

(44) 中国横断自動車道見延橋の大容量外ケーブル定着部実物大試験報告

日本道路公団中国支社 建設部構造技術課 大中 英揮
 日本道路公団中国支社 津山工事事務所 岡 隆延
 (株)大林組 土木技術本部設計第一部 正会員 加藤 敏明
 住友建設(株)土木本部PC設計部 正会員○小川 整

1. はじめに

中国横断自動車道見延橋は、最大支間長 149m の 5 径間連続ラーメン橋であり、全外ケーブル方式としては国内最大級の橋梁である。全外ケーブル橋における外ケーブルの定着部は構造上重要な部位であり、特に片持ち張出し架設で施工する本橋は、架設ケーブルを突起部で定着する必要がある。また、本橋は長大支間であることから、大容量ケーブルシステム(27S15.2)を採用しており、その定着部においてFEM解析を行い突起形状や補強方法の検討を行っているものの、国内では本橋のように大容量のケーブルを突起定着させた例はない。そこで、定着突起の補強効果の確認およびFEM解析との比較を行うため、実物大供試体により耐荷性能試験を行った。

本報告では、事前解析により決定した定着突起と、試験により得られた結果をもとに、本橋の定着突起の耐荷性能について報告する。

2. 定着突起の設計

2.1 定着突起形状の決定

図-1 に、設計から試験までのフローチャートを示す。定着突起の形状については、中空 PC 鋼棒による応力を合成した FEM 解析を行い、コンクリートに作用する引張応力度が最大 2.0N/mm² 以内におさまるよう最終寸法を決定した。詳細については、同論文中の「中国横断自動車道見延橋（全外ケーブル）の設計」を参照されたい。0.7Pu 載荷時の FEM 解析による応力分布図を図-2 に、主げた変形図を図-3 に示す。

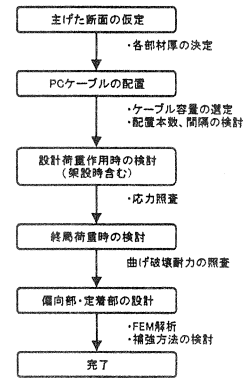


図-1 設計フローチャート

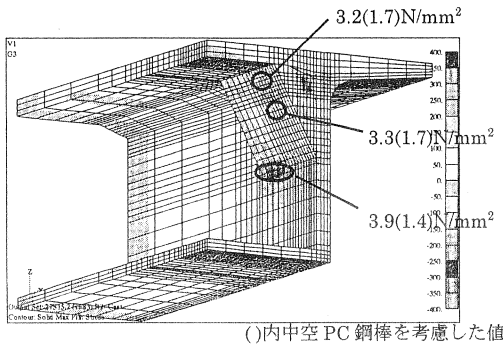


図-2 応力分布図

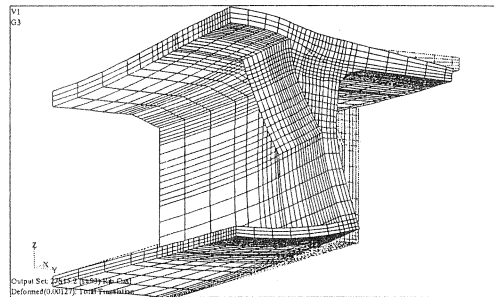


図-3 主げた変形図

2.2 補強鉄筋の決定

補強鉄筋量は、FEM解析による結果をもとに、主げた部材と定着突起部の各界面に働く引張力およびせん断力を算出し決定した。補強筋はSD345 D19 125ピッチを基本として、施工性、コンクリートの充填性を考慮し配筋を行った。

2.3 補強方法の決定

鉄筋のみによる補強に対して、横リブ、中空PC鋼棒、またその複合による補強を検討した。横リブの形状は、ケーブル偏向に必要な厚さを確保し、外ケーブル緊張により横リブ本体に過大な引張応力が発生しない形状とした。

中空PC鋼棒 ($P=300\text{kN}/\text{本}$) は、外ケーブル緊張によって定着突起部および主げた本体に発生する引張応力に対して、あらかじめ圧縮応力を導入する目的で配置した。配置位置については、FEM解析による応力分布、変形図をもとに、定着部周辺に対しては斜め配置、定着突起下側については鉛直配置により主げたの変形を拘束し、 $0.7P_u$ 緊張時コンクリートに発生する最大引張応力を $2.0\text{N}/\text{mm}^2$ 以下となるように配置本数を決定した。

