

報告 鋼ポータルラーメン橋隅角部の静的載荷実験と解析評価

塩永 亮介^{*1}・川辺 篤宣^{*2}・山田 菊雄^{*3}・杉本 憲生^{*4}

要旨：鋼ポータルラーメン橋は、鋼ラーメン桁の橋台部に鉄筋コンクリートを巻き立てた合成構造である。隅角部の鋼桁とコンクリートの合成に用いたスタッドジベルの配置については、FEM 解析で算出したせん断力分布から決定する設計法を適用した。そのため、隅角部モデル試験体による静的載荷実験を行い、本設計法の妥当性を検証するとともに隅角部の耐荷性能を確認した。さらに実橋設計への適用例についても報告する。

キーワード：鋼ポータルラーメン橋、ずれ止め、静的載荷試験、FEM 解析

1. はじめに

鋼道路橋における構造の簡素化、コスト縮減を目指した構造の一つとして、鋼桁と橋台を剛結した鋼ポータルラーメン橋が挙げられる。支承や伸縮装置を省略できる上下部一体構造とすることで、初期建設費や維持管理費が縮減されるほか、耐震性や走行性の向上も図れるなどの多くの優位性を持つ橋梁形式である。

一方、このような鋼コンクリート複合構造では、鋼部材とコンクリートの合成方法が設計的課題として挙げられる。両部材の合成には、今回頭付きスタッドジベル（以下、スタッドと記す）を採用することとしたが、既往の設計手法¹⁾に基づけば鋼桁フランジおよびウェブ上のスタッドが過密な配置となりうるという危惧があった。そこで著者らは、ずれ止めの設計に FEM 解析を適用し、せん断力分布に見合った合理的なスタッド配置とする設計法を採用した。本稿では、本設計手法の妥当性を検証するために実施した隅角部モデル試験体による静的載荷試験結果と、実橋への適用事例について報告する。

2. 実験概要

載荷試験の概要図を図-1に示す。試験体の

縮尺は実橋の約 1/3 とし、隅角部をモデル化した試験体を用いて静的載荷試験を実施した。試験体は内部鋼材のスタッド配置を既往の設計法で決定した（TYPE A）と FEM 解析によって決定した（TYPE B）の 2 体を製作した。実験の目的としては、以下の 2 点である。

- ・ FEM 解析を用いたスタッド設計手法の妥当性の検証
- ・ 鋼ポータルラーメン構造隅角部の耐荷性能、変形性能の確認

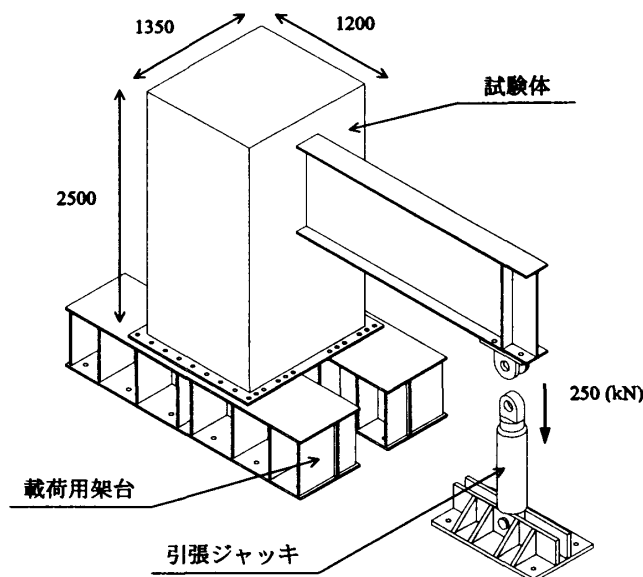


図-1 載荷実験概要

*1 石川島播磨重工業（株） 基盤技術研究所（正会員）

*2 " 橋梁事業部 設計部

*3 日本道路公団 中部支社 建設第二部構造技術課

*4 " 建設第一部企画調査課

試験体底面は架台を通して反力床に固定し、鋼桁の先端を鉛直載荷することで、隅角部に曲げモーメントを作用させる載荷方法とした。上方からの鉛直載荷では鋼桁が偏心する可能性があるため、引張ジャッキにより引き下ろす載荷方法をとした。

