

鋼桁とRC 橋脚の剛結部に着目したグループスタッドの研究

Study on Application of Grouped Studs for the Rigid Connecting Part between Steel Girder and RC Pier

大久保 宣人*, 栗田 章光**, 平野 修司*, 夏秋 義広*

Nobuhito Okubo, Akimitsu Kurita, Syuuji Hirano, Yoshihiro Natsuaki

* 片山ストラテック(株) 技術本部橋梁設計部 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島6-2-21)

** 工博 大阪工業大学工学部都市デザイン工学科教授 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)

Recently in Japan, the steel-concrete composite bridges aiming at reducing construction cost and period are adopting widely and its numbers are increasing remarkably. For instance, the hybrid rigid frame bridges between steel girder and reinforced concrete pier to increase an earthquake resistance of the whole bridge structure is one of its example. However, it is difficult to introduce the prestress into the transverse direction of the concrete slab in the region of the rigid connection. Therefore, it is a popular opinion that connected method between concrete slab and steel girder by using the groped stud arrangement has good workability and high efficiency. This paper deals with the results of the comparison between analytical and the test results based on the comparative large-scale model.

Key Words: grouped stud, rigid connection, prestressing, opening for studs, FE-analysis

キーワード: グループスタッド, 剛結合, プレストレッシング, 箱抜き, FE 解析

1. 序論

近年, 中小スパンの鋼橋ではPC床版を有する少数主桁橋が数多く建設されている。さらに, 経済性, 耐震性の向上を目指した鋼桁と鉄筋コンクリート橋脚(以下, RC橋脚)を剛結させた複合ラーメン橋の実績が増大している。これらの橋梁は床版にプレストレスを導入することが必要であるが, プレストレスの導入時期が床版と鋼桁とを結合してから行うこととなる。この場合, 従来のスタッド配置では, 床版を橋軸方向あるいは橋軸直角方向へプレストレスすることによる鋼桁への影響が発生するとともに, コンクリート床版に十分なプレストレスが導入され難くなり, 設計通りのプレストレスが導入されなくなる可能性がある。特に, 中間支点部において鋼桁とRC橋脚を剛結した複合ラーメン橋では, 図-1に示すように橋脚コンクリートが主桁まで充填されるため, プレストレスに対して大きな拘束を受けることとなる。そこで, 鋼桁とPC床版が結合される前にプレストレスを導入し, 床版のみに有効にプレストレスを導入できる方法としてスタッドをグループ配置させた構造(以下, グループスタッド)を提案する。グループスタッドを用いた橋梁はスイスで数橋の施工事例¹⁾があり既往の研究²⁾もある。我が国においてはグループスタッドに関する既往の研究^{3)~6)}で, グループ化したスタッドの静的および疲労強度は従来配置したスタッドの挙動

と差がないことを実験および解析にて確認され, また, 疲労を考慮した設計法も提案されている⁷⁾。しかし, 実橋構造レベルにおける床版へのプレストレス導入およびグループスタッド箱抜き部の応力集中などによる影響が把握できていないのが現状である。そこで, 本研究では, これらの事を解決するために実物大レベルの床版供試体によるプレストレス導入試験を行った。

本文は, まずグループスタッドの概要と施工手順を説明し, 実橋における剛結部コンクリートのプレストレス導入

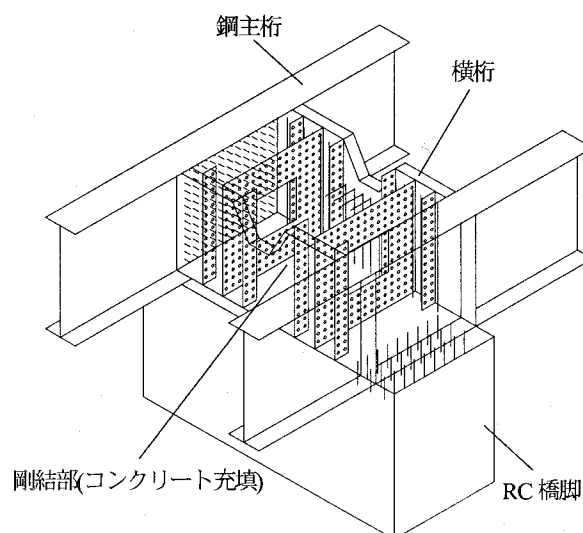


図-1 剛結部概要図

における問題点を抽出する。次に、実物大レベル供試体におけるプレストレス導入試験および有限要素解析(以下、FE解析)の結果を報告し、最後に総括と今後の課題を述べる。

