

床版取替え時における合成はりの合成効果および限界状態に関する研究

宇都宮大学大学院 学生員 ○岡崎康幸 フェロー会員 中島章典
川田工業(株) 正会員 溝江慶久 非会員 佐藤美乃里(元宇都宮大学生)

1. はじめに

既設道路鋼桁橋の鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版）の経年劣化が問題となっており、種々の方法で補修が行われている。しかし、RC床版の劣化損傷が激しい場合には、RC床版を取替えることが必要となる。既設橋のRC床版を取替える場合には、高品質で施工期間の短縮が図れることからプレキャストコンクリート床版（以下、PCa床版）を利用する場合が多い。さらに、鋼桁橋が合成桁の場合には、鋼桁とPCa床版間の合成効果を確保する必要があるため、ずれ止め配置に対しても配慮しなければならない。この場合、合成桁として必要な性能を確保するため、PCa床版に箱抜き部を設けスタッドをグループ配置する場合もある。

しかし、PCa床版を用いる場合、プレストレストコンクリート床版を用いることが前提であるため、合成桁として必要なスタッドの本数を考慮して、スタッドのグループ配置に対応したPCa床版の箱抜き部の大きさとPC鋼棒の配置間隔を適切に決定することが必要である。さらに、PC鋼棒の配置の観点からはグループスタッド配置のための箱抜き部が占める領域をできるだけ減らすことが望ましい。一方、グループスタッド配置のための箱抜き部を減少させることが、合成効果の低下を招き合成桁として必要な性能を低下させる懸念もある。

そこで本研究では、スタッドが等間隔に配置された場所打ち床版を有する合成はりスタッドグループ配置でPCa床版を有する合成はりのモデル試験体を作製し、静的載荷実験を行った。その結果から、PCa床版を有する合成はりにおいて、グループスタッド配置数や1グループあたりのスタッド本数を变化させた場合の合成はりの挙動を、耐荷性および使用性の限界状態に着目して検討した。さらに、スタッドを通常の一段に配置した押抜き試験体、およびはり試験体に対応させてスタッドをグループ配置した押抜き試験体の静的載荷実験を行い、合成はり試験体中のスタッドの挙動と押抜き試験体中のスタッドの挙動の比較をする。

2. 合成はり静的載荷試験

(1) 概要および試験体の種類

本研究に用いた試験体は、図-1～図-4に示すように、全長4200mm、支間長4000mmの合成はり試験体である。試験体は6体作製し、それぞれ表-1に示すような名称を付した。試験体の断面形状を図-5に示す。床版は幅400mm、厚さ120mm、鋼はりの高さは約400mmの断面形状で、床版内にはD13の軸方向鉄筋を8本配置し、ずれ止めとして全高90mmのスタッドを2列に配置した。なお、試験体の設計にあたっては、コンクリート床版の上縁が圧壊し耐力に達するように寸法を決定した。また、載荷点位置は、比較的小さい荷重でスタッドに大きい水平せん断力を作用させることを目的として、支間長の1/3点に載荷するものとした。

表-1 合成桁試験体一覧

試験体名	スタッド軸径	スタッド配置	床版	モルタル層
RC-UGS	16mm	等間隔配置	場所打ち	—
PCa-GS1	16mm	グループ8箇所	プレキャスト	なし
PCa-GS2m	16mm	グループ8箇所	プレキャスト	あり
PCa-GS3m	16mm	グループ6箇所	プレキャスト	あり
PCa-GS4m	16mm	グループ11箇所	プレキャスト	あり
PCa-GS5m	19mm	グループ11箇所	プレキャスト	あり

