## 論文 三次元格子等価連続体化法による PC 定着部の破壊解析

牧 真也<sup>\*1</sup>・Kongkeo PHAMAVANH<sup>\*2</sup>・伊藤 睦<sup>\*3</sup>・田辺 忠顕<sup>\*4</sup>

要旨:プレストレストコンクリート(PC)橋梁を設計する際,緊張材の定着突起部には十分な注 意を払わなければならない。外ケーブル工法を用いる際,定着突起が必ず必要であり,その近辺 の挙動が構造物全体の耐力に大きく影響してくる。近年,この外ケーブル工法を適用した PC 橋 梁の合理化に関する研究が進められているが,未だ定着突起近辺の破壊性状などが明らかにされ ていないのが現状である。本研究では,三次元格子等価連続体化法 RC 構成式を構築し,PC 箱桁 定着部の破壊解析を行うとともに,予測された解析結果に基づき考察を行った。 キーワード:三次元格子等価連続体化法,外ケーブル工法,定着突起

#### 1. 序論

PC 橋梁の上部工断面に外ケーブル方式を用 いてプレストレスを導入する際には,桁断面の 下床版か上床版への定着突起が必ず必要となる。 定着突起部の安全性照査については、日本道路 公団監修の「PC橋の耐久性向上に関する設計施 エマニュアル」の中 5.4.3 定着部の構造と補強の 条項で、「定着部には、定着部の安全性を確保で きるよう,FEM 解析により十分な補強鉄筋を配 置しなければならない。」とあるだけで,どのよ うにして安全性を照査したらよいかの具体的な 方法については,記述がない。現状では,定着 部近辺を取り出した,三次元の弾性有限要素解 析により,最大引張応力を検出し,そのレベル をある許容値以内に納めると同時に,定着突起 の底面の全せん断力が伝達されるように考慮し ているようである。その方法としては,土木学 会コンクリート示方書のせん断伝達の耐荷力式 から,伝達力を算出して弾性解による全せん断 力量と比較照査する方法が取られている。

このような安全照査の問題点を挙げると,定 着突起部から,一点集中力がフランジを通して, 断面全体に分散され有効なプレストレス状態に

なるその間の部材各部の安全性照査が曖昧にな っている点である。また,定着部近辺の局部的 な弾性解析は,局部に限っても真の耐荷力を明 らかにしていないため,真の安全余裕度がどの 程度になっているか不明である。その結果,過 剰設計を行っているか,あるいは危険側設計に なっているか不明となる。総合的な観点では, これらの定着突起部の設計は性能設計としては 不十分であり,更に改善の余地がある。改善法 として,非線形解析を行うことにより,定着突 起部の最終破壊形態,最大耐荷力などを算出す ることができると考えられる。本研究では,格 子等価連続体化法 <sup>1)</sup>を三次元に拡張し, 定着突 起が異なる位置に配置された箱桁の耐荷力実験 <sup>2)</sup>を解析,その最大耐荷力や破壊性状などにつ いて考察し、PC 箱桁設計における今後の課題に ついて検討した。

#### 2. 解析モデル

#### 2.1 解析モデルの概要

格子等価連続体法<sup>1)</sup>とは,コンクリートと補 強筋による耐荷機構をモデル化した Main lattice 成分と,ひび割れ面におけるせん断伝達をモデ

\*1 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (正会員)
\*2 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 工修(正会員)
\*3 名古屋大学大学院助手 工学研究科 土木工学専攻 工博(正会員)
\*4 名古屋大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻 工博(正会員)



図 - 1 格子等価連続体化法構成式の概要と一軸応力 - ひずみ関係

ル化した Shear lattice 成分を,ひび割れ面座標 系に想定することにより RC 構成式を構築する。 本研究では,これを三次元に拡張し,定着部破 壊解析を行った。以下に本構成式の定式化の概 略を示す。

## (1) Main lattice による剛性

図 - 1 に示すように,配筋された補強筋とひ び割れが発生したコンクリートの耐荷機構を, 補強筋,コンクリート格子成分でモデル化する。 定式化の上で,これら格子成分は Smeared out され,最終的に Main lattice による[D]マトリク スは,次式で与えられる。