2. グループスタッドの概要および施工手順

グループスタッドは図-2に示すように、鋼桁上のスタッドをグループにして配置させコンクリート打設時には、そ

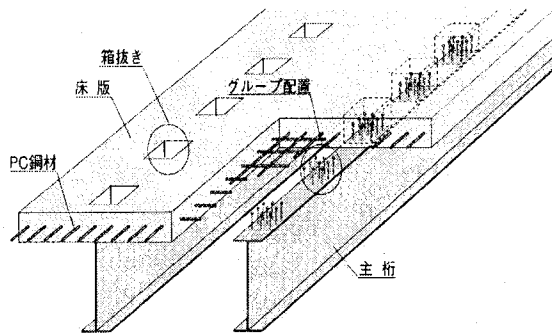


図-2 グループスタッド概要図

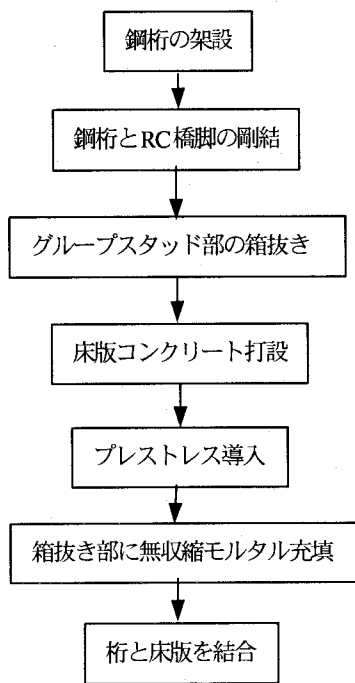


図-3 施工フロー

の付近を箱抜きし、コンクリートの打設ならびにプレストレスの導入後に箱抜き部に無収縮モルタルなどを充填し、床版と鋼桁を結合させる方法である。この工法を採用することで、床版へ有効にプレストレスが導入されると共に、鋼桁には二次応力が発生しない。施工のフローを図-3に示す。

3. 実橋におけるプレストレス導入状況

3.1 対象橋梁

鋼桁とRC橋脚を剛結した混合ラーメン橋の中間支点は、剛結部にコンクリートが充填される構造である。したがって、床版コンクリートを打設した後、すなわち鋼桁と床版がスタッドで結合された後、橋軸直角方向にプレストレスを導入すると、床版は大きな拘束を受けることとなる。ここでは、実橋における中間支点付近のコンクリート床版上面のひずみを測定しプレストレスの導入状況を確認した結果を報告する。対象とした橋梁を図-4に、剛結部の断面を図-5に示す。

3.2 計測位置

コンクリート床版上面におけるひずみの計測位置を図-6に示す。計測位置はRC橋脚の中心線上に張出し部、主桁上および床版中心の計5箇所とした。

3.3 計測結果

計測位置におけるひずみ分布を図-7に示す。張出し部および主桁上では 170μ 程度のひずみが発生している。床版のプレストレスによる設計導入ひずみは 129μ (3.9N/mm^2)

