

外面リブ付鋼管とコンクリートを合成した大型壁式橋脚模型の載荷実験 —鋼管強度の影響について—

- Effects of Strength of Steel Pipe -

(独)北海道開発土木研究所	正員	池田 憲二 (Kenji Ikeda)
(独)北海道開発土木研究所	○正員	皆川 昌樹 (Masaki Minakawa)
三井建設(株)	フェロー	三上 浩 (Hiroshi Mikami)
三井建設(株)	正員	篠崎 裕生 (Hiroo Shinozaki)
室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

扁平比の大きい壁式橋脚の耐荷性能の向上、施工の省力化および工費縮減を図るため、橋脚断面内に主鉄筋の代わりとして外面リブ付鋼管を配置した鋼管・コンクリート合成構造橋脚を提案した。

著者らはすでに、実際の壁式橋脚の約 1/3 にモデル化した大型 RC 構造および合成構造試験体（以下 SRC 試験体と呼ぶ）の水平単調載荷と交番載荷実験により、耐荷性能の比較検討を行っている¹⁾。その中で、1) 合成構造橋脚は RC 構造橋脚と同程度以上の耐力および靱性能を有していること、2) 合成構造では鋼管が大きなせん断力を負担するため、RC 構造と比較して帯鉄筋（中間帯鉄筋を含む）によるせん断負担が小さい、などの知見を得ている。

一方、加力軸方向に複数本の鋼管が配置されている扁平比が1に近い橋脚を対象にした模型試験体の靱性能²⁾は、同じRC構造と比較して大きく改善されるのに対し、当該実験結果ではあまり改善が見られなかった点、実験終了後に鋼管周囲のコンクリートをはつり観察した結果、鋼管が輪切り状に破断していた点、など解明すべき点が残っている。

文献 1) の実験では、用いた鋼管の強度が規格値よりも大幅に大きく (降伏強度 478 MPa), 材料の応力-ひ

ずみ関係において降伏点が現れない非鉄金属の性質を示していたが、これが上記の結果をもたらした原因なのか、あるいは加力軸に対して一列しか鋼管が配置されていない壁式構造特有のものであるかについて検討する必要がある。本研究では、鋼管の強度が壁式橋脚の耐荷性状に及ぼす影響に着目し、文献 1) と同様な試験体で鋼管の降伏強度を変えた場合の正負交番載荷実験を行った。

2. 実験の概要

2.1 試験体の概要

図-1 に試験体の概要と計測位置図を示す。本検討に用いた試験体は RC 構造試験体と $\phi 500$, 板厚 6 mm の外面リブ付鋼管を一行に 3 本配置した SRC 構造試験体の 2 種 3 体である。RC および SRC-1 試験体は文献 1) のもので、鋼管の降伏強度が大きい場合である。SRC-2 試験体を鋼管の降伏強度が小さい場合として新たに実験した。

試験体の断面寸法は、短辺が 800 mm、長辺が 2,500 mm で、扁平比が 1:3.125 であり、高さは 3,500 mm である。軸方向鉄筋および帯鉄筋には RC 試験体でそれぞれ D29 と D10, SRC 試験体で D19 と D13 を用いた。いずれの試験体も加力軸方向の帯鉄筋比が 0.2 % となるように配筋した。なお、外面リブ付鋼管内には、コンクリート量低減のため試験体基部より上方に 1D (短辺幅: 800 mm) お