図-4に補強鉄筋および中空PC鋼棒配置図を示す。

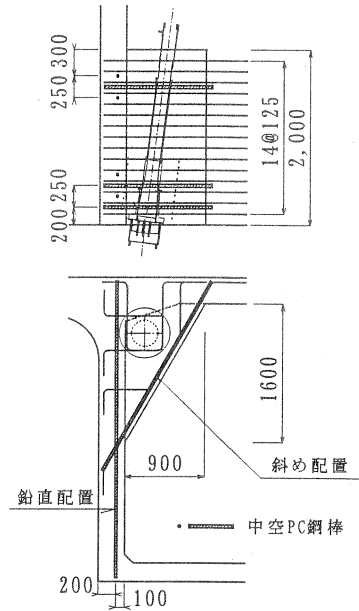


図-4 補強鋼材配置図

3. 耐荷性能試験

3.1 試験目的

上記により設計した定着突起に対して、実物大試験により解析結果の妥当性の検証を行う。補強方法については、その結果をもとに最終決定する。

3.2 試験確認事項

本試験では、定着部の安全性を中心に以下の項目について確認を行う。

- ① 定着突起耐荷性能の確認 (緊張時、終局時)
- ② 補強効果の確認
- ③ 施工性 (鉄筋配置方法、コンクリートの充填性等) の確認

3.3 試験供試体

供試体状況を写真-1に示す。試験供試体は実物大断面とし、橋軸方向長さについては、FEM解析を行

い、横げた定着部が定着突起に影響を及ぼさない範囲で最小とし、全長 18.0m とした。

実橋における主げた部材厚 (ウェブ厚、げた高、下床版厚等) は、定着突起を配置する位置によりそれぞれ異なるため、各項目についてFEM解析によるパラメータ解析をおこない、最も厳しい状態とした。

支持条件は、図-5に示すように実施工を反映するため、張出し施工状態を再現した。定着突起は、各断面 2箇所づつ計 4箇所設置し、それぞれ横げた部に定着した。

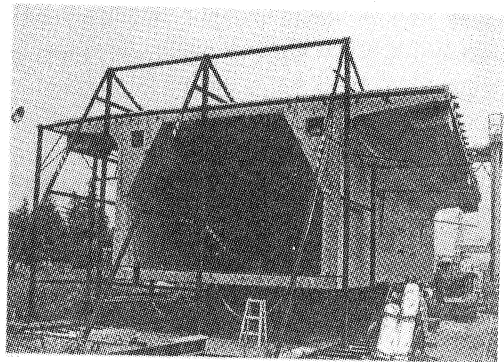


写真-1 供試体状況

3.4 使用材料

実橋における張出し架設状態を想定し、試験では以下のように決定した。

- ・コンクリート

緊張時： (最大緊張力 0.70Pu) $\sigma_{ck}=27\text{N/mm}^2$

終局時： (最大緊張力 0.84Pu) $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$

- ・外ケーブル

定着工法： デイダ-カstrand システム(27S15.2)

PC 鋼材： エポキシ被覆strand (SWPR 7BN)

3.5 補強のパラメータ

試験供試体の主げた部材寸法は、各定着部で一定とし、ケーブル配置角度および定着補強方法をパラメータとした。ケーブル配置角度については、実橋の鋼材配置をもとに最大配置角度 $7+3^\circ$ と標準配置角度 7° とした。補強方法については、架設ケーブル偏向部も兼ねた横リブによる補強、中空 PC 鋼棒 (緊張力 $P=300\text{kN}$) による補強をパラメータとして設定した。

表-1 に、各定着部とパラメータ一覧を示す。

4. 試験結果

4.1 定着突起の施工性

本橋に採用した定着突起は、27S15.2 用の大型リブキャストに加え、補強鉄筋、中空 PC 鋼棒を配置するため、施工性、コンクリートの充填性が心配されたが、突起形状の簡略化、中空 PC 鋼棒配置による鉄筋配置本数の減少により施工性の向上を図った結果、問題なく施工できた。