3. 試験体の設計

本供試体の設計荷重は、鋼桁下フランジの局部座屈を先行させるようフランジの許容応力をもとに橋台の中心軸から 3.0m の位置へ鉛直荷重 250kN を載荷するものとした。鋼桁部は曲げとせん断を受ける片持ち梁として照査し、橋台躯体コンクリート部は内部の鋼支柱フランジを鉄筋換算し SRC 構造として設計した。実験供試体図を図-2 に示す。ずれ止めの設計（スタッドの配置）については、TYPE A および TYPE B で以下のように分かれる。なお、使用するスタ

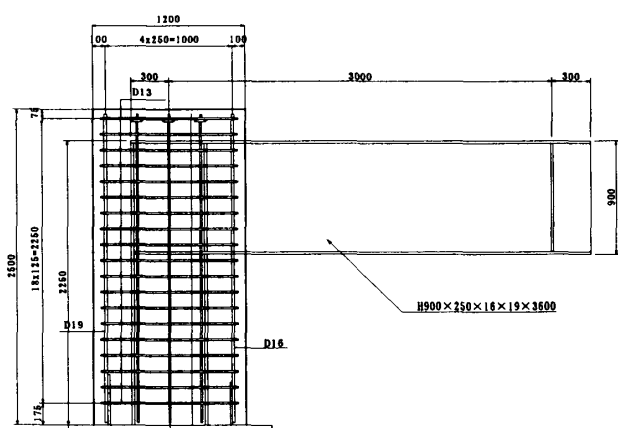


図-2 実験供試体図

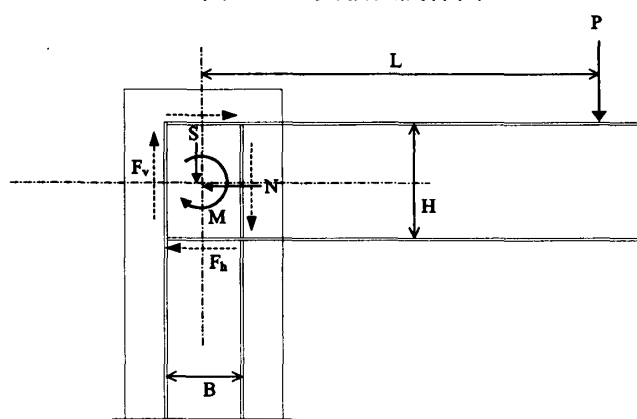


図-3 作用断面力

ッドは実橋ではφ22×150mm 程度であるが、試験体の縮尺を考慮してφ13×100mm を用いている。

TYPE A は既往の設計法¹⁾に準じた。設計方針としては、隅角部に作用する設計断面力を鋼とコンクリートの分担率で分け、コンクリートが分担する断面力相当分をスタッドが確実に伝達できるように設計する。ここで、鋼とコンクリートの分担率は、引張側の鉄筋と鋼支柱フランジの断面積比から算出する。また曲げモーメントに対してはフランジに配置したスタッドで力の伝達を負担し、軸力およびせん断力に対してはウェブに配置したスタッドで負担するものとしている。これらの方針をもとに、スタッド必要本数の算出は、フランジとウェブについて式(1)、(2)で表される。これらの式に用いた断面力の作用位置は図-3に示す。

$$n_f = \frac{F_h}{Q_s} \times \alpha \quad (1)$$

$$n_w = \frac{S+N}{Q_s} \times \alpha \quad (2)$$

ここに、 $F_h=M/H$ ：曲げモーメントによるフランジ力、 Q_s ：スタッドの許容せん断力、 α ：コンクリートが受け持つ分担率である。スタッド1本あたりの許容せん断力は、道路橋示方書・同解説に準じて算定し、またコンクリートの断面力分担率は以下の式(3)より算出する。

$$\alpha = A_s / (A_s + A_p) \quad (3)$$

ここに A_s ：引張側の鉄筋の断面積、 A_p ：引張側の鋼桁フランジの断面積である。また、鋼支柱フランジのスタッドについても、 $F_v=M/B$ を用いて同様に必要本数を算出する。