 $\Delta \{ \boldsymbol{\sigma}_{g} \} = [L_{\boldsymbol{\sigma}}]^{T} [R_{n}] [L_{\boldsymbol{\varepsilon}}] \Delta \{ \boldsymbol{\varepsilon}_{g} \} = [D_{main}] \{ \boldsymbol{\varepsilon}_{g} \} (1)$ 

ここで,  $[L_a] \geq [L_{\varepsilon}]$ は, それぞれ全体座標系 から各格子成分方向への応力とひずみの変換マ トリクスである。また,  $[R_n]$ は, 各方向の格子 成分の一軸剛性をまとめたものである。なお, 本定式化は, 任意多方向配筋を許容し, 必ずし もコンクリート格子成分の直交性を規定しない。

## (2) Shear lattice による剛性

Shear lattice 成分は,ひび割れ面の噛み合わせ により伝達されるせん断応力と直圧縮応力を評 価するものである<sup>3)</sup>。図 - 1 に示すように,Shear lattice はひび割れ面の凹凸面に垂直方向に想定 され,ひび割れ面の噛み合わせにより伝達され るせん断応力と直圧縮応力に対する剛性は,全 体座標系とひび割れ面座標系  $(\xi - \eta - \zeta)$ の応 力,ひずみを関連づけるマトリクス  $[T_{\sigma}]$ ,  $[T_{\varepsilon}]$ ,  $(\xi - \eta - \zeta)$ 系と Shear lattice 方向の応力,ひず みを関連付けるマトリクス  $[T_{\sigma,s}]$ ,  $[T_{\varepsilon,s}]$ , Shear Lattice の一軸剛性  $[D_u]$ ,及び Shear Controlling Matrix  $[\Omega]$ の積により次式で与えられる。  $[D_{shear}] = [T_{\sigma}]^r [\Omega] [T_{\sigma,s}]^r [D_u] [T_{\varepsilon,s}] [\Omega] [T_{\varepsilon}]$  (2) 以上から,格子等価連続体化法による RC 構成 式は,コンクリートの直応力成分,補強筋の耐 荷機構をモデル化した Main lattice による剛性 と,ひび割れ面でのせん断伝達機構をモデル化 した Shear lattice による剛性の和として,次式で

[D]=[D<sub>main</sub>]+[D<sub>shear</sub>] (3) 2.2 材料モデル (1) コンクリート引張モデル

プレーンコンクリート領域の応力 - ひずみ関 係には,引張軟化曲線である 1/4 モデルと破壊 エネルギー(100N/m)を導入した。また補強筋と の付着が期待される領域には,Tension Stiffening Modelを仮定した。

(2) コンクリート圧縮モデル

与えられる。

応力が圧縮強度に到達する前は,2次放物線 で応力が増加し,ひずみ軟化領域には,解のメ ッシュ寸法依存性を軽減するために,中村らが





写真 - 1 実験体概要 図-3 解析モデル

Section

h-h'

提案する圧縮破壊エネルギー<sup>4)</sup>を導入した。ま た,ひび割れ発生による圧縮強度の低下をモデ ル化するために Collins らが提案する圧縮軟化 係数を導入した。

## (3) 鉄筋モデル

2100

8

軸方向鉄筋の平均応力 ひずみ関係には Abdeldjelil BelarbiとThomas T.C.Hsuらの平均引 張応力 ひずみ関係 5を仮定した。

## 3 解析対象

### 3.1 実験の概要

本研究では,国土交通省土木研究所(現国土 技術政策総合研究所)と(社)プレストレスト・ コンクリート建設業協会との共同研究である外 ケーブル定着体破壊実験<sup>2)</sup>を解析対象とした。 実験では 幅員 10.0m 桁高 3.0m,下床版幅 5.0m, ウェブ厚 0.4m, 下床版厚 0.25m の想定断面に,

19S15.2(SWPR7B)の外ケーブルでプレストレス を与えている。実験供試体は,実橋の1/2スケ ールとし,断面寸法は下床版 2.5m,ウェブ厚 0.2m, 下床版 0.125m としている。実験供試体 の概要図を図 - 2及び写真1に示す。供試体は, 定着突起の配置をウェブから離れた位置に定着 した TYPE-A とウェブと下床版の隅角部に配置 した TYPE-B の二つ行われている。TYPE-A, TYPE-B はそれぞれ 1.0m, 0.5m であり, コンク リートには設計基準強度  $\sigma ck = 40 \text{N/mm}^2$  を使用, 鉄筋は SD295A となっている。外ケーブルは, 19S15.2 の 0.7 o pu 時緊張力 P=3430kN を想定し, 実験では F200T(SEEE 工法)が使用された。実験 は,供試体を支間約4.0m程度で単純支持し,緊 張ジャッキにより外ケーブルに直接プレストレ スを与える方法で行われた。供試体後方にマス コンクリートを置き,ゴム板を介して軸方向を