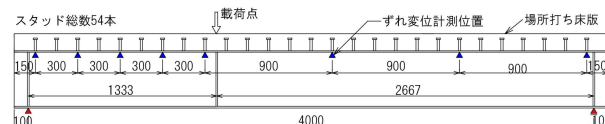


図-1 試験体 RC-UGS 側面図

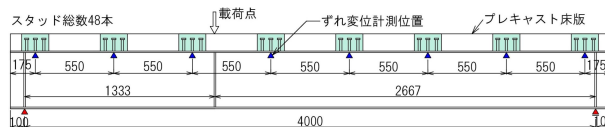


図-2 試験体 PCa-GS1 および PCa-GS2m 側面図

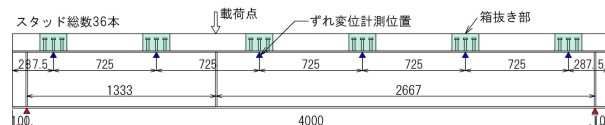


図-3 試験体 PCa-GS3m 側面図

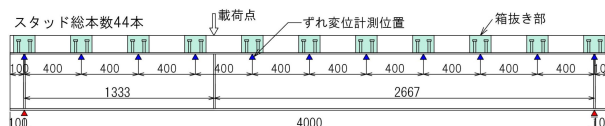


図-4 試験体 PCa-GS4m および PCa-GS5m 側面図

RC-UGSはスタッドを等間隔で配置し、鋼はりの上に直接コンクリートを打設した試験体であり、グループスタッド配置の試験体との比較のために作製した。PCa-GS1およびPCa-GS2mはグループスタッドを6本ずつ550mm間隔で全長に8箇所配置した合成はり試験体である。グループスタッド用の箱抜き部を有するPCa床版は別に作製し、載荷試験の約2週間前に無収縮モルタルによって鋼はりとは一体化させた。また、PCa-GS3mはグループスタッドの配置間隔による影響を確認する目的で、グループスタッドの間隔を725mm間隔で全長に6箇所配置した試験体である。なお、PCa-GS1、PCa-GS2m、PCa-GS3mについては、図-6に示すようにグループスタッド1箇所につき、スタッドを6本配置している。これに対して、PCa-GS4mおよびPCa-GS5mは、箱抜き部の占める領域を減少させることを目的として、図-7に示すようにグループスタッド1箇所につきスタッドを4本配置とし、箱抜き部の長手方

Key Words: 合成桁 床版取換え プレキャスト床版 グループスタッド 合成効果

〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学大学院工学研究科地球環境デザイン学専攻 Tel.028-689-6210 Fax.028-689-6208

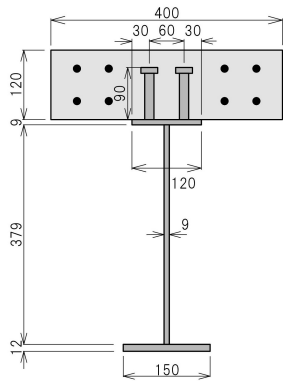


図-5 合成桁試験体断面図

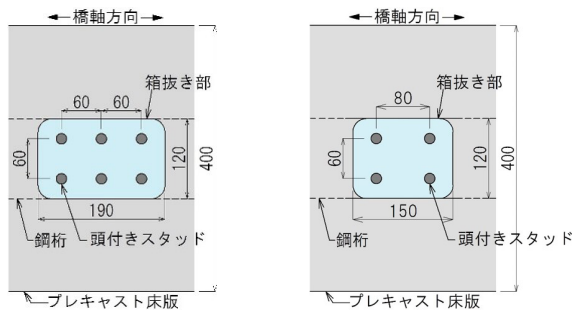


図-6 PCa-GS1,2,3m グルー プスタッド部平面図 図-7 PCa-GS4,5m グルー プスタッド部平面図

向長さを短くして、はり全体に 11 箇所ของกลุ่ม配置としている。なお、PCa-GS5m は、スタッド軸径による影響を確認する目的で、他の試験体のスタッド軸径 16mm より大きい 19mm とした試験体である。なお、PCa-GS1 では上フランジと PCa 床版の間にモルタル層は設けていないが、その他の PCa 床版の試験体では上フランジと PCa 床版の間に厚さ 3mm 程度のモルタル層を設けている。

(2) 試験方法

載荷試験時には、図-1～図-4 に示すように支点間距離が 4000mm となるように試験体を単純支持し、上述の理由から支点間 1/3 点に集中荷重を載荷した。載荷方法は漸増繰返し載荷とし、それぞれのサイクルのピーク荷重を 100, 200, 300, 400, 500kN およびずれ止め位置で計測したずれ変位の最大値が 0.6mm 程度となる荷重を目安として載荷除荷を繰り返した後、床版が圧壊し荷重が低下するまで荷重を増加させた。

