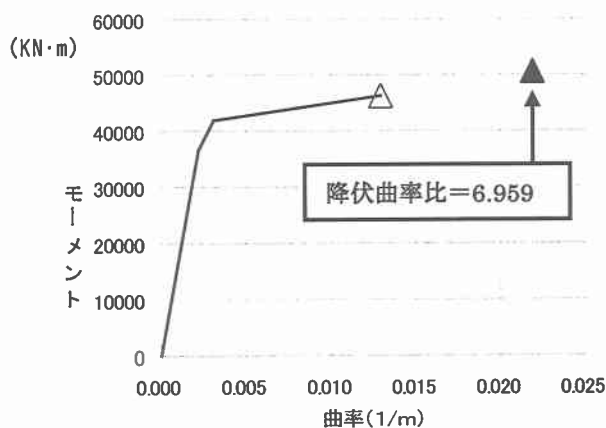
図-5の実構造形式の一層門型ラーメン橋脚で, 取付部材のない構造の時刻歴応答解析結果として, 最大応答値を柱部材の骨格曲線上にプロットしたのが図-7である。図-7の縦軸はモーメント, 横軸は曲率である。実線は, 橋脚本体の柱部材の骨格曲線であり, Δ が橋脚本体の終局状態に対する点を表している。時刻歴応答解析の最大応答値は $\blacktriangle$ であり, 左柱下端で発生していた。この最大応答値と, 橋脚本体の降伏点の関係について比較



図－5 実構造形式の鋼製門型ラーメン橋脚



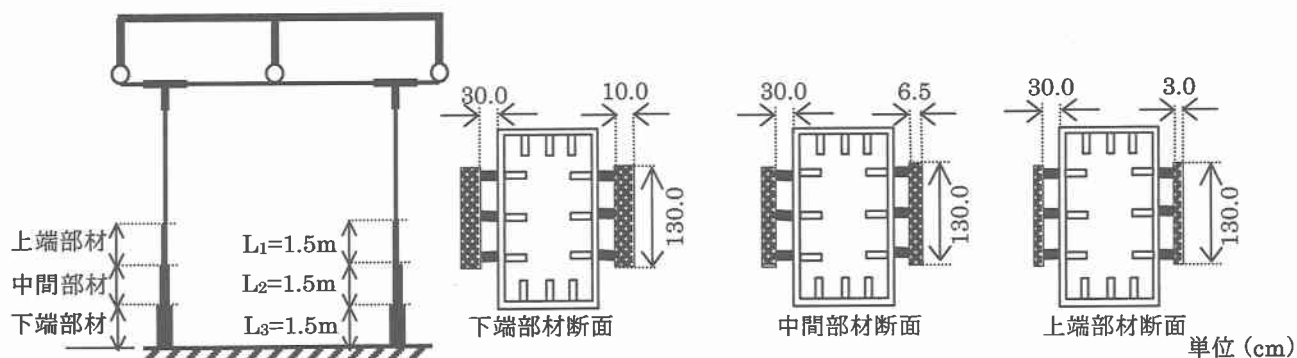
図－6 橋脚本体の柱断面諸元



図－7 取付部材のない構造の最大応答値

表－1 取付部材のある構造の計算結果

L ₁ 取付長 1.5m 板幅t ₁	L ₂ 取付長 1.5m 板幅t ₂	L ₃ 取付長=1.5m 板幅t ₃								
		9.0cm			10.0cm			11.0cm		
		取付あり部	取付なし部	容積	取付あり部	取付なし部	容積	取付あり部	取付なし部	容積
3.0cm	6.0cm	1.7189	0.7482	34.17%	1.4621	0.7457	36.06%	1.3918	0.7333	37.96%
	6.5cm	1.7359	0.7435	35.11%	0.7429	0.7366	37.01%	0.6681	0.7393	38.91%
	7.0cm	1.7493	0.7463	36.06%	0.8455	0.7420	37.96%	0.6974	0.7383	39.85%
3.5cm	6.0cm	1.7267	0.7427	35.11%	1.4892	0.7351	37.01%	1.4010	0.7301	38.91%
	6.5cm	1.7330	0.7434	36.06%	0.8192	0.7329	37.96%	0.6818	0.7379	39.85%
	7.0cm	1.7121	0.7353	37.01%	0.5890	0.7345	38.91%	0.5232	0.7410	40.81%
4.0cm	6.0cm	1.7266	0.7430	36.06%	1.4745	0.7310	37.96%	1.3982	0.7309	39.85%
	6.5cm	1.7328	0.7425	37.01%	0.7984	0.7308	38.91%	0.7215	0.7350	40.81%
	7.0cm	1.6665	0.7322	37.96%	0.6356	0.7361	39.86%	0.4834	0.7366	41.75%



図－8 取付部材(最小容積)のある構造の断面構成

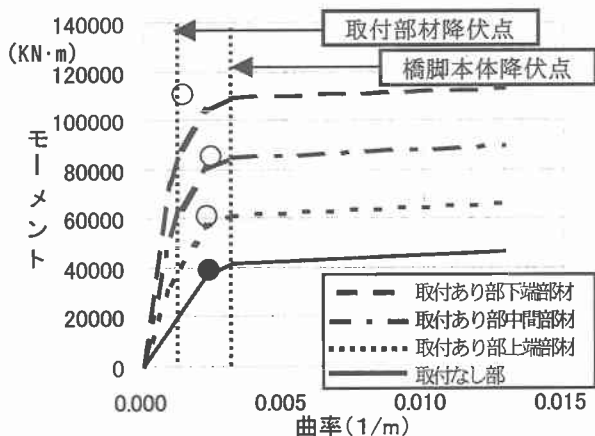


図-9 取付部材(最小容積)のある構造の最大応答値

するために、最大応答曲率を橋脚本体の降伏曲率で除した降伏曲率比で表すと6.959である。従って、この構造モデルでは、タイプⅡ程度の地震動を受けた場合、応答値が橋脚本体の柱部材が保有している終局点を大きく超えたことから、破壊または倒壊に至ると思われる。

