

招待論文 「鋼管コンクリート複合構造橋脚の耐震性能と施工」

渡辺 将之

要旨: 鋼管コンクリート複合構造橋脚は、高橋脚の合理的設計と橋脚工事の省力化・急速施工を目的に開発された鋼管を主体とする鉄骨鉄筋コンクリート構造橋脚であり、鉄筋コンクリート内部に鋼管を配するとともに、帶筋にPC鋼材を用いた構造となっている。平成8年の道路橋示方書の改訂に伴ない、本構造の優れた耐震性能を有効に利用すべく柱型模型による繰り返し水平載荷試験及びせん断試験を行い、本構造の耐震性と耐荷力特性を解明し、地震時の安全性の確認と照査方法について検討を行った。また施工面では品質向上への取り組み及び経済性追求のための種々の改善を実施した。

キーワード: 複合構造、耐震性能、鋼管、水平載荷試験、せん断試験、PC鋼材、施工

1. はじめに

高速道路の建設は昭和50年代後半より横断道の時代を迎え、急峻な山岳部を横架するようになってきた。横断道（山岳路線）は一般に橋梁・トンネルといった構造物の比率が非常に高く、建設コストを引き上げることから構造物をいかに安価に合理的に建設するかが重要な課題となっていた。さらにバブル期に見られたような労働者不足及び労働者の老年齢化に伴ない、施工の機械化・省力化が強く望まれていた。そのような中、開発検討されたのが「鋼管コンクリート複合構造橋脚」である。

鋼管コンクリート複合構造橋脚の概要を図-1に示すが、本構造の特徴としては、以下のとおりである。

- ①複数本の鋼管を使用することにより軸方向鉄筋量を削減する。
- ②鋼管の役割としては主鋼材の他、内型枠、仮設材

(大型移動足場昇降用反力架台)も兼ねる。

- ③帶鉄筋の替わりにPCストランドをスパイラル状に用いている。さらに施工を図-2に示す巻き付け機を用いて半自動化した。
- ④大型の移動足場装置を用い、足場の設置・撤去作業の省力化及び型枠作業の簡素化を可能にした。

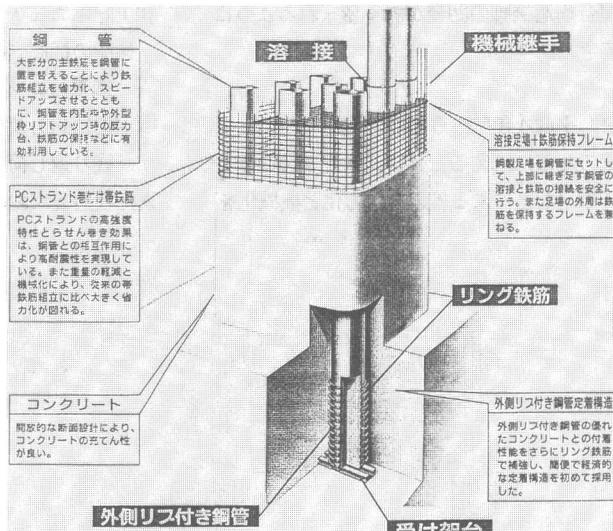


図-1 鋼管コンクリート複合構造橋脚の概要

2. 開発の経緯

2. 1 土木構造物以外での実績

鋼管コンクリート構造物は、建築の分野ではかなり以前より研究開発が進められ、多くの建築構造物において使用実績がある。しかし土木構造物に採用された例は無く、その理由としては以下の点が考えられる。

(1)建築分野では居住空間の確保などの点から柱形状が小さく、柱内に鋼管を1本用いる構造が主流となっている。一方、土木構造物は柱形状が大きく鋼管も複数本用いることから、柱の形状、鋼管本数などのバリエーションが多くなり、設計・施工の標準化が難しい。

(2)従来のRC橋脚の鉄筋位置よりも鋼管は内側に配置されることから、主鉄筋としての利きが劣り、また鋼管が高価であるため、トータルコストも従来のRC橋脚より高くなる傾向にある。

以上のような点から土木構造物への採用がなされなかったと思われる。

しかし、第二東名神をはじめ高橋脚の計画が多くなされてくるに従い、従来のRC橋脚では対応が難しく、新たな構造として鋼管コンクリート複合構造橋脚の開発が強く望まれるようになってきた。