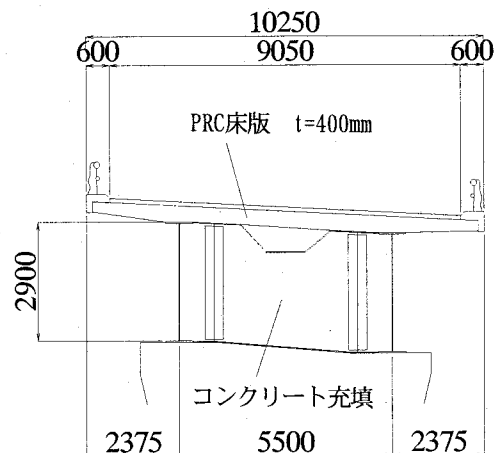


図-5 剛結部断面

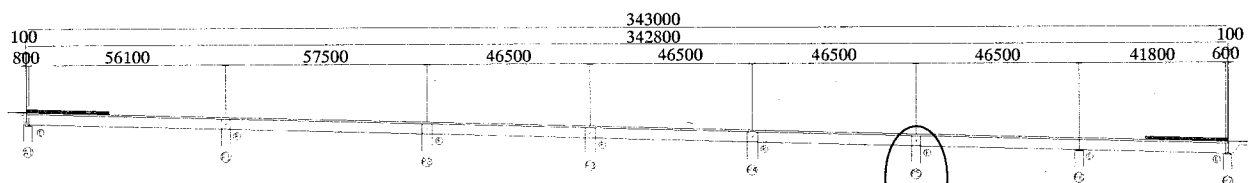


図-4 対象橋梁

計測位置

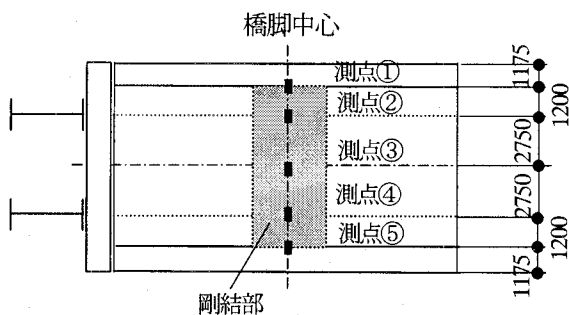


図-6 測定位置

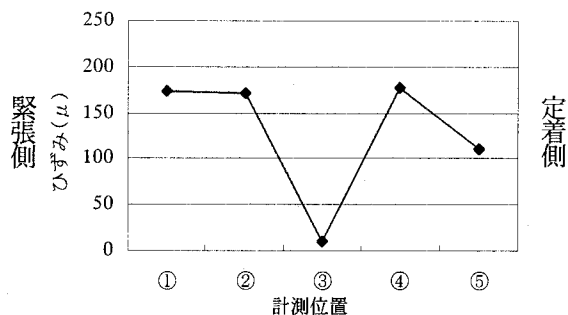


図-7 ひずみ分布図

であり、1.2～1.3倍程度のプレストレスが導入されていることとなる。現場でのプレストレス導入は所定の導入量より多く導入される傾向であることから設計どおりであると言える。一方、床版中心のひずみは、ほとんど0に近いことから、剛結部におけるプレストレスは、充填コンクリートによる拘束が非常に大きく、プレストレスが導入され難い状況である。また、床版張出し部の定着側のひずみは緊張側のひずみより小さい傾向にある。なお、床版コンクリートの弾性係数は $3.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ で計算した。

この計測結果より、鋼桁とRC橋脚が剛結された構造においては、張出し部から主桁付近までは所定のプレストレスが導入されるが、主桁間においては剛結部の影響により、ほとんどプレストレスが導入されない状況であることが明らかになった。また、本来、プレストレスが床版に均等に導入されるべきであるが、そうっていないことから床版内部のどこかで応力集中していることも考えられる。すなわち、剛結部周辺ではバランスの悪いプレストレスが導入されていると考えられる。

なお、本橋における剛結域の床版は、床版支間を3m程度で支持するRC構造としているため設計上の問題はない。

4. 施工試験

4.1 試験の概要

前述の実橋計測では剛結された床版にプレストレスを導入すると、床版支間部に期待どおりのプレストレスが導入されないことがわかった。そこで、鋼桁上のスタッドをグループ配置し、床版と鋼桁が結合される前にPC鋼材を緊張し有効なプレストレスが導入されることを確認する

