

# 論文 外面リブ付鋼管・コンクリート合成構造はりのせん断耐力について

篠崎裕生\*1, 田村多佳志\*2, 岡本隆\*3, 水谷慎吾\*4

**要旨:** 複数本の外面リブ付鋼管をコンクリート断面内部に埋込んだ合成構造はりの 3 次元 FEM 解析により, 鋼管が負担するせん断力について検討した。解析結果は合成構造はりのせん断実験結果とよく一致しており, ①鋼管の負担せん断力は, はりに作用するせん断力に対して 40~80%と大きな割合を占めること, ②鋼管のせん断力負担は, 加力開始直後から直線的に増加し始めることから, そのせん断耐荷機構は帯鉄筋などとは異なっていること, ③鋼管の負担せん断力は鋼管の曲げ負担からある程度予測できること, などが明らかとなった。

**キーワード:** 合成構造, 外面リブ付鋼管, せん断耐力, 有限要素法解析

## 1. はじめに

高橋脚の省力化施工法として, 複数本の外面リブ付鋼管を橋脚コンクリート断面内部に埋込み, 合成構造とする工法を開発してきた<sup>1)2)</sup>。本合成構造の力学特性については, 柱模型試験体への交番載荷実験の結果により, RC 構造に比べて, 大きな塑性率まで最大耐力を保持し, 優れたじん性を発揮することを確認している<sup>1)</sup>。

本構造が優れた変形性能を発揮する理由としては, 外面リブによって鋼管とコンクリートとの一体化が大変形時まで保持されること, および鋼管がそれ自体でせん断力を負担することにより, 部材のせん断耐力が向上していることが考えられる。しかしながら, 鋼管あるいは H 形鋼などの鋼材と, 鉄筋コンクリートとの合成構造において, 鋼管あるいは鋼材がどれだけのせん断力を負担しているかを明らかにした研究はまだ少ない。

本文では, 本合成構造はりのせん断実験およびその 3 次元 FEM 解析により, 鋼管が負担するせん断力について検討した。検討の結果, 加力

時に鋼管に発生するせん断応力の分布や, はりの作用せん断力に対する鋼管のせん断負担比率などを解析的に明らかにすることができた。

また, 鋼管の負担せん断力の大きさを鋼管の曲げ負担から予測することを試みた結果, 両者は比較的良く一致し, 本構造における鋼管のせん断力負担あるいはせん断耐力を評価する一手法としての可能性を示した。

## 2. 実験の概要

### 2.1 試験体形状

図-1 に試験体形状を示す。試験体は加力方向に鋼管を 1 本配置した I シリーズ<sup>3)</sup>および 2 本配置した II シリーズ<sup>4)</sup>とした。解析結果との比較のため, ここでは, コンクリート内に帯鉄筋のみを配置した I-SC, II-SC 試験体と, 軸方向鉄筋も配置した I-SRC, II-SRC 試験体の計 4 体とした。

外面リブ付鋼管は, シームレスの厚板鋼管から所定の板厚およびリブ形状 (高さ 2.5mm, 幅 4.0mm の帯状の外面突起で 40mm ピッチのスパ

\*1 三井建設(株)技術研究所土木構造グループ主任研究員 (正会員)