2. 2 平成4年度～6年度の検討

上記の要望に応えると併に、人件費の高騰や労働者不足などによる施工の省力化と機械化を

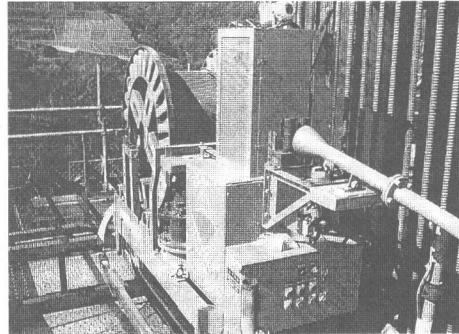


図-2 PCストランド巻き付け機

速やかに実現させるために、平成4年度より大分自動車道横道橋のP1橋脚(脚高31m)とP2橋脚(脚高34m)において鋼管コンクリート複合構造橋脚の採用を試みた。横道橋の一般図及び橋脚断面を図-3に示す。

横道橋における取り組みの目標としては、中低橋脚(概ね橋脚高30m以下)における本構造の開発であり、構造としては鋼管内部にもコンクリートを充填させているのが特徴である。平成4年度からの主な検討項目を以下に示す。

- ①橋脚施工の省力化、急速化。
- ②中低橋脚(充実断面)における設計・施工マニュアルの策定(震度法レベル)。
- ③上記マニュアル作成に必要な本構造の基本性能の把握(模型実験の実施)。
 - ・鋼管とコンクリートの合成度の確認
 - ・曲げ耐力及びせん断耐力の把握
 - ・繰り返し荷重による変形性能の把握

また横道橋における試験施工結果から確認で

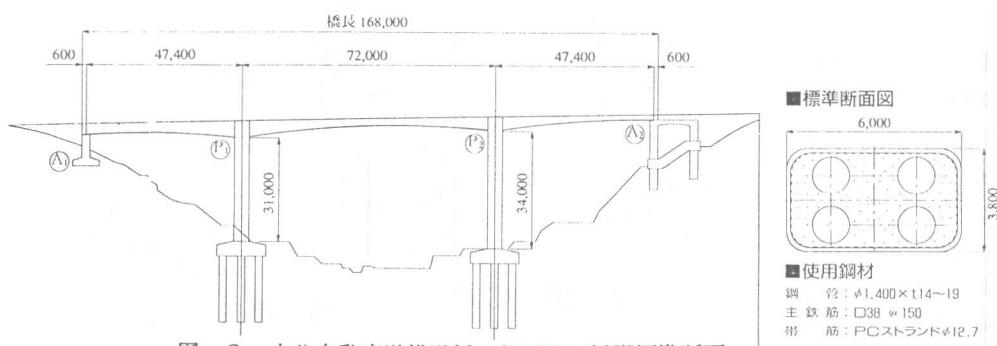


図-3 大分自動車道横道橋一般図及び橋脚標準断面

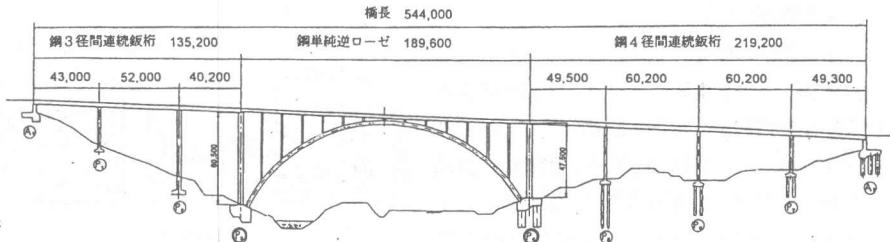


図-4 山形自動車道大網川橋一般図

きた事項は以下のとおりである。

- (1) 従来のRC橋脚に比べ約40%の工期短縮が可能となった。
- (2) 模型実験結果から最大耐力は鋼管をRC換算した理論値とほぼ一致し、また優れた変形性能を有することを確認した。
- (3) 工費は従来のRC橋脚より6割程度割高になる。
- (4) 橋脚基部に温度応力による鋼管に沿った微細なひびわれが発生する。

2. 3 平成7年度～9年度の検討

平成6年度までは、中低橋脚（30m以下）を目標に検討していたが、本構造を有効に活用するためには高橋脚（30m以上）への適用を図る必要がある。またそのためには鋼管内部を中空とする必要があり、新たな実験・解析が必要となってきた。さらに平成7年の兵庫県南部地震及び平成8年度の道路橋示方書の大幅改訂などを踏まえ、大規模地震時に対する安全性の照査方法についても確立する必要が生じ、横道橋での試験施工時に抽出された課題の克服とともに検討していくこととした。

