

上フランジを有しない合成桁のスタッドによる応力伝達に関する研究

STRESS PROPAGATION BY STUDS CONNECTORS OF A COMPOSITE GIRDER WITHOUT UPPER FLANGE

近田康夫*, 城戸隆良**, 小堀為雄***, 安田正明****

By Yasuo CHIKATA*, Takayoshi KIDO**, Tameo KOBORI*** and Masaaki YASUDA****

In this paper, stress propagation was investigated between stud and slab concrete under slab bending load of the SElf-Flexed T type Beam (named SEFT Beam). The investigations were made by not only experiments but also numerical analyses. The results of investigations suggest that the stud is safe under bending load (range 0 to 20tf), but slip occurs in the interface between stud and slab concrete.

1. はじめに

今日、橋梁や建物の部材として使用されている合成桁のほとんどは、ウェブの上下にフランジを有する I 型形状の断面を有し、曲げを受ける桁としては合理的な断面と言える。ところで、完成系をみると、通常の合成桁の圧縮側(上)フランジは、床版コンクリートに置換が可能であり、これを省略すれば経済性が増すと考えられる。しかし、合成後は床版の支持のみを担い、桁の曲げ耐力の観点からは不要と考えられる圧縮側フランジは、合成前の桁に荷重を載荷した場合に横座屈を防止するという重要な役割があり、現工法での省略は難しいと言わねばならない。

筆者らは、合成桁における圧縮側フランジを省略すると同時に桁にプレストレス(Prestress)を導入する方法を考案し、その実用性を実験を通じて検証した^{1), 2)}。原理は、(以下の章で詳しく説明するが)圧縮側フランジを省略した逆 T 字型鋼桁を上下逆転設置(使用時の引張りフランジが上になるように設置)し、この状態で型枠を組み立て床版コンクリートを打設することにより、桁の自重、型枠、打設したコンクリートの重量により、桁にプレストレスを導入する方法である。以下では、自重によりプレストレスが導入されることに着目して、SEFT Beam (SElf-Flexed T type Beam) と呼ぶ。

本報告では、圧縮フランジを省略したことによって、鋼桁と床版コンクリートの合成を担うスタッド・ジベル(ウェブ側面に水平方向に設置)の応力伝達が、構造上の弱点になりやすいと考えられることから、有限

* 工修 金沢大学助手 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

** 金沢大学技官 工学部土木建設工学科 (同上)

*** 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (同上)

**** 佐藤鉄工㈱ 橋梁設計部長 (〒930-02 富山県中新川郡立山町鉾木220)

要素法により、その局所解析を行い、実験結果と比較することにより応力伝達機構を把握するとともに、安全性を検討した。本報告では、SEFT Beam におけるスタッドが、床版と鋼桁を繋いで橋軸方向のせん断力のみでなく、床版を支持する役目をも担うことから、床版の曲げに対するスタッドの応力伝達機構に着目している。

2. 自重によるプレストレス導入桁(SEFT Beam)

SEFT Beam の原理を図1に示す。

SEFT Beam の特徴は、上フランジの省略と自重によるプレストレスの導入の2点であるが、これらはSEFT Beam の製造過程を見ると理解しやすい。すなわち、

①下フランジとウェブから構成されるT形桁のウェブ上部に、スタッドを水平方向に設けて、桁の天地を逆にして設置する。

②スラブ（床版）の型枠、鉄筋を、桁から吊り下げて設置すると、桁の自重、型枠の重量などによりウェブ上部（この段階では下）に引張力が生じる。コンクリートを打設し養生する。

③スラブ・コンクリート硬化後、桁を天地逆に設置する（本来の位置）。このとき、②の段階での引張力がウェブ上部に導入されているので、ちょうど、プレストレスが導入されたのと同じ効果が生じている。これが、この桁を、自重によるプレストレス導入桁（Self-Flxed T type Beam：SEFT Beam）と名付けた理由である。

従来の合成桁において、完成系では、圧縮材としての上フランジはコンクリートに代用されてしまい、床版を支持する役目を担うだけになる。そこで、上フランジをスタッドで代用する方法が考えられたが、型枠

ステップ	断面形状、応力状態	製作手順	荷重状態
1		鋼製逆T形桁を溶接組立する	
2		鋼桁を逆転支持し、桁から型枠を吊り下げる	鋼重 型枠
3		工場で床版部分の鉄筋コンクリートを打設する	床版
4		型枠を脱枠し、正位置に反転し多点支持して保管	荷重開放 乾燥収縮 クリープ
5		現場に輸送し、正位置に架設する	鋼重、床版等の死荷重
6		床版継ぎ手部、高欄、地覆等の後死荷重を施工供用する	高欄、地覆、舗装の後死荷重 活荷重