\*2 三井建設(株)土木本部土木設計部 工修

\*3 日本鋼管(株)基盤技術研究所都市工学研究部部長 工博

\*4 日本鋼管(株)基盤技術研究所都市工学研究部 工修

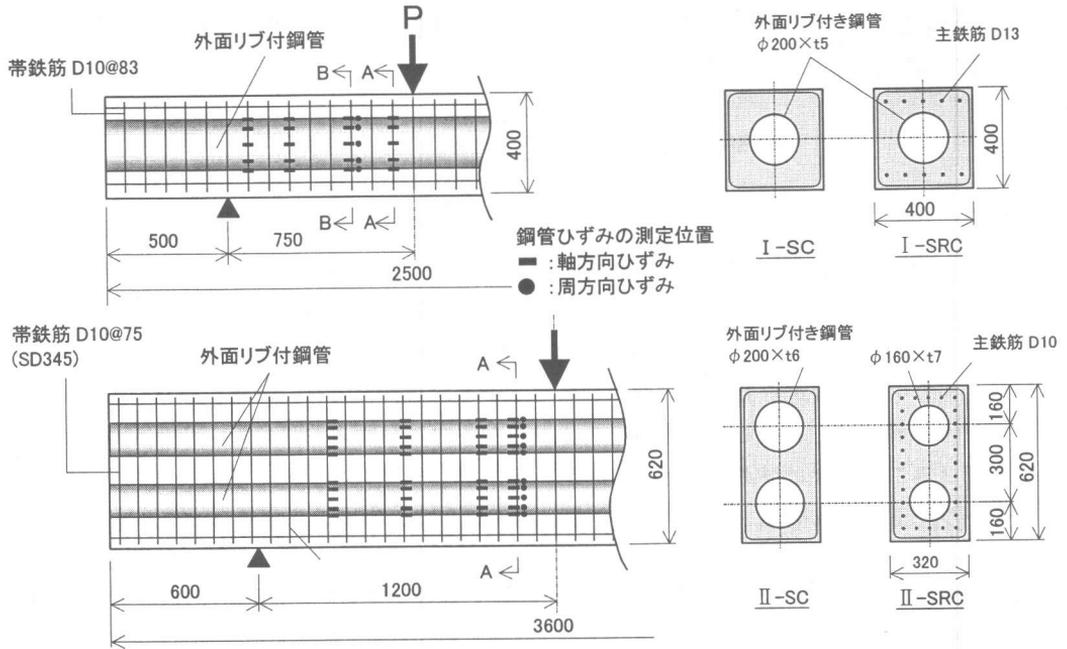


図-1 試験体形状

イラル形状)に削り出したものを使用した。使用材料の力学特性値を表-1、表-2、表-3に示す。

本実験におけるせん断支間桁高比はIシリーズで1.88、IIシリーズで1.94であり、鋼管のせん断負担を考慮しない場合には、I-SC試験体以外は計算上せん断破壊する(後述の表-4参照)。

表-1 鋼管の力学的特性

鋼管	φ 200t6	φ 200t5	φ 160t7
弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	206	206	206
降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	272	301	269
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	457	430	461

表-2 鉄筋の力学的特性

鉄筋	D10	D10*	D13
弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	206	206	206
降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	343	393	343
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	529	575	532

\*はSD345(IIシリーズ帯鉄筋), 他はSD295

表-3 コンクリートの力学的特性

コンクリート	I-SC, I-SRC	II-SC, II-SRC
弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	25.9	28.7
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	32.8	38.5
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	2.51	2.88

## 2.2 加力方法および計測項目

加力は、はり支間中央に対して一方向の静的単調載荷とした。

実験では、はりの変位と鋼管の軸方向および周方向のひずみ、帯鉄筋および軸方向鉄筋のひずみを計測した。

## 3. 解析の概要

### 3.1 解析方法

解析では、鋼管の応力状態を詳細に検討するため3次元モデルとした。また、モデル化においては、試験体の対称性から図-2に示すようにはりの1/4をモデル化した。

解析には、鋼材およびコンクリートの材料非線形性を考慮できる汎用のFEMプログラム(DIANA)を用い、鋼管はシェル要素、コンクリートは6面体ソリッド要素、鉄筋は埋込み鉄筋要素(コンクリート要素と完全付着している)でモデル化した。

鋼管とコンクリートの付着特性については、鋼管にコンクリートとの付着に優れた外面リブを採用しており、両者の一体化が終局時まで良

好に保持されるという実験結果<sup>4)</sup>が得られていることから完全付着を仮定した。

### 3.2 材料モデル

コンクリートの圧縮側については、Drucker-Plager の降伏基準による塑性モデルとした。引張側については、ひび割れを考慮した分布ひび割れモデルとし、ひび割れ後の引張硬化については、コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係をモデル化した方法<sup>5)</sup>を用いた。しかし、これは、主鉄筋を有する I-SRC, II-SRC の場合で、SC タイプの試験体では、鋼管を被覆するコンクリートははり軸方向においては無筋と考えられ、試験体が曲げで破壊していることも考慮し、ひび割れ発生後はコンクリートの引張応力が直線的に低下するモデルを採用した。引張硬化モデルをまとめて図-3 に示す。

