

鉄道橋用断続合成桁の設計法の提案

DESIGN METHOD PROPOSAL OF PARTIAL COMPOSITE CONTINUOUS RAILWAY GIRDERS

稲葉紀昭*、井口光雄**

Noriaki Inaba and Mitsuo Iguchi

* 日本鉄道建設公団 設計技術室 室長 (〒100 東京都千代田区永田町2-14-2)

** 日本交通技術(株) 鋼構造部 調査役 (〒110 東京都千代田区西神田2-5-2)

Continuous composite girder bridges have been often constructed for railways. For prevention of the cracks which may occur in the concrete slab in the negative moment regions the authors decided to use partial composite girders with flexible shear connectors placed over these regions. The connectors must, however, be strong enough to resist frequent repetition of relatively large slip between the slab and the steel girder. In order to devise the connectors of this type, the authors conducted a series of static and dynamic tests. FEM were also carried out for analysis of the behavior of the structure. Finally a simple design method of this kind of composite girder was proposed.

Key Words: partial composite girders, continuous girders, design method, flexible connector

1. まえがき

現在、鉄道橋としての鋼橋は騒音防止効果の高いコンクリートを併用した合成桁が主流となっている。また、その構造形式は、橋脚を中間支点として数連の単純合成桁を連続させたり、交差角度が小さい架橋道等においては橋梁の中間付近に2本橋脚を設け、その橋脚間に桁(以後、受桁と称する)を渡して、これを中間支点として単純合成桁を連続させるケースが多い。

このような橋梁形式では、合成桁相互や合成桁と受桁とを剛結合して連続構造にできれば、桁高を低くできる。また、シュアの個数も減りコンクリート床版に目地を設ける必要もなくなる。結果として、合理的で経済的な橋梁となるばかりでなく、耐荷力、耐久性、耐震性等の面からも有利となる。しかし、連続合成桁にすると、中間支点部近傍に生ずる大きな負の曲げモーメントによって、コンクリート床版に大きな引張力が作用し有害なクラックの発生する恐れがある。そのために、従来から数多くの研究^{1) 2)}がなされ、支点の上昇、下降やPC鋼材に

よってプレストレスを導入する等の方法が実橋に採用されてきた。しかし、それらの方法は設計及び施工が複雑なため、最近あまり用いられなくなった。そこで、鉄道橋としては、その実例はないが、いわゆる断続合成桁に着目することにした。その簡便な設計法が提案できれば構造的に比較的簡単で施工も通常の合成桁と同様に取扱うことが可能となる。ここで言う断続合成桁とは、負モーメント域の全区間または一部区間に、ずれを許容するコネクター(以後、柔ジベルと称する)を設置して非合成とし、正モーメント域には従来から使用しているずれを許容しないコネクター(以後、剛ジベルと称する)を設置して完全合成とした連続形式の桁であり、コンクリート床版は連続した構造とするものである。連続桁に

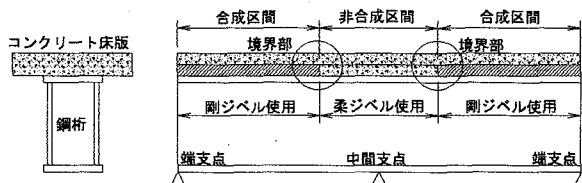


図-1 断続合成桁のイメージ

非合成区間を設けることによって、同区間のコンクリート床版の最大引張応力度の低減が期待できる。しかし、合成区間と非合成区間の境界部（以後、境界部と称する）の剛ジベルには水平せん断力の集中が予想される。

柔ジベルには、その疲労強度が高く、しかも橋軸直角方向に固定されるよう工夫された阿部らが提案³⁾したジベルを用いる。このジベルはH型断面をしており、鋼桁とコンクリート床版とのずれに対しては支圧で抵抗せず、ジベルのウェブの曲げ剛性のみで抵抗する構造であるとともに、フランジのみがコンクリートと一体となるため、鋼桁とコンクリート床版との分離を拘束するアンカー機能を果たすコネクターであるが、これまでに、これを実橋に適用した事例はない。

本文では、

- ① 柔ジベルのメカニズムとその配置によるコンクリート床版の引張応力度低減効果を試験的に確認するために、受桁と主桁を一体化させた2径間断続合成桁（以後、受桁一体型断続合成桁と称する）及び比較のために行った2径間完全合成桁の模型による静的载荷試験、
- ② ①と同じ趣旨で、受桁の無い剛な中間支点を有する①と同様な合成桁による静的载荷試験、
- ③ ①及び②に関する試験結果を評価するため、①及び②の試験体をモデル化した3次元FEM解析、

