

(40) 木曾川橋における橋面外ケーブルおよび大容量外ケーブルの定着突起に関する実験

オリエンタル建設㈱ 技術研究所	正会員	○阿部 浩幸
日本道路公団 名古屋建設局四日市工事事務所	正会員	花島 崇
第二名神高速道路 木曾川橋東工事共同企業体		齋藤 幸治
日本高圧コンクリート㈱ PC事業部	正会員	照沼 英彦

1. はじめに

木曾川橋は、橋長 1145.0m、幅員 33.0m、側径間を除く各支間中央部に長さ 105m の鋼桁を有する 5 径間連続の PC・鋼複合エクストラドーズド橋である。PC 桁は、ショートラインマッチキャスト工法で製作した長さ 5.0m のプレキャストセグメントを、各橋脚より左右のバランスを保ちながら張出架設を行っている。側径間端橋脚側は、このような張出架設ができないので、端橋脚橋面上に設けたサドルを介して隣接する 1 径間（隣接径間）の橋体を反力に橋面外ケーブルで補強しながら張出す工法を採用している。図-1 にその架設概要を示す。橋面外ケーブル(19S15.2)の定着は、上床版に後打ちした突起で行い、架設終了後撤去する方法を採っている。この定着突起は、鉛直 PC 鋼棒で上床版に緊結すると共に、薄い床版への応力緩和を目的に、緊張背面を鋼製ブラケットで補強し、橋面外ケーブルの張力を床版の広い範囲に伝達する構造としている（図-2 参照）。また、本橋の側径間閉合部では、外ケーブル(27S15.2)および内ケーブル(12S15.2)を同じ突起に定着する構造を採用している（図-3 参照）。

これらの設計では、いずれの場合も、定着突起部は弾性 FEM 解析を行い、ひび割れ発生限界を超える場合には鉄筋を配置してひび割れ幅制限値以下になるように、形状、鉄筋量を決定している。しかしながら、外ケーブルを橋面突起で定着した実績がないこと、27S15.2 のような大容量ケーブルを突起構造で定着した実績もないことから、FEM 解析による設計精度が検証されているとは言い難い。