TYPE B は3次元 FEM 解析によるスタッド配置の設計法である。鋼桁に接しているコンクリート要素のせん断応力を求め、要素面積との積から境界面のせん断力分布を算出し、これに見合った必要本数を算出する。実験供試体の FEM 解析モデルを図-4に示す。コンクリートはソリッド要素、鋼桁や底板はシェル要素とした。両者は境界面で共有節点を有する剛結条件とし

ているため、このモデルでは鋼とコンクリートのずれ特性が考慮できない。そのためずれ止めのモデル化に関する既往の報告²⁾をもとに、コンクリート要素のうち、図-4の右上図に示す各フランジ面からスタッド高さ ($h=100\text{mm}$) までの要素のせん断弾性係数を、要素内に含むスタッドのせん断弾性係数と等価とする仮想せん断弾性係数を用いることで、簡易的にずれ特性を考慮させた。

$$S = \gamma \cdot G_{st} \cdot A_{st} = \gamma \cdot G'_c \cdot A_c \text{ より}$$

$$G'_c = (A_{st} / A_c) \times G_{st} \quad (4)$$

ここに、 γ ：要素のせん断ひずみ， G'_c ：鋼桁に接するコンクリート要素の仮想せん断弾性係数， G_{st} ：スタッドジベルのせん断弾性係数， A_c ：コンクリート要素の断面積， A_{st} ：コンクリート要素の境界面内にあるスタッドの断面積である。なお、仮想せん断弾性係数を考慮させる要素の縦弾性係数 E'_c も、コンクリートのポアソン比 $\mu=0.17$ と一定であるため、以下の式(5)で置き換えた。

$$E'_c = G'_c \cdot 2(\mu + 1) \quad (5)$$

以上の要素特性を考慮し、設計荷重を桁端部に作用させた FEM 解析結果から各境界面のせん断応力を算出し、さらにフランジ上の要素面積との積からせん断力分布を求める。図-5 (a) に鋼桁上フランジ、図-5 (b) に鋼支柱フランジのせん断力分布の算出結果を示す。鋼桁上フランジでは、抜け出し側でせん断力が突出しており、鋼支柱フランジでは、上部の方が比較的せん断力が大きい。これらの解析結果よりスタッド 1 本あたりの許容せん断耐力をもとに、せん断力の大きなエリアには密に、せん断力が小さなエリアには疎にと合理的な配置に設計できる。

TYPE A および TYPE B の試験体の設計法にて決定されたスタッド配置図を図-6 に示す。TYPE A はフランジ幅方向に 4 本と一様の配置にあるのに対し、TYPE B ではせん断力分布をもとに 2, 4, 6 本と分布したスタッド配置となった。これよりスタッド数量としては、TYPE B は TYPE A に比べ約 3 割削減となった。