- ④ 中間支点部において列車荷重により大きな繰返しずれ、繰返し応力を受ける柔ジベルがどの程度の疲労強度を有するかを確認するため、中間支点部を想定した単純模型桁による200万回の疲労試験

について、その結果を報告する。

次に、計画中的実橋をモデル化した、剛な中間支点を有する2径間断続合成桁を対象に2次元FEM解析を行い、

- ① コンクリート床版引張力を効果的に低減させるための非合成区間長、
- ② 非合成区間長と水平せん断力の集中率の関係を調べ、これらの結果と通常の骨組解析値を比較検討し、より簡易な設計法について提案する。

2. 断続合成桁に関する試験

本試験の目的は、非合成部分に柔ジベルを用いた断続合成桁の静的・動的挙動を模型試験によって調査し、鉄道橋としての安全性を検証することにある。

2. 1 受桁一体型断続合成桁の試験

(1) 試験体

試験体は、図-2に示すサイズで2体製作した。1体

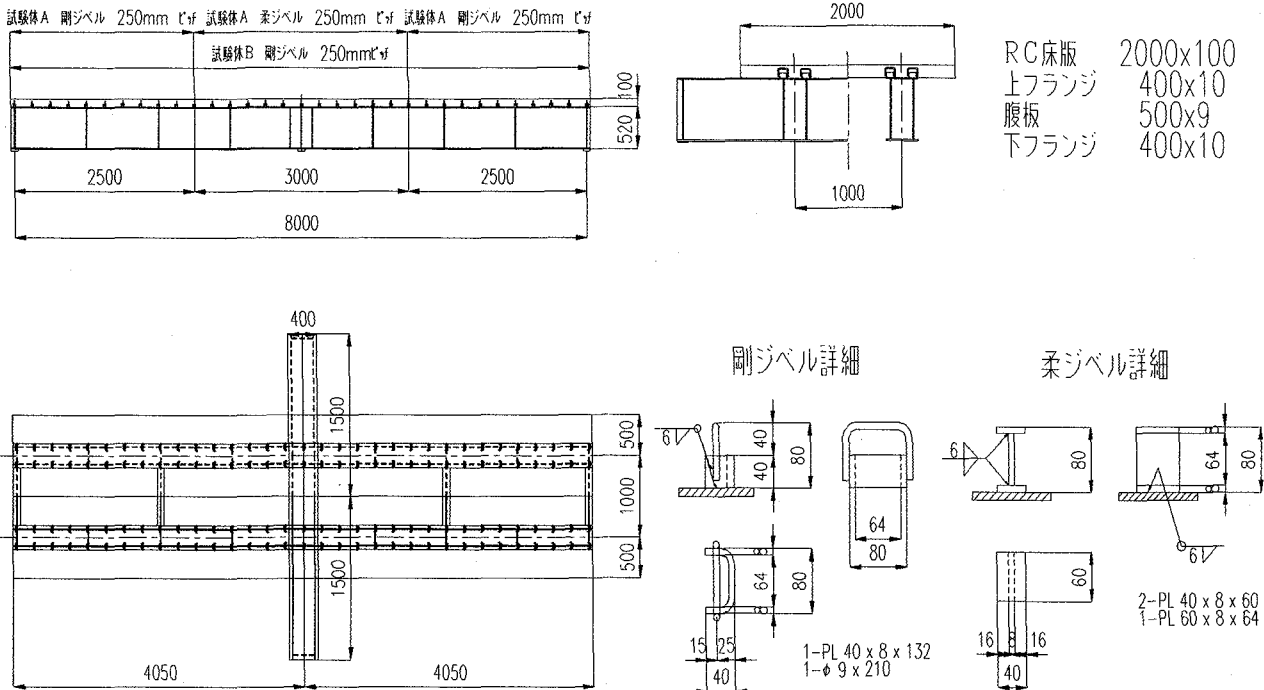


図-2 試験体の一般図

は完全合成区間に剛ジベル、非合成区間に柔ジベルを250mmピッチで配置した試験体A（断続合成桁モデル）、もう1体は、全長に剛ジベルを250mmピッチで配置した試験体B（完全合成桁モデル）である。

試験体のサイズは、試験機的能力等から全長8m（4m+4m）とし、鋼桁とコンクリート床版の力の伝達はジベルのみによって行われるように鋼桁上フランジには、ビニールテープを貼付し付着力カットの対策を行った。

断続合成桁に用いた柔ジベルは、図-2に示すように鋼板を溶接集成してH断面にした。実橋では圧延H形鋼を輪切りにしたものを使用するが、試験用に適切なサイズが入手できなかったためにビルトアップした。このウェブには、コンクリートとウェブが直接接触するのを防止するために発泡スチロールを貼付けた。