図1 SEFT Beam の原理と製作手順

工事が複雑になるなど施工面での問題やスラブ・コンクリート打設時などに、ウェブが座屈するおそれがあった。そこで、桁を天地逆に設置して座屈のおそれをなくすると共に、自重によってプレストレスを導入することにより、使用鋼重を軽減できるという利点も加わり、いわば、一石二鳥のアイデアからSEFT Beam は考案された。

筆者らの試算では、たとえば、支間21m、幅員 5mの単純桁の場合、SEFT Beam は鋼重で単純活荷重合成H形桁に比較して約30%、単純活荷重合成鉄桁に比較して約16%の軽減が計れる。また、上部工主構造の建設費は、単純活荷重合成H形桁より約 7%、プレ・テンション単純T桁より約 4.5%、単純活荷重合成鉄桁に比較して約 5%の軽減ができ、その経済性は充分に実用化の妥当性を示している¹⁾。

しかし、SEFT Beam は、その応力伝達機構を、ウェブ上部に設置するスタッドに依存するため、スタッドでの応力伝達機構、強度などを充分に検討する必要がある。上フランジの代わりにスタッドを配置した模型を使つての実験報告は既に見られるが³⁾、荷重の載荷方法が桁に曲げを生じさせる場合のみであり（すなわち、桁全体としての耐力の測定を行っている）、スタッドにとつてもう一つの過酷な状況であるスラブの曲げに関しては検討されていない。そこで、試験桁を作成して、SEFT Beam でのスラブの曲げ試験を行い、スタッドにおける応力を測定した。

実験桁の概要を図2に示す。この実験では、桁の曲げ試験も併せて行い、SEFT Beam の桁としての強度も検討しているが、これに関しては、既に発表している¹⁾のでここでは省略する。

実験桁におけるスタッドは、 $\phi 13 \times 200$ の丸鋼をウェブの穴をあけて貫通させた後、溶接してある。すなわち、片側100mm の長さのスタッドを、桁軸方向に100mm 間隔でウェブ両側に配置してある。また、床版は、12cm厚で、D13 異形鉄筋を用いて補強してある。桁端部と、ウェブの一部には桁の逆転や、運搬のための吊り下げ治具を設置してある。

3. スタッドの応力伝達の有限要素解析

SEFT BEAM の構造上での弱点になる可能性のあるスタッドにおける応力伝達機構を3次元有限要素法を用いて解析する。解析モデルを図2、図3に示す。解析モデルは、対象構造および荷重の対称性を考慮して図のように桁中央部のスタッド4本分の区間を取り出した。要素分割は、スラブおよびスタッドに関しては6面体アイソパラメトリック要素（8節点）を用い⁴⁾、スタッドとスラブの境界には、8節点ジョイント要素^{5)、6)}を導入して境界面での剝離・滑動現象を再現できるようにした。ウェブは、ほかの部分に比較して極端に要素が小さくなり、全体剛性行列が不安定になりやすいので省略し、固定境界としてモデル化した。荷重条件がスラブの曲げに対応することから、桁のたわみは小さく、桁の曲げの影響はほとんどないことから、このようなモデル化でも十分にスタッドの応力伝達を解析できる。

スタッドの最も過酷な応力状態は、水平、鉛直両方向の荷重成分の合力で考えるべきであるが、ここでは、スラブの曲げに対するスタッドの応力伝達に着目するため支間中央部分をモデル化し、橋軸方向の荷重も加えてはいない。

解析は、荷重条件を2通り、すなわち、スラブの正曲げ、負曲げ。各々の荷重条件に対して、スタッドとスラブの境界面の条件として、ジョイント要素無し（境界面での付着が完全である場合）、線形挙動をするジョイント要素を導入（ジョイント要素は設けるが、剝離・滑動をさせず、境界面において弾性挙動のみをさせる。これにより、付着が完全ではないが、剝離・滑動を生ずるまでには至っていない中間的な状態を表現する）、非線形挙動をするジョイント要素を導入（剝離・滑動を表現）、の3条件を設定し、計6通りの計算を行った。