鋼管および鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニア型の非線形モデルを用いた。

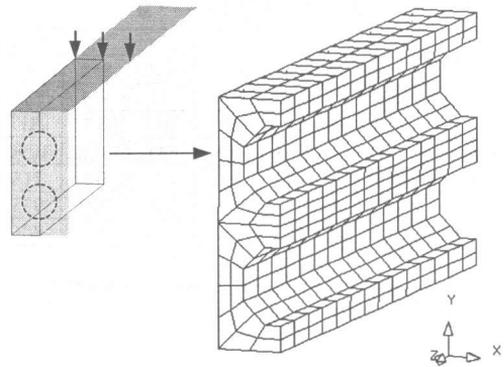


図-2 要素分割図

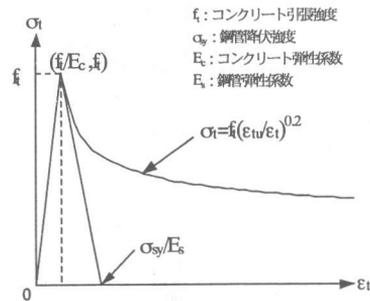


図-3 引張硬化モデル

## 4. 実験および解析結果

### 4.1 荷重-変位関係

図-4 に両シリーズの荷重-変位関係の実験値と解析値を示す。また、図-5 に試験体の最終のひび割れ状況を示す。

実験では両シリーズのいずれの試験体とも、載荷点近傍のコンクリートが圧壊して曲げ破壊した。ひび割れは、鋼管降伏荷重付近で、鉛直ひび割れが斜め方向のひびわれへ進展したが、荷重の増加によっても斜めひびわれは発達しなかった。

解析値は、塑性変形が大きくなる領域では収束不能となったが、最大荷重付近までは、比較的良い精度で実験値と一致した。

### 4.2 耐力の比較

表-4 に実験結果の一覧を示す。表中の計算値は、鋼管を鉄筋に換算して、コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>に準じて断面分割法で材料実験値を用いて算定した。なお、せん断耐力の計算値は鋼管のせん断負担を考慮していない。

I, II シリーズとも、試験体の最大荷重は、

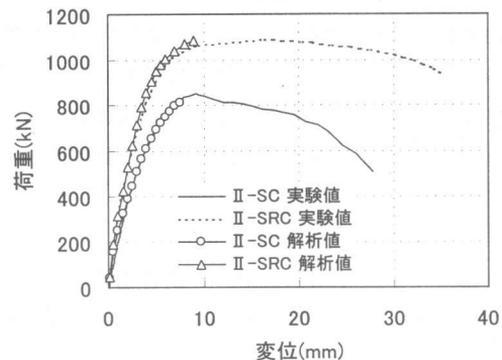
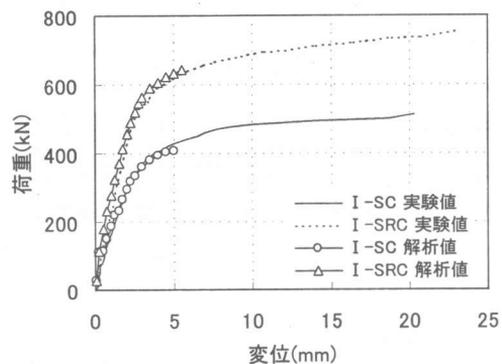


図-4 荷重-変位関係

表-4 実験結果一覧

項目(kN)		I-SC	I-SRC	II-SC	II-SRC
実験値	最大荷重	491	752	850	1092
	鋼管降伏荷重	304	441	511	736
	破壊形式	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ
FEM 解析値	最大耐力	406	641	812	1090
	鋼管降伏荷重	263	490	508	713
RC 計算値	曲げ耐力	366	535	779	935
	せん断耐力	412	466	758	806

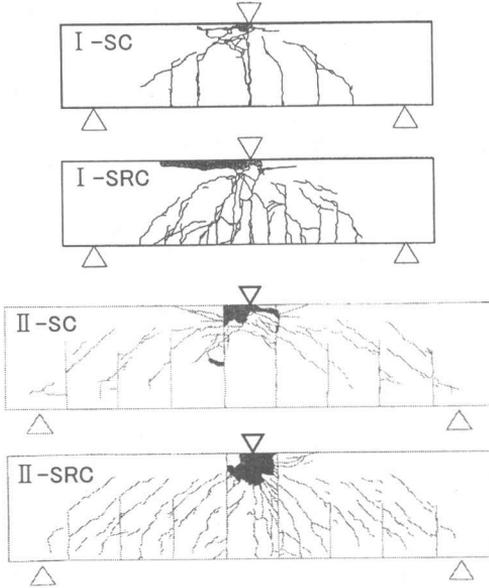


図-5 最終ひびわれ状況

鋼管のせん断負担を考慮していないせん断耐力の計算値を上回り、曲げ耐力の計算値に近い。これは、鋼管のせん断負担によって合成構造はりのせん断耐力が増大し、曲げ破壊したものと考えられる。