また、コンクリート打設後の中空 PC 鋼棒の緊張力導入も全て橋面上の作業であり、施工性は良好であった。

4.2 0.7Pu 緊張時

(1) ひび割れ発生状況

コンクリート強度 $\sigma_{ck} = 27\text{N/mm}^2$ を確認し、0.5MN ピッチで 0.7Pu (=5.0MN) まで載荷を行った。その結果、定着突起 No.1~3 まではひび割れの発生は全く認められなかったが、鉄筋による補強のみの NO.4 において 4.5MN 載荷時に微細なひび割れが発生した。しかし、このひび割れ幅は 0.04mm 以下と非常に小さいものであった。写真-2 に、緊張試験状況を示す。

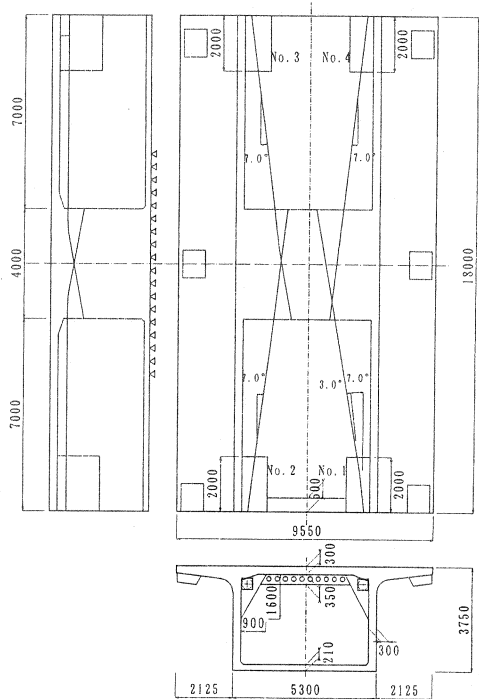


図-5 試験供試体図

表-1 パラメータ一覧

定着突起 No.	配置角度	横リブ	中空 PC 鋼棒
No.1	$7.0^\circ + 3.0^\circ$	有り	有り
No.2	7.0°	有り	無し
No.3	7.0°	無し	有り
No.4	7.0°	無し	無し

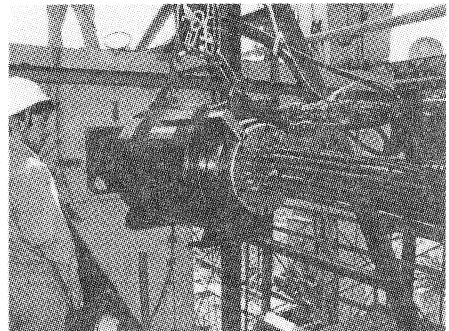


写真-2 0.7Pu 緊張試験状況

(2) 発生応力度の状況

図-6 にコンクリート計測位置図、表-2 に中空 PC 鋼棒および外ケーブル緊張による定着部への導入応力の FEM 解析値と計測値の比較を示す。中空 PC 鋼棒緊張力導入による定着部への導入応力は、FEM 解析値とほぼ一致しており、中空 PC 鋼棒の評価の妥当性が確認できた。定着部および鋼管近傍では、若干実測値のひずみが大きい値を示す傾向にあったが、図-7 の変形図を比較すると全体的に FEM 解析よりも変形が小さいことから、FEM 解析における定着具、鋼管等のモデル化や荷重載荷方法に差異があったと想定される。また、実測値の結果からも、中空 PC 鋼棒を配置した定着突起では引張応力が 2.0N/mm^2 以下となっており、当初の改善目標値は達成された。