(3) 測定項目

載荷実験では、載荷点におけるたわみ、コンクリート床版と鋼はり間の水平ずれ変位、鋼はりおよび床版内鉄筋のひずみ、スタッド中央高さのひずみなどを測定した。載荷点部たわみはダイヤルゲージ型変位計を用いて測定した。コンクリート床版と鋼はり間の水平ずれ変位は図-1～図-4 に示している位置で、各試験体 8 箇所または 6 箇所を高感度変位計を用いて計測した。鋼はりおよび床版内鉄筋のひずみは断面平面保持の状況を確認するために、載荷点位置など数か所の断面において鋼はり上下フランジとウェブおよび鉄筋にひずみゲージを貼り付け、ひずみを測定した。

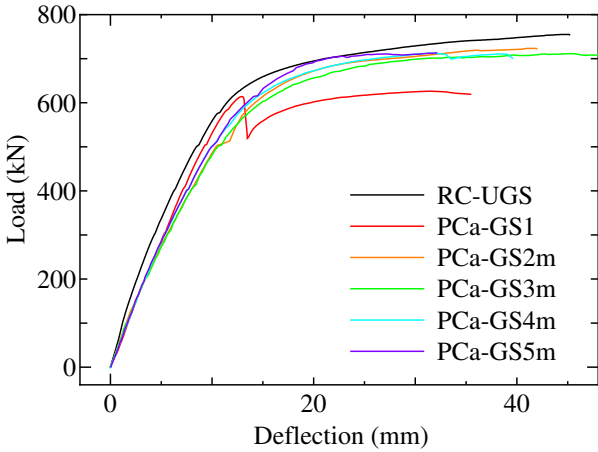


図-8 荷重－たわみ関係

表-2 降伏荷重および最大荷重

試験体名	鋼はり下縁 降伏荷重	最大荷重	全塑性モーメント理論値	
			鉄筋考慮なし	鉄筋考慮あり
RC-UGS	453.8kN	755.0kN	743kN	773kN
PCa-GS1	474.7kN	624.3kN	743kN	773kN
PCa-GS2m	402.8kN	723.3kN	696kN	724kN
PCa-GS3m	415.0kN	711.9kN	696kN	724kN
PCa-GS4m	443.7kN	712.5kN	721kN	747kN
PCa-GS5m	463.9kN	713.2kN	721kN	747kN

(4) 試験結果および考察

a) 荷重－たわみ関係

載荷点における荷重－たわみ関係を図-8 に示す。PCa-GS1 では荷重 613kN 程度で、載荷点付近の床版にせん断斜めひび割れを生じて急激に荷重が低下し、その後載荷を続け、626.3kN で最大荷重となった。この原因として、床版設置時に載荷点付近の床版下縁と鋼はり上フランジの間に 1～2mm 程度の隙間があったため、その部分の床版がせん断破壊した後に隙間が狭まって、その後も荷重が増加したものと考えられる。この対策として後に作製した PCa-GS2m, PCa-GS3m, PCa-GS4m, PCa-GS5m では前述のようにモルタル層を設けることによって、せん断破壊による急激な荷重低下を防ぐことができた。また、PCa 床版を有する試験体では、荷重 300kN 程度までの初期勾配はほぼ一致しており、同程度の合成効果を有すると言える。

b) 降伏荷重および最大荷重

それぞれの試験体鋼はり下縁降伏時の荷重および最大荷重を表-2 に示す。本研究では、鋼はり下縁の降伏時を合成はりの使用性の限界状態とし、最大荷重時を耐荷性の限界状態として考慮するものとする。RC-UGS が最も最大荷重が大きく、PCa-GS1 を除く PCa 床版の試験体はほぼ同程度の耐力となった。また、材料強度を考慮した各試験体の全塑性モーメントに対応する荷重の理論値を表-2 に併せて示す。なお、全塑性モーメントは床版内の軸方向鉄筋を無視した場合と、鉄筋の受け持つ圧縮応力を考慮した場合の 2 つの理論値を算定している。鉄筋を考慮しない場合は、RC-UGS, PCa-GS2m および PCa-GS3m のみ最