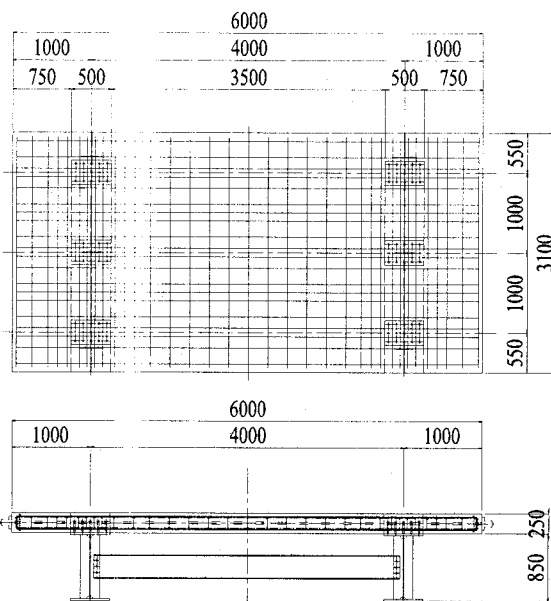


図-8 供試体の形状

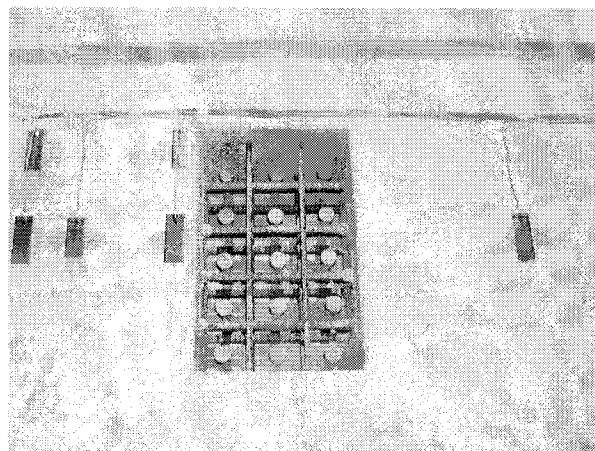


写真-1 箱抜き部の配筋

表-1 使用材料

使用材料	材質、強度
鋼材	SM400A, SS400, S10T
コンクリート	早強コンクリート $s_{ck}=36 \text{ N/mm}^2$ (膨張材 30 kg/m^3)
P C 鋼材	SWPR19 1S28.6