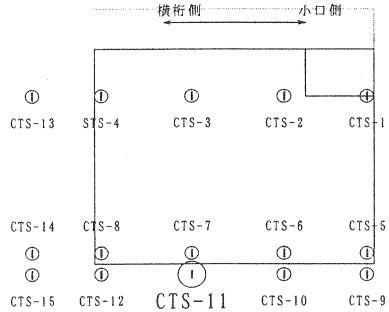


図-6 コンクリート計測位置図

表-2 FEM解析と実測値比較

計測点	定着突起 No.1						定着突起 No.2						定着突起 No.3						定着突起 No.4					
	中空PC 鋼棒		5.0MN載荷		合計		中空PC鋼棒		5.0MN載荷		合計		中空PC鋼棒		5.0MN載荷		合計		中空PC鋼棒		5.0MN載荷		合計	
	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値
CTS-1	2.0	1.8	2.6	3.4	4.6	5.2	2.6	3.1	1.8	2.2	1.8	2.1	3.6	4.3	1.8	1.3								
CTS-2	1.2	1.1	-0.8	-1.7	0.4	-0.6	-0.8	-1.4	1.4	1.5	-1.4	-2.3	0.0	-0.8	-1.4	-1.9								
CTS-3	0.8	0.8	-0.8	-1.1	0.0	-0.3	-0.7	-1.0	0.8	0.8	-0.6	-1.3	0.2	-0.5	-0.6	-1.5								
CTS-4	0.6	0.9	-1.4	-2.2	-0.8	-1.3	-1.3	-2.3	0.6	0.8	-1.1	-2.4	-0.5	-1.6	-1.1	-2.6								
CTS-5	4.8	4.7	-1.2	-1.4	3.6	3.3	-0.9	-1.1	5.0	5.0	-1.6	-2.0	3.4	3.0	-1.6	-2.2								
CTS-6	3.6	2.7	-1.0	-1.1	2.6	1.6	-0.6	-0.5	3.8	3.2	-1.3	-1.5	2.5	1.7	-1.3	-0.3								
CTS-7	2.6	2.3	-1.6	-1.5	1.0	0.8	-1.2	-1.3	2.7	2.2	-1.9	-2.3	0.8	-0.1	-1.9	-1.2								
CTS-8	2.1	1.6	-1.8	-1.4	0.3	0.2	-1.2	-0.9	2.2	1.6	-2.0	-2.2	0.2	-0.6	-2.0	-1.2								
CTS-9	4.4	2.5	-1.9	-1.6	2.5	0.9	-1.3	-1.3	4.7	3.7	-2.5	-2.8	2.2	0.9	-2.5	-3.5								
CTS-10	4.0	2.7	-1.6	-1.1	2.4	1.6	-0.9	-0.6	4.2	4.1	-2.1	-2.1	2.1	2.0	-2.1	0.1								
CTS-11	3.2	1.9	-2.2	-1.4	1.0	0.5	-1.5	-0.4	3.4	2.6	-2.6	-2.6	0.8	0.0	-2.6	-0.4								
CTS-12	2.1	1.4	-1.9	-1.4	0.2	0.0	-1.3	-1.0	2.2	1.8	-2.2	-2.4	0.0	-0.6	-2.2	-0.6								
CTS-13	0.3	0.1	-0.8	-0.9	-0.5	-0.8	-0.8	-1.0	0.3	0.3	-0.9	-1.1	-0.6	-0.8	-0.9	-1.3								
CTS-14	0.7	0.5	-0.6	-0.7	0.1	-0.2	-0.4	-0.7	0.8	0.7	-0.7	-1.1	0.1	-0.4	-0.7	-1.1								
CTS-15	0.9	0.5	-0.9	-0.9	0.0	-0.4	-0.6	-0.6	1.0	0.8	-1.1	-1.5	-0.1	-0.7	-1.1	-1.8								

図-8, 9 に、着目点のコンクリートひずみ計測位置とひずみ履歴図を示す。なお、図中のひずみは正値が引張ひずみ、負値が圧縮ひずみを示す。定着突起 No. 1, 3 では、荷重-ひずみの関係はほぼ線形となり、FEM 解析の結果とも概ね一致している。定着突起 No. 2, 4 では、定着突起下側部分において緊張力 2.0MN 前後から緊張力が増加してもひずみが増加しない部分がある。特に No. 4 においてその様子が顕著に現れており、定着部コンクリートに目視できない微細なひび割れが発生していると考えられる。

以上のことから、0.7Pu 緊張においては、中空 PC 鋼棒で補強している定着突起 No. 1, 3 については、定着突起全体がほぼ弾性体を維持し、FEM 解析どおりの結果となった。