支持されている。

緊張力は,プレストレス導入直後0.7*σ pu*相 当の緊張力(P=868kN), PC 鋼材の第2降伏点 である0.93*σ pu*相当の緊張力(P=1153kN)を着 目点とし,一旦0.93*σ pu*相当まで漸増させた後, 緊張力を開放している。その後,破壊性状を確 認するため緊張力を1.1*σ pu*相当(P=1350kN) まで緊張力を漸増させている。

なお変位計は定着突起の 30cm 前方の下床版 上に設置されており,定着突起上部の変位を計 測している。

## 3.2 供試体のモデル化

図 - 3 に解析モデルを示す。2 方向対称性を考慮して,解析モデルを供試体の 1/2 とした。定着体載荷板を剛体とし,中心を変位制御で一点載荷することにより,PushOver解析を行った。 変位は変位計測点である定着突起上部の変位から変位計が設置されている点の変位を除した相対変位とした。

# 4. 実験及び解析結果

## 4.1 実験結果

TYPE-A は, P=200kN で定着突起からハンチ に向かって下床版にひび割れが確認されている。 その後,緊張力の増加とともにひび割れが進展 していき,P=1020kN 載荷された時点で,下床 版が剥離し,緊張力が降下したと報告されてい る。TYPE-B は,P=700kN でひび割れが確認さ れている。載荷が P=1153kN に達すると定着突 起本体にもひび割れが確認された。最大ひび割 れ幅は約0.1mm である。しかし,実験は安全性 確保を原因に途中で中止されたため,その最大 耐荷力,最終的な破壊形態などは未知のままで ある。

## 4.2 解析結果

図 - 4,図 - 5,図 - 6,図 - 7にそれぞれ TYPE-- A・B ソリッド解析結果,変形図,ピーク後 のひび割れ進展状況, TYPE-A シェル解析結果 を示す。



(1) TYPE-A

解析は、変位、耐荷力ともに実験値を精度良 く評価できている。また耐力が低下していくポ ストピーク挙動も得られている。本解析では鉄 筋は分散モデルとして取り扱っているため,純 粋なひずみ量の評価には適していないと考えら れるが,ここでは8つのガウス点(八節点アイ ソパラメトリック要素)の平均値を取る手法を 取った。これにより定着突起直下,下床版に埋 め込まれている軸方向鉄筋ひずみを求めた結果, 荷重 - 鉄筋ひずみ関係を精度良く評価できてい ることが確認された。(図-4(b)) 変形図から は,定着部とウェブ間のせん断変形を予測でき ている事が見受けられる。図-7 にシェル要素 を用いて解析した結果を示す。解析では剛性を 過小評価しているものの,耐荷力は実験値と良 く一致する結果となった。載荷軸直交方向スタ ーラップのひずみを調べ,定着突起前方からウ ェブにかけて,鉄筋ひずみが卓越している要素 が斜めに並んでいる事を確認した。定着突起の 下床版からの剥離が完全に起こりえないシェル 要素を用いた解析と三次元アイソパラメトリッ ク要素を用いた解析では同様の耐荷力を予測す る結果となった。これらにより, TYPE-A は, 突起部とスラブとの接合部での変形が定着突起 に集中しているものの,最終的には定着突起か らウェブに広がるせん断破壊で破壊に至るので

はないかと考えられる。しかし,厳密には断定 できず,まだ検討の余地がある。

(2) TYPE-B

TYPE-B 供試体では TYPE-A 供試体の二倍程 の耐荷力を予測する結果となった。荷重 - 変位 曲線では,負方向に変形が進むが,これは変位 計測点と変位計設置位置の相対変位を取ってい ることに起因する。定着突起中央の載荷版が定 着突起にめり込んで行き,定着突起上部が負方 向に張り出してくるため,相対変位が負の値と なっているのである。ここで破壊性状を推測す るため,図-8に定着突起の代表的な要素a,図 -9 に荷重 - 軸ひずみ関係, せん断ひずみ関係 を示す。荷重 - 軸ひずみ関係では耐力がピーク に達した後,軸ひずみが低下していく結果が得 られたのに対し,荷重-せん断ひずみ関係では ピーク後,せん断ひずみが卓越していく。同様 の結果が定着体突起とウェブの結合部分にあた る要素にも見られる。これらのひずみ挙動より, 本供試体の破壊性状は,定着部と下床版,ウェ ブ間のスリップ(せん断)破壊であると考えら れる。本解析では、ポストピーク領域における 破壊の局所化は,定着部全面に見受けられる。