試験体に使用した鋼材はSS400（引張強度46kgf/mm²降伏強度32kgf/mm²）、コンクリート床版の鉄筋はφ10mm（SD30）を使用した。床版コンクリートの設計基準強度は300kgf/cm²であり28日強度は349kgf/cm²であった。

試験体への荷重は、図-3に示すように試験ベッドに試験桁をセット後、門形フレームに取り付けたジャッキから両径間の中央部に等曲げモーメントが作用するように載荷桁を介して行った。

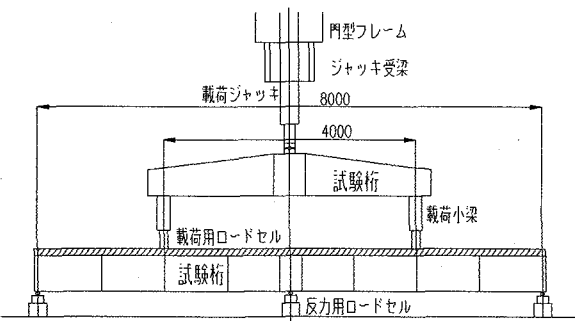


図-3 静的試験載荷要領

載荷パターンはケース1（4点对称載荷：死荷重モデル）、ケース2（2点片側載荷：活荷重モデル）、ケース3（2点逆対称載荷：偏載モデル）の3ケースとした。

(2) 静的載荷試験結果

試験体Aおよび試験体Bの静的載荷試験結果を以下に示す。図-4にケース1のたわみ分布、図-5にケース

1の中間支点部コンクリート床版上面の応力と荷重の関係を示す。図-4から、たわみは、試験体Aが大きく、その分布形状は、中間部の受桁を弾性支承とする2径間連続梁のたわみ形状を示す。

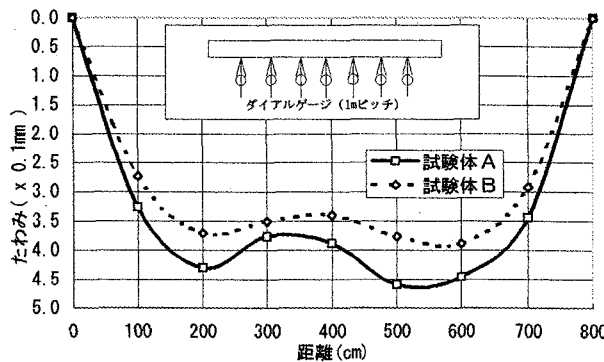


図-4 たわみ分布（ケース1、荷重10tf）

図-5から、中間支点部のコンクリート床版上面の応力度は、試験体Aが低い傾向にあり、特に2点片側載荷（ケース2）では半減していた。柔ジベルを使用したことにより、コンクリート床版の引張応力度が低減したことが実験的に明確となった。なお、試験体Bのコンクリート上面の応力は60tf付近がピークで17kgf/cm²以上の引張応力度に達しており、これから先は上がっていない。この段階では、ひび割れがコンクリート床版に発生していると考えられた。

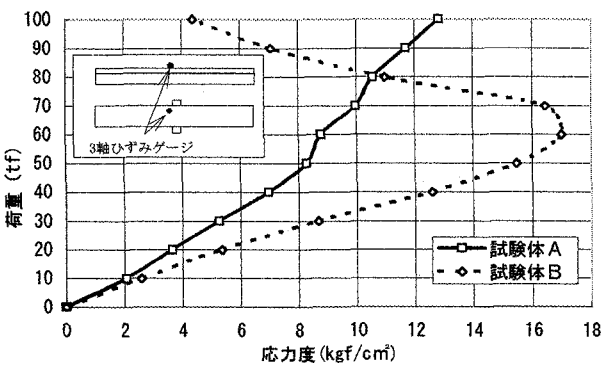
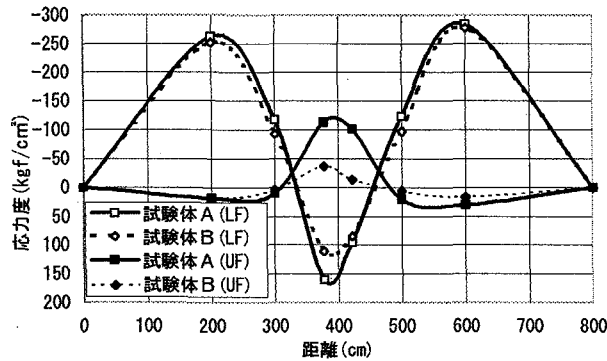