#### 4.3 鋼管のひずみ

図-6に、I-SC試験体の、B断面(図-1参照)における鋼管の軸方向および周方向ひずみ(図中の上中下の3箇所)を解析値とともに示した。図より、実験値と解析値は比較的良く一致しており、載荷時の鋼管の応力状態を良く再現できていると考えられる。

#### 4.4 鋼管のせん断応力分布

図-7に、I-SC試験体の鋼管初降伏時および最大荷重時の鋼管のせん断応力分布解析値を示す。

初降伏時における鋼管のせん断応力は、加力

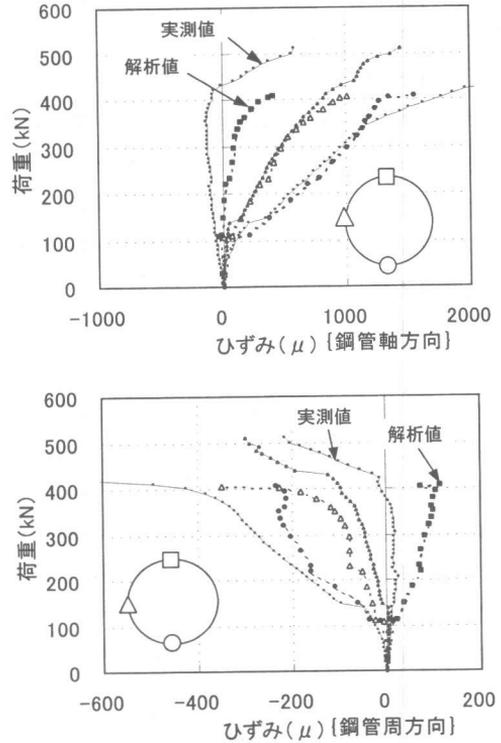


図-6 鋼管ひずみの実験値と解析値の比較

点断面近くの、鉛直方向中央付近に多く発生している、すなわち、鋼管のウェブ位置で多くのせん断力を負担していることが分かる。一方、最大荷重時には、加力点断面近くでは鋼管の上側のせん断応力分布が大きくなり、加力点から離れるにしたがってウェブ付近の分布が大きくなる傾向が見られた。また、初降伏時と比較し

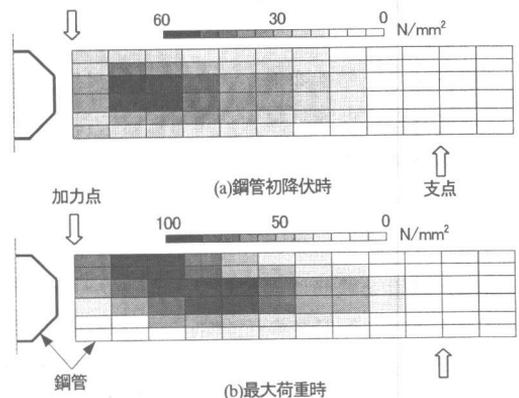


図-7 せん断応力分布(I-SC)

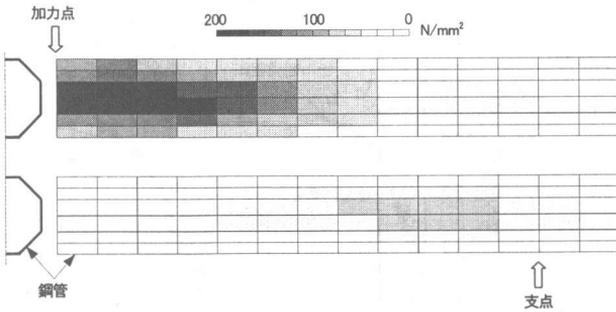


図-8 鋼管のせん断応力分布(II-SC)

