

論文 鋼管・コンクリート複合構造のせん断耐力にコンクリート強度が及ぼす影響

田中 浩一^{*1}

要旨：鋼管・コンクリート複合構造のせん断耐力評価式の立案に向け，著者らは模型実験や数値実験を行ってきた。しかしながら，せん断耐力評価式の提案時では，コンクリートの強度を一律 30N/mm^2 としていた。そこで，コンクリートの圧縮強度を高めることでせん断圧縮破壊が遅れ，鋼管をさらに有効利用できないかと考えた。本研究では，本構造のせん断耐力にコンクリートの圧縮強度が及ぼす影響を確認するため，非線形 FEM でパラメトリックスタディを行った。その結果，コンクリートが高強度化するとせん断耐力は上昇するものの，鋼管や PC 鋼より線の寄与は少なく，コンクリートの負担のみが増加することが分かった。
 キーワード：複合構造，鋼管，せん断，PC 鋼より線，高橋脚，非線形解析

1. はじめに

断面内に複数本の鋼管を有する鋼管・コンクリート複合構造は，高橋脚の急速施工性という利点からこれまで多数の実績がある。本構造のせん断耐力評価式を立案するため，著者らは模型実験¹⁾や数値実験²⁾を行ない，コンクリート，鋼管および PC 鋼より線のせん断負担を各々累加するせん断耐力式を提案した。提案時点では本構造が山岳部に採用されること，また場所打ちであることなどから，コンクリートの強度を一律 30N/mm^2 と予測して実験等を行ってきた。しかしながら，本構造のせん断耐力はせん断圧縮破壊で決定されるため，設計における鋼管のせん断負担は純せん断強度と比べて余裕がある。これを改善する一手法としてコンクリート圧縮強度を高め，せん断圧縮破壊を遅らせて鋼管に作用するせん断応力を高める方法が考えられる。繊維補強されたコンクリートは強度 200N/mm^2 級があるが，ここでは繊維等を混入しない高強度コンクリート程度の範囲で本構造のせん断耐力に及ぼすコンクリート強度の影響を，非線形 FEM によるパラメトリックスタディで検討する。

2. 解析方法

2.1 解析モデル

(1) モデル化の概要

鋼管の配列は 2×3 本の 1 種類とし，図-1 に示すような 2 次元にモデル化した。コンクリートを四辺形要素に，また主鉄筋，PC 鋼より線はトラス要素に置き換えた。鋼管は $0-45^\circ$ および $135-180^\circ$ のフランジ部分をトラス要素で， $45-135^\circ$ のウェブ部分を四辺形要素に置き換えた。コンクリート～鋼管間には接触要素を設け，鋼管のすべりや接触方向の特性を模擬した。

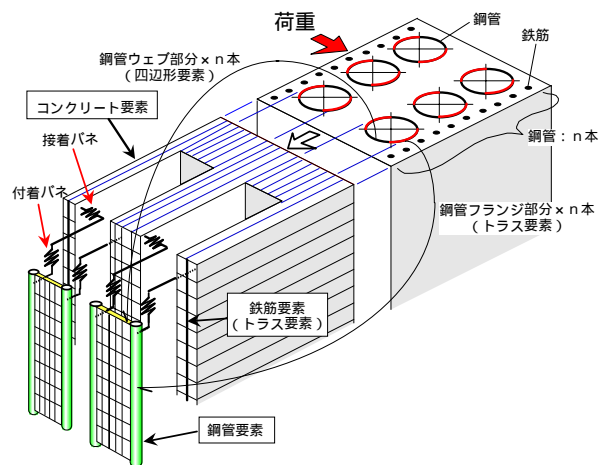


図-1 モデル化の概要

*1 (株)大林組 技術研究所 土木構造研究室 副主査 工修 (正会員)