計算に用いた諸物性値、荷重条件を表1に示す。スラブコンクリートおよび鋼桁の物性値は材料試験の値を用いている。また、ジョイント要素の物性値は、その挙動が、例えば、圧縮の場合、2つの面の相対距離が負になるなど実際の物理現象と異なることから、接合剛性はできるだけ大きなことが要求されるが、あま

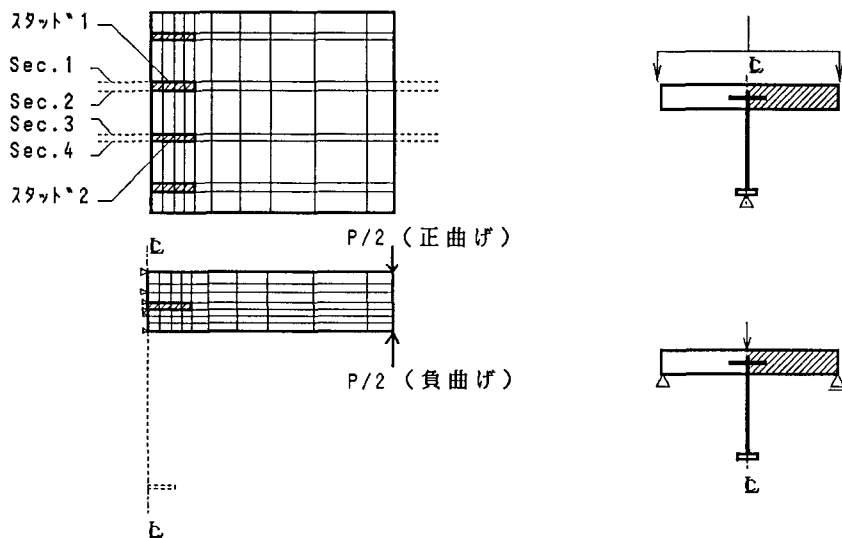
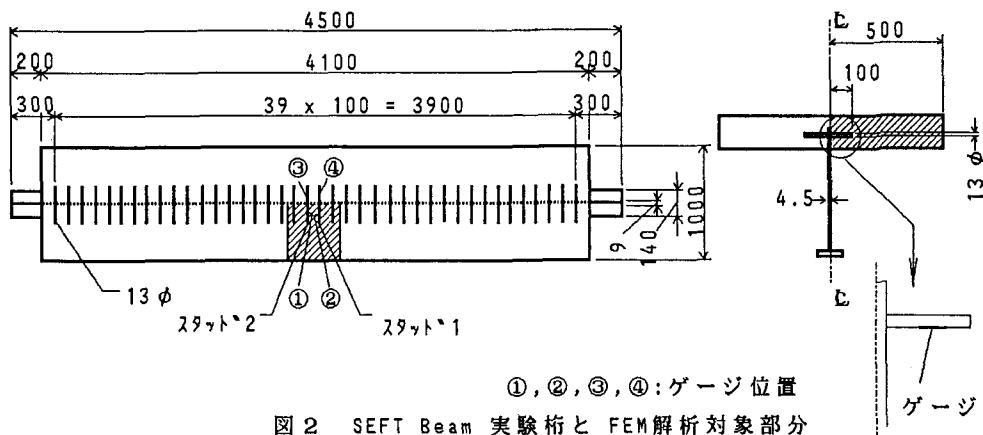


表1 有限要素解析に用いた諸物性値

スラブコンクリート	ヤング率	$E = 3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
	ポアソン比	$\nu = 0.17$
鋼材	ヤング率	$E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
	ポアソン比	$\nu = 0.3$
ジョイント要素	接合剛性	$kr = 8.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
	接合剛性	$ks = 8.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
	接合剛性	$kt = 8.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
	粘着力	$C = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$
	摩擦角	$\varphi = 30^\circ$

$$1.0 \text{ kgf/cm}^2 = 98.0665 \text{ kPa}$$

り大きくすると、数値計算において解の収束が得られないなどの不都合が生じる。したがって、ここでは、ジョイントを用いないモデルの解と、線形挙動のみをするジョイント(剝離、滑動をさせない)を用いた解を比較して、その差が 5% 以内になるように設定した。粘着力 C と内部摩擦角 ϕ に関しては、具体的な数値の実験例など文献等に見当たらなかったため、ここでは適当に与えた。この点に関しては、今後資料の収集に努めたい。

