

機関番号：53901
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008 ～ 2010
 課題番号：20560455
 研究課題名（和文） 制振機能を有する接触縦リブ補強が円筒構成部材の耐震性能向上に与える効果
 研究課題名（英文） SEISMIC REINFORCEMENT OF EXISTING CYLINDRICAL STEEL PIERS BY TAKING ADVANTAGE OF CONTACT EFFECT OF ADDED STIFFENERS
 研究代表者
 忠 和男 (CHU KAZUO)
 豊田工業高等専門学校・環境都市工学科・教授
 研究者番号：20141898

研究成果の概要（和文）：既設橋脚の耐震補強には、水平耐荷力の増加を抑え、変形性能のみを向上させることが必要とされる。本研究では、既設の円形断面鋼製橋脚について、従来までの縦リブ追加による補強に対して、縦リブの下端と橋脚底面との間にわずかなすき間を設ける耐震補強法（接触縦リブ補強）を提案し、その耐震補強効果について検討した。これらの結果、提案した耐震補強により補強前の橋脚に対して水平耐荷力の増加をごく僅かに抑え、変形性能の向上を図ることができることが確認された。

研究成果の概要（英文）：In order to seismically strengthen existing bridge piers, it is commonly required to improve only their ductility while suppressing any excessive strengthening of load bearing capacity. In the present study, we proposed and verified a new method, which is, unlike the conventional method of providing longitudinal stiffeners, the same stiffeners are provided to existing cylindrical steel piers while elaborately allowing a slight gap in between the bottom of a stiffener and bottom plate of a pier. The estimated seismic effect has been verified by an experiment and the numerical analysis. Our studies showed that only the ductility has been effectively increased by being contacted the bottom of stiffeners and the bottom plate of piers after seismic force has reached a maximum level.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2009年度	200,000	60,000	260,000
2010年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：耐震構造

1. 研究開始当初の背景

平成7年1月の阪神大震災により、土木の鋼構造物にも多大の被害が生じ、鋼製橋脚においては、円形断面、角形断面を問わず多く

の被害が見られた。特に、円筒鋼製橋脚では、橋脚基部や板厚変化部において局部座屈が生じ、これが進展して崩壊に至るものが見られた。この地震を契機に既設橋脚の耐震補強

が急務となり、多方面において研究が進められた。この種の鋼製橋脚の補強法として、鋼管巻き立て補強、コンクリート充填補強、縦リブ補強等が考案されたが、いずれも橋脚基部アンカー部に負担のかかる過補強となり、最適な補強法とは言い難い。これまでの補強では、補強による既設橋脚の強度増加が、橋脚の基礎アンカー部に負担をかける例が多く見られる。以上のことから、既設橋脚の補強に当たっては、橋脚設計当初の設計強度を過度に超える補強を実施すると基礎アンカー部の補強も考慮する必要が生じ施工時間や費用における困難さも発生することになる。今後は既往の研究を踏まえた上で、既設橋脚の耐震補強に留まらず、円筒構成部材の制振性能の向上も視野に入れた制振及び耐震構造を有する補強の確立が必要であると考えている。制振及び耐震補強に当たっては、これまで行ってきた耐震補強法の方針を基礎にその発展形として応用することで、これまでの研究で得られた知見も十分に活用することができる点に着目した。

2. 研究の目的

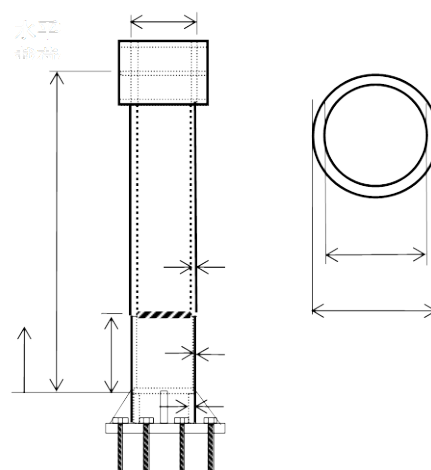
本研究は、制振及び耐震に効果を発揮する接触型縦リブを有する補強縦リブを橋脚基部に溶接した実橋の 1/10 サイズの供試体を用いて、実験を主体に研究を実施した。さらに、実験結果の妥当性検証のため数値解析も実施した。初年度の研究において、実験用供試体の寸法を試算により決定し、実験用供試体を作製した。続いて、供試体の材料特性を知るための引張り試験、供試体作製時に生じる形状の初期不整を測定し、本載荷実験の準備を行った。