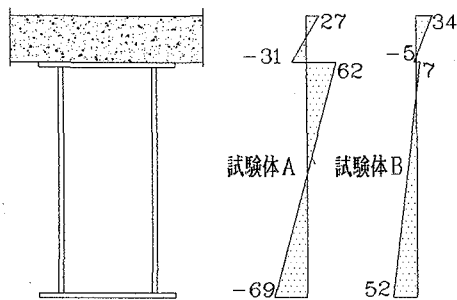
図-5 中間支点部床版の応力度（ケース1）

図-6には鋼桁の応力度分布を示す。試験体Aでは、鋼桁の中間支点部の上フランジ応力度は試験体Bに比べ大きく、負の曲げモーメントの鋼桁への分担が増加し上下フランジ応力度の絶対値の差が小さく、合成断面ではなく重ね梁的な傾向が強い。この傾向は図-7に示す中

間支点部の断面ひずみ分布からも読取ることができる。
合成区間における下フランジについては、両試験体とも
ほぼ同じ値を示している。

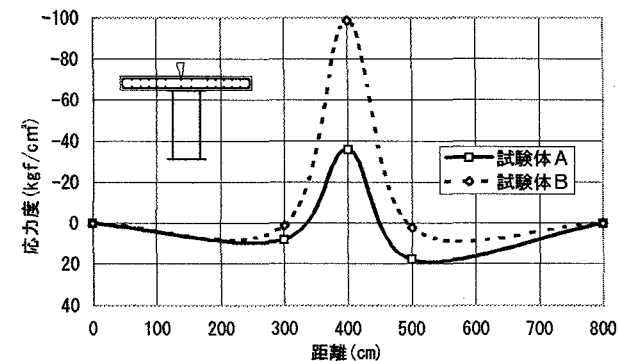


図－6 鋼桁の応力度（ケース 1、荷重 40tf）



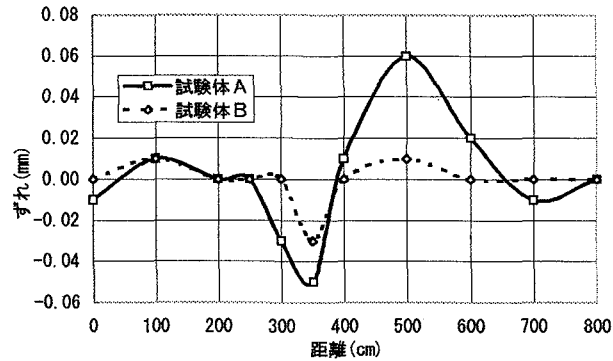
図－7 中間支点部ひずみ分布
（ケース 1、荷重 40tf、単位：μ）

図－8 には鉄筋応力度を示す。柔ジベルが配置された
試験体 A では、試験体 B と比較して半減していることが
判る。負の曲げモーメント領域では、コンクリート床版
応力が低減し、曲げモーメントは主に鋼桁が負担してい
ると考えられる。コンクリート床版と鋼桁のずれは、ダ
イアルゲージを用い鋼桁とコンクリート床版の変位差か
ら求めた。



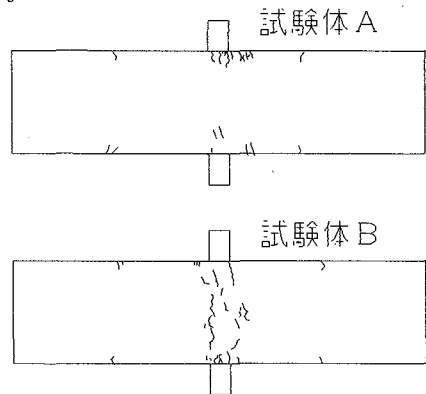
図－8 鉄筋の応力度（荷重40tf）

図－9 に 4 点対称載荷時のジベルずれ量の分布を示す。
試験体 A では柔ジベル領域に大きなずれが見られる。



図－9 床版と鋼桁のずれ（ケース 1、荷重40tf）

図－10 は、載荷荷重100tfを載荷後、コンクリート床
版上面のひび割れを観察した結果である。試験体 A では
コンクリート床版に橋軸直角方向にひび割れが発生して
いたが、その幅はヘアークラック程度で目視だけで発見
は困難であった。これに比較して試験体 B では、橋軸直
角方向の大きなひび割れが多く、多くの箇所に発生して
いた。つまり、試験体 B の中間支点部におけるコンクリート床
版上面では試験体 A よりも大きな応力が発生していたこ
とが判る。



図－10 床版のひび割れ結果

試験的に得られた特性は次のように整理できる。

- ① たわみの分布の測定値は、試験体 A が大きい。
- ② 中間支点部コンクリート床版の引張力は柔ジベルを
用いた断続合成桁とすることでかなり低減できる。
- ③ 柔ジベルには、せん断力の伝達は少なく大きなずれ
が発生する。
- ④ 剛ジベル区間では、いずれの載荷方法によっても試
験体の違いによる応力度の差は少ない。