4. 解析結果とその考察

有限要素解析結果の一部を図4、図5に示す。

各々の図は、スタッド軸方向断面(桁軸直交方向)での、ガウス積分点におけるスタッド軸方向のスタッド内の応力値を示している。

各々の図から、スタッドには、曲げおよび軸力が作用していることがわかり、特に、スタッド根元(ウェブへの取付位置)に近い断面ほど応力値は大きくなっている。また、応力値は、線形モデル(ジョイント要素を用いない)、非線形モデル(ジョイント要素を用い、剝離・滑動を考慮)、線形バネモデル(線形挙動のみをするジョイント要素を導入)の順に小さくなっている。

これらの計算結果を実験結果と比較すると、表2のようである。表2を見ると、荷重が比較的小さな範囲では非線形モデルが比較的实验値に近く、荷重が大きくなると線形バネモデルがかなり実験値に近い値を示している(表中、負曲げ載荷の結果で Sec.2 および Sec.4 の実験値は荷重が大きくなった場合に明らかに不自然な挙動を示していることから、ゲージに不具合が生じたものと考えられ、ここでは考慮していない)。

実験結果が小さな荷重範囲で非線形モデル、大きな荷重の作用下で線形バネモデルに最も近い挙動を示すのは、剝離あるいは滑動が生じてはいるものの、大きな荷重の作用下ではダイレイタンス的な境界面挙動(ここでの有限要素解析では考慮していない)をしていると推測される。数値計算による、より詳細な荷重伝達の再現のためには、ジョイント要素の特性の影響やダイレイタンス挙動の導入が必要と考えられる。

曲げ応力値自体は、一般的な荷重状態(0~20tf)、すなわち、実際に供用した場合に、車両軸重として床版曲げ方向に加わる荷重の状態に対しては十分にスタッドが安全であることを示している(20tf載荷時で約240kgf/cm²)。

普通、正曲げが作用した場合には、ウェブ上端面に沿って床版にひび割れが生じると予想されるが、今回の実験桁では、12cm厚と薄い床版に対してD13の鉄筋で床版が補強されていたためか、載荷範囲では、ひび割れは発生しなかった。したがって、ここでの数値解析が、スタッドおよび鋼桁と床版コンクリートの間の剝離・滑動のみを考慮していることで、実験結果との比較を行う上では、妥当であったと言える。

一方、27tf載荷時におけるスタッドの鉛直方向せん断力(FEM解析結果のスタッド根元断面内せん断応力にスタッド断面積を乗じて求めた値)は、非線形解が最も大きくスタッド1において227kgf、スタッド2で306kgfであった。スタッドのせん断耐力は鉛直方向、水平方向の合成力で評価することになるが、27tf載荷時の最大水平せん断力の計算値(実験値、FEM解析値ともに得られていないので、合成桁の設計に準じて試算した値)は、426kgf/cmであり、スタッドの間隔は10cmであるからスタッド1組みあたり4260kgf従って1本あたりの最大作用せん断力は2130kgfとなる。支持条件が異なるので厳密な比較ではないが、水平方向せん断力に対する鉛直方向せん断力の比率 $306/2130=0.14$ と小さいことから、通常の合成桁と同様に水平方向の照査で十分と考えられる。

このスタッドの安全性を検討するために行った、床版の正曲げ、負曲げ実験においては、いずれの場合も20tfの載荷では破壊しなかったため、通常の荷重状態では十分に安全であると考えられる。床版の曲げ載荷では、構造的に最も不利な荷重条件と考えられる負曲げ実験で破壊するまで載荷したところ27tfで破壊に至った。その際の観察では、床版下面でウェブとの間で剝離が生じ、荷重の増加に伴って徐々にV字形の変形をし、スタッドの抜け出しによって一気に床版コンクリートが破壊に至った。上に述べた解析結果と併せ