て、せん断応力分布の大きい領域が支点断面付近へ向かって拡大していることが分かる。

図-8には、II-SC 試験体鋼管の最大荷重時のせん断応力分布解析値を示した。

図より、鋼管を加力方向に2本配置している場合には、上の鋼管の加力点断面付近のウェブ位置でのせん断応力分布が大きくなり、同断面では、下の鋼管にはせん断応力があまり発生していないことが分かる。また、全体的に見て、加力点と支点を結んだ線上において、比較的大

きなせん断応力分布を示すことが分かった。

図-7、図-8より、鋼管のせん断応力は、荷重の大きさにより、その分布が変化すること、また、その分布は荷重点付近において、はり軸方向の圧縮力が卓越するような領域に近い位置で大きくなることが分かった。

#### 4.5 鋼管のせん断力負担

図-9に、各試験体の作用せん断力とそれに占める鋼管のせん断力負担の解析値を示した。鋼管のせん断力負担は図-1中のA断面において鋼管を構成する要素の断面積とせん断応力の積の和として計算した。また、IIシリーズについては、上下鋼管のそれぞれの負担分とその合計を示した。

各試験体とも、鋼管の負担せん断力は荷重直後から作用せん断力の増加とともに大きくなっており、その作用せん断力に対する割合も20～

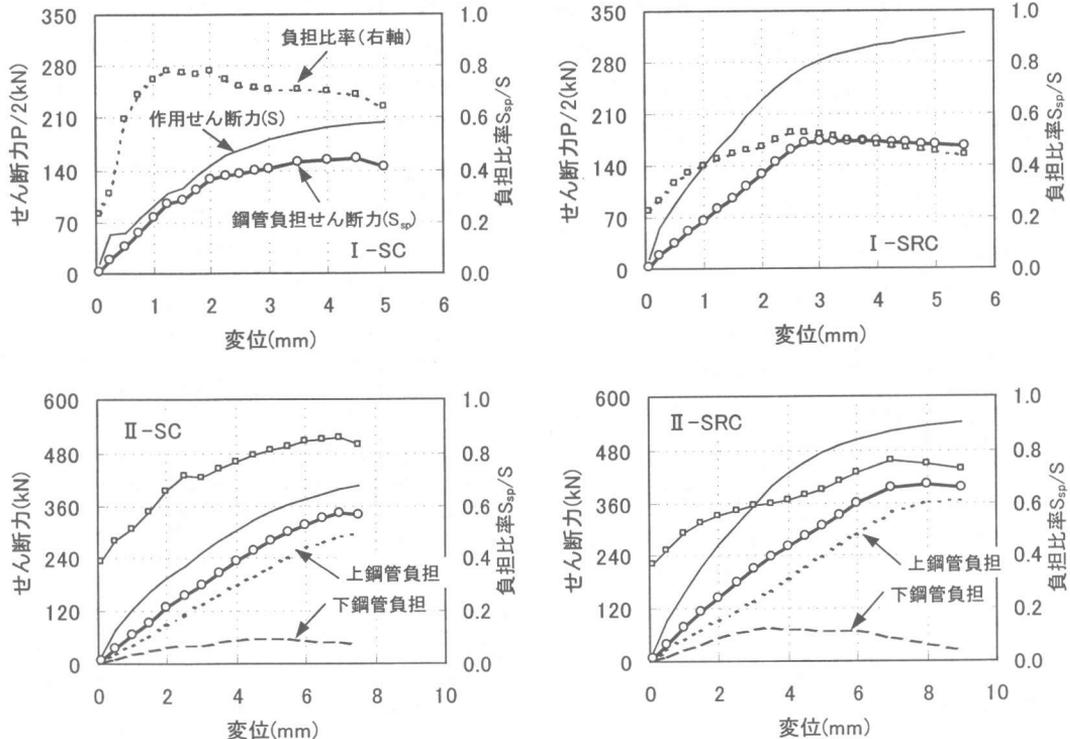


図-9 鋼管のせん断力負担

40%程度から 40~80%程度までに徐々に増加している。また、主鉄筋を有しない SC 構造の方が鋼管の負担割合が大きくなる傾向が見られる。

II シリーズにおいては、4.4 で示したように、下鋼管のせん断負担が頭打ちになるのに対し、上鋼管がかなり大きなせん断力を負担していることが分かる。

以上のように、鋼管をはり断面に配置した場合、せん断力のかなりの部分を鋼管が負担し、また、そのせん断抵抗機構は、帯鉄筋のようにコンクリートに斜めひび割れが発生した後、効果が発揮されるというのではなく、載荷直後からコンクリートと一体となってせん断力に抵抗しているものと考えられる。