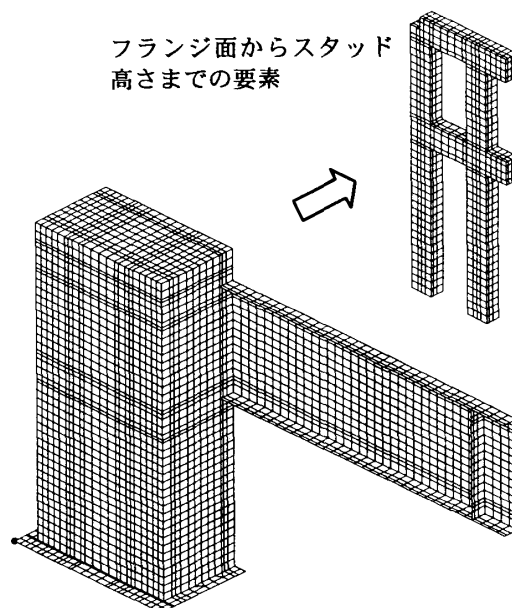


図-4 FEM 解析モデル

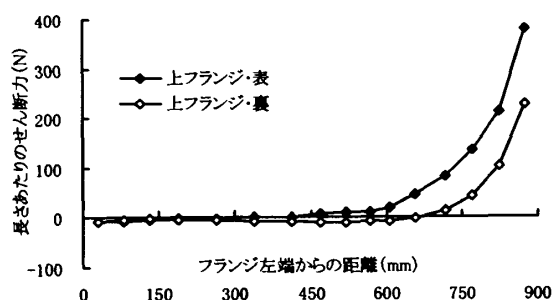


図-5 (a) 鋼桁フランジのせん断力分布

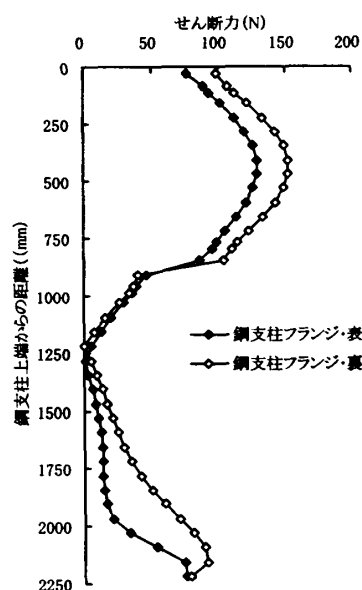
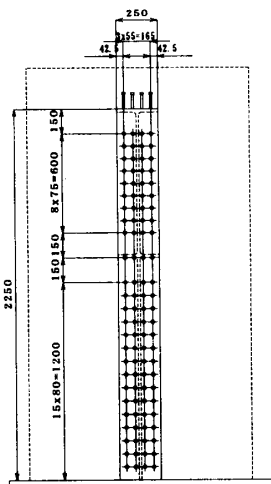


図-5 (b) 鋼支柱フランジのせん断力分布



TYPE A 試験体

TYPE B 試験体

図-6 試験体のスタッド配置

図-7 試験体計測項目

圖-8 荷重—變位關係

図-9 鋼桁の抜け出し量

計測結果である。TYPE A のスタッド配置のひずみでは、載荷点から離れた後列側にあるスタッドのひずみ (ST5,ST6) が小さく前列側と差があるものに対し、TYPE B では各スタッドのひずみ値がほぼ同傾向で表れている。これは各スタッドが均等な力を受け持ち鋼桁に働く力を効率的にコンクリート側へ伝達していると考えられる。またもっとも高いせん断力が働く最前列の ST2 のひずみで比較すると、TYPE B では TYPE A に比べてひずみが大きく抑えられており、鋼とコンクリートの一体化 (合成) がより図られている。この結果が変形性能や鋼桁の抜けだし量の差になっていると思われる。逆に後列側を考えれば、TYPE A のスタッド配置では、やや過剰な本数であるとも考えられる。