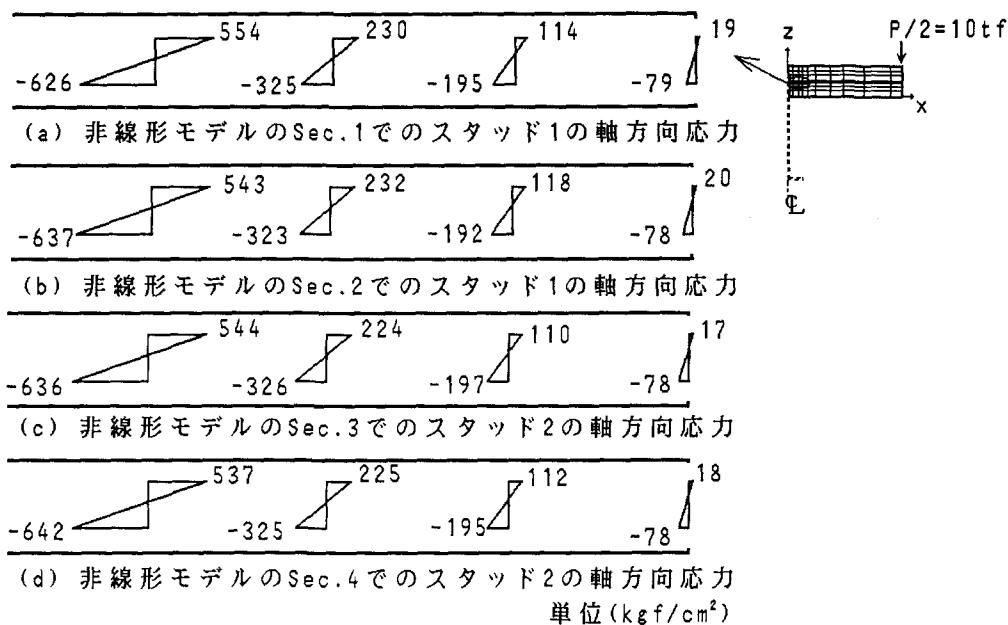


図4 FEM解析結果(正曲げ) 20tf载荷時

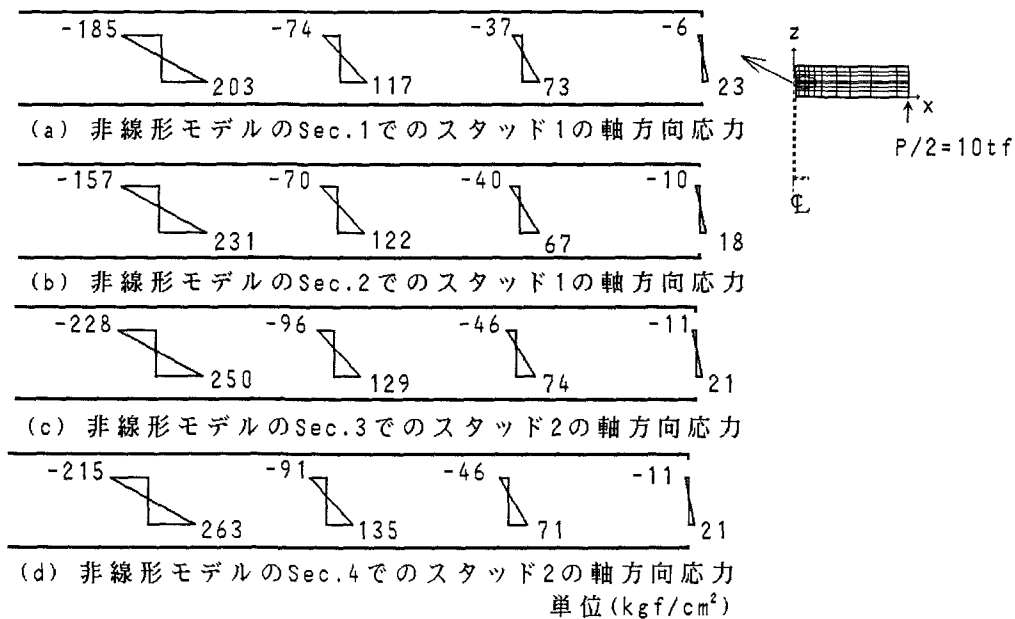


図5 FEM解析結果(負曲げ) 20tf载荷時

表2 解析値と実験値の比較

(a) 正曲げ

荷重 (tf)	部位	測点	線形モデル (kgf/cm ²)	線形ばねモデル (kgf/cm ²)	非線形モデル (kgf/cm ²)	実験値 (kgf/cm ²)
2	Sec. 1	①	-74	-21	-34	18
2	Sec. 2	②	-73	-21	-34	-10
2	Sec. 3	③	-76	-24	-34	16
2	Sec. 4	④	-76	-23	-34	-8
8	Sec. 1	①	-295	-86	-132	-26
8	Sec. 2	②	-294	-82	-131	-100
8	Sec. 3	③	-304	-94	-132	4
8	Sec. 4	④	-303	-93	-132	-92
14	Sec. 1	①	-516	-150	-230	-114
14	Sec. 2	②	-515	-144	-229	-258
14	Sec. 3	③	-532	-165	-229	-100
14	Sec. 4	④	-531	-162	-229	-204
20	Sec. 1	①	-737	-214	-325	-236
20	Sec. 2	②	-736	-206	-323	-436
20	Sec. 3	③	-760	-236	-326	-234
20	Sec. 4	④	-759	-232	-325	-276