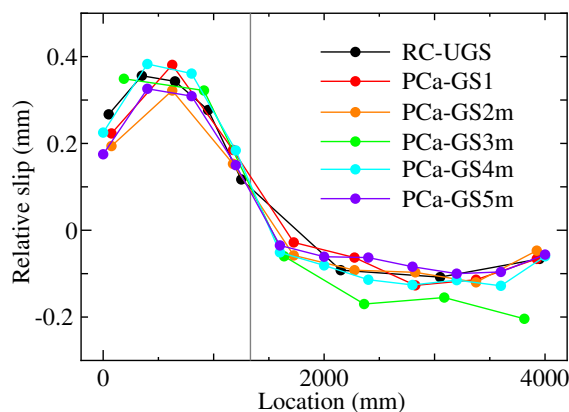


図-9 鋼はり下縁降伏時ずれ変位分布

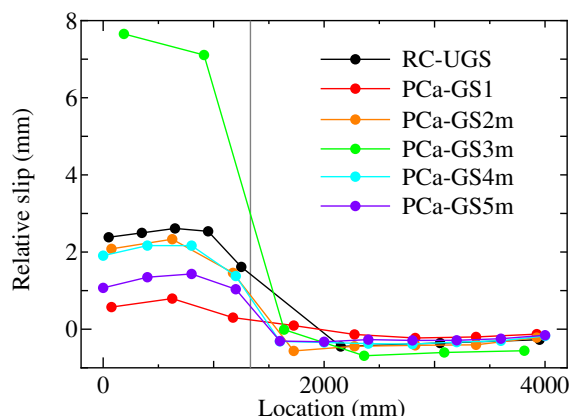


図-10 最大荷重時ずれ変位分布

大荷重は理論値よりやや大きく、PCa-GS1を除いて最大荷重は理論値に対して-1.2%~3.9%程度の値を示している。しかし、鉄筋を考慮した場合はいずれの試験体でも最大荷重は理論値より小さく、PCa-GS1を除き、理論値に対して-4.5%~-0.1%程度の値を示している。実際は軸方向鉄筋も圧縮応力を受け持つため、鉄筋を考慮した場合のほうが実際に即した値であると考えられる。しかし、理論値と比較しても極端な強度低下はないことから、グループスタッドの配置数を8箇所から6箇所に低減しても同程度の耐力を期待できる可能性があると考えられる。また、スタッド軸径を19mmとしたPCa-GS5mは、同様のスタッド配置でスタッド軸径16mmのPCa-GS4mと比較して合成効果が高まることが予想されたが、両者の初期勾配はほぼ一致しており、最大荷重もほぼ等しい値となった。

c) ずれ変位分布

各試験体の鋼はり下縁降伏時および最大荷重時におけるずれ変位分布を比較する。なお、各試験体の降伏荷重は表-2示している。試験体ごとに降伏荷重に差異があるが、これは使用した鋼材の降伏強度、コンクリートの圧縮強度および弾性係数の差異によるものである。

図-9に鋼はり下縁降伏時の橋軸方向の床版と鋼はり間のずれ変位分布を示す。縦軸はずれ変位を表し、横軸は左側支点からずれ変位計測位置までの距離を表している。なお、図において鋼はりに対してコンクリート床版が左側に移動する方向を正の値としている。複合構造標準示方書¹⁾によると、ずれ変位0.4mmを使用性の限界状態の目安と考え

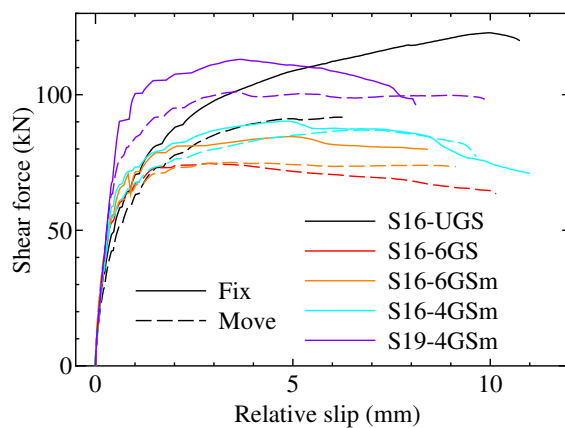


図-11 セン断力-ずれ変位関係

表-3 押抜き試験体と合成はり試験体の対応

押抜き試験体名	対応する合成桁試験体
S16-UGS	RC-UGS
S16-6GS	PCa-GS1
S16-6GSm	PCa-GS2m および PCa-GS3m
S16-4GS	PCa-GS4m
S19-4GS	PCa-GS5m