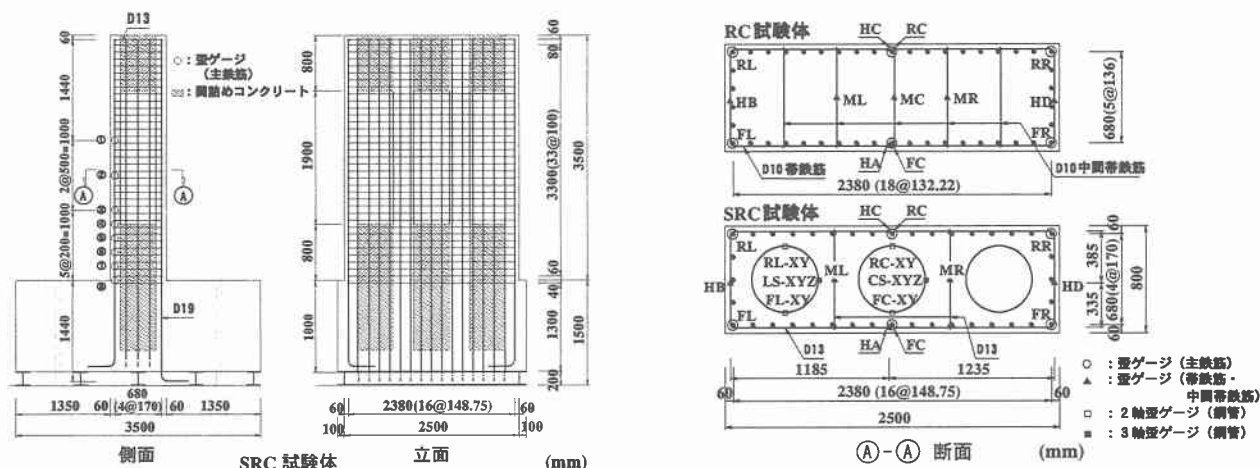


図-1 試験体の概要と計測位置図

表－１ 鋼材の力学的特性値

鋼材種		降伏強度(MPa)	引張強度(MPa)
鋼管 (SRC-1)		478.0	627.0
鋼管 (SRC-2)		349.0	477.0
帯鉄筋	D10	375.1	588.7
	D13	377.2	559.5
軸方向鉄筋	D19	383.3	590.4
	D29	383.9	596.3

表－２ コンクリートの力学的特性値

鋼材種	SRC-1, RC	SRC-2
圧縮強度 (MPa)	31.0	31.0
弾性係数 (GPa)	19.9	32.3
ポアソン比	0.22	0.21

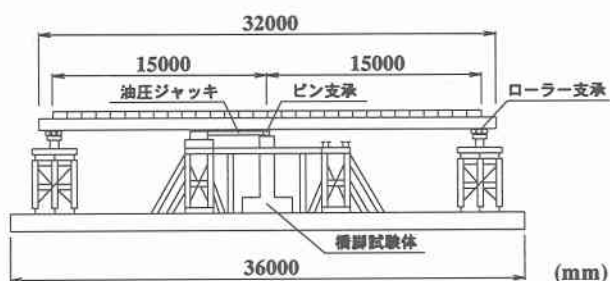
よび頭部 1 D のみにコンクリートを充填している。RC 試験体と SRC-2 試験体は、材料の規格値を用いて断面分割法によって計算した曲げ耐力が同等になるように鋼材の配置等を決めた。表－１、表－２に使用した鋼材およびコンクリートの力学的特性値を示す。なお、外面リブ付鋼管のリブ間隔は 40 mm のスパイラル状を呈し、高さは 2.5 mm、リブ天端幅は 4.0 mm である。