そこで山形自動車道大網川橋P3橋脚（脚高60.5m）及びP4橋脚（脚高47.5m）において高橋脚への取り組みを実施し、またそこでの成果を山形自動車道小網川橋P3橋脚（脚高75m）他4橋脚へ反映させることとした。

大網川橋の一般図を図-4に、大網川橋での施工状況を図-5に示す。

大網川橋における取り組みの目標は、

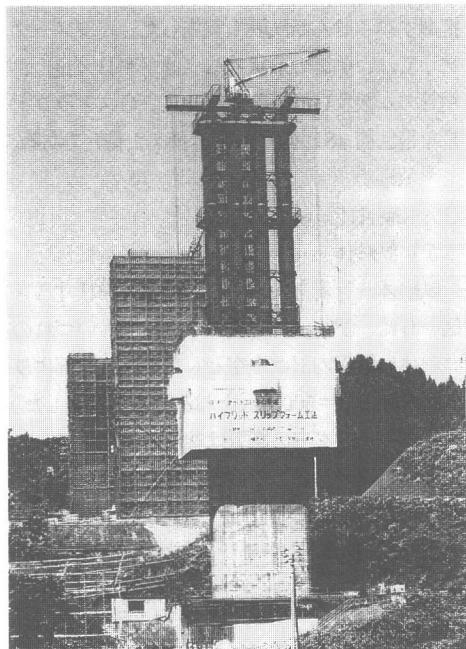


図-5 大網川橋施工状況

- (1)高橋脚（内空断面）における設計・施工マニュアルの策定（保耐法レベル）。
- (2)大規模地震時の安全性の照査方法の確立。
- (3)上記照査方法確立のための模型実験（韌性試験、せん断試験）の実施。
- (4)高橋脚施工時の課題の抽出と対策検討。
- (5)経済性の追求

である。

以下にこれら項目の中から耐震性能確認のために実施した模型実験の概要と経済性追求への取り組みについて紹介する。

3. 耐震性能の把握

3. 1 試験の概要

高橋脚における鋼管コンクリート複合構造の耐震性能を把握すべく靭性能試験並びにせん断試験を実施した。高橋脚の場合、鋼管は主鉄筋の役割の他内型枠も兼ね鋼管内部は中空となることから、鋼管とコンクリートの付着が切れ易くなると想定される。よって最大耐力及び靭性能を靭性能試験で確認することとした。さらに鋼管がどの程度せん断耐力に寄与しているのか把握すべくせん断試験も実施した。パラメータとしては、橋脚の形状寸法（偏平率B/D）、鋼管の本数及び換算帶鉄筋比（PCストランド量を帶鉄筋（SD345）に置き換えた値）である。

3. 2 靭性能試験

(1) 試験体

試験体一覧表を表-1に、試験体形状寸法を図-6に、配筋状況を図-7に示す。いづれの試験体も鋼管内部は中空としたが、柱基部より1D区間（D=500 mm）はグラウト注入した。またフーチング内の鋼管は端部板に溶接し、天端は定着無としている。なお、コンクリートは呼び強度 24 N/mm²（普通ポルトランドセメント）を使用し、粗骨材最大寸法は 13 mm を用いた。