施工試験を行った。この試験において確認する主な項目は以下の通りである。

- ①プレストレス導入時の床版全体の応力状態
- ②箱抜き部周辺の応力状態
- ③プレストレス導入に伴う床版の変形
- ④鋼桁上フランジと床版の付着切れの有無

4.2 試験体の形状

供試体は図-8に示すように、桁高85cmの主桁を2本横桁でつなぎ、その上に幅6m(床版支間4m、張出し長1m)、長

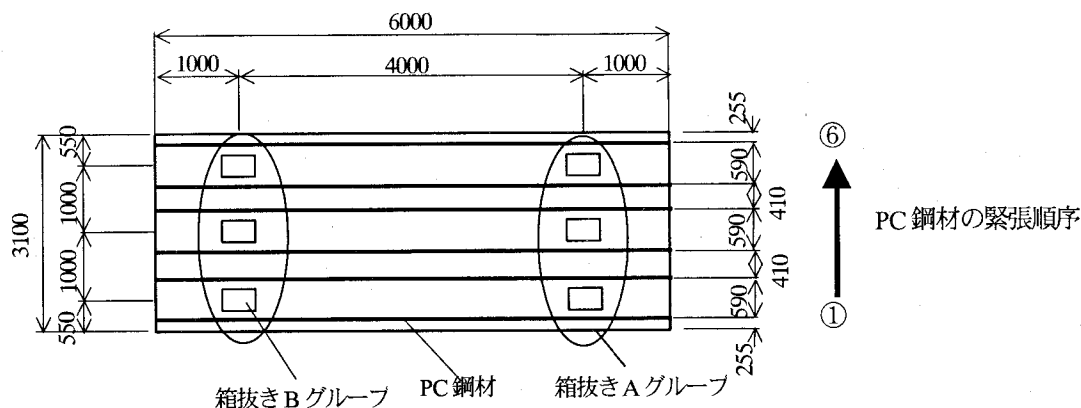


図-9 プレストレスの導入順序

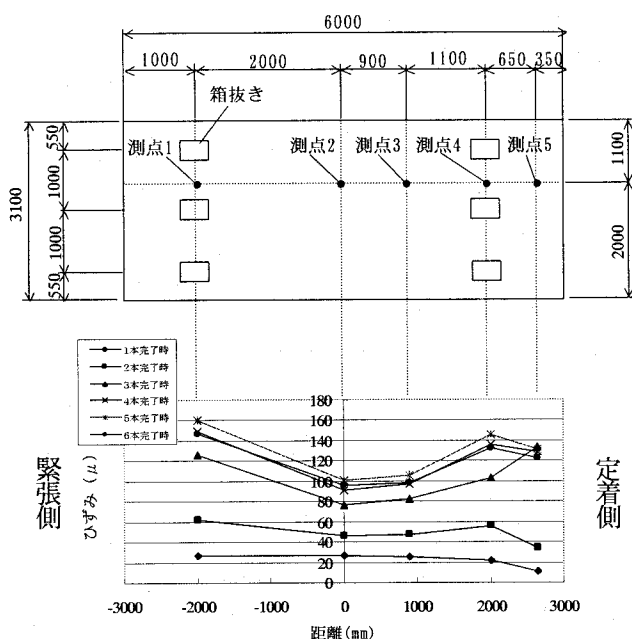


図-10 プレストレス導入によるひずみ分布

さ3.1m, 床版厚25cmの単純版を載せた実物大の大きさで、1体製作した。鋼桁にはφ22×150スタッドを中心間隔1mでグループ化しており、1群のスタッド配置は5本3列である。上フランジ面にはコンクリートとの付着・摩擦条件を実構造と同じにするため無機ジンクリッチプライマーを塗布した。床版にはグループスタッド用の箱抜きを設け、そのサイズはモルタルが十分充填される310mm×500mmとし、Aグループは箱抜き4隅に角を残した状態とし、一方、Bグループは箱抜き4隅にR=50mmの曲線部を設けた状態とした。また、箱抜き部には写真-1に示すように主鉄筋および配力鉄筋を従来通り配筋している。PC鋼材は直線配置とし、箱抜き間を410mm, 箱抜きをまたぐ位置では590mmとし、合計6本配置した。使用材料は表-1に示すとおりである。

4.3 プレストレスの導入

供試体へのプレストレス導入は図-9に示すように緊張側を一定とし、片側から順に緊張を行った。導入量は、前述の実橋床版に導入される応力を参考にPC鋼材1本当

りの緊張力を500kNとした。この緊張力は、プレストレス導入直後の床版上面応力が 3.9N/mm^2 となる量である。ただし、PC鋼材緊張後のセットロスのため最終導入量は1本当たり400kNとなった。このときの床版応力は 3.1N/mm^2 である。また、箱抜き部周辺の応力は断面欠損を考慮すると 4.4N/mm^2 である。

4.4 試験結果

(1) コンクリートの試験

使用したコンクリートの試験は、プレストレスを導入する直前に行った。コンクリート打設日から4日目である。試験結果は、圧縮強度が 40.8N/mm^2 、弾性係数が $2.9 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 、引張強度が 3.1N/mm^2 であった。

(2) プレストレス導入状況

床版各測点における段階毎のプレストレス導入によるひずみ分布を図-10に示す。なお、プレストレスの導入はコンクリートが十分に強度を発生していることを確認してから行った。この図より、定着側のひずみは緊張側のひずみより小さい。これは前述の実橋計測での傾向と同じである。

供試体中央付近(以下、一般部)および箱抜き部のプレストレス導入状況を図-11～図-14に示す。

まず、一般部測点2のプレストレス導入状況は図-11に示すように、床版上面、上側鉄筋および下側鉄筋において、ほぼ均等にプレストレスが導入されている。平均値で見ると、最終導入量が 100μ で応力に換算すると 2.9N/mm^2 となり、設計での目標である 3.1N/mm^2 とほぼ一致している。図-12に示す一般部測点3についても同様の結果となっている。

次に、箱抜き部である測点4のプレストレス導入状況は図-13に示すように、ひずみ値が平均で 144μ となり応力に換算すると 4.1N/mm^2 である。この部分の設計導入量は 4.4N/mm^2 であり、ほぼ一致していると考えてよい。

最後に、一般部および箱抜き部におけるプレストレス導入量の比較を図-14に示す。箱抜き部のひずみは一般部に比べ44%大きい。箱抜き部は一般部に比べ断面が欠損しているため一般部に比べひずみが大きくなる。一般部と箱抜き部の断面欠損率は43%であることから、断面欠損とプレ