2.2 載荷実験の概要

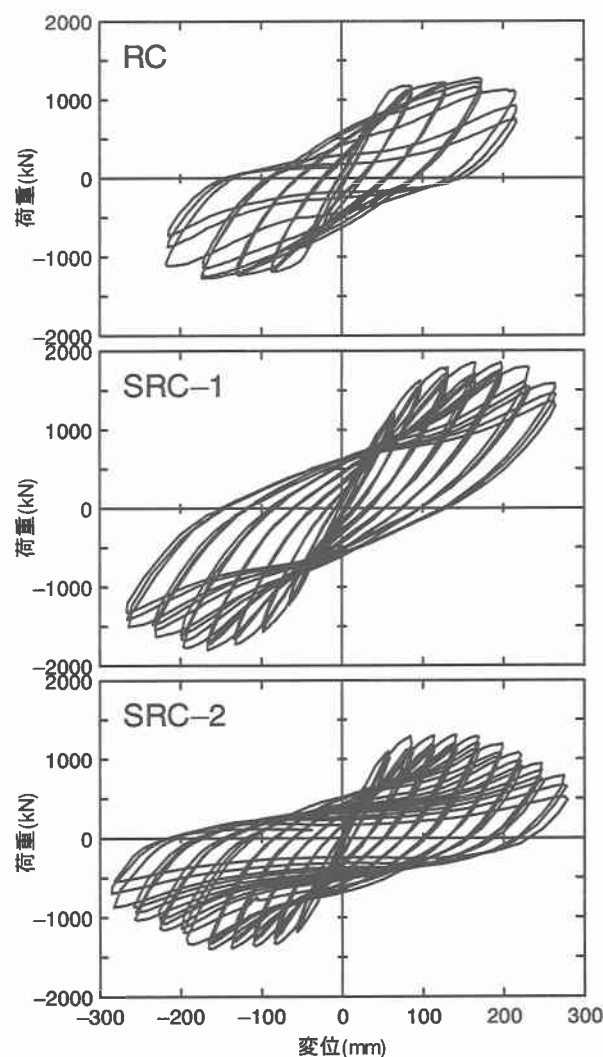
図－２に実験装置の概略図を示す。実験は、実橋と同様に橋脚への上部工の曲げ剛性による拘束効果を考慮するため、全長 32 m の実規模二径間連続桁橋橋型の中間橋脚位置に各試験体を設置して実施した。上部工は支間 30 m、総重量約 1,010 kN の鋼製桁で試験体とピン接合されている。荷重載荷は、ピン部分に油圧ジャッキを設置して行った。試験体天端からピン中心までの高さは 240 mm であり、載荷点のフーチング天端からの高さは 3,740 mm である。

本実験では、試験体に作用する上部工死荷重が約 980 kN (0.49 MPa) となるように、試験体直上部の鋼桁上に鋼板を設置して重量を調整した。載荷荷重はロードセル、各点の水平変位はワイヤ式変位計にて測定している。

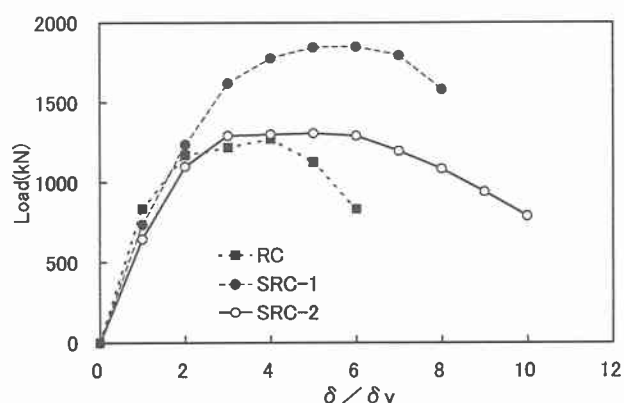
載荷は降伏時変位 δ_y の整数倍の変位 $2\delta_y$, $3\delta_y$, ... を振幅とする変位制御により、漸次変位を増加させて終局状態に達するまで 3 回ずつ繰り返し行った。SRC 試験体の降伏時変位は、軸方向鉄筋と鋼管のうちいずれかが降伏ひずみに達した時点の変位とした。



図－２ 実験装置の概略図



図－３ 荷重－変位関係



図－４ 荷重－変位関係包絡線の比較

3. 実験結果および考察

3.1 荷重－変位関係

図－３に各試験体の荷重－変位履歴曲線を示す。また、表－３に計算結果との比較を示す。計算は材料試験結果を用いて断面分割法で行った。

表－3 実験および計算結果の比較

試験体名	降伏時				終局時			
	耐力 P_y (kN)		変位 δ_y (mm)		最大耐力 P_{max} (kN)		変位 δ_{max} (mm)	
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値
RC	836.8	986.5	42.9	25.0	1241.0	1145.4	215.0	321.0
SRC-1	748.3	1181.7	32.9	36.8	1839.0	1512.2	264.0	229.6
SRC-2	644.9	920.5	27.5	23.0	1307.3	1321.2	275.4	192.3

SRC-2 試験体は 645 kN で主鉄筋が降伏し、 $3\delta_y$ でほぼ最大耐力に達した後、その耐力を保持したまま $6\delta_y$ まで変位が増加した。基部におけるかぶりコンクリートの剥離が $6\delta_y$ において始まり、その後剥離の進展と主鉄筋の破断に伴い徐々に耐力を低下させ、 $10\delta_y$ の 3 回目の載荷において降伏荷重を大きく下回ったため試験を終了した。最大荷重は $5\delta_y$ 時の 1,307 kN であった。