そこで、実物大供試体を用いて、これらの外ケーブル定着突起の定着実験を実施し、設計方法の妥当性を確認すると共に、安全性を確認することを目的に本実験を行った。

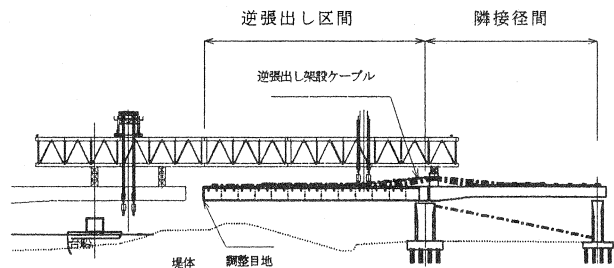


図-1 側径間逆張り出し施工概念図

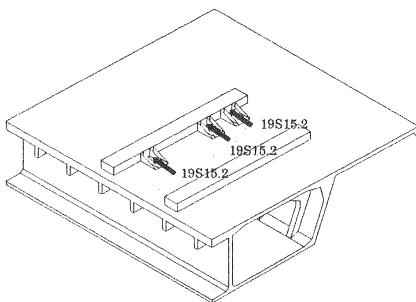


図-2 橋面外ケーブル突起概略図

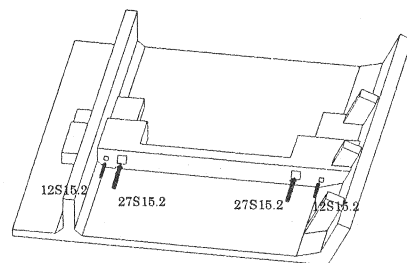


図-3 下床版定着突起概略図

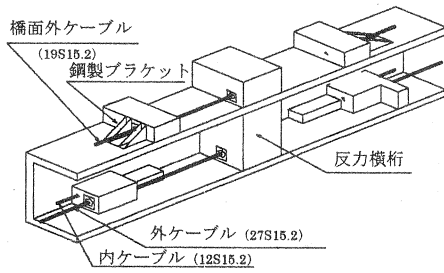
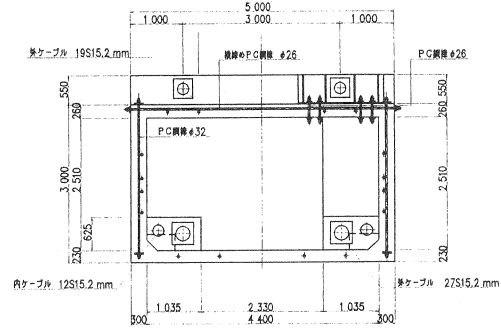
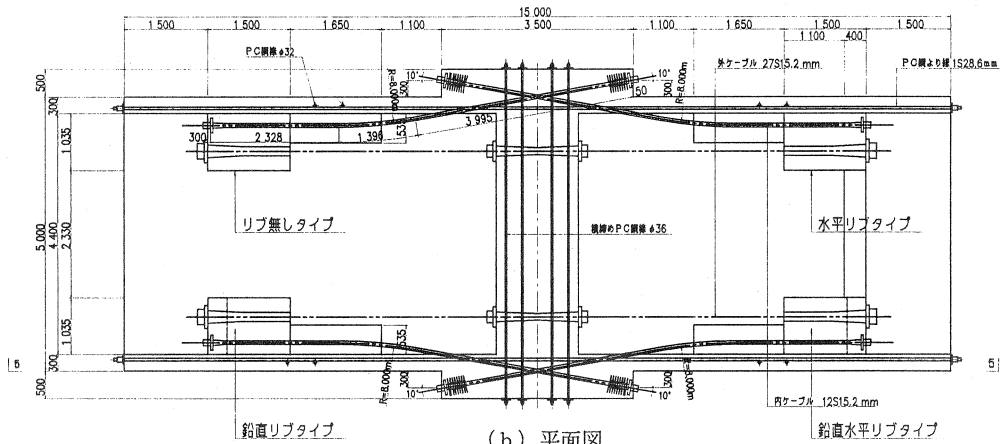


図-4 供試体概要図



(a) 断面図



(b) 平面図

図-5 供試体一般図

2. 実験概要

2. 1 供試体

供試体の形状は、上床版部に橋面外ケーブル定着突起を、下床版部に大容量外ケーブル定着用突起を配置した箱桁形状とし、中間部に各突起載荷荷重の反力を受ける横桁を配置した形状とした。突起形状、ウェブ厚および床版厚は実施工に合わせ、隣合う突起に発生する応力がほとんど影響しない状態となるように供試体の幅を決定した。図-4に供試体を2分割した概要図を示す。図-5には供試体一般図を示す。橋面突起の側面方向の断面は幅 1.00m、高さ 0.55mである。

使用材料は、実施工と同一な仕様とし、コンクリートは設計基準強度 $60\text{N}/\text{mm}^2$ 、鉄筋は SD345、P C 鋼材は橋面突起およびブラケットの一体化に普通 P C 鋼棒 B 種 1 号、外・内ケーブルの構成には SWPR7BN を用いている。ケーブルの突起部定着はアンダーソン工法としている。

2. 2 実験ケース

2. 2. 1 橋面外ケーブル定着突起実験

橋面突起の実験ケースとして、ブラケットの有無、ブラケットの水平固定の有無、ブラケット自体の補強の有無、突起縦締め PC 鋼材緊張力の相違、以上の 6 タイプについて行った。ブラケットは、板厚は全て 22mm を使用し、定着面断面の幅 1.50m、高さ 0.55m、水平部分の長さが 1.20m で鉛直リブが 4 枚溶接された構造である。ブラケットの取り付け状況の概要を写真-1 に示す。実験ケース一覧を表-1 に示す。