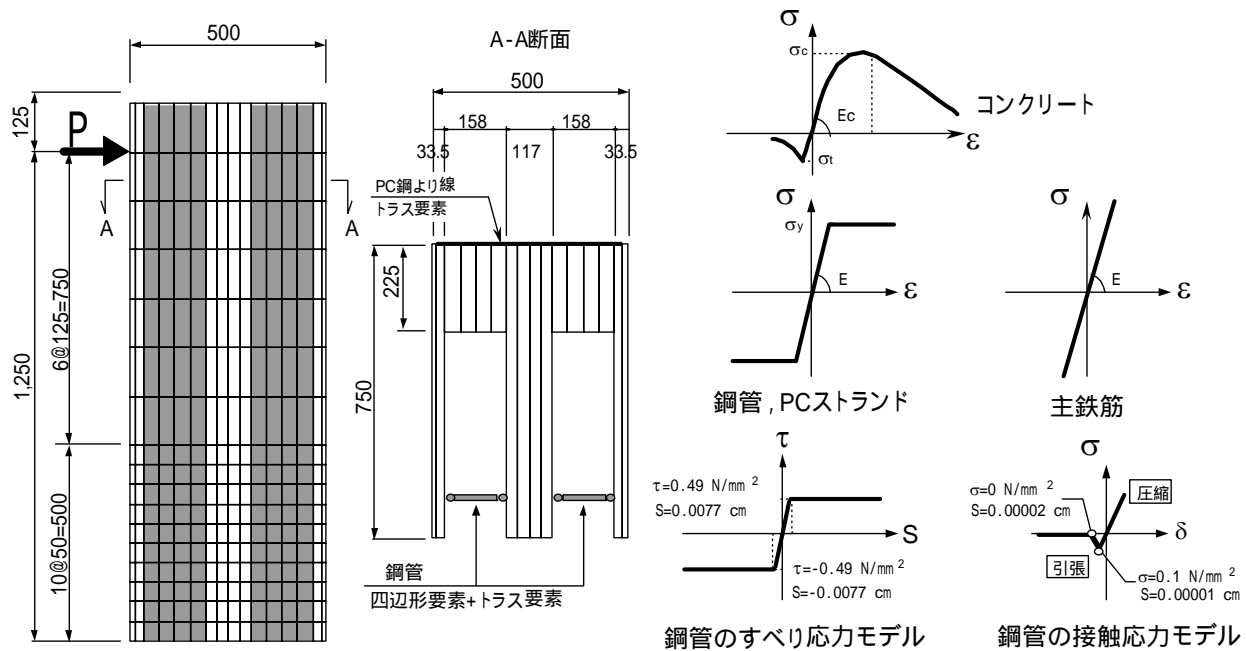


図 - 2 解析モデル

なお、コンクリートの強度が 30N/mm^2 のとき本モデルは実験値を精度良く評価していた²⁾。

(2) 解析モデル

解析モデルを図-2 に示す。断面およびせん断スパンはせん断実験の試験体²⁾と同寸法である。コンクリート要素厚さは、鋼管配置位置では有効幅 B_e ($B_e = B - n'$, B : 柱断面幅, n' : 加力直角方向に配置された鋼管本数, $' = (1/4$ ²⁾,

: 鋼管外径), それ以外は全幅とした。鋼管のトラス要素と四辺形要素の断面積と断面二次モーメントは、次の通りとした。

$$A_{\text{truss}} = 1/4 \Sigma A_T \quad (1)$$

$$A_{\text{quad}} = 1/2 \Sigma A_T \quad (2)$$

$$I_{\text{quad}} + 2 \cdot A_{\text{truss}} \cdot y^2 = \Sigma I_T \quad (3)$$

ここに、

- A_{truss} : フランジ部分トラス要素の断面積
- A_{quad} : ウェブ部分四辺形要素の断面積
- ΣA_T : 鋼管 1 列分の断面積の総和
- I_{quad} : ウェブ部分四辺形要素のウェブ中心周りの断面二次モーメント
- y : ウェブ中心からフランジ部トラス要素までの距離
- ΣI_T : 鋼管 1 列分のウェブ中心周り断面二次モーメントの総和

表 - 1 鋼材の特性値

	弾性係数 : E ($\times 10^5 \text{N/mm}^2$)	降伏強度 : σ_y ($\times \text{N/mm}^2$)	ポアソン比
主鉄筋	1.96	弾性	-
PC鋼より線	2.16	1765	-
鋼管	1.96	294	0.3

鋼管フランジ部トラス要素とコンクリート要素間の接合要素には文献²⁾の付着試験より得た付着強度 $=0.49\text{N/mm}^2$ を用いたバイリニア -Sモデルをもとに、鋼管半周分の付着面積を考慮し与えた。一度付着が切れた繰返し応力状態では機械的摩擦のみが生じ、それはコンクリートの強度が異なっても大きく違わないと判断し、一律の付着強度とした。また同部の水平方向には剥離接着を考慮した接合要素を設けた。