5. FEM解析の検証

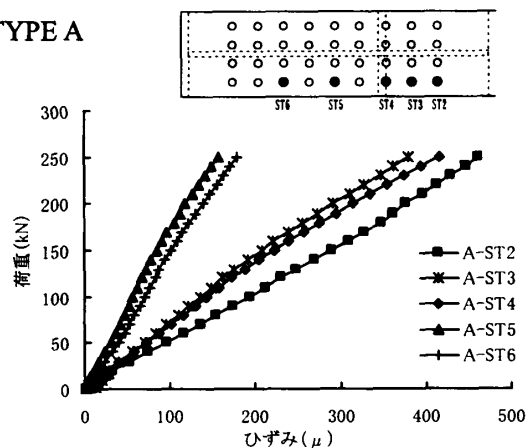
FEM 解析結果の妥当性の検証するため、実験値と解析値でダイレクトに比較ができる鋼フランジのひずみ値で検証した。図-11 はその中より設計荷重 (250kN) 載荷時における鋼支柱フランジの軸方向のひずみ計測結果である。実験値および解析値は、大きさやその分布とも概ね一致していた。

また、そのほか躯体内部の鋼桁上下フランジ面のひずみや試験体の変形なども解析値は実験値を概ね捉えていることから解析結果の妥当性を確認した。厳密にスタッド1本あたりの作用せん断力の算出は不可能であるが、境界部のせん断力の定量的評価には、仮想せん断剛性を考慮した本解析法も適用できると考えられる。

6. 実橋設計への適用

載荷実験や解析における検証結果をもとに、FEM 解析による隅角部のずれ止め設計法を実橋設計へ反映させた。図-12 に示す色太第三橋 (近畿自動車道: 尾鷲勢和線) は橋長 50m の単純桁橋であり、2本の鋼ラーメン桁の橋台部にコンクリートを巻きたてた鋼ポータルラーメン少数主桁橋である。本橋におけるずれ止めの

TYPE A



TYPE B

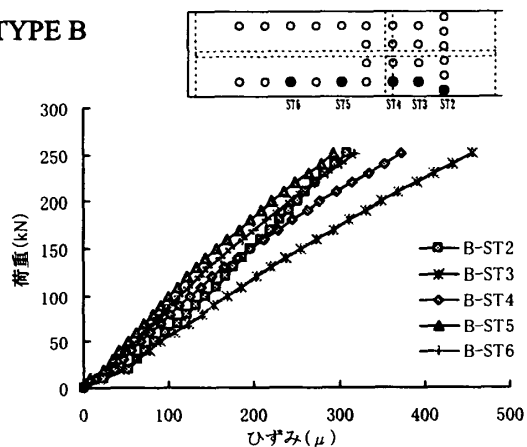


図-10 スタッドのひずみ

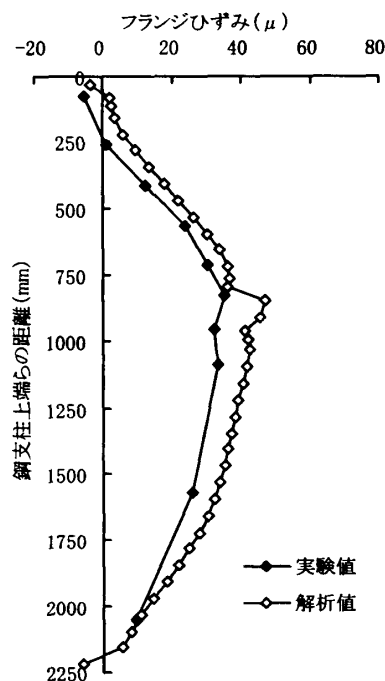


図-11 実験値と解析値の比較

設計では、基礎やコンクリート床版も含めた実橋全体系の解析モデル（図－１３）を用いて、死荷重・活荷重および温度荷重に対する FEM 解析を実施した。鋼とコンクリートのずれ止めには $\phi 22 \times 150\text{mm}$ のスタッドを用いているため、フランジ面より 150mm の要素に仮想せん断弾性係数を考慮させた。これより算出される各フランジ面のせん断力分布より、スタッドの配置は図－１４のように決定した。