2年および3年目の研究では、残りの本載荷実験を行った。実験結果の妥当性を検討するための計算は、供試体特性データを入力し、

実験の進行に合わせて適宜実施した。本研究では、円筒構成部材の制振機能を有する接触縦リブ補強法について実験を行い、この構造を用いたことによる性能特性について、その効果を確認する。特に、以下の評価手法でその効果を考察した。制振および耐震性能の特性を評価する手法としては、既往の研究による耐震性能評価方法の基準に従って、①耐荷力、②塑性率、③エネルギー吸収量によって評価する。これらの補強によって、塑性率及び耐荷力の増加傾向の特性を定量的に評価する。この評価結果と既往の耐震補強法との結果を比較検討し、この構造が制振及び耐震補強構造として、妥当であるかを検証した。

3. 研究の方法

まず、既設円筒鋼製橋脚の寸法等に関する資料を収集し、この種の鋼製橋脚の特性（形状寸法、径厚比、細長比及びこれらのパラメータ）を分類・整理等を行った。上記のパラメータを参照して、実構造物と同様のパラメータを持つ供試体寸法で、図-1に示すような寸法に決定した。これまでの調査・検討



図—1 供試体形状

から径厚比パラメータ R_t を降伏応力まで利用できる限界値 $R_t = 0.09$ より小さい供試体

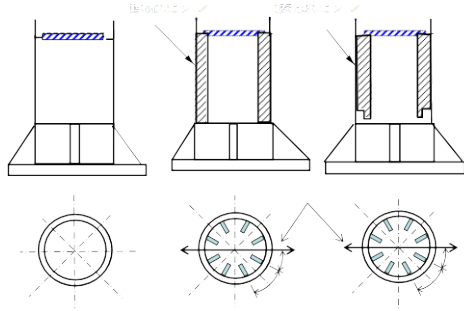


図-2 供試体形状詳細図

について実験した。実験に用いる供試体は、円筒鋼製橋脚基部の補強法として、局部座屈発生位置で断面の減少する接触型縦リブを鋼管内側に溶接する。この接触型縦リブは、円筒の円周上で対称に8枚溶接する。図-2に示すように、この縦リブは局部座屈発生予想位置で縦リブを切り欠き、縦リブの断面を減少させた部分（スリット長さ）とこの切り欠いた部分の先端と低面との間にすき間を設けた構造とする。この縦リブ断面減少部分のスリット長さ、およびすき間部分の距離およびその設定位置で、橋脚の靱性および耐荷力を調節する。供試体は、まず、補強を施さない無補強（既設橋脚相当）を作製するため市販品の電縫鋼管を鋼管の表面と内面から均等に切削し基部板厚を2.5mm程度にする。すき間距離1種類、従来型の切り欠きのない連続縦リブおよび無補強を加え、計3タイプ用意した。実験は、橋梁の上部構造に相当する一定軸力と地震荷重に相当する水平力を載荷して行う。載荷方法は旧建設省土木研究所の提案する静的繰返し載荷とする。載荷実験は、図-3に示す本校所有の材料・構造物疲労試験センター所有の油圧サーボ疲労試験機を使用する。

初年度に3年分の供試体を同時期に作製する理由としては、作製時期を異にすると材料特性等にバラツキが生じ、実験結果の信頼性に影響を与える可能性を含むからである。従って、初年度に3体の供試体を作製した。

静的繰返し載荷実験に先立ち、供試体の初

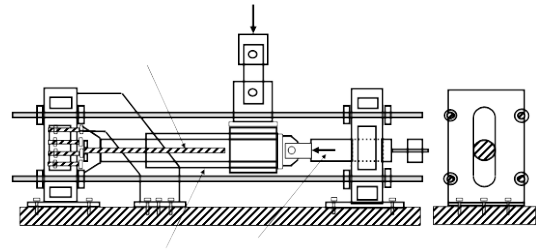


図-3 実験装置概略

期不整および供試体から切り出した材料試験片による引張り試験を行う。引張り試験から、供試体の材料特性を把握する。実験中のデータを収集するために高性能データロガーを用いることにより、安定したデータの収集とデータ収集時間の短縮が図られた。