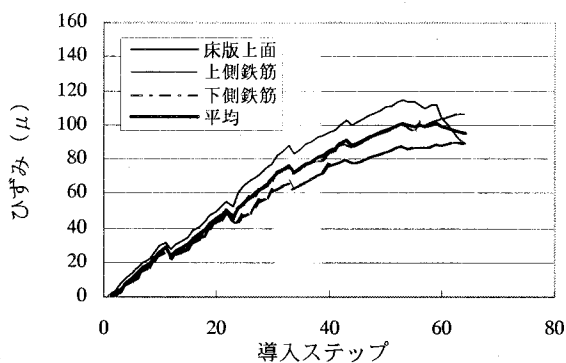


図-11 測点2のプレストレス導入状況

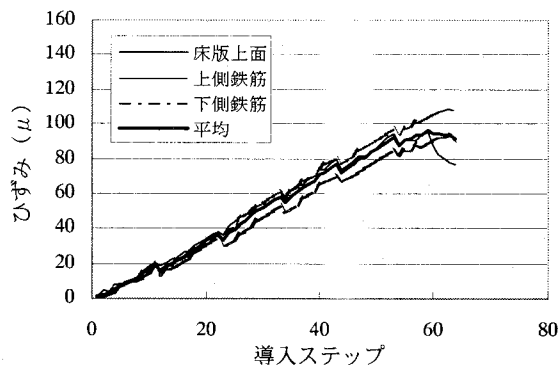


図-12 測点3のプレストレス導入状況

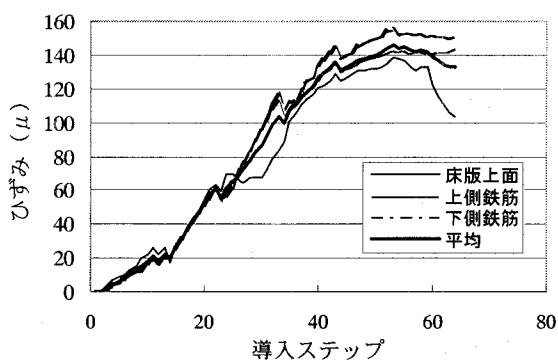


図-13 測点4のプレストレス導入状況

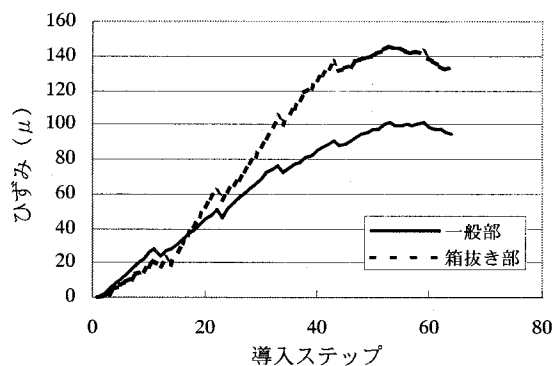


図-14 測点2と測点4の比較

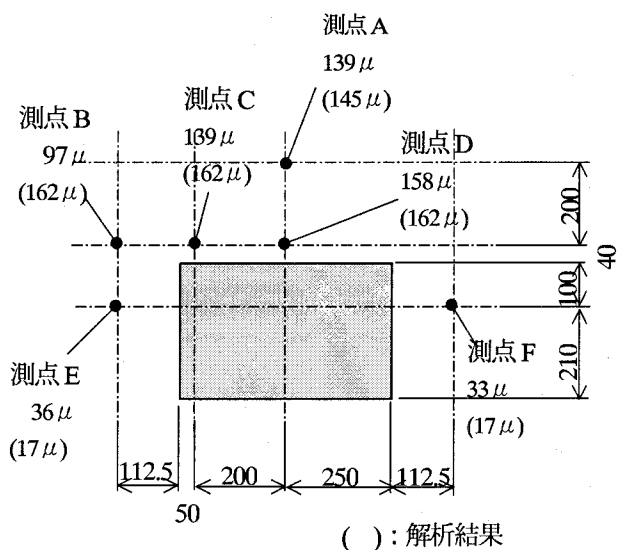


図-15 箱抜き部周辺のひずみ分布

ストレスによる導入量は比例関係にあることがわかる。

これらの結果から、床版には所定のプレストレスが導入されたことが確認された。したがって、鋼桁の上フランジと床版との付着や摩擦による応力の損失がないこともわかった。

(3)箱抜き部のひずみ分布

箱抜き部周辺に着目した導入直後の床版上面ひずみ分

布を図-15 に示す。なお、着目した箱抜き部は4隅に $R=50\text{mm}$ の曲線部を設けたものである。

箱抜き周辺は応力が集中する可能性があるため、そのひずみ状態を十分に把握しておく必要がある。測点 A および測点 D はコンクリート断面が欠損している部分であるため比較的大きいひずみが発生している。特に測点 D は断面欠損の影響が大きい箱抜きの中央に近いところであることと、箱抜き部縁端から 40mm とコンクリートと箱抜き部に非常に近いこともあって 158μ と大きなひずみが発生している。測点 B および測点 C は箱抜きの角部に位置するため応力集中などの影響があると考えていたが、ひずみのレベルはそれほど大きくなかった。一方、測点 E および測点 F ひずみは比較的小さい。これは、プレストレスを導入する方向に対して箱抜き部、すなわちコンクリートが充填されていない空間があるため、ひずみの発生が小さくなったと考えられる。

(4)プレストレスによる床版の状況

プレストレス導入時および導入直後のコンクリートはひび割れもなく健全な状態であった。箱抜き部周辺についても、何らひび割れは確認されなかった。また、プレストレス導入によるコンクリートの浮き上がりやずれなどの変形も見られなかった。