ここで、それぞれのタイプにおいて床版との打ち継ぎ目処理方法が異なるが、いずれのタイプの実験においても摩擦係数として 0.6 以上が確保されており、床版とのずれが生じることはなかった。これより今回の実験において打ち継ぎ目処理の相違による影響は小さいと判断できるので、今回の実験では考慮しないものとする。タイプ B1h 実験後に同じ試験体を用いて B1h' を、タイプ B2h 実験後に B2 を行った。ブラケットの補強とは、定着面側に鋼板とコンクリートのサンドイッチ構造で 78mm 増厚し、定着面側の剛性を高めたものである。

2. 2. 2 下床版大容量定着突起実験

下床版突起は、230mm と薄い床版とウェブに接合するタイプであり、弾性解析では突起定着面接合部分の床版とウェブに大きな応力が発生する結果が算出されていることより、この部分の発生応力の軽減を目的に、突起を拘束する条件をパラメータとした。以下にタイプおよびその記号を示す。形状の概要を図・6 に示す。

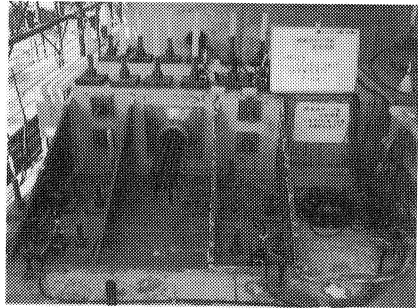
- ① 補強リブの無いタイプ (N)
- ② 水平リブで補強されたタイプ (H)
- ③ 鉛直リブで補強されたタイプ (V)
- ④ 水平鉛直リブで補強されたタイプ (VH)

突起部の補強鉄筋は D22 を使い、タイプ N と同等となるように他のタイプの配筋を決めている。補強鉄筋は密に配置しているため、通常用いられるスパイラル筋は省略している。写真・2 にその一例を示す。水平リブは厚さ 400mm とし、鉛直リブは厚さ 350mm とした。現設計においては、外ケーブル偏向のため水平リブを設ける構造としている。

2. 3 試験体プレストレス

試験体に導入するプレストレスは、実設計において最も厳しい条件を再現するように設定した。橋軸方向には、橋面外ケーブル定着突起実験で 2.0 N/mm^2 、下床版大容量定着突起実験で 1.0 N/mm^2 の軸力をそれぞれ導入し、橋軸直角方向には、実設計と同様に上床版部に 3.0 N/mm^2 を導入し、下床版は RC 構造としている。

橋面突起鉛直締め PC 鋼材 ($\phi 36$) は、導入緊張力を 600 kN/本 、ブラケット鉛直締めおよび水平固定 PC 鋼材 ($\phi 26$) は、導入緊張力を 350 kN/本 とした。

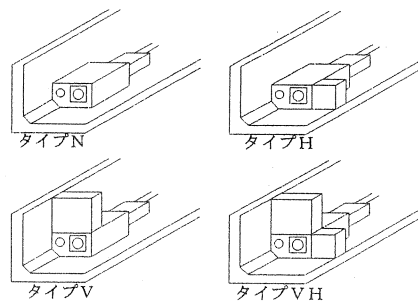


写真・1 ブラケット取付状況(タイプ B2h)

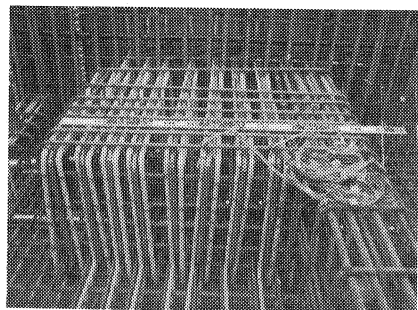
表-1 実験ケース一覧表

記号	ブラケットの有無	水平固定の有無	ブラケット補強の有無	打ち継ぎ目処理方法
N	無	---	---	エキスパンドメタル処理
OB1	有	無	無	ぼろ目処理
B1h	有	有	無	エキスパンドメタル処理
B1h'	有	有	無	エキスパンドメタル処理
B2h	有	有	有	一体打ち処理
B2	有	無	有	一体打ち処理