#### 5. 考察

定着突起配置の影響を照査するため, TYPE-A, TYPE-Bの解析結果を比較した。定着 突起が偶角部に配置された TYPE-B は,下床版 の中央に配置された TYPE-A に比べ最大耐荷力 が約2倍となった。TYPE-A では定着突起-ウ ェブ間のせん断で破壊に至り, TYPE-B では定 着突起が剥離したと考えられることから, TYPE-A と TYPE-B は破壊性状も異なる。これ らより定着突起の配置が PC 定着体の耐力,破 壊性状に大きな影響を及ぼす事が確認された。 今後も様々な解析を通じて,条件に応じた最善 な解析モデルを見出し,現実の設計の中で有益 な設計指標を示す必要がある。

## 6. 今後の課題

本研究で解析対象とした PC 定着部破壊実験 <sup>2)</sup>は,未だ解明されていない定着突起近辺の破 壊性状を照査することができる,稀少であり, 大変貴重な実験である。今後もこのような実験, そして解析を行っていくことにより,PC 橋梁の 安全設計性,施工性,経済性を高めることがで きると考えられる。本解析を通じて得られた定 着部の実験及び解析におけるいくつかの改善点 を下記に示す。

将来の設計に貢献するための実験を行う際、 その実験供試体は限りなく実構造物に近い物が 望ましい。今回行われた実験では,供試体とマ スコンクリートの間にゴム板を用いている事に より,支持方向の境界条件が不明確となった。 また供試体後方に壁がつけられているが,実在 の箱桁では定着体突起と後方の壁が 3m という 近距離に配置されているとは考えにくい。実験 供試体を実在する構造物に近づける事により、 より正確に箱桁の挙動,破壊性状,最大耐荷力 を予測し,PC橋設計の助力となると考えられる。 解析では計測不可能なピーク領域も解析によっ て予測可能であるが,解析モデルの限界や,膨 大な計算量といった問題は回避できない。そこ で一つのモデルに固執せず,設計目標にあった モデルで 様々なケースを解析することにより, 信頼おける解析が得られると考えられる。

### 7. 結論

PC 橋梁を設計する際に重要となる PC 定着部

付近の破壊性状,耐荷力は未だ明確にされてい ない。西川らによる実験<sup>1)</sup>と本解析を行うこと により,次の二つの結論が得られた。

・本解析を通して,三次元格子等価連続体化 法は,TYPE - A においては最大耐荷力,変位, 定着部下部の軸ひずみを精度良く評価でき, TYPE - B においては,実験では計測不可能であ った最大耐荷力を推測するに至った。

・PC 箱桁はそのケーブル定着部の配置,配筋 量,定着突起と下床板との結合力などによって, 破壊性状,最大耐荷力などが異なってくる事が 確認された。本解析に基づけば,TYPE - A は定 着突起からウェブへと伝達するせん断で破壊に 至り,TYPE - B は定着突起が下床版から剥離す るという破壊性状が推測された。

## 参考文献

- Tada-aki, Tanabe, Ahmad Syed Istiaq: Development of Lattice Equivalent Continuum Model for Analysis of Cyclic Behavior of Reinforced Concrete, Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads Volume2, pp.105-123, 1999.10.
- 西川和廣,廣松新,伊藤公彦:外ケーブル 定着突起の形状および配筋に関する研究, 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,pp.781-786,2001
- 舟田武, S.I.Ahmad,田辺忠顕:格子等価連 続体化法によるひび割れ面のせん断伝達 モデル,コンクリート工学年次論文集 Vol.23, No.3, pp1003-1008, 2001
- 4) Nakamura H . and Higai T .: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Load, ASCE, 2001
- 5) Belarbi Abdeldjelil, T. C. Hsu Thomas : Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete, ACI Structural Journal, pp.465-474, 1994.