(2) 試験方法

載荷は正負交番繰り返しで実施し、加力水平変位は柱主鉄筋および鋼管縁の両方が降伏する変位の整数倍で各3サイクル繰り返した。終局

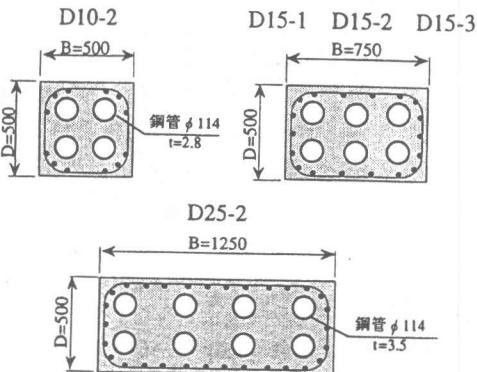


図-6 試験体断面形状図

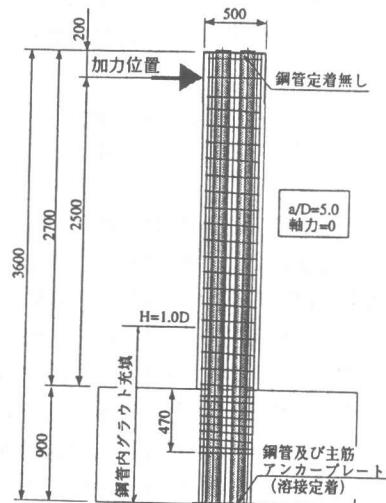


図-7 試験体配筋状況（側面図）

表-1 試験体一覧表

試験体	断面形状 (B/D)	鋼 管				主 鉄 筋		帶 筋	
		公称外径 (mm)	公称厚さ (mm)	本数	钢管比 =At/(BD) (%)	钢管内 グラウト	鉄筋 =Ab/(BD) (%)	PC鋼より線 2本より 2.9mm	等価帯筋比 p_w^eq(%)
D10-2	1.0	114.3	2.8	4	1.57	基部1.0D	12-D16	0.61	@130
D15-1	1.5	114.3	2.8	6	1.57	基部1.0D	18-D16	0.61	@180
D15-2	1.5	114.3	2.8	6	1.57	基部1.0D	18-D22	0.61	@90
D15-3	1.5	114.3	2.8	6	1.57	基部1.0D	18-D25	0.61	@60
D25-2	2.5	114.3	3.5	8	1.56	基部1.0D	30-D25	0.61	@50

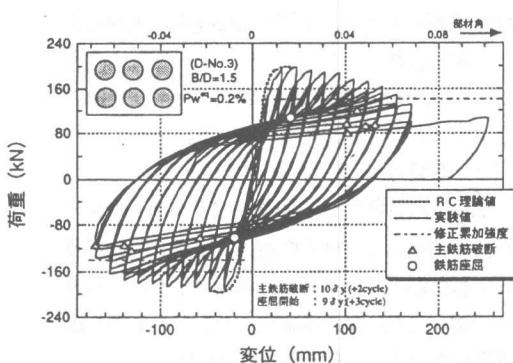


図-8 荷重一変位関係 (D 15-2)

変位に達した後は部材角 $R = +10/100$ ($R = \text{加力点変位 } \delta / \text{柱高さ } H$) まで加力して実験を終了した。なお高橋脚試設計結果から軸圧縮応力レベルが $1.5 \sim 2.0 \text{ N/mm}^2$ 程度であり、軸力が韌性率に大きく影響しないことが判明したため、軸力は導入していない。

(3) 実験結果

試験体 D 15-2 における荷重と変位の関係を図-8 に示す。図中には、鋼管を鉄筋とみなした RC 梁理論で求められた荷重一変位計算値を点線で、修正累加強度式から求められた値を 1 点破線で示した。なお、修正累加強度とは鉄筋コンクリート部分の曲げ耐力と鋼管の全塑性軸力に偏心距離を乗じた耐力の累加で定義される値をいう。この結果から最大荷重は $3\delta_y$ 時で発生し、RC 計算値に近いものとなっており、他の試験体も同様であった。また鉄筋の座屈は $7\delta_y$ から $10\delta_y$ で発生し、 B/D が大きいほど早く座屈が起こることが確認できた。

韌性率と B/D の関係を図-9 に、韌性率と換算帶鉄筋量の関係を図-10 に示す。ここで、耐力が修正累加強度を下回った時の変位を主筋が降伏した時の変位で除した値を「耐力韌性率」、主筋が座屈した時の変位で除した値を「座屈韌性率」と定義した。この結果から各試験体とも耐力韌性率で 9 以上、座屈韌性率で 7 以上を確保している。また、換算帶鉄筋比が韌性率に及ぼ