ているが、いずれの試験体においてもこの荷重段階におけるずれ変位は0.4mm以下となっている。また、グループスタッドの配置数を減らしたPCa-GS3mおよび、配置間隔の異なるPCa-GS4mとPCa-GS5mの最大ずれ変位も他の試験体の結果とほとんど変わらず、0.3mm~0.4mm程度であり、両者を比較するとスタッド軸径の大きいPCa-GS5mのほうが若干ずれ変位が小さい。

一方、図-10に最大荷重時のずれ変位分布を示す。載荷点の左側において、グループスタッドの配置数を減らしたPCa-GS3mのずれ変位は他の試験体より顕著に大きい。また、はり試験体に対応するスタッドの押抜き試験を行っており、そのせん断力-ずれ変位関係を図-11に示す。なお、それぞれの押抜き試験体と合成はり試験体の対応を表-3に示す。各押抜き試験体は、対応する合成はり試験体のコンクリート床版の断面寸法やスタッドのグループ配置などを模擬している。試験方法は日本鋼構造協会より提案されている押抜き試験方法²⁾によるものと、島が提案する新しい押抜き試験方法³⁾によるものの2種類の方法に従っており、ここではそれぞれの方法を固定支持、可動支持と呼ぶものとする。図-11より、S16-6GSmでは最大せん断力時のずれ変位は3~5mm程度である。これに対して、対応する合成はり試験体PCa-GS3mは載荷点の左側で7~8mm程度のずれ変位が生じていることから、スタッドのせん断耐力に達していることがわかる。つまり、この試験体においては、はりとしての耐荷性の限界状態とスタッドの耐荷性の限界状態がほぼ同時に生じていると言える。なお、このPCa-GS3m試験体において、実験終了後に載荷点左側の箱抜き部周辺のコンクリート床版に橋軸方向のひび割れが確認された。

これに対して、スタッドの総数が同程度であるRC-UGS

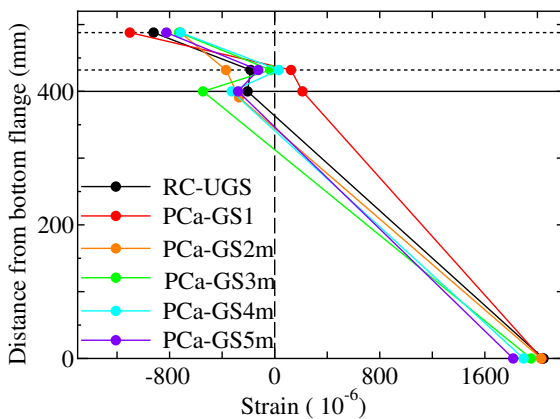


図-12 鋼はり下縁降伏時はり高方向ひずみ分布

と PCa-GS2m のずれ変位分布は近似しており、最大ずれ変位は対応する押抜き試験時の最大せん断力時のずれ変位よりも小さい。また、PCa-GS4m と PCa-GS5m を比較すると、載荷点の左側において PCa-GS4m で 2mm 程度ずれ変位が生じているのに対し、PCa-GS5m では 1.0~1.4mm 程度しかずれ変位が生じていない。このことから、スタッド軸径を 16mm から 19mm に大きくしたことで、はりの最大荷重はほとんど変わらないが、耐荷性の限界状態におけるずれ変位は幾分小さくなることがわかる。また、押抜き試験体のせん断耐力時のずれ変位と対応するはり試験体の最大荷重時ずれ変位分布を比較すると、PCa-GS3m を除くいずれのはり試験体でも耐荷性の限界状態において、押抜き試験体のスタッドのせん断耐力時のずれ変位に達していない。なお、PCa-GS1 では、最大荷重が比較的小さかったため、ずれ変位は他の場合よりも全体的に小さい値である。