⑤ 境界部にはせん断力の集中が想定されたが、本試験体では測定できなかった。これは、3. で述べる実橋を対象とした数値解析で検討する。

(4) FEM解析

解析は、本試験の試験体を対象とし、コンクリート床版は8節点ソリッド要素、鋼桁は板シェル要素、鉄筋はトラス要素、ジベルは床版の厚さの1/2の長さを持つ3次元梁要素でモデル化した。この梁要素の曲げ剛性が水平方向のばねとなり、断面剛性が軸方向のばねとなる。断面2次モーメント、断面積は試験に用いた部材から計算した。載荷荷重等も試験と同様とした。

解析モデルは、比較のためタイプ0（全区間剛ジベル）、タイプ1（剛ジベル+柔ジベル、非合成部のコンクリート、鉄筋は有効）、タイプ2（剛ジベル+柔ジベル、非合成部のコンクリート無視、鉄筋は有効）の3タイプについて計算することにした。この解析モデルのサイズは約3200節点である。本解析に用いた鋼とコンクリートのヤング係数比は7とした。なお鉄筋は、床版をソリッド要素で厚さ方向に2分割することとしたため、床版の厚さの1/2の位置に集めてトラス要素でモデル化した。

(5) FEM解析結果

図-11に模型試験と同様な荷重パターンで載荷した解析モデルの変形図を示す。それぞれの荷重によって受桁、主桁のたわみの様子がよく判る。このタイプの桁は、連続桁の中間支点到相当する受桁の剛度によって変形モードは大きく変わる。

図-12にタイプ0、タイプ1のたわみ分布の計測値とFEM解析値を示す。FEM解析では、タイプ0、タイプ1ともたわみの差は少ないが、FEM解析結果が試験値よりも大きめにたわんでいるが、概ね解析値と試験値の傾向は一致している。