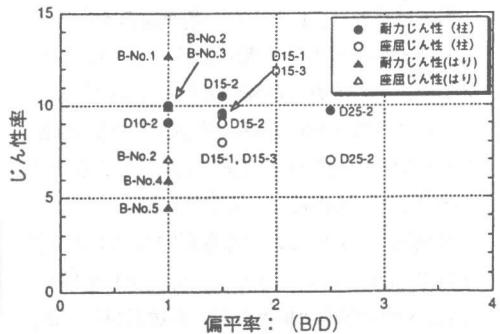


図-9 韌性率と断面偏心率の関係

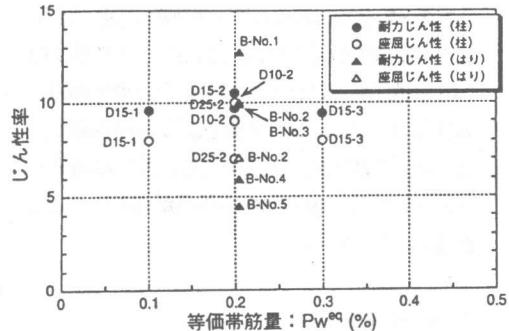


図-10 韌性率と換算帶鉄筋量の関係

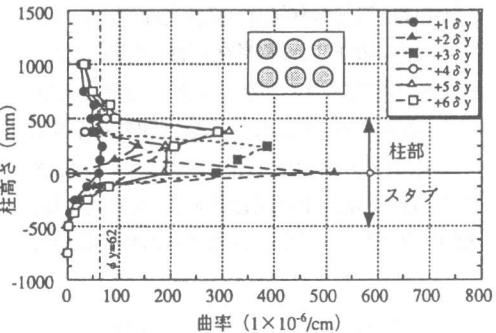


図-11 曲率分布 (D 15-2)



図-12 柱基部の鋼管座屈状況

す影響は見受けられないが、断面幅 B が大きくなるほど座屈耐性率が減少している。これは PC ストランドの拘束力が幅が大きくなるほど低下したためと考えられるが、耐力耐性率の減少が見られないことから、主鉄筋が座屈しても十分な耐力を有する構造と考えられる。

試験体 D15-2 における各変位レベルでの曲率分布を図-11 に示すが、この図より基部～1.0 D 区間で曲率が卓越している状況が分かる。また、鋼管座屈の状況を図-12 に示すが、鋼管が基部～約 280mm(0.6 D に相当)の範囲で座屈している様子が見られ、これは図-10 に示す曲率の卓越区間とほぼ一致する。また最終加力におけるコンクリートの剥離状況から帶筋量が少ないほど剥離範囲が大きいこと、並びに偏平率が大きいほど柱中央部の座屈長が長くなることが認められている。

3. 3せん断試験

(1) 試験体

試験体は鋼管の有無及び換算帶鉄筋比をパラメータとし製作した。試験体一覧表を表-2 に、試験体形状寸法(せん断スパン比 $a/D = 2.5$)と配筋状況を図-13 に示す。試験区間の鋼管内部は実状と合わせて中空とし、フーチング内のミグラウト注入した。また鋼管端部は鉄板に溶接し、天端は定着していない。主筋はせん断破壊を先

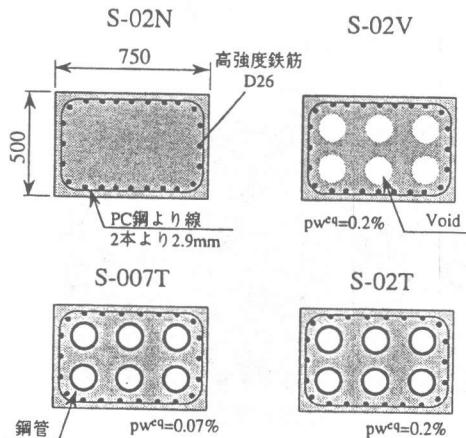


図-13 試験体形状寸法及び配筋状況

行させる目的で高強度鉄筋(ゲビンデスターB D26 B種)を用い、下端は溶接定着、上端はボルト定着した。

コンクリートは呼び強度 $24 N/mm^2$ 、普通ポルトランドセメントを用いている。

(2) 試験方法

加力は部材角で $2/1000$ 刻みで $R=3/100$ まで正負交番繰返し、せん断耐力に繰返し回数が及ぼす影響が小さいと考え、各 1 サイクルずつの水平載荷した。また本試験においても軸力の影響は小さいことから導入していない。

(3) 試験結果

試験体 S-02T における荷重一変位の関係を図-14 に示す。図中には道路橋示方書によるせん断耐力の計算値を示す。なお計算に当たっては、せん断補強筋の強度として PC ストランドの材料試験結果に基づく降伏強度を用い、鋼管のせん断耐力は考慮していない。また鋼管有りの場合は、コンクリート負担分について全幅有効とした場合と鋼管幅部分を無視した有効幅

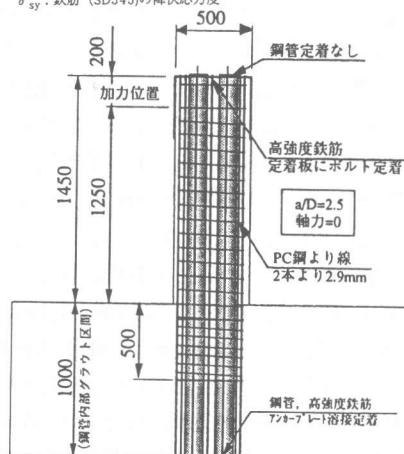
表-2 試験体一覧表

No.	鋼管	PCストランド量		
		ピッチ	p_w	p_w^{eq} *1)
S-02N	無(中実)	@90mm	0.04%	0.2%
S-02V	無(ボイド)	@90mm	0.04%	0.2%
S-007T	有	@250mm	0.014%	0.07%
S-02T	有	@90mm	0.04%	0.2%