一方、SRC-1 試験体は 748 kN で主鉄筋が降伏し、 $3\delta_y$ でほぼ最大耐力近くまで荷重が増大し、その後 $6\delta_y$ まで最大耐力を保持した後、かぶりコンクリートの剥離と主鉄筋の破断に伴い荷重が徐々に低下した。 $9\delta_y$ の 2 回目の載荷において鋼管破断が原因と見られる荷重の急激な低下が発生したため試験を終了した。最大荷重は $5\delta_y$ 時の 1,839 kN であった。以上のように SRC-1 と SRC-2 試験体の耐荷挙動はほぼ同様であり、鋼管の強度が荷重－変位関係に与える影響は比較的小さいものと考えられる。

しかしながら、 $6\delta_y$ 以降の荷重の低下傾向は、鋼管強度の大きい SRC-1 試験体の方が顕著であり、終局変位にも若干の差異が見られることから、両試験体で鋼管とコンクリートの曲げ負担の割合が異なることなどが影響を与えているものと考えられる。

RC 試験体は 840 kN で主鉄筋が降伏し、 $2 \sim 4\delta_y$ まで徐々に荷重が増加し、 $4\delta_y$ 時において最大荷重 1,241 kN に達した。その後、主鉄筋の破断に伴う荷重の低下のため $6\delta_y$ で降伏荷重を下回り試験を終了した。

RC 試験体は SRC 試験体と比較すると、 δ_y 以降の荷重の増加が少ない。これは、RC 試験体では最外縁の主鉄筋の降伏 (δ_y 時) でほぼ最大耐力に達してしまうのに対し、SRC 試験体では、主鉄筋降伏後にさらに鋼管の外縁から徐々に降伏するためである。また、RC 試験体では主鉄筋の破断による荷重低下が SRC 試験体と比較して急激である。これも、RC 試験体の耐力のほとんどを最外縁の主鉄筋が担っていることによる。

図－4 に荷重－変位関係の包絡線を 3 つの試験体で比較した。同図は横軸を δ_y で正規化している。

図より、SRC 試験体は、RC 試験体よりも最大耐力を保持できる変位振幅が大きく、また最大耐力以降も急激な耐力低下を起こすことなく大きな塑性率を示していることが分かる。このことから、SRC 構造は RC 構造よりも耐震性に優れた構造であると言える。また、他の条件が同じであれば、鋼管の強度を上げることで耐力は向上するものの、靱性能の向上にはさして寄与しないことが分かる。