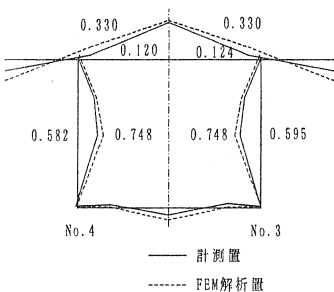


図-7 供試体変形図

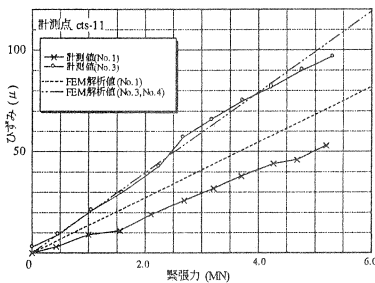


図-8 コンクリートひずみ履歴(No.1,3)

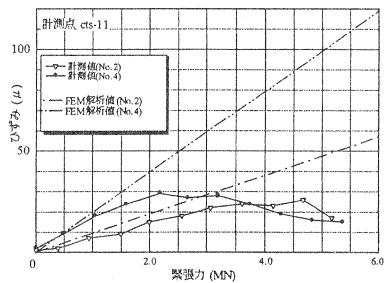


図-9 コンクリートひずみ履歴 (No.2,4)

4.3 継続载荷→0.84Pu 緊張時

(1) ひび割れ発生状況

0.7Pu 緊張後、0.84Pu 緊張時における所定のコンクリート強度に達するまで 15 日間、荷重(P=5.0MN)を継続载荷した。その結果、全ての定着突起に微細なひび割れの発生が確認された。図-10 に、0.7Pu 载荷時から 0.84 载荷時までの時系列ひび割れ発生状況を示す。定着突起 No.1~No.3 のひび割れ幅は、最大 0.04mm 以下の微細なものであったが、No.4 では 0.7Pu 緊張時に発生したひび割れが 0.15mm まで進行した。これは、継続载荷中の若材齢時におけるコンクリートのクリープ・乾燥収縮や、温度変化による応力変動に起因するものと考えられるため、今後ひび割れ対策を検討する必要がある。