*1) $p_w^{eq}=p_w \times (\sigma_{py}/\sigma_{sy})$

σ_{py} : PCストランド降伏応力度

σ_{sy} : 鉄筋(SD345)の降伏応力度



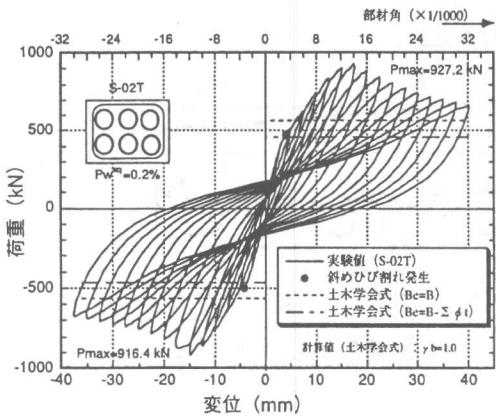


図-14 荷重一変位の関係 (S-02 T)

による場合の両者を示している。いずれの試験体においてもせん断ひびわれは $R = \pm 4/1000$ 時で発生し、最大荷重は計算耐力を大きく上回るものであった。

せん断耐力と換算帶鉄筋比との関係を図-15に示す。なお各試験体ともせん断耐力は正負の内小さい方を表した。試験体 S-007T と S-02T の比較から PCストランドによる補強効果は見られ、また試験体 S-02T と S-02V の耐力差から鋼管の影響(約 200 kN 強の耐力増加)が分かる。また鋼管の存在により 0.07% 程度の PCストランド量でも 0.2% 程度の補強効果があることが確認できた。

次にボイドによるコンクリートの損失せん断力と鋼管の負担せん断力の関係について図-16に示す。図において、前者を試験体 S-02 N と試験体 S-02 V の差、後者を試験体 S-02T と試験体 S-02 V の差で表している。その結果、鋼管のせん断力負担分がボイドによるせん断力