6. 取付部材のある構造による計算結果と考察

橋脚本体の基部に、図-3の板型取付部材モデルを用いて計算を行った。実験供試体形式による取付部材の研究では、箱型・板型の両取付部材モデルのパラメータを、基部からその取付長さ L の高さまで変化しない等断面を用いて、橋脚本体を弾性域に抑えることが可能であった²⁾。しかし、本研究で検討した図-5の実構造形式ラーメン橋脚に等断面の取付部材を用いた場合、取付なし部の下部で橋脚本体の降伏曲率を超える結果となった。そこで、等断面の適用が難しいと判断し、また経済的に取付部材の断面積が大きくなることを避けるために、取付あり部の取付長さの高さ範囲で、取付部材を3変断面にすることとした。ただし試行錯誤的に板型取付部材の部材寸法を決定する際に、図-3の板型取付部材パラメータである接続間距離 A_1 、板厚 B_1 を一定としている。 A_1 を一定としたのは橋脚本体と取付部材の景観や施工面を考慮して、また B_1 を一定としたのは取付部材の板幅変化による橋脚本体の応力変化を避けるためである。3変断面の板型取付部材モデルにおける時刻歴応答解析結果を表-1に示す。表-1の結果は、 $A_1=30.0\text{cm}$ 、 $B_1=130.0\text{cm}$ 、取付部材の降伏応力は橋脚本体よりも小さい 240N/mm^2 で計算を行ったものである。左右柱部材における時刻歴応答解析の照査箇所は、取付あり部は、上端(L_1)、中間(L_2)、下端(L_3)部材の下部、取付なし部は部材の上・下部で行った。表-1の計算結果は、取付あり部と取付なし部のそれぞれ最大となった降伏曲率比で表している。降伏曲率比が1.0以下となる弾性域を示すパラメータの組合せについては、表-1のセルを塗りつぶしてある。また降伏曲率比の横には容積として、取付部材容積を橋脚本体の柱部材容積で除した値をパーセンテージ化したものを掲載した。表-1の結果から、下端部材の板厚 t_3 が9.0cmでは、どの組合せも取付あり部の降伏曲率比1.0以上となり、取付部材を用いても地震力を抑えることができずに橋脚本体が塑性域に達する結果となった。しかし、取付あり部の下端部材の板厚 t_3 を10.0cm、中間部

材の板厚 t_2 が6.5cm以上では、取付あり部、なし部の両者が弾性域に収まる結果を確認できた。取付部材の容積が、橋脚本体柱に対して最小(37.01%)であった、取付長さ、取付部材断面の結果を簡単に図示したのが図-8である。図-8の左図は、構造モデルに対して取付あり部、なし部の関係を図示している、右図は取付あり部の上端、中間、下端部材の断面構成である。また、図-8の断面による時刻歴応答解析結果を、取付部材のない構造の結果と同様に、骨格曲線上に最大応答値をプロットしたのが図-9である。図-9の実線は取付なし部の骨格曲線、点線の骨格曲線は、上から取付あり部の下端、中間、上端部材を表している。取付なし部の最大応答値は●、取付あり部それぞれの最大応答値は○である。ここで、応答値が骨格曲線上にないのは、図-4に変換して動的解析したためである。この結果から、それぞれの最大応答値が橋脚本体降伏点を超えずに収まった、また取付あり部の最大応答値は、全て取付部材が塑性化の状態にある。

以上の計算結果から、実構造形式のラーメン橋脚でも取付部材の効果がみられた。また取付部材の容積は、橋脚本体の柱容積に対して3~4割程度であった。ただし、取付部材の容積が橋脚本体に対して37.01%(図-8)やそれ以上でも弾性域とならないものがあつた。従って、3変断面の取付部材では、取付部材全体の容積だけではなく、3変断面のパラメータのバランスが重要である。

7. あとがき

実験供試体形式のラーメン橋脚による取付部材の研究結果を参考にして、取付部材の可能性について実構造形式の門型ラーメン橋脚を用いて検討を行った。結果的に、実構造形式でも取付部材を用いることで、取付部材を塑性化させて橋脚本体を弾性域に抑える、本研究が目的とする応答値の範囲内に地震動のエネルギーを吸収することが可能であった。今後は、道路橋示方書で提案されている時刻歴応答解析法の3波平均応答による結果を追加すると同時に、検討するパラメータについて、取付部材の取付長さ、降伏応力変化等の計算結果を追加する。また、取付部材による橋脚全体の景観を考慮したモデル作成についても行っていく予定である。

謝辞：本研究の実施において、文部省私立大学学術フロンティア推進拠点事業(積雪寒冷地における災害に強い都市環境モジュールの開発とシステム構築)の援助、日本橋梁建設協会の援助を受けた。末筆であるが記して謝意を表する。

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) 杉本・村部・渡辺・高久・古川：軟鋼部材で補強する鋼製門型ラーメン橋脚の耐震設計の一試み，鋼構造年次論文報告集，第8巻，p285 - 292，2000。
- 3) 日本製鐵株式会社：新日鐵の弾塑性履歴型ダンパー用鋼板，1993。
- 4) 葛・鄭・宇佐美：短柱の変形能に基づく鋼構造物の保有性能評価法，土木学会第54回年次学術講演会，I-B196，1999。