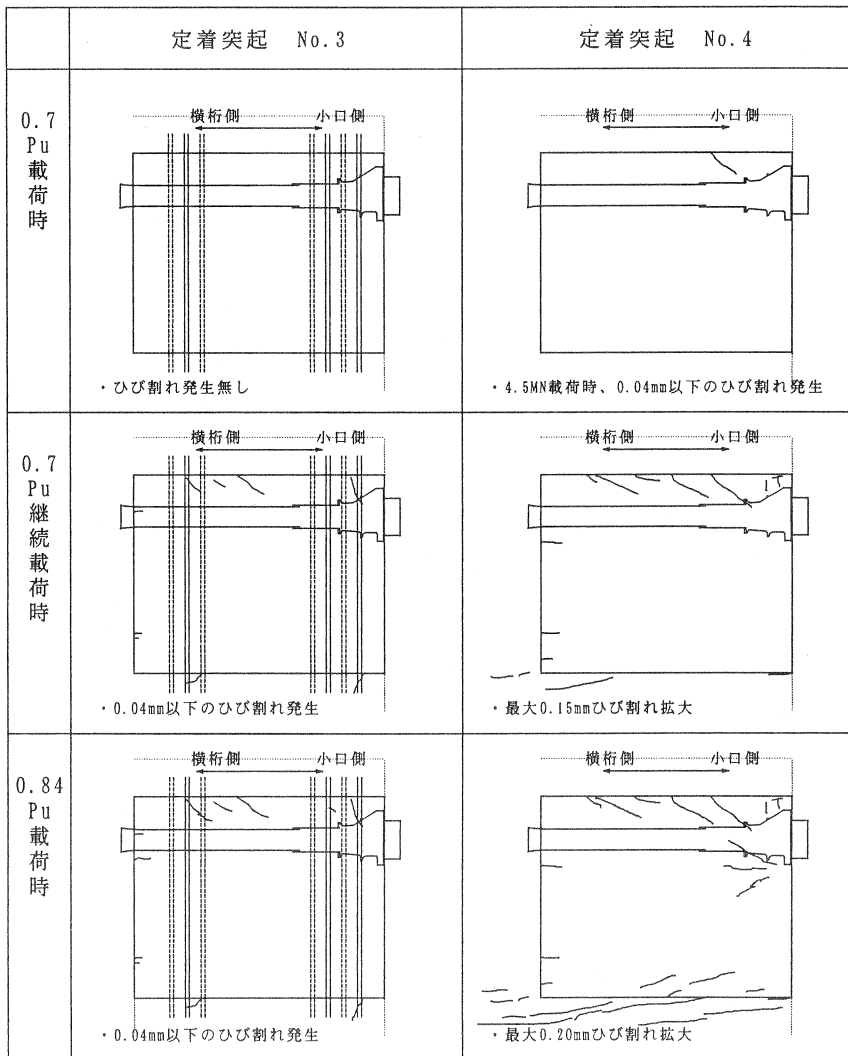


図-10 時系列ひび割れ発生状況

コンクリート強度 $\sigma_{ck} = 40\text{N/mm}^2$ を確認後、0.25MN ピッチで 0.84Pu まで荷重を行った。その結果、一部に新たにひび割れの発生が確認された。定着突起 No.1~No.3 については、ひび割れ幅が最大 0.04mm 以下であったが、定着突起 No.4 では突起下側部分から主げた部分に数多く発生し、ひび割れ幅も最大 0.20mm まで拡大した。

(2) 発生応力度の状況

図-11に、0.7Pu 緊張時に引き続き着目点のコンクリートひずみ履歴図を示す。0.7Pu 緊張時のひずみ履歴と比較して、定着突起 No.1,3 については、部分的に非線形の挙動が現れており、ほぼ弾性体としての限界域であることが推測される。また、図-12に鉄筋ひずみ計測位置図を、図-13に定着突起 No.4 のひび割れ発生付近の鉄筋ひずみ履歴図を示す。鉄筋ひずみは、0.84Pu 緊張まではほぼ線形の挙動を示しており、特にひび割れ発生の影響は観測されなかった。0.84Pu 時に鉄筋発生応力を 30N/mm^2 以下に抑えており、鉄筋については十分な安全性が確保されている。

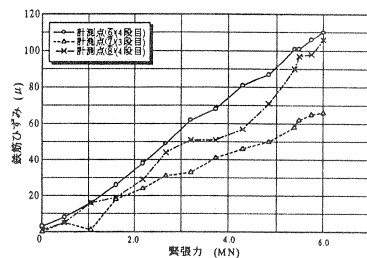
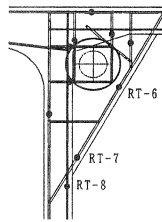
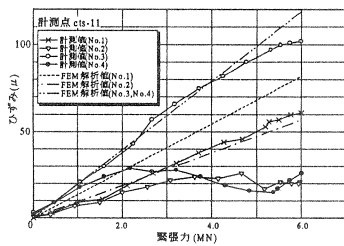


図-11 コンクリートひずみ履歴(cts-11) 図-12 鉄筋ひずみ計測位置図 図-13 鉄筋ひずみ履歴図

5. まとめ

大容量外ケーブル(27S15.2)定着部の耐荷性能試験により、以下の事項が確認された。

1. 若材令 ($\sigma_{ck}=27\text{N/mm}^2$) 時における 0.7Pu 緊張試験の結果、補強方法の異なるすべての定着突起において有害なひび割れは発生せず、本橋で採用した定着突起形状の妥当性が確認された。
2. 0.7Pu 緊張試験の結果、中空 PC 鋼棒により補強された定着突起 No.1, 3 は、最大発生引張応力が 2.0N/mm^2 以下であり、ひび割れの発生も全く認められず弾性体を維持できることから、中空 PC 鋼棒による補強の有効性が確認された。
3. 0.84Pu 緊張試験の結果、ひび割れ本数が増加したものの、ひび割れ幅の変化は見られず、鉄筋の配置方法の妥当性が確認された。
4. 本橋のシンプルな定着突起形状は、施工性に優れているだけでなく、FEM解析との整合性が非常に良好であることが確認された。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編、平成8年12月
- 2) (社) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編、平成8年3月
- 3) (社) プレストレストコンクリート技術協会：外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工基準(案)、平成8年3月
- 4) 岡村敦、橋川勝司、荻田豊、中村収志：中国横断自動車道見延橋(全外ケーブル橋)の設計、プレストレストコンクリート技術協会 第10回シンポジウム論文集