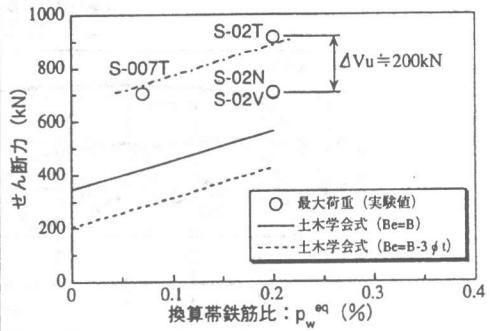


図-15 せん断耐力と換算帶鉄筋比の関係

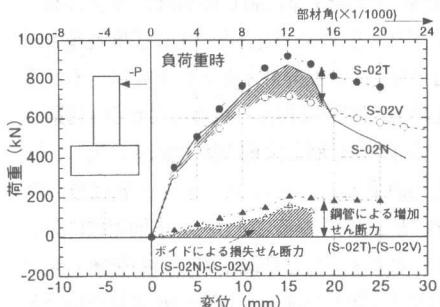


図-16 鋼管とボイドのせん断力負担分
損失分を上回っており、ボイドによるせん断力低下を鋼管が補っていることが分かる。

4. 経済性追求への取り組み

経済性追求への取り組みは、材料面と施工面の2つに分類し実施した。

4. 1 材料面からの取り組み

(1) コンクリート

横道橋での試験施工時に橋脚基部に温度ひびわれの発生が見られた。このひびわれは鋼管の存在によりかぶり厚の急激な変化がおこるため

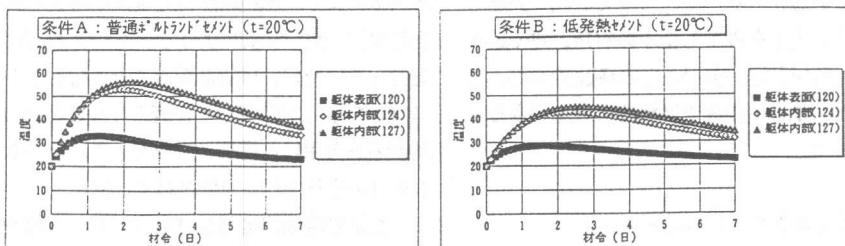


図-17 温度履歴解析結果

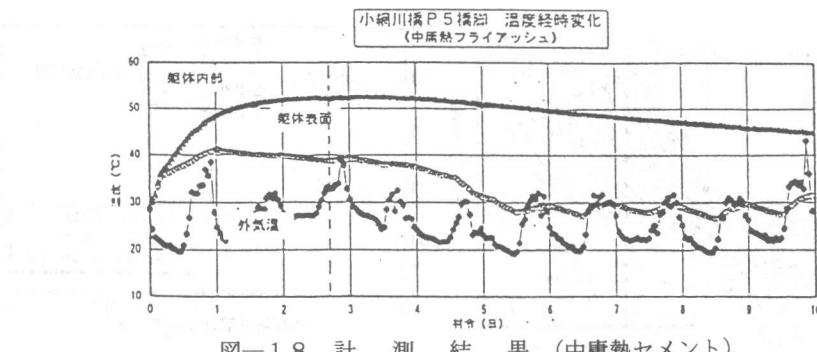


図-18 計測結果 (中庸熱セメント)

橋脚内部と外部に約30°Cの温度差が生じることが原因と考えられた。図-17に温度履歴の解析結果を示すが低発熱系セメントを用いると温度差が15°C以下に抑えられることから、対策としては有効と判断し大網川橋で使用した。しかし低発熱系セメントはコンクリートm³当たり1500円程度高くなることから、小網川橋においては普通セメントと単価差のない中庸熱セメントを用いて施工を試みた。図-18に計測結果を示すが温度差は18°C程度であり、ひびわれの発生に至っていないことが現地で確認できた。

(2) 鋼材

横道橋においては高炉製のねじふし鉄筋を用いていたが、大網川橋では電炉製ねじふし鉄筋に変更した。また材料費に占める割合の大きい鋼管については、鋼管の最小肉厚の規定（一般に鋼管径の1/100）があり、そのため計算上から必要となる肉厚より厚くなる傾向にある。そこで、径の1/150又は10mmを最小肉厚に現地で試験施工を行った。厚みを薄くすることの問題は運搬時の歪みの発生とそれに伴なう建て込み精度の悪化であるが、現地で計測を実施したところ、先の条件でも歪みの有無、建て込み精度上も特段問題が無いことが確認できた。これにより、鋼管の肉厚を経済的に設定できるようになった。

4. 2 施工面からの取り組み

(1) 風対策

図-19に示すように鋼管コンクリート複合

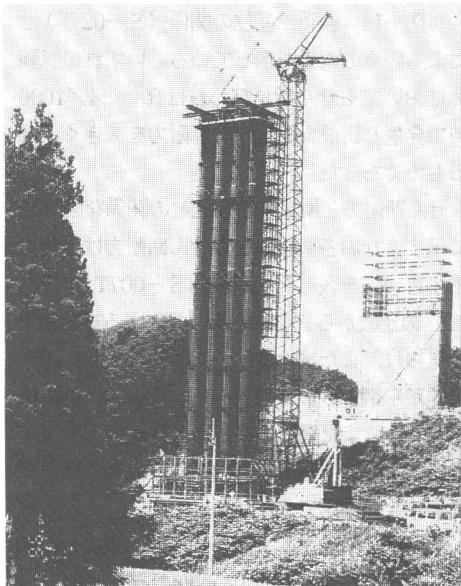


図-19 鋼管コンクリート橋脚施工状況

構造橋脚は最初に鋼管を全て建込み、その後大型移動足場を用いて順次コンクリートを打設していく施工手順である。そのため鋼管自立時の風荷重による局部座屈防止対策が不可欠である。当初は図-20に示すようなプレース材で対策を行っていたが、橋脚高が高くなるほどプレース材等の重量が増加し不経済になることから、制振装置を用いる構造に変更し、これに伴ない仮設材の重量を約60%削減できた。