本供試体では箱抜き部の形状は、4隅に $R=50\text{mm}$ の曲線をつけたものと、特に何も処理しない角張った状態の2種類を作った。箱抜きの角部はプレストレスにより応力集

中を起こしクラックが発生する可能性があったが、ひび割れの発生はなかった。したがって、今回の結果からは箱抜き角部に対し、特に処理をする必要がないように思えるが、実橋の適用に際しては、応力集中を回避するため、曲線部を設ける方が望ましいと考えられる。

5.FEM 解析および解析値と実験値との比較

5.1 解析概要

FEM 解析は実験供試体の床版部分のみを対象として行なった。このときの箱抜きの形状についても4隅に角部およびR=50の曲線部を設けたモデルとした。

5.2 解析モデル

(1)使用要素

解析モデルを図-16に示す。使用要素はコンクリートをソリッド要素としてモデル化した。なお、解析ソフトには、NASTRANを用いた。

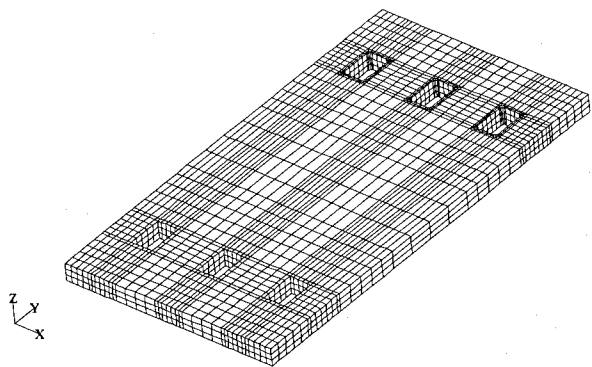


図-16 解析モデル

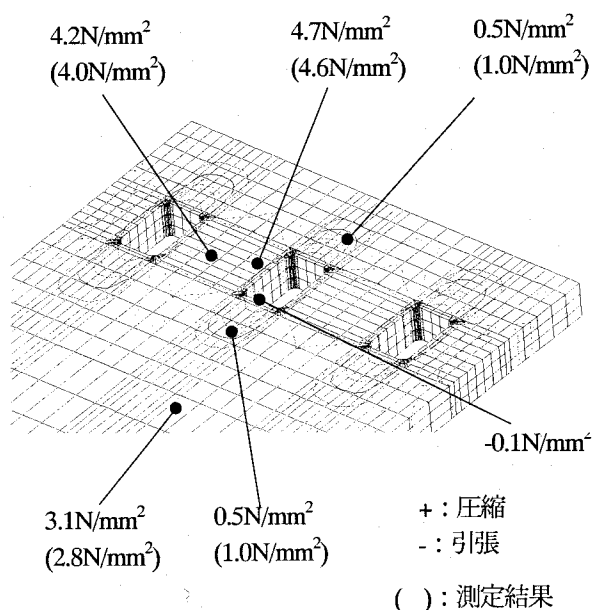


図-17 解析結果

(2)プレストレスの載荷要領

導入直後の緊張力を床版側面に単位面積荷重として載荷した。

PC鋼材1本当たりの緊張力	: 400kN
PC鋼材本数(モデル化領域内)	: 6本
床版側面面積(モデル化領域)	: 775000mm ²
単位面積当りのプレストレス	: 3.097N/mm ²

5.3 解析結果

解析結果を図-17に示す。床版の中央付近である一般部の応力は3.1N/mm²となっており、設計値の3.1N/mm²と同じである。箱抜き部の応力は4.2N/mm²で、これも設計値の4.4N/mm²とほぼ同じである。次に、角に曲線部を設けた箱抜き部に着目した応力分布について考察する。ここで、箱抜き部のプレストレス導入方向に対し導入方向側を側面側、直角方向側を断面側と定義する。側面側は4.7N/mm²で断面欠損分の応力より少し大きな応力が発生しているのわかる。一方、断面側は0.1N/mm²~0.5N/mm²とほとんど応力が発生していない。これは、プレストレスの導入の方向に対して箱抜き部、すなわちコンクリートがないためである。箱抜き角部については特に応力の集中などは見られない。また、引張応力が発生しているものの、その量は導入方向に対し0.1N/mm²以下であり特に問題にならないと考えられる。