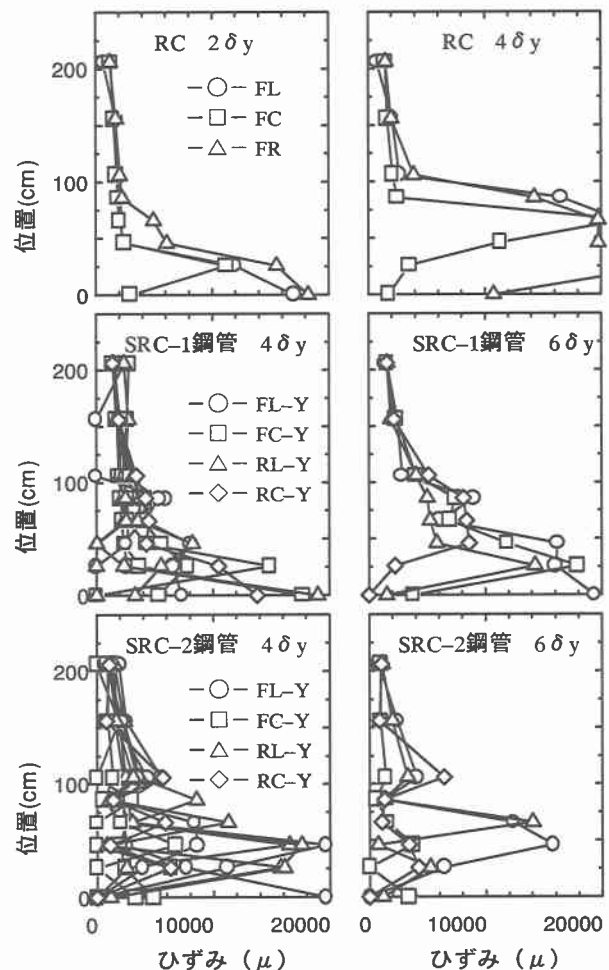
3.2 損傷領域の大きさ

壁式橋脚における SRC 構造の損傷領域(塑性ヒンジ領域)を検討するため、主鉄筋および鋼管の軸方向ひずみの

分布を整理し、図－5 に示した。RC 試験体では、正側載荷時に引張となる最外縁の主鉄筋のうち 3 本を選びデータを図化した。SRC 試験体では、鋼管両縁の引張ひずみを図化している。いずれも、 $4 \sim 6\delta_y$ 以降に測定不能となるひずみゲージが急増しているため、主鉄筋では $4\delta_y$ まで、鋼管は $6\delta_y$ までのひずみ値をプロットした。図中、リード線やゲージ本体の破断などにより測定が不能となったひずみゲージの値はゼロとしている。

RC 試験体は、 $2\delta_y$ において基部から 400 mm 程度まで、 $4\delta_y$ では基部から約 1000 mm までの主鉄筋ひずみが急増し、ひずみの不連続性が顕著になっている。これは、載荷振幅の増加に伴って損傷した領域が広がっていることを示している。

これに対し、SRC-1 試験体の鋼管ひずみは、 $4\delta_y$ において基部から 500 mm 程度まで、 $6\delta_y$ で基部から 600 mm 程度までのひずみ分布が不連続になっており、RC 試験体



図－5 鋼材の高さ方向ひずみ分布

と比較すると大きな損傷を受けた領域が小さいことが分かる。

SRC-2 試験体では、ひずみが不連続となる領域の高さは $4\delta y$ で基部から 600 mm 程度、 $6\delta y$ で基部から 800 mm 程度であり、やはり、RC 試験体と比較すると損傷領域が小さいと言える。ただし、鋼管強度の大きい SRC-1 試験体と比較すると、その領域は若干広がっており、鋼管の強度（材質）が塑性ヒンジ領域の形成に影響を与えているものと考えられる。

3.3 等価粘性減衰定数

SRC 構造のエネルギー吸収能力と減衰性を評価するため、等価粘性減衰定数を検討した。等価粘性減衰定数は、図-6 の模式図および式①によって表されるもので、減衰を伴う振動系における粘性減衰定数 h と等価に評価できる指標である。

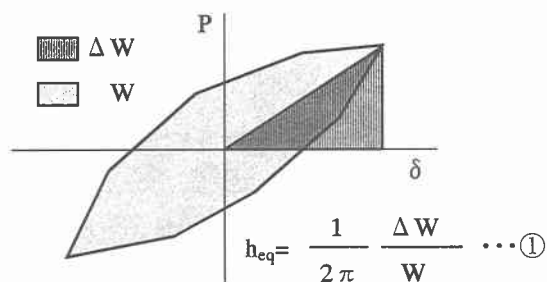


図-6 等価粘性減衰定数 h_{eq}

図-7 に各試験体の載荷振幅と等価粘性減衰定数の関係を示す。なお、同一載荷振幅で3回の繰り返し載荷を行っているので各々3点の結果を示している。RC 試験体は、載荷振幅の増加とともに比例的に h_{eq} が増加し、 $4\delta y$ で最大値 0.23 となった。SRC-1 試験体も同様の傾向を示すものの、その傾き、最大値ともに RC 試験体よりも小さく、エネルギー吸収能力が比較的小さいことを示している。これは、3.2 で示した塑性ヒンジ領域の大きさと関連付けて考えられる。すなわち、SRC 試験体の方が鋼材軸ひずみの不連続領域、すなわち損傷領域が小さく、それに使われるエネルギーも小さいため、 h_{eq} にそれが反映されていると考えられる。