また鋼管現場溶接時及びコンクリート打設時の足場を兼ねて図-21に示す平面プレース材を設置した。この平面プレース材は鋼管同志を

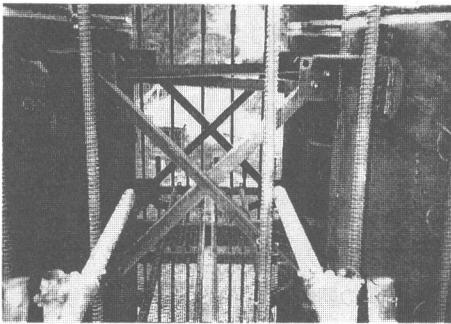


図-20 鋼管同志を繋ぐブレース材

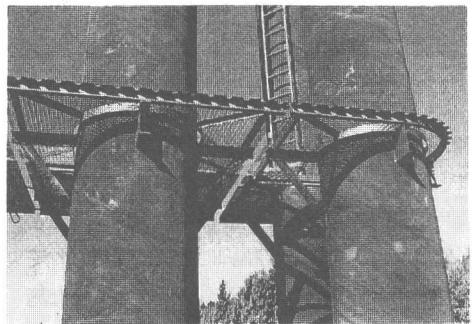


図-21 平面プレース材

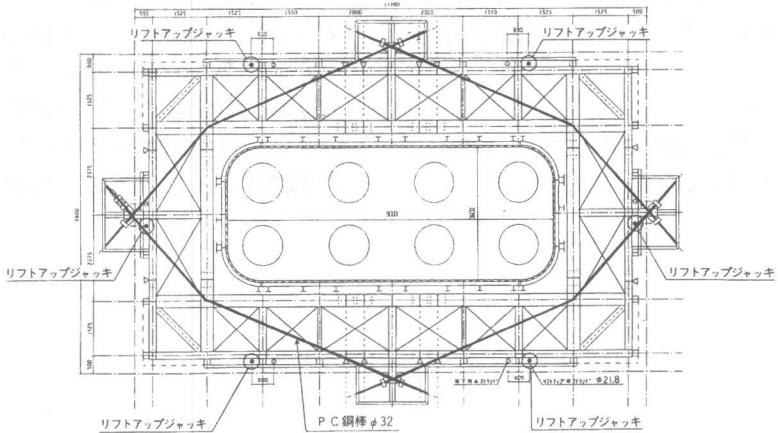


図-22 大型移動型枠装置平面図

拘束しねじりを防止するほか、周囲に切り込みを入れることにより鉄筋の配置精度（かぶり及び間隔）を確保する役割を果たしている。

(2) 大型移動型枠装置

橋脚高が高くなるに従い一般には橋脚断面が大きくなるため、大型移動型枠装置が非常に重厚なものとなる。また、同装置を上昇させるジャッキ等の能力アップも必要となり、装置全体として、橋脚高に比例して大幅な工費増となる。そこで、一般に用いられている型鋼による設備から図-22 に示すようなコンクリートの側圧を横方向の主梁と補強 P C 鋼棒で構成されたトラス構造で受け持つ新しい構造を開発し採用した。実施工においては装置の安全性と設計の妥当性を確認する目的で装置部材のひずみ測定を実施し、本装置が安全であることを確認した。

これにより本装置の空m³当たり重量を約40%削減させた。

5. まとめ

鋼管コンクリート複合構造橋脚の特徴を整理すると以下のようになる。

- (1)鋼管コンクリート複合構造橋脚は鋼管とPCストランド帶鉄筋を組み合わせた新しい構造である。
 - (2)大型移動型枠装置並びにPCストランド巻き付け機の導入により施工の省力化及び工期の短縮を可能にした。
 - (3)靱性能試験及びせん断試験結果などから、優れた耐震性能を有することを確認した。
 - (4)材料及び施工面における幾つかの取り組みにより、高橋脚においては従来のRC橋脚

と同等程度での工費で設計・施工が可能となった。

このように鋼管コンクリート複合構造橋脚は、施工の省力化及び急速施工が可能であるとともに、靭性能試験及びせん断試験等から大規模地震時に対しても優れた耐震性能を発揮することが確認され、今後の高橋脚に大いに採用されていくものと期待されているものである。また施工面での各種の取り組みにより、従来のRC橋脚と工費面でも同等程度までに至っており、本構造が今後益々普及していくものと思われる。

謝辞

本構造の研究を実施するに当たり、「鋼管・コンクリート複合構造橋脚の設計法に関する検

討委員会（財団法人 高速道路技術センター；委員長 東京大学岡村甫工学部長）の各委員の皆様に多大なご協力をいただきましたことをここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1、渡辺将之ほか：鋼管・コンクリート複合構造橋脚の靭性試験、コンクリート工学年次講演報告集、p 939～944、(1997.6)
- 2、田中浩一ほか：鋼管・コンクリート複合構造橋脚のせん断試験、コンクリート工学年次講演報告集、p 933～938、(1997.6)
- 3、渡辺将之：鋼管コンクリート複合構造橋脚の施工、土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集、p 554～555、(1998. 3)