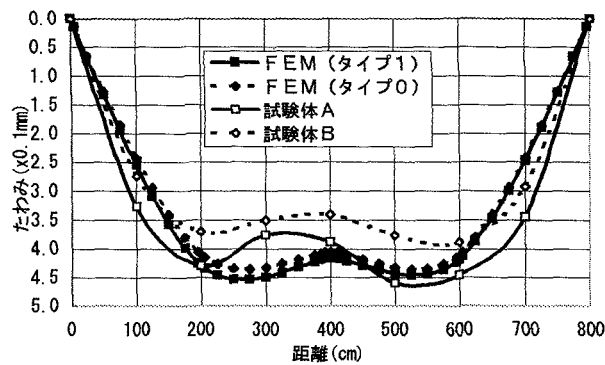


図-12 タイプ別たわみ分布（荷重40tf）

図-13にはコンクリート床版中間支点部の応力度分布を示す。この図は40tf載荷時の中間支点部の値であるが、計測値と比較すると、約1/2の応力度であった。

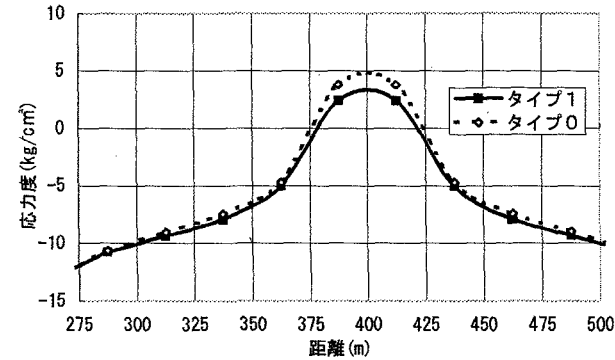


図-13 コンクリート床版の応力度
（4点对称載荷、荷重40tf）

また、タイプ0、1の差も少ない。中間支点部から左

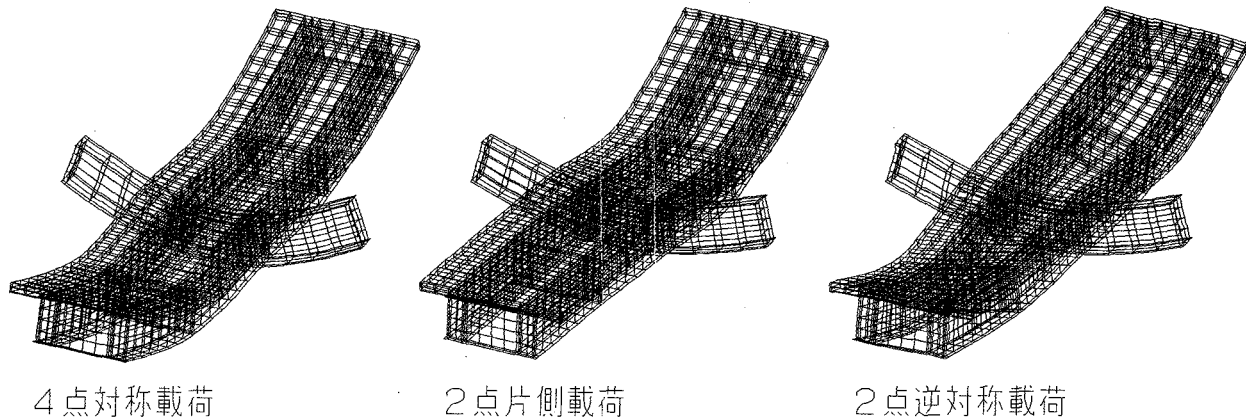
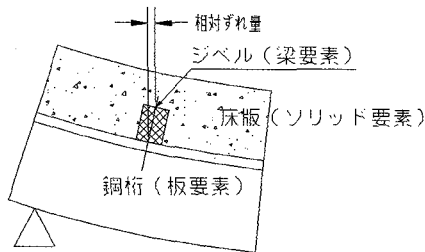


図-11 FEM解析結果（変形図）

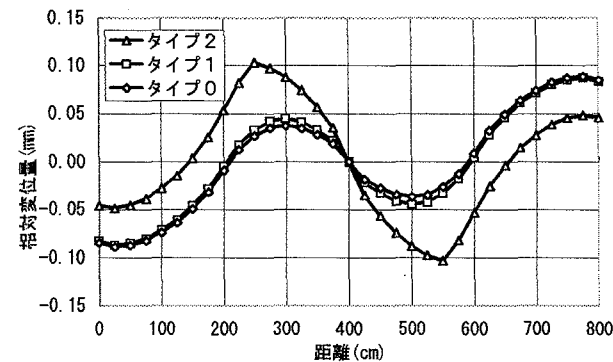
右0.5m程度の範囲に引張応力が発生している。この形式では、中間支点部が弾性支持された連続桁となるため中間支点部のピークは顕著ではないが、約6%程度が負の曲げモーメント領域であることがわかった。

図－１５，１６にジベルのずれ量を示す。ここで示すずれ量は図－１４に示すように、鋼桁上フランジとジベル上端との橋軸方向の変位量の差である。

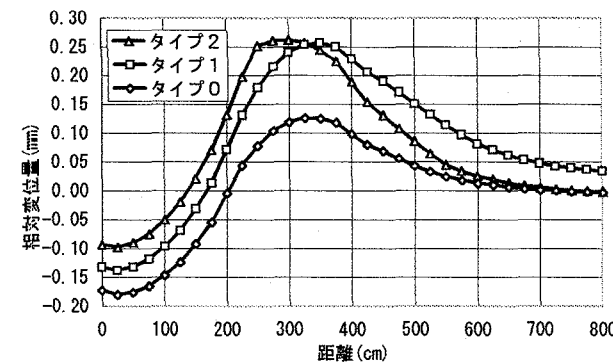
図－１６に示すように片側載荷の場合、完全合成桁（タイプ０）と非合成部コンクリートを無視し鉄筋を有効とした断続合成桁（タイプ２）とでは、断続合成桁が２倍程度大きくなることが判る。



図－１４ 相対変位の概念



図－１５ ジベルのずれ量（４点対称載荷）



図－１６ ジベルのずれ量（２点片側載荷）

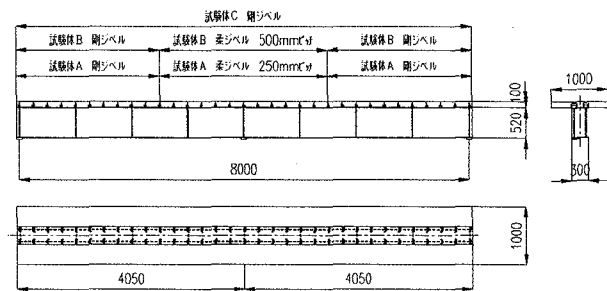
2. 2 2 径間断続合成桁の試験

(1) 試験体

試験体は受荷の無い１主桁の断続合成桁とし、３体を製作した。図－１７のように、非合成区間に柔ジベルを250mmピッチで配置した試験体A、同区間に柔ジベルを500mmピッチで配置した試験体B、全長に剛ジベルを250mmピッチで配置した試験体Cである。

試験体の全長、断面サイズ及びジベルのサイズは２．１と同様である。試験体に使用した鋼材はSS400（引張強度44kgf/cm²、降伏強度30kgf/cm²）、鉄筋はD10、SD30を使用した。