4. 研究成果

繰返し水平荷重を載荷したときの荷重-変位履歴曲線を図-4～図-6に示す。なお、荷重および変位は降伏水平荷重 H_y 、降伏水平変位 δ_y により無次元化して表現する。図-4は無補強のケース、図-5は連続縦リブ補強のケース、図-6は接触縦リブ補強のケースにおける結果をそれぞれ表しており、実験結果を実線、解析結果を点線で表している。また、図-4～図-6の図中、左半分を上側載荷、右半分を下側載荷と定義し、載荷は下側から始め上側へと載荷したことを示している。

図-4の無補強のケースでは、 $\pm 4\delta_y$ 以上の制御変位点における水平荷重の低下傾向は実験と解析で概ね一致しているといえる。しかし、荷重-変位履歴曲線の第2、4象限における経路では実験と解析結果に差が認められ、この影響のため最大荷重が発生する $\pm 3\delta_y$ 以内の制御変位における水平荷重の値は両者で一致しているとはいえない。実験結果の方が計算結果よりも小さな荷重値となっており、最大で約17%の誤差が生じている。

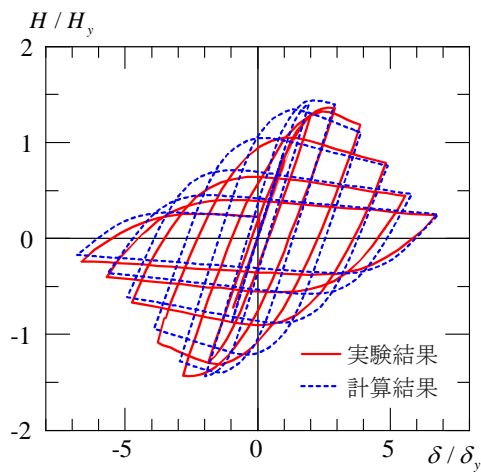


図-4 荷重—変位履歴曲線（無補強）

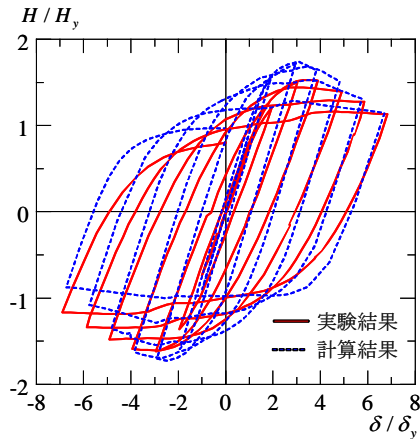


図-5 荷重—変位履歴曲線（連続縦リブ）

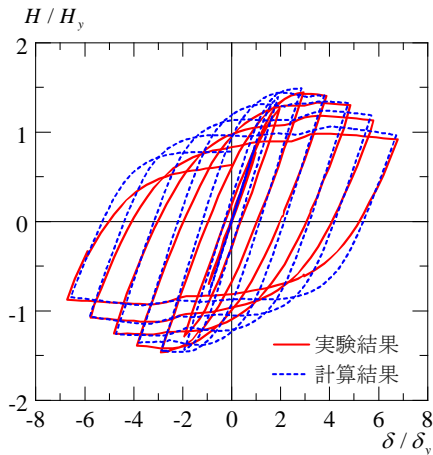


図-6 荷重—変位履歴曲線（接触縦リブ）

このような誤差の原因となる第 2、4 象限の履歴経路の差は、解析結果の弾性域が実験のそれに比べ大きくなっているためであり、これは数値解析の鋼材の構成則に降伏曲面の大きさが一定となる移動硬化則を用いた点と考えられる。なお、薄肉断面鋼管の構成

則として、移動硬化則の使用が推奨されていることを先に述べたが、本研究においては、実験結果と計算結果に看過できない差が生じており、本研究の計算における材料構成則の適用に問題があったとも考えられる。また、上述の誤差の原因として、実験において生じる基部の剛体回転の除去が不十分であったことも類推される。実験では変位を与え、応答荷重を測定しているが、この場合、試験体の剛体回転が完全に除去されないと与えた変位量の中に剛体回転成分が含まれるため、試験体の変形に寄与する変位は与えた変位量より小さくなる。このため強制変位に対応する荷重が小さく測定される結果となることも考えられる。