#### 4.6 鋼管のせん断力負担の評価

本構造のせん断設計および耐力評価の際に、鋼管のせん断負担を考慮できれば鋼材量の削減などによる経済性の向上が期待できる。

鋼管のせん断負担を簡易に算定する方法として、建築の被覆形鋼管コンクリート構造において、鋼管の曲げ耐力（全塑性モーメント）を載荷スパンで割ることにより算定する方法がある<sup>7)</sup>。これを参考に、鋼管の軸方向応力から求めた曲げモーメントをスパン長（支点から着目断面までの距離）で除した負担せん断力を算出し、4.5 において鋼管のせん断力から直接求めたせん断負担と比較した（図-10）。

図中のせん断負担 A はせん断応力から求めたもの、せん断負担 B は鋼管軸方向応力（曲げモーメント）から求めたものである。また、せん断負担 B-Exp は鋼管ひずみの実測値から求めた実験値である（以下簡単に A, B と呼ぶ）。

図より、荷重の増加に伴って、A の方が大きくなる傾向が見られるが、鋼管降伏までは A と B は比較的良好に一致していることから、B によって鋼管のせん断負担を簡易に、かつ安全側に評価できることが分かる。

#### 5. まとめ

外面リブ付き鋼管・コンクリート合成構造はり試験体の載荷試験および3次元FEM解析を行

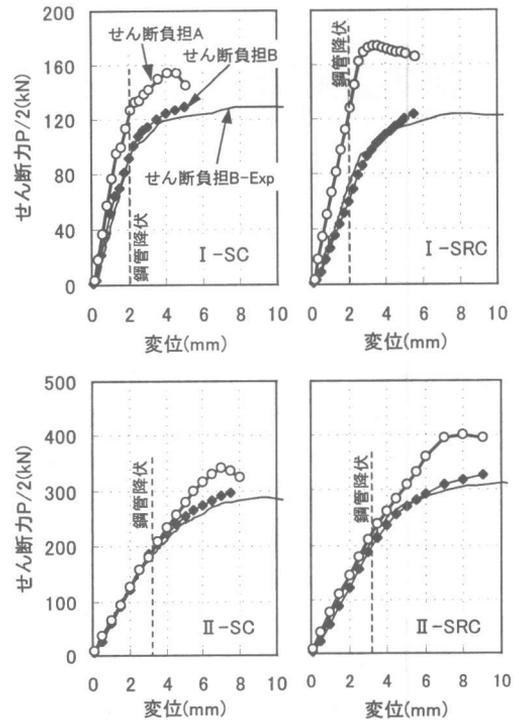


図-10 鋼管せん断負担の比較

い以下のことが明らかとなった。

- (1) はりに作用するせん断力に対して、鋼管は最大で 40~80% のせん断力を負担している。
- (2) 鋼管のせん断力負担は、加力開始直後から直線的に増加し始めることから、そのせん断耐力機構は帯鉄筋などとは異なっている。
- (3) 鋼管のせん断負担は、鋼管の曲げ負担で簡易に、かつ安全側に評価できる。

#### 参考文献

- 1) 跡部, 田村, 岡本, 水谷: 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, コンクリート工学論文集, 第6巻, 第2号, pp.107-116, 1995.7
- 2) 福本, 川端, 久, 田村, 篠崎: 鋼管・コンクリート合成構造橋脚 (ML工法) の設計と施工-本州四国連絡橋下田水高架橋 SP2 橋脚-, 橋梁と基礎, pp.10-15, 1999.3
- 3) 篠崎, 三上, 加島, 跡部, 田村: リブ付き鋼管とコンクリート合成構造梁の力学特性, 三井建設技術研究報告, 第20号, 1995
- 4) 田村, 篠崎, 三上, 山田, 岡本, 水谷: 外面リブ付き鋼管・コンクリート合成構造の耐力に関する一考察, 第4回復合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.93-98, 1999.11
- 5) 岡村 甫, 前川 宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書設計編, 1996
- 7) 日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算標準・同解説, 1987