主鉄筋はせん断耐力確認のため弾性と仮定した。鋼管フランジ部および PC 鋼より線にはバイリニア型の 1 軸繰返しモデルを用いたが、2 軸状態にある鋼管ウェブ部分はこれを相当応力・ひずみ関係とした 2 軸弾塑性理論に従うものとした。なお、それぞれの材料特性を表-1 に示す。

2.2 パラメータ

解析ケースを表-2 に示す。パラメータであるコンクリートの強度は 30, 60, 80 N/mm^2 とした。

表 - 2 解析ケース

等価帯筋量 p_w^{eq} (%)	鋼管量: p_T (%)								
	0.5			1.0			2.0		
0.65	-	-	-	30	60	80	-	-	-
0.20	30	60	80	30	60	80	30	60	80
0.40	-	-	-	30	60	80	-	-	-
0.60	-	-	-	30	60	80	-	-	-

表中の値はコンクリート強度を示す

表 - 3 コンクリートの材料特性

圧縮強度 c (N/mm ²)	引張強度 t (N/mm ²)	弾性係数 E_c (kN/mm ²)
30	2.2	28
60	3.5	35
80	4.3	38

コンクリートの応力 - ひずみモデルは、強度が 30 N/mm² では圧縮側の最大応力までを Saenz モデル³⁾ 軟化域を Dawin-Pecknold モデル⁴⁾とした。一方、コンクリート強度が 60 ~ 80 N/mm² では圧縮側の最大応力までを Fafitis-Shah モデル⁵⁾、軟化域を修正 Ahmad モデル⁶⁾とした。引張側軟化域はいずれのコンクリート強度も出雲モデル⁷⁾とした。繰り返し特性は、それぞれ包絡曲線とする繰返しモデル⁸⁾とした。

その他のパラメータとして、鋼管量 (p_T) を 0.5 ~ 2.0% とした。ここに鋼管量とは、鋼管の断面積の総和 (ΣA_T) を柱の全断面 ($= B \cdot D, B=750, D=500$) で除した値である。また等価帯筋量 (p_w^{eq}) を 0.065 ~ 0.6% とした。この等価帯筋量とは、帯鉄筋として用いている PC 鋼より線の量を SD345 の帯鉄筋相当に強度換算した値である。強度比は 1765/345 = 5.0 なので、等価帯筋量は以下ようになる。

$$p_w^{eq} = 5 \times A_{pc} / (B \cdot a) \quad (4)$$

ここに、

p_w^{eq} : 等価帯筋量

A_{pc} : 巻付け間隔 a 中の PC 鋼より線総断面積

B : 柱幅

a : PC 鋼より線の巻付け間隔

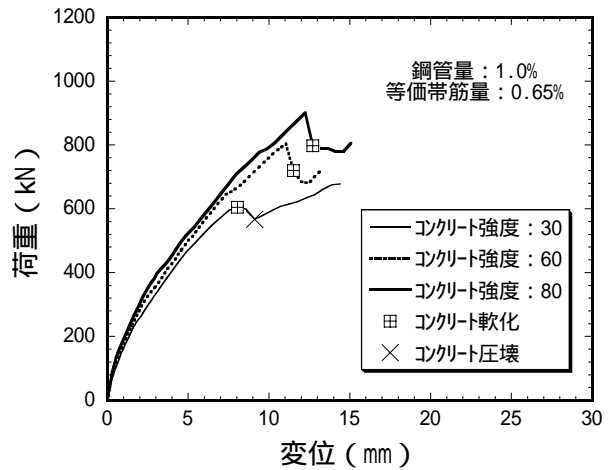


図 - 3 荷重-変位関係 ($p_w^{eq}=0.065\%$)

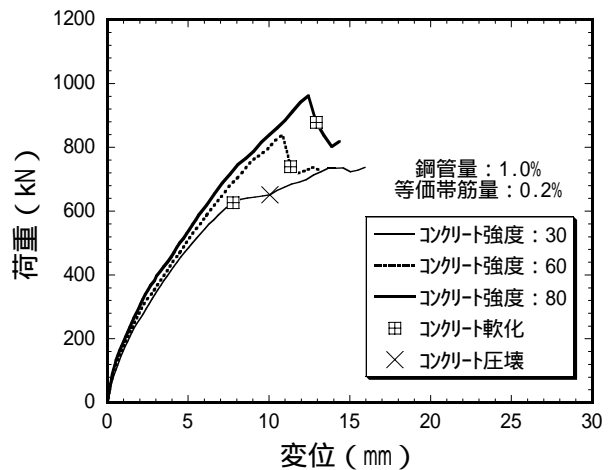


図 - 4 荷重-変位関係 ($p_w^{eq}=0.2\%$)