図-5 の連続縦リブ補強を行ったケースでは、数値解析と実験結果の荷重—変位履歴曲線において全体的に差が認められ、 $\pm 3\delta_y$ までの実験と数値解析の誤差は最大で約 28% となっている。この要因としては、前述の誤差の要因の他、実験における試験体の製作誤差として縦リブ下端と底板との間にわずかな隙間が存在し、この隙間の影響により実験の最大荷重が解析結果よりも小さくなったものと推測される。

図-6 の接触縦リブ補強のケースでは、無補強のケースと同様に $\pm 4\delta_y$ 以上の制御変位点における水平荷重の低下傾向は実験と解析で概ね一致しているといえるが、最大荷重が発生する $\pm 3\delta_y$ 以内の制御変位における水平荷重の誤差は最大で約 15% で、両者は一致しているとはいえず、実験結果の方が計算結果よりも小さな荷重値となっている。この原因についても無補強のケースと同様であると考えられる。

接触縦リブの補強効果について注目すると、**図-6** から実験および計算の両者とも荷重の増加傾向が一時的に停留し、その後、再び荷重が増加する現象が確認できる。接触縦リブの下端が底面に接触し、橋脚基部の変形を拘束して耐荷力を復元しており、結果としてこの効果により、変形性能が向上していることが確認できる。

図-4~**図-6** の結果から、今回の計算結果は、特に最大荷重付近の挙動が実験結果と一致しているとはいえないため、両者の耐震性能指標（耐荷力比、塑性率）を同一なものとして評価することはできないものと考え、以降に示す耐震性能指標の評価には、実験結果と計算結果を独立なものとして、それぞれの間で補強法の違いによる耐震性能を評価する。

図-7 は、**図-4**~**図-6** の繰返し载荷についての包絡線を示したものであり、縦軸に \bar{H}/H_y 、横軸に $\bar{\delta}/\delta_y$ をとったものである。こ

こで、 $\bar{H}, \bar{\delta}$ は、同一サイクルにおける上・下载荷の制御変位時の荷重と変位についての絶対値の平均値を表す。この図より、無補強では3サイクル目で最大荷重に達し、その後は著しく荷重が低下する。それに対して接触縦リブ補強では、最大荷重が無補強の最大荷重よりわずかに増加したまま、4サイクル目まで維持され、その後の荷重低下もかなり緩和されている。これは、接触縦リブの下端が底板に接触することにより、補強リブによる荷重支持力が発生するためである。

表-1 には、**図-7** と同様にして求めた塑性率 μ と耐荷力比 H_{max}/H_y のまとめを示す。塑性率 μ は、荷重-変位履歴曲線上で最大荷重到達後、最大荷重の97%に達したときの変位 δ_{97} を降伏変位 δ_y で除した値である。また、耐荷力比は、最大水平荷重 H_{max} を降伏水平荷

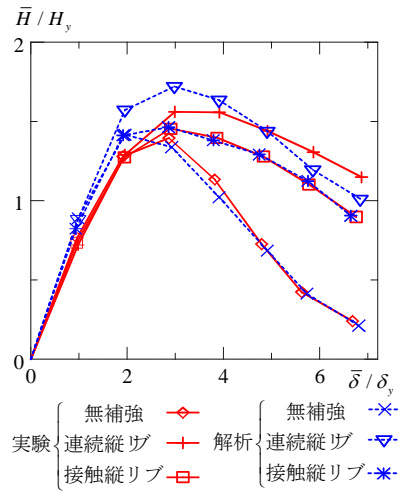
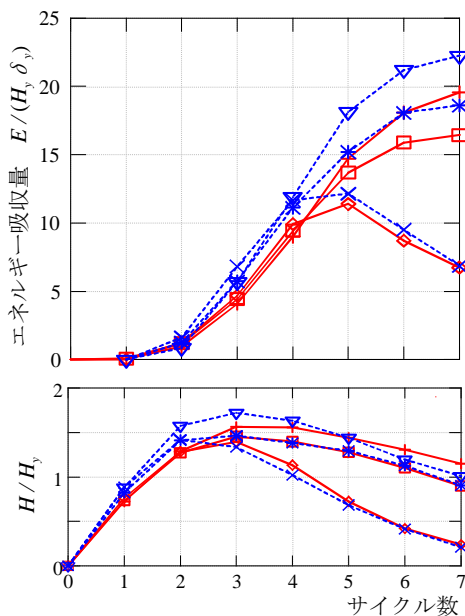