5.4 FEM 解析値と実験値との比較

ここでは、設計値とFEM解析で算出された床版上面の応力と施工試験から計測された応力とを比較する。

まず、床版全体を対象とした一般部と箱抜き部の応力の比較を表-2に示す。ここに示す測点1~測点5は図-10に示されている位置である。設計値と解析値は同じであるのでFE解析の妥当性が確認できた。次に、実験値と設計値および解析値の比較においても、ほぼ同じ応力であることがわかる。

表-2 一般部と箱抜き部の応力比較

	測点1	測点2	測点3	測点4	測点5
設計値	4.4	3.1	3.1	4.4	3.1
解析値	4.2	3.1	3.1	4.2	3.1
実験値	4.3	2.8	2.8	3.8	3.6

次に、箱抜き部周辺の応力比較を表-3に示す。ここに示す測点A~測点Fは図-15に示されている位置である。箱抜き部である測点A~測点Cの実験値は設計値および解析値にほぼ同じである。測点Bおよび測点Fは解析値

表-3 箱抜き部周辺の応力

	測点A	測点B	測点C	測点D	測点E	測点F
設計値	4.4	3.1	4.4	4.4	3.1	3.1
解析値	4.2	4.7	4.7	4.7	0.5	0.5
実験値	4.0	2.8	4.0	4.6	1.0	1.0

と実験値はほぼ同じであるが設計値とは差が出た。これは、設計値は床版断面をすべて有効と考えて算出したもので、コンクリート断面がない箱抜きの影響を考慮していない。したがって、解析値および実験値は実際の挙動を示したものであり妥当な結果であると考えられる。

6.まとめ

以上に、鋼桁とRC橋脚の剛結部におけるPC床版のプレストレス導入状況と、グループスタッドの施工試験およびFE解析の結果を考察した。本研究により得られた知見をまとめると以下になる。

- (1)鋼桁とRC橋脚が剛結された構造の場合、PC床版を鋼桁と結合させた後プレストレスを導入すると、充填コンクリートにより大きな拘束を受けた応力状態となる。
- (2)プレストレス導入試験において、一般部および箱抜き部は理論値通りのプレストレスが導入される。したがって、鋼桁と床版との付着や摩擦による影響はほとんどない。
- (3)箱抜き部の応力状態についても理論値通りの応力が導入される。ただし、プレストレスを導入する方向の箱抜き付近はコンクリートがないため、ほとんど応力が発生しない。
- (4)プレストレス導入に伴い床版には、クラックの発生や浮き上がりなどの変形は生じない。
- (5)箱抜き部の4隅には引張応力が発生するものの、その量は少ない。したがって、特別な応力緩和処理は必要ないと考えられるが、応力集中を回避するため50mm程度のRを設けるのが望ましい。
- (6)FE解析は理論値および実験値とよく一致しており、解析の妥当性が確認できた。

本研究により鋼桁とRC橋脚が剛結されたPC床版にグループスタッドを適用することが有効であることが確認できた。また、プレストレスの導入によりコンクリートにクラックや有害な変形もなく、実用化に向け大きく前進したと考えられる。しかし、活荷重載荷時の箱抜き部の挙動についての知見が得られていないため、今後の課題として検討を進める必要がある。

参考文献

- 1)Jean-Paul Lebet,(訳) 橘 吉宏・長井正嗣：スイスにおける合成桁橋、橋梁と基礎 Vol.34 No.3,pp37-46, 2000.3.
- 2)Jun Okada・Jean-Paul Lebet:STRENGTH AND BEHAVIOR OF GROUPED STUD CONNECTORS, COMPOSITE AND HYBRID STRUCTURES, Vol 1, 2000.8.
- 3)大久保宣人,栗田章光,中島星佳,小松恵一：合成桁のスタッドグループ配置に関する実験的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第8巻, pp493-500, 2000.11.
- 4)中島星佳：スタッドをグループ配置した合成桁の力学性状, 大阪工業大学修士学位論文, 2001.1.
- 5)大久保宣人, 栗田章光, 小松恵一, 石原靖弘：グループスタッドの静的および疲労特性に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol. 48A, pp1391-1398, 2002.3.
- 6)大久保宣人, 栗田章光, 小松恵一, 中島星佳：スタッドをグループ配置した合成桁の力学性状に関する解析的研究, 鋼構造論文集 第9巻第34号, pp67-75, 2002.6.
- 7)N.Okubo, A.Kurita, K.Komatsu, : Fatigue Strength of Grouped Stud and Its Design Example for Composite Bridge, 5th Japanese-German Joint Symposium on Steel and Composite Bridge, pp511-518, 2003.9.

(2003年9月12日受付)

最新バージョン