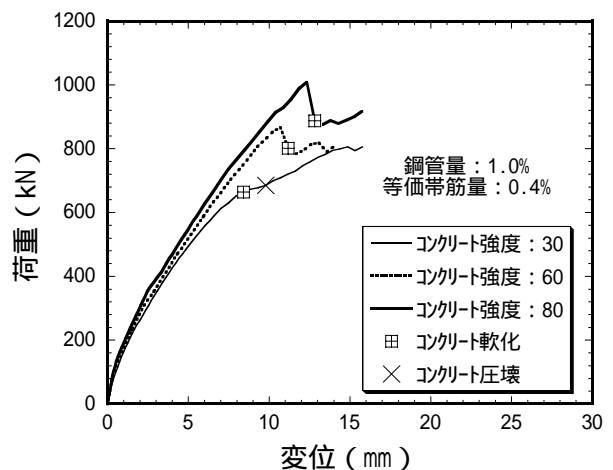


図 - 5 荷重-変位関係 ($p_w^{eq}=0.4\%$)

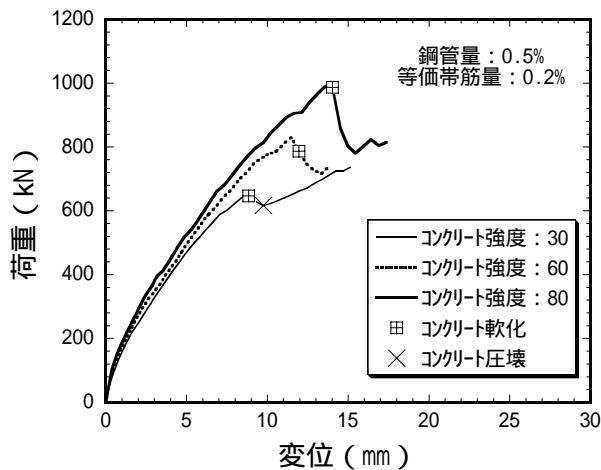


図 - 6 荷重-変位関係 ($p_r=0.5\%$)

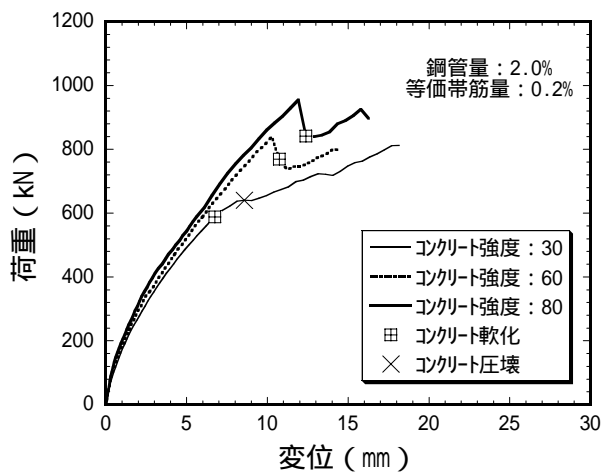


図 - 7 荷重-変位関係 ($p_r=2.0\%$)

3. 解析結果

3.1 荷重 変位関係

(1) コンクリート強度の影響

荷重 変位関係を図-3～図-7 に示す。いずれの場合もコンクリートの圧縮強度が大きくなるとせん断耐力は上昇し、コンクリート圧縮強度が 30N/mm^2 と 80N/mm^2 では最大で約 30% 大きい。

(2) 破壊過程

コンクリートの圧縮強度が 30N/mm^2 のときには明確な荷重ピークがなく、コンクリートの最大応力時ひずみを超え（コンクリート軟化）、その後、柱基部が圧縮応力軟化域を越えて圧壊するものの、耐力はわずかに上昇する。一方、コンクリート強度が $60, 80\text{N/mm}^2$ と大きくなるとコンクリートが軟化開始する直前にピークを迎え、ピーク後は大きく耐力が低下するとともに、