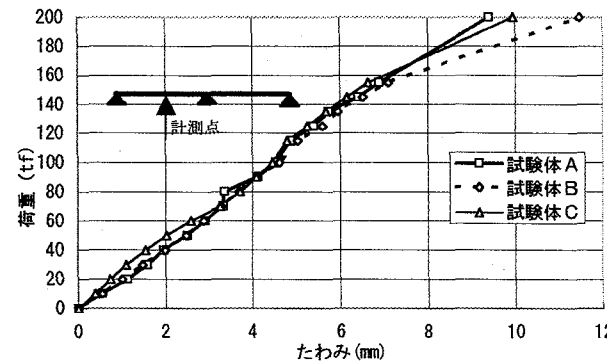
コンクリート床版の設計基準強度は300kgf/cm²、28日強度は402kgf/cm²であった。また、２．１と同様な条件でFEM解析を行うこととした。



図－１７ 試験体一般図

(2) 試験結果およびFEM解析結果

図－１８に荷重たわみ関係を示す。断続合成桁である試験体A，Bの差はほとんど見られないが、完全合成桁である試験体Cに比べてたわみが大きくなる傾向が実験的に確認できた。



図－１８ 荷重とたわみの関係

図-19には、中間支点部の鉄筋応力度と荷重の関係を示す。30tf程度の時に試験体Cの鉄筋応力度は急激に変化している。一方、試験体A、Bでは50tf程度までは線形的に増加している。このことから、完全合成桁よりも断続合成桁のほうがコンクリート床版の引張応力度が低減しひび割れ発生が遅くなることが実験的に確認できる。

図-20には試験体A及び試験体Cについて鋼桁応力度を示す。試験体Aについて行ったFEM解析結果と試験結果との傾向は概ね一致している。

また、断続合成桁をモデル化した試験体Aの中間支点部の上下フランジにおける測定応力度の絶対値は試験体Cに比べて大きく、負の曲げモーメントの鋼桁への分担が増加し合成断面ではなく重ね梁的な傾向が見られる。

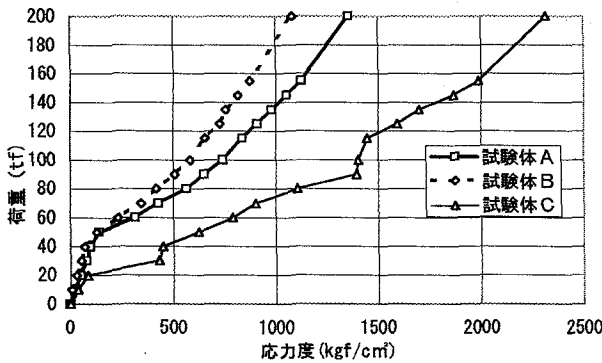


図-19 鉄筋応力度と荷重の関係

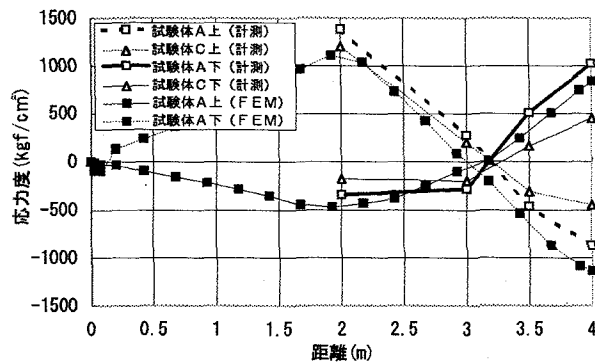


図-20 鋼桁応力度の分布 (荷重40tf)

荷重試験及びFEM解析により得られた特性は次のように整理できる。

- ① 柔ジベルを用いた試験体A、Bとも2.1の結果と同様に中間支点部付近でのコンクリート床版引張応

力度は低減されていることが判った。

- ② 道路橋示方書⁴⁾では正負の曲げモーメントいずれの領域でもずれ止めを配置することを規定しているが、米国のAASHTO示方書では、むしろ疲労とコンクリート床版ひび割れ低減のため、負の曲げモーメント区間では、一部または全域のずれ止めを除いた断続形式が有利なことが認められている。試験体A及びBでは、負の曲げモーメント区間に柔ジベルを用いたが、柔ジベル配置区間では非合成桁の挙動の傾向がみられた。

2.3 柔ジベルを取付けた非合成桁の疲労試験

(1) 試験体

試験体は、断続合成桁の非合成区間をモデル化することにし、疲労試験機的能力等から全区間にわたって柔ジベルを取り付けた単純合成桁とすることとした。すなわち、2.2で製作した断面と同寸法の1主桁の上下を逆にして、動的荷重を上方から行い、コンクリート床版に引張力を作用させるものである。試験体は3体製作しそれぞれを試験体D (柔ジベル250mmピッチ)、E (柔ジベル500mmピッチ)、F (剛ジベル250mmピッチ)とした。図-21に試験体の寸法を示す。試験体D、E、Fに使用したジベルは2.1、2.2で使用したものと同サイズとした。