(注) "B1h" のみ、突起鉛直締め PC 鋼材緊張力を計画の半分 (300 kN/本) として載荷する。



図・6 下床版大容量定着突起実験要因



写真・2 突起部配筋状況 (タイプ H)

2. 4 実験方法

2. 4. 1 橋面外ケーブル定着突起実験

中間隔壁と突起との間に外ケーブル(19S15.2)を配置し、突起部分は定着具でケーブルを固定し、中間隔壁側定着部に緊張ジャッキを設置し、隔壁を反力として緊張力を載荷した。載荷荷重は、設計荷重 ($0.7P_u = 3500\text{kN}$, P_u : 鋼材引張荷重) まで漸増載荷を行い、その状態のまま 20 時間以上荷重を保持した後、荷重除荷を行った。その後、終局荷重 ($P_y = 4250\text{kN}$, P_y : 鋼材降伏点荷重) までの漸増載荷を行った。載荷の各段階において、ひび割れ観察およびひずみ、変位の計測を行った。

2. 4. 2 下床版大容量定着突起実験

中間隔壁と突起との間に外ケーブル(27S15.2)および内ケーブル(12S15.2)を配置し、橋面外ケーブル定着突起実験と同様な載荷方法としている。載荷は、内ケーブルを設計荷重 ($0.7P_u = 2700\text{kN}$) まで緊張後、外ケーブルを設計荷重 ($0.7P_u = 5000\text{kN}$) まで漸増載荷を行い、その状態のまま 24 時間以上荷重を保持した後、内・外ケーブルの荷重除荷を行った。その後、内ケーブルを設計荷重まで緊張し、外ケーブルは終局荷重 ($P_y = 6000\text{kN}$) までの漸増載荷を行った。載荷の各段階において、ひび割れ観察および計測を行った。

3. 実験結果

3. 1 橋面外ケーブル定着突起実験

3. 1. 1 ひび割れ状況

各タイプについてひび割れ発生状況を比較すると、タイプNは突起定着背面側に橋軸直角方向突起全長に渡ってひび割れが発生し、その最大ひび割れ幅は 0.06mm を示した。床版上面の定着側にも、ひび割れが発生している。タイプ 0B1 もひび割れはタイプ N と同様な発生状況であった。他のタイプについてはひび割れはほとんど発生せず、そのひび割れ幅は 0.04mm 以下であり、床版上面にひび割れは確認されなかった。以上のことより、ブラケットの使用法によりひび割れの発生を効果的に力抑えることが出来ると言える。

3. 1. 2 床版鉄筋応力度

図-7 に外ケーブル軸線突起直下における床版橋軸方向上側の鉄筋応力度と載荷荷重の関係を示す。図-7 より、緊張荷重 $P=350\text{tf}$ における各タイプの鉄筋応力度を比較すると、タイプNとタイプ 0B1 の結果はほぼ同等であり、タイプ 0B1 ではブラケットの補強効果が見られない。これに対し、その他のタイプは両者に比べ約 $1/4 \sim 1/7$ の発生応力であった。ブラケットの補強方法によりその効果は、大きく異なることが言える。

3. 1. 3 ブラケットの変形

図-8 にブラケットの定着面と水平部材をつなぐ鉛直リブの内、定着面に近い側の位置での突起との相対変位を測定した結果を示す。この図より、タイプ B1h に比べタイプ B2 および B2h の変位量が小さいことがわかる。この位置において変位量が大きいということは、鉛直リブを通じて水平部材に力が伝達されていないことになる。このことより、補強されていないブラケットで水平固定するよりブラケットを補強したものの方が、効果的に力の伝達が行われていると考えられる。補強ブラケットの中で、水平固定したもの (B2h) が水平固定なし (B2) より変位量が小さいことから、タイプ B2h の方がより良いと言えるが、この二つのタイプに大きな差はないと言える。