表 - 4 せん断耐力の解析結果

等価帯筋量 p_w^{eq} (%)	鋼管量: p_r (%)								
	0.5			1.0			2.0		
	コンクリート圧縮強度			コンクリート圧縮強度			コンクリート圧縮強度		
	30	60	80	30	60	80	30	60	80
0.065	-	-	-	678	804	901	-	-	-
0.20	737	830	989	737	822	961	812	840	955
0.40	-	-	-	806	867	1009	-	-	-
0.60	-	-	-	810	888	1031	-	-	-

下段の値はコンクリート強度 30N/mm^2 の場合に対する比

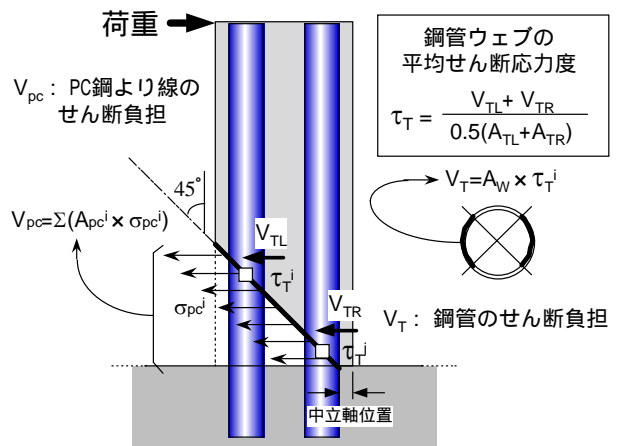


図 - 8 仮想ひび割れ面

耐力の上昇がない。

3.2 せん断耐力に影響を及ぼす要因

(1) 帯筋量の影響

表-4 に各解析ケースにおけるせん断耐力の計算値を示す。PC 鋼より線の量（等価帯筋量）がせん断耐力に及ぼす影響は、文献 2) に記したようにコンクリートの圧縮強度が 30N/mm^2 の場合、等価帯筋量が 0.4% まではせん断耐力も上昇する。一方、コンクリート強度が $60, 80\text{N/mm}^2$ と大きくなると等価帯筋量の増加によるせん断耐力の増加が顕著ではない。図-8 に示す仮想のひび割れ面を横切る PC 鋼より線の張力を積分した PC 鋼より線のせん断力の負担分 (V_{pc}) と等価帯筋量との関係を図-9 に示す。コンクリート強度が 80N/mm^2 の場合 PC 鋼より線のせん断力負担分はコンクリート強度 30N/mm^2 の場合と比べ半分以下となる。図中には参考に等価帯筋量に降伏強度を乗じた値 ($p_w \cdot \sigma_y$) も示す。