図-7 平均包絡線

表-1 塑性率と耐荷力比

		塑性率	耐荷力比
実験	無補強	3.03(1.00)	1.39(1.00)
	接触縦リブ	3.68(1.22)	1.45(1.04)
	連続縦リブ	4.18(1.38)	1.57(1.13)
数値解析	無補強	2.64(1.00)	1.42(1.00)
	接触縦リブ	3.36(1.27)	1.46(1.03)
	連続縦リブ	3.53(1.34)	1.72(1.22)

重 H_y で除した値で定義する。表中の () 内の値は、無補強を 1.0 としたときの塑性率と耐荷力比の比率を表す。**表-3** より、実験および数値解析結果とも接触縦リブ補強については、無補強に比べて耐荷力比が 4% の増加に止まっており、その傾向は良く一致している。また、接触縦リブによる塑性率は、実験で 22%、数値解析で 27% の増加があり、この補強法が「耐震補強による耐荷力の増加を抑え、塑性率を増加させる」本研究の目的を満たす補強法であるといえる。また、数値解析のみで検討した連続縦リブでは、塑性率が 52% 増加し、変形性能は大きく改善されるものの、耐荷力比も 27% 増加していることから、接触縦リブ補強による耐荷力の低減効果が顕著に現れているといえる。



図—8 エネルギー吸収量

図—8には繰り返しサイクル毎のエネルギー吸収量と包絡線を合わせて示す。エネルギー吸収量は繰返し载荷の H/H_y と δ/δ_y 座標で示される荷重—変位曲線における1サイクル毎の面積と定義する。これは、繰り返し荷重による橋脚の塑性変形発生により外部へ散逸する熱エネルギーを表しており、地震エネルギーに対する橋脚の吸収能を意味する。無補強のケースでは、3サイクル目で最大荷重に到達し、以降のサイクルにおいて急激な荷重低下が生じるため5サイクル目を境にエネルギー吸収量が低下している。一方、補強を施した場合は、5サイクルを越えてもそれが増加する。これに対して、図—18から縦リブ補強を行ったいずれのケースでもエネルギー吸収量は、荷重が低下しているサイクルにも関わらず6サイクル目においても上昇していることが分かる。

本研究では、水平耐力の増加を一定限度に抑え、変形性能を向上させるという目的を達成するため、接触縦リブによる耐震補強法を提案した。また、提案した補強法による耐震補強効果を数値解析および実験の両面から明らかにし、以下の結論を得た。

1) 繰り返し载荷実験の結果、接触縦リブ補強では、無補強に対して耐力が4%増、

塑性率 ($\mu = \delta_{97} / \delta_y$) が22%増となるのに対し、連続縦リブ補強(下端非接合)では、耐力が13%増、塑性率が38%増となり、後者による耐震補強では耐力の増加量が顕著となった。なお、数値解析における結果でも実験と同様な傾向が認められた。

2) 1)より、既設円形断面鋼製橋脚の耐震補強として本研究で提案した接触縦リブは、耐力の上昇を抑制し、変形性能のみを有効に向上させる補強法であることが分かった。

3) 接触縦リブ補強の荷重—変位経路のサイクル内において、荷重の増加傾向が一時的に停滞し、その後、荷重が再度増加する傾向を示した。これは、接触縦リブが橋脚底面に接触することによって、橋脚基部の局部変形を拘束し、耐力を復元する構造の特性が表れた結果である。この効果はエネルギー吸収量からも確認できた。

本研究で提案した接触縦リブ補強により、円形断面鋼製橋脚の水平耐力の増加を抑え、塑性率のみ増加を計ることが可能であることが分かった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

著書名: 忠和男、川西直樹、櫻井孝昌
 論文表題: 接触効果を利用した縦リブ補強による既設円形断面鋼製橋脚の耐震性能の向上、雑誌名: 土木学会論文集、査読の有無: 有、巻: Vol.66, No.2、発行年: 2010、ページ: pp.239-252

6. 研究組織

(1) 研究代表者

忠和男 (CHU KAZUO)

豊田工業高等専門学校・環境都市工学科・教授

研究者番号: 20141898

(2) 研究協力者

川西直樹 (KAWANISI NAOKI)

豊田工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授

研究者番号: 6030589