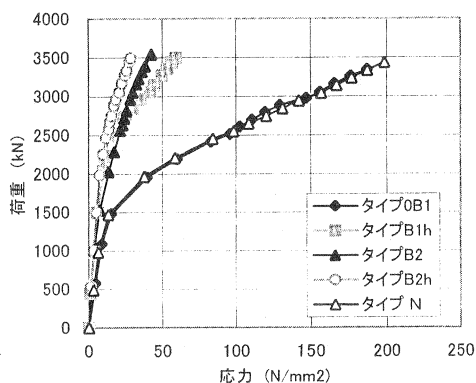


図-7 荷重—鉄筋応力の関係
(突起ケーブル軸直下床版軸方向鉄筋)

3. 2 下床版大容量定着突起実験

3. 2. 1 主応力

突起および下床版上面に貼付した3軸ゲージから得られた主応力の方向と大きさについて、各タイプの比較を図9に示す。このときの外ケーブルの緊張荷重は $P=2000\text{kN}$ であり、ひび割れが生じていない状態を選定した。この図より、突起定着前面の下床版部は軸方向に応力が作用していること、突起上面は鉛直リブのないタイプNおよびHの場合ケーブル軸近傍に大きな応力が発生していること、鉛直リブの有るタイプVおよびVHは鉛直リブ背面のウェブ近傍に大きな応力が発生していることがわかる。これらの傾向および作用方向は、FEM 弾性解析の結果と同様であった。しかし、突起上面に対し下床版の値が小さいことなど、解析結果と異なった点も見られた。これらの結果より、FEM 解析結果と実験値は突起部分については比較的精度が良い傾向を示しているが、床版部、特に解析結果では最大主応力を示す突起定着前面の床版上面については発生応力が解析値より小さい傾向を示していることが認められる。

3. 2. 2 ひび割れ状況

突起部では上面において、タイプNは $P=3000\text{kN}$ でひび割れが発生し、 $P=5000\text{kN}(0.7P_u)$ で最大ひび割れ幅は 0.10mm であった。タイプHは $P=4500\text{ kN}$ でひび割れが発生し、 $P=5000\text{kN}$ で最大ひび割れ幅は 0.06mm であった。タイプVおよびVHは $P=5000\text{kN}$ においてもひび割れの発生は見られなかった。

下床版では下面において、タイプNおよびVは $P=2500\text{kN}$ で、タイプHおよびVHは $P=3000\text{kN}$ でひび割れが突起側面近傍から発生し、緊張力の増加と共に徐々に広がった。下床版下面のひび割れ状況を図10に示す。

この図より、水平リブの無いタイプNおよびVは、ひび割れ範囲が広く定着面から橋軸方向に約 3m 近くまで発生しているのに対し、水平リブを有するタイプHおよびVHは、定着面から約 2m 範囲にとどまっている。また、下床版上面にも、範囲は狭いものの同じ方向にひび割れが発生した。これらのひび割れ状況から判断すると、突起自体のひび割れに対する補強としては鉛直リブが有効であり、床版に対する補強としては水平リブが効果的であることが認められる。

さらに、突起部上面および下床版下面いずれのひび割れも、 $P=6000\text{kN}(P_y)$ 作用時においても範囲および幅がわずかに進展する程度で大きな損傷には至っていない。このことより、今回検討した突起形状および補強筋の配置によれば、定着体としての耐力は十分に有しているものと思われる。

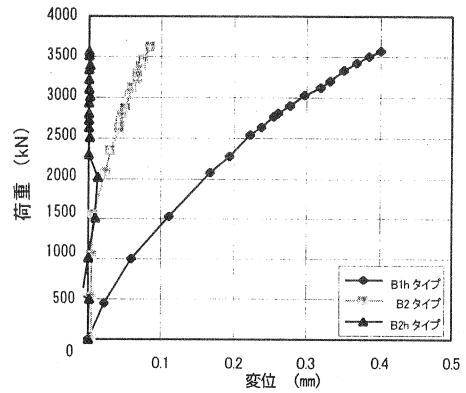


図-8 ブラケットの変形
(内側鉛直リブ部と突起との相対変位)