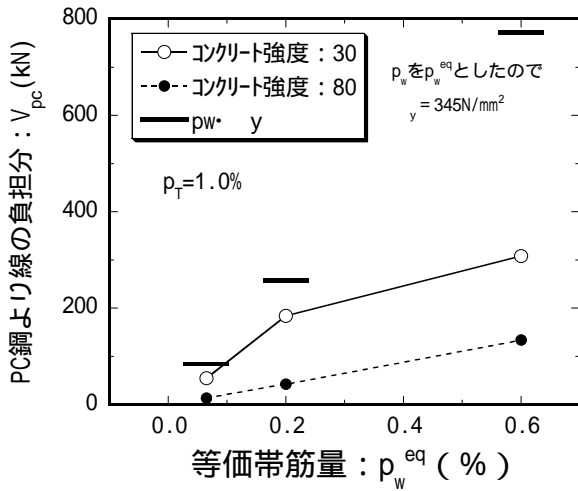


図 - 9 PC 鋼より線のせん断負担分

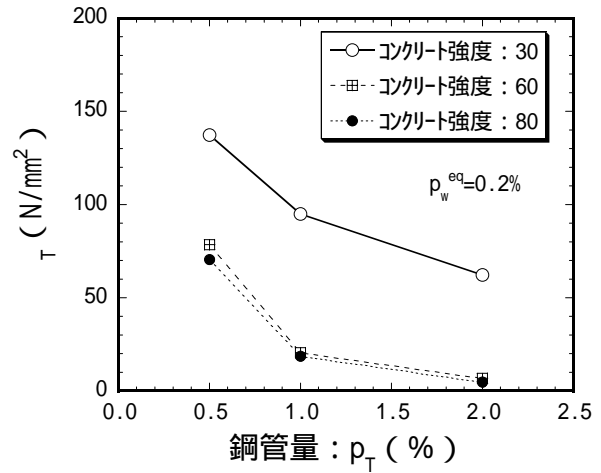


図 - 10 せん断耐力時の鋼管の平均せん断応力

(2) 鋼管量の影響

コンクリートの強度にかかわらず、鋼管量がせん断耐力に及ぼす影響は小さい(表-4 参照)。一方、図-8 の仮想ひび割れ面を横切る鋼管のせん断力の負担 (V_T) は、図-10 に示すようにコンクリートの圧縮強度が大きいとピーク時(せん断耐力時)の鋼管に発生するせん断応力は小さくなる。

3.3 せん断力の負担メカニズム

(1) せん断力の負担の内訳

図-8 に示す仮想のひび割れ面におけるコンクリート、PC 鋼より線および鋼管のせん断力負担 (V_{pc} , V_T) の内訳を図-11, 図-12 に示す。コンクリートの圧縮強度が 30N/mm^2 の場合、柱基部のコンクリート軟化開始点から V_{pc} が増加し、その後、最大耐力近傍で V_T が急増する。これに対し、コンクリートの強度が 80N/mm^2 ではせん断耐力時まで V_{pc} と V_T は、圧縮強度が 30N/mm^2 の場合と比べ小さい。これはコンクリート強度が増加したことにより、作用するせん断力の大部分をコンクリートで負担したためである。せん断耐力以後は V_{pc} ならびに V_T が増加し、各々の負担もコンクリートの圧縮強度が 30N/mm^2 の場合と同等となる。

(2) 鋼管のせん断応力度分布

コンクリート圧縮強度が $30, 80\text{N/mm}^2$ の場合における鋼管のせん断応力度分布を、それぞれ

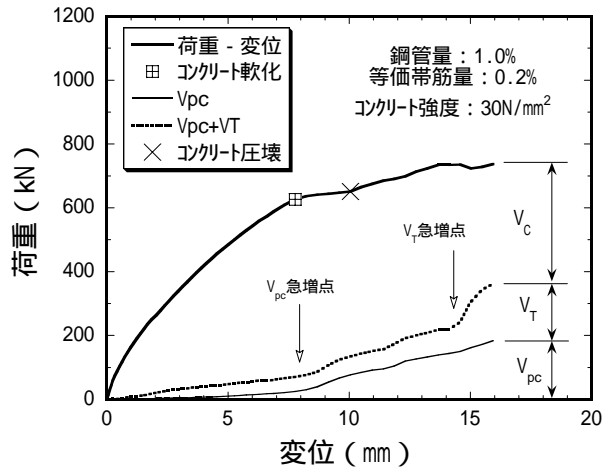


図 - 11 せん断力の負担の内訳 ($\sigma_c = 30\text{N/mm}^2$)

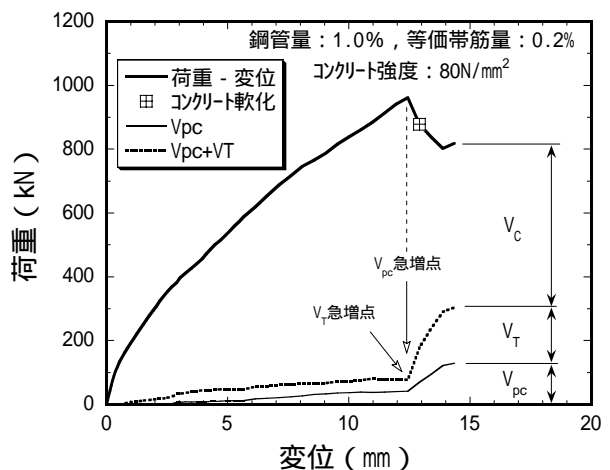


図 - 12 せん断力の負担の内訳 ($\sigma_c = 80\text{N/mm}^2$)