一方、SRC-2 試験体の h_{eq} の増加勾配は RC 試験体よ

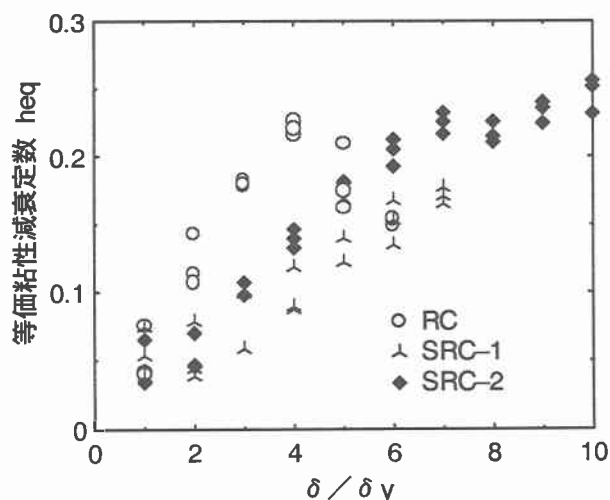


図-7 等価粘性減衰定数の比較

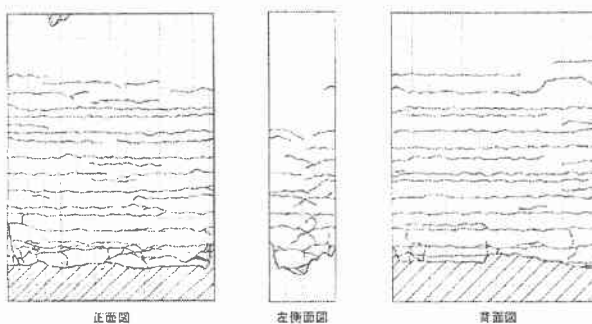


図-8 最終ひび割れ性状 (SRC-2)

りも小さいものの、SRC-1 試験体よりも大きい、また、 $10\delta y$ という大きな変形領域まで h_{eq} が増加する傾向は変わらず、その最大値も 0.26 と RC 試験体よりも大きい。なお、 h_{eq} の増加勾配は 3.2 で示した損傷領域の大きさの関係と一致している。このように通常程度の強度（規格値に近い強度）の鋼管を用いれば、合成構造特有の粘り強い特性を得ることができ、RC 試験体よりも高いエネルギー吸収、減衰性能が得られるものと考えられる。

3.4 ひび割れ性状

図-8 に SRC-2 試験体の最終ひび割れ性状を示す。その他の試験体については、文献 1) を参照されたい。

ひび割れ性状は SRC-1 試験体とほぼ同様であった。図中、斜線で示されたかぶりコンクリートの剥離領域の大きさは、3.2 で示した損傷領域の基部からの高さとはほぼ一致している。加力軸方向に複数本の鋼管が配置されている扁平比が 1 に近い橋脚の損傷領域の大きさは、RC 構造と大差がなかった²⁾ のに対し、壁式橋脚でこのような差異が生じる原因については、鋼管配置の違いによる断面内ひずみ分布性状の違いなどに起因していることも考えられる。今後、これらの検討を行ない、壁式橋脚特有の耐荷機構の解明を進めていく予定である。

4. まとめ

合成構造を適用した壁式橋脚に配置する鋼管の強度に着目して正負交番載荷実験を行った。本研究の範囲内で得られた結論は以下の通りである。

- (1) SRC 構造では、鋼管強度の小さい方が、塑性ヒンジ長、等価粘性減衰定数（エネルギー吸収能）ともに大きくなり、結果的に大きな塑性率を示した。
- (2) 壁式橋脚の場合、SRC 構造は、RC 構造と比較して塑性ヒンジ長が短くなる傾向にある。しかし、鋼管構造特有のねばり強い特性により大きな塑性率を確保できるため、RC 構造と同等以上のエネルギー吸収能力が発揮される。

参考文献

- 1) 池田等：外面リブ付き鋼管とコンクリートを合成した大型壁式橋脚模型の載荷実験，コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 24, No.2, pp.1591-1596, 2002.6
- 2) 跡部等：プレキャストセグメントと鋼管からなる合成構造橋脚の力学特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.6, No.2, pp.107-116, 1995.7