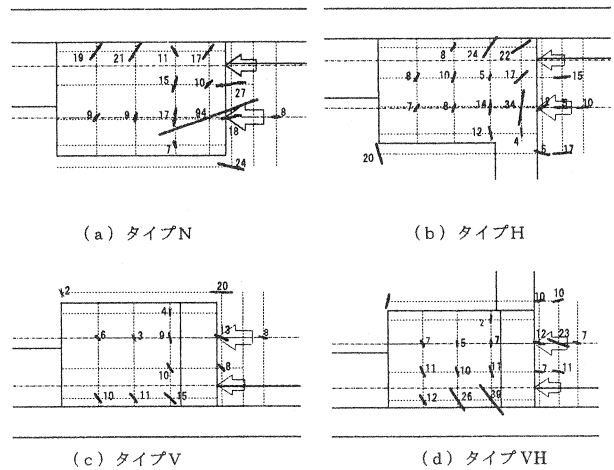
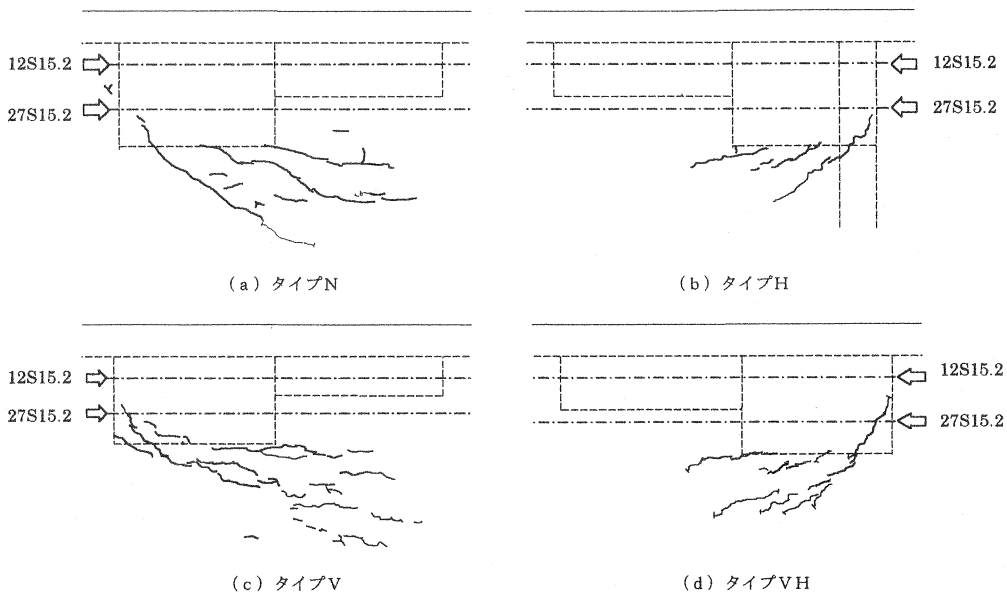


図-9 突起上面および下床版上面主応力線図($P=2000\text{kN}$ 載荷時)



図・10 下床版下面ひび割れ図 (P=5000kN 載荷時)

4. まとめ

本実験の範囲内において、以下の結論が得られた。

- (1) 橋面外ケーブル定着突起実験では、橋面突起をブラケットで補強することによって床版に発生する部分的な過大な応力を分散し低減する効果があることが認められた。ただし、低減する効果を期待するためには、単にブラケットを設置するのではなく、ブラケットが突起の定着面においても単独に過大な変形することの無いように、水平固定するかまたは定着面の剛性を高める必要がある。

実施工では施工性の良い接合面の剛性を高めたタイプ (B2) を採用した。

- (2) 下床版大容量定着突起実験では、突起に対するリブの効果は、突起自体のひび割れに対する補強としては鉛直リブが、床版に対する補強としては水平リブが効果的であることが認められた。

また、今回検討した突起形状および補強筋の配置によれば、定着体としての耐力は十分に有している。

実施工では床版が薄いことを考慮し、外ケーブルの偏向部も兼ねられる水平リブ補強を採用した。

今後の課題として、弾性FEM解析において定着突起近傍の床版部における最大主応力発生位置など、いくつかの点について実験結果とに相違点が認められるので、弾塑性FEM解析も検討しながら精度の向上を図っていきたい。