図-13, 図-14 に示す。図は V_T 急増開始点と解析終了点の分布を示し、応力スケールは等しくしている。 V_T 急増開始点と解析終了点との違いは

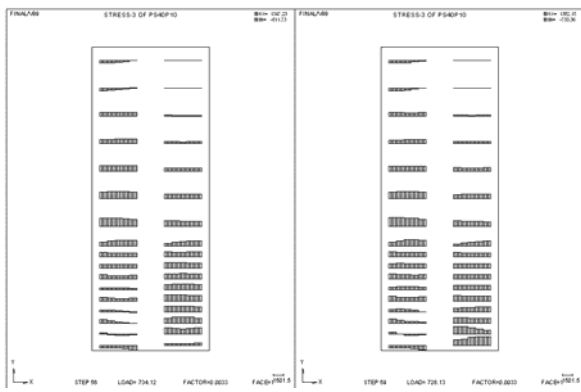


図 - 13 鋼管のせん断応力度分布
 $(\sigma_c=30\text{N/mm}^2)$
 (左: V_T 急増点, 右: 解析終了点)

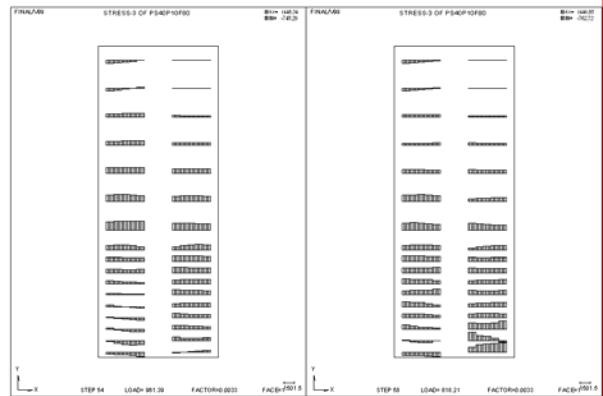


図 - 14 鋼管のせん断応力度分布
 $(\sigma_c=80\text{N/mm}^2)$
 (左: V_T 急増点, 右: 解析終了点)

解析終了点では圧縮側鋼管の基部せん断応力が高まる点であり、これはいずれのコンクリート強度でも同様である。しかしながら、コンクリート圧縮強度が 30N/mm^2 の場合では、解析終了点が最大荷重(せん断耐力)となるが、コンクリート圧縮強度が 80N/mm^2 と高強度の場合では V_T 急増開始点が最大荷重(せん断耐力)となる。このことが図-9、図-10 に示した PC 鋼より線と鋼管のせん断負担が減少した原因である。

4. まとめ

コンクリートの圧縮強度を高め、鋼管が負担する設計せん断力をより大きくすることを期待して数値解析を行い、以下の結論を得た。

- (1) 本構造に用いるコンクリートの圧縮強度を高めるとせん断耐力は高まるが PC 鋼より線や鋼管のせん断力負担は増加しない。これはコンクリートのせん断負担耐力 (V_c) が支配的となるためである。
- (2) コンクリートの圧縮強度が大きい場合でも、最大荷重以後に PC 鋼より線、鋼管とも設計で想定する程度のせん断力を負担する。したがって、本構造の経済設計、すなわち鋼管や PC 鋼より線にせん断負担をより一層させるという点では、コンクリートの高強度化は効果が小さく、むしろ弾性係数を小さくして躯体のせん断変形を大きくする方が効果は大きいと予想される。

参考文献

- 1) 渡辺将之ほか：鋼管・コンクリート複合構造部材の正負交番載荷試験，土木学会論文集 No.627/V-44，pp.113-132，1999.8
- 2) 田中浩一ほか：水平力を受ける鋼管・コンクリート複合構造橋脚の挙動評価，土木学会論文集 No.648/V-47，pp.89-108，2000.5
- 3) Saenz,L.P.:Discussion of Equation for the Stress-strain Curve of Concrete By Desayi and Krishnan, ACI Journal,Vol.61,pp.1229-1235, Sep.1964.
- 4) Darwin,D. and Pecknold,D.A.: Nonlinear Biaxial Stress-strain Law for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.103, No.EM2, pp.229-241, April.1977.
- 5) Fafitis,A. and Shah,S.P.:Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Columns, Publ.ACI, No.SP-87,pp.213-232,Sep.1985.
- 6) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第 474 号，pp.163-170，1995.8.
- 7) 出雲淳一ほか：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル，コンクリート工学論文集，No.87.9-1，pp.107-120，1987.9.
- 8) 長沼一洋ほか：正負繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート板の解析(その 1 - その 2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造，pp.823-826，1995.8.