(b) 負曲げ

荷重 (tf)	部位	測点	線形モデル (kgf/cm ²)	線形ばねモデル (kgf/cm ²)	非線形モデル (kgf/cm ²)	実験値 (kgf/cm ²)
2	Sec. 1	①	74	21	14	8
2	Sec. 2	②	73	21	14	10
2	Sec. 3	③	76	24	16	-2
2	Sec. 4	④	76	23	16	2
8	Sec. 1	①	294	85	50	46
8	Sec. 2	②	294	82	51	28
8	Sec. 3	③	304	95	57	14
8	Sec. 4	④	304	93	58	10
14	Sec. 1	①	516	150	82	92
14	Sec. 2	②	515	144	86	344
14	Sec. 3	③	533	166	97	58
14	Sec. 4	④	532	163	99	236
20	Sec. 1	①	737	214	117	242
20	Sec. 2	②	735	206	122	1114
20	Sec. 3	③	761	237	129	268
20	Sec. 4	④	760	232	135	500

1 tf=9.80665×10³ N, 1 kgf/cm²=98.0665 kPa

て考えると、スタッドそのものの強度ではなく、スタッドと床版コンクリートの結合を如何に強固にするか、またその結合強度の評価方法をどうするかが今後の課題といえる。

5. 結論

筆者らが開発中の、自重によるプレストレス導入桁(SEFT Beam)の床版曲げに対するスタッドの安全性を検討するため3次元有限要素解析を行った。実験結果との比較を通じて、スタッドとコンクリートの間で剝離・滑動(特に滑動)は生じているがダイレイタンスーにより力が伝達されていることが推測できる。実験では、最終破壊は、スタッドの抜け出しとともに急速に生じており、このことからスタッド自体の安全性は充分であり、むしろ、スタッドと床版コンクリートの付着を如何に保つかが課題となる。しかし、今回の床版曲げ実験でも、スタッドの応力は十分に安全な値の範囲にあり、かつ水平方向せん断力の約15%の大きさであることからSEFT Beamにおけるスタッドの安全性は充分であるといえよう。床版曲げに対しては、床版の配筋の一部がウェブを貫通するような方法を採用すれば、さらにスタッドの負担は少なくなると考えられる。また、スタッドの桁軸方向のせん断抵抗に関しては、文献1)で詳しく述べているが、橋軸方向に関しては実験結果、解析結果双方からの検討で充分に安全であることが確認されている。

今後、ジョイント要素の特性値の検討やダイレイタンスー挙動の導入、さらには弾塑性解析など数値解析モデルの改良を行い、より実際に近いモデル化により、桁の終局状態での挙動も追跡する必要があると考えられる。また、2次的な応力であるクリープ、乾燥収縮の取扱いなどの設計における細部の検討が必要となる。

謝辞

本研究で示した数値計算に関して、嶋利幸氏、石井幸一郎氏(当時、本学学生)の協力を得た。また、実験データの整理に関して、大橋隆樹氏、中田知志氏、三田周平氏(共に佐藤鉄工㈱)にお世話になった。記して感謝の意を表す次第である。なお、数値計算には、金沢大学情報処理センター設置のFACOM-M760/10システムを使用した。

参考文献

- 1) 安田正明、小堀為雄：自重を利用したプレストレスT形桁の理論と実験、橋梁と基礎、88-9、pp.29～34、1988.
- 2) 中田知志、小堀為雄：自重によるプレストレスT形桁の特徴と施工法、土木学会年次学術講演会講演概要集、I-PS4、pp.8～9、1988.
- 3) Toprac, A. Anthony and Eyre, Dale G.: Composite Beams with a Hybrid Tee Steel Section, Proc. of ASCE, Vol.93, No. ST5, Paper 5518, 1976.10.
- 4) Owen, D. R. J. and Hinton, E.: Finite Elements in Plasticity -Theory and Practice -, pp.157～270 Pineridge Pres. Ltd. 1980.
- 5) 土岐憲三ほか：3次元ジョイント要素による地盤一構造物形の非線形振動解析、土木学会論文報告集、No. 322、pp.51～61、1982.06.
- 6) 三浦房紀ほか：3次元ジョイント要素の改良とその動的問題への適用、土木学会年次学術講演会講演概要集、I-382、PP.763～764、1985.

(1989年10月2日受け付け)