d) はり高方向ひずみ分布

鋼はり下縁降伏時におけるはり高方向ひずみ分布を図-12 に示す。計測位置は、PCa-GS2m では載荷点から右側に 134mm 位置の断面であり、その他の試験体では載荷点位置である。図の縦軸は鋼はり下縁からの距離、横軸はひずみを表している。鋼はり下縁のひずみは材料の降伏強度に対応した降伏ひずみ約 2000×10^{-6} に達している。この図から、どの試験体においても鋼はり部分と床版部分の断面平面保持は成立しておらず、不完全合成状態にあるが、特に、スタッドの配置数が少ない緑線で示す PCa-GS3m において、床版部分と鋼はり部分のひずみ分布のずれが最も大きい。このことから、スタッドの配置数が荷重-たわみ関係や同荷重時の長手方向ずれ変位分布に及ぼす影響は小さいが、はり高方向ひずみ分布に及ぼす影響は大きいことがわかる。

一方、最大荷重時における同位置でのはり高方向ひずみ分布を図-13 に示す。この場合、鋼はり下縁のひずみは約 2000×10^{-6} を大きく超えており、また、床版内の上段鉄筋のひずみはコンクリートの圧縮強度に相当する約 2000×10^{-6} 以上となっている。つまり、このはり高方向のひずみ分布は耐荷性の限界状態（床版コンクリート上縁の圧縮破壊）に対応している。また、使用性の限界状態時に比較して、床版部分と鋼はり部分の断面平面保持のひずみ分布からのずれが大きく、特に、PCa-GS3m でその傾向が顕著に見られる。

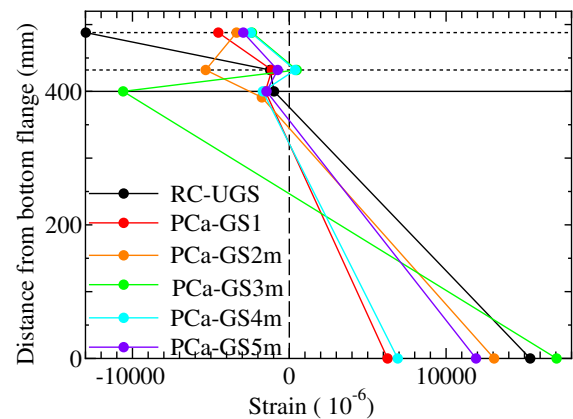


図-13 最大荷重時はり高方向ひずみ分布

3. おわりに

本研究では、場所打ち RC 床版を有する合成はり試験体と、グループスタッド配置数やモルタル層の有無などを変化させた PCa 床版を有する合成はり試験体の静的載荷試験を行った。そして、それらの結果を使用性、耐荷性の限界状態の観点から、相互に比較して考察を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

1. 本研究で実験を行った場所打ち RC 床版を有する合成はり試験体と PCa 床版を有する合成はり試験体において、鋼はり下縁降伏時を使用性の限界状態とした場合、グループスタッド配置数を 25% 程度減少させた PCa 床版を有する合成はり試験体も含めて、最大のずれ変位は 0.4mm 以下となり、使用性の限界状態を満足する結果となった。また、その荷重段階における試験体ごとのずれ変位分布に大きな差異は認められない。
2. 合成はり試験体の最大荷重時を安全性の限界状態とした場合、グループスタッド配置数を 25% 程度減少させた PCa-GS3m において他の試験体より顕著にずれが大きく、スタッド軸径を 16mm から 19mm に大きくした PCa-GS5m においては他の試験体よりずれ変位は小さい。このことから、安全性の限界状態において、スタッド配置間隔やスタッド軸径がずれ変位に及ぼす影響は大きいと考えられる。
3. 鋼はり下縁降伏時のはり高方向ひずみ分布には不完全合成はりの挙動が認められる。
4. 場所打ち RC 床版を有する合成はり試験体はもちろん、PCa 床版を有する合成はり試験体でグループスタッド配置数を 25% 程度減少させた場合においても、曲げ耐力は全塑性モーメントよりやや小さいが、極端な強度低下はない。

参考文献

- 1) 土木学会：複合構造標準示方書，pp38，2015.4.
- 2) (社) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状，JSSC テクニカルレポート No.35，1996.11
- 3) 島弘：頭付きスタッドのせん断力とずれ変位およびスタッド軸方向挙動との関係に及ぼす試験方法の影響，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vo.67，pp.307-319. 2011.