7. まとめ

鋼ポータルラーメン橋隅角部のモデル試験体による載荷実験および FEM 解析評価より、以下の内容を確認した。

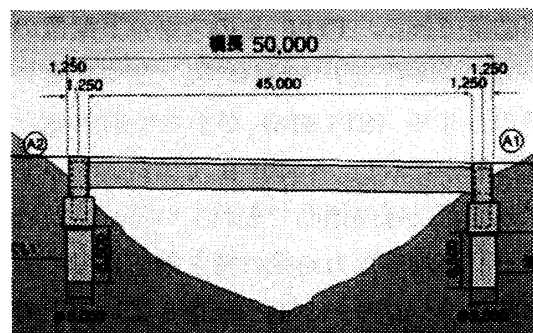
- (1) 鋼ポータルラーメン橋隅角部のずれ止め設計において、せん断力分布に合わせたスタッド配置とすることで十分な耐荷性能およびずれ止め特性を有することを確認した。
- (2) FEM 解析における鋼とコンクリートのずれ特性のモデル化に、仮想せん断弾性係数を考慮させた FEM 解析手法の妥当性を確認した。

また、この FEM 解析によるずれ止めの設計手法を実橋設計に適用し、スタッドの施工数量を削減することで経済性および製作性の向上が図れた。

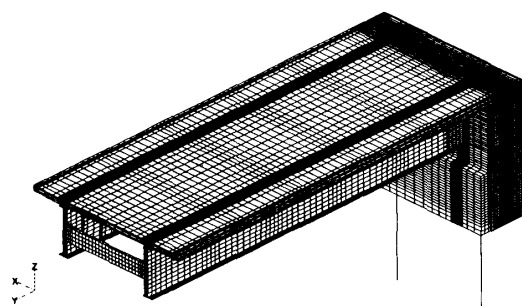
なお、FEM 解析における鋼コンクリート合成構造のずれ止め評価手法については多種のモデル化が報告されているが、厳密にはスタッド自体のモデル化や部材間の付着・摩擦特性の把握など、多くの課題を残しており、さらなる解析評価技術の改善が望まれる。

－謝辞－

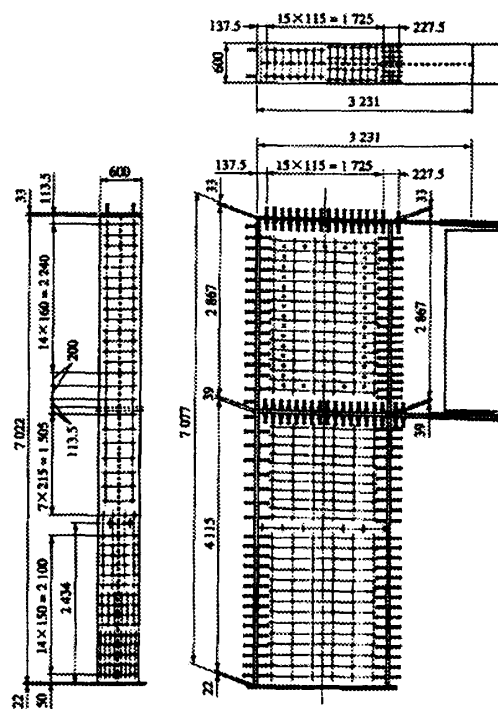
本稿に記載した鋼ポータルラーメン橋の載荷実験をはじめ色太第三橋の設計、施工においては、JH 中部支社構造技術課および JH 松阪工事事務所の多大なご指導、ご協力いただいたことをここに記すとともに、紙面をかりて関係各位に深く感謝の意を表します。



図－１２ 色太第三橋 橋梁一般図



図－１３ 実橋 FEM 解析モデル



図－１４ 実橋隅角部のスタッド配置図

【参考文献】

- 1) 大久保宣人, 村田幸隆, 広江誠喜: 小針岸川の設計と施工 片山技報 No.16 pp.41-48
- 2) 西土隆幸, 中蘭明広, 稲葉尚文: FEM 解析による連続 2 主桁の特性に関する考察 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集 2000,9 I-A299