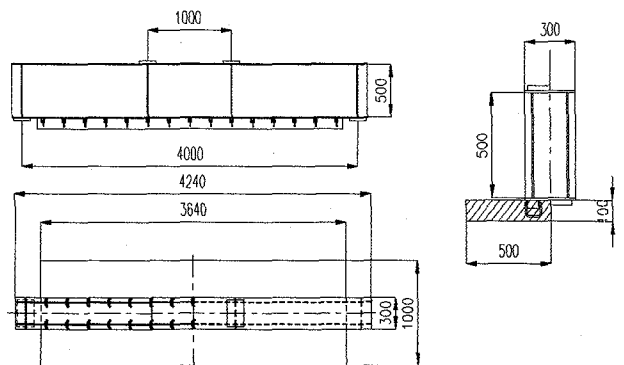


図-21 疲労試験体

荷重疲労寿命回数は、柔ジベルの疲労破断位置と想定されるH断面腹板とフランジとの溶接止端部の疲労強度を、日本鋼構造協会の疲労設計指針⁵⁾に定める荷重伝達型の十字溶接継手と同じ強度等級D~Eランク程度と想定

して次式により求める。

$$\Delta \sigma^3 \cdot N = C_0 = 2 \times 10^6 \times \Delta \sigma_f^3$$

$\Delta \sigma_f = 200$ 万回基本許容応力範囲
D等級 100Mpa = 1020 kg/cm²
E等級 80Mpa = 816 kg/cm²
 $\Delta \sigma$ = 柔ジベルの溶接止端部の直応力範囲
N = 疲労寿命回数

上式における $\Delta \sigma$ の値は、静的荷重試験においてひずみゲージで計測した応力度から溶接止端部の応力度を推定した。

荷重速度は、各試験体について周波数を少しずつ変えて計測し、荷重荷重波形と応力波形が一致するように 4 Hz とした。

これらの結果、疲労試験の荷重を、試験体Dは13±12tf、試験体E、Fは11±9tfとした。

(2) 疲労試験結果

試験体Dについては、あらかじめ予測した10万回ではなく約23万回程度の繰返し回数の時に柔ジベルに変状（異常な音の発生）が見られた。これを疲労亀裂の発生とした。この時点で200万回までの試験を継続するため荷重荷重を下げた（図-22）。試験体Eについては、ジベルの応力をモニターした結果、85万回程度で応力が変動した。ジベルもしくはジベル周辺のコンクリートにき裂の発生が予想されたため、荷重荷重を下げて試験を続行した。

200万回荷重後、該当するジベルを掘り出して外観の観察を行った結果、試験体Dについては、桁端から3列目までのジベルの溶接止端部外側から破断していた。

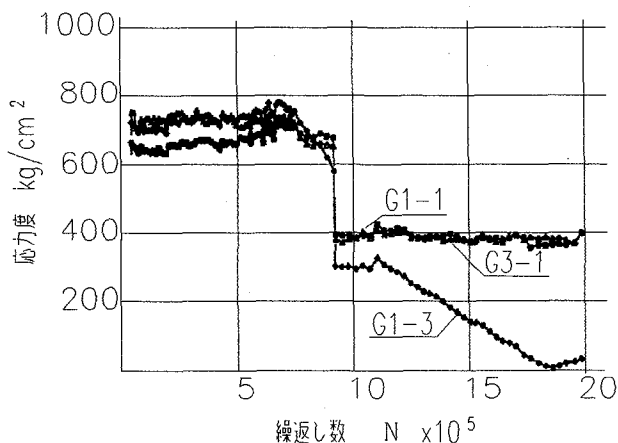


図-22 応力-繰返し線図（記号は図-23参照）

一方、試験体Eについては破断が見られなかったが、

図-23に示すような亀裂の進行が確認された。亀裂の発生箇所はすべて溶接止端部外側であった。また、亀裂の開始点はジベルのウェブ端から発生したと考えられる。試験体Fについては変状はみられなかった。

試験体D、Eについては、当初それぞれ10万回、40万回（D等級と考えた場合）程度でクラックの発生を予測していたが、測定値及び目視観察から判断すると、2倍以上の繰返しに耐えたと考えられる。試験体Fについては比較のため、D、Eと同じプロポーションをとったため、ジベルに発生する応力は小さく、ジベルの破断には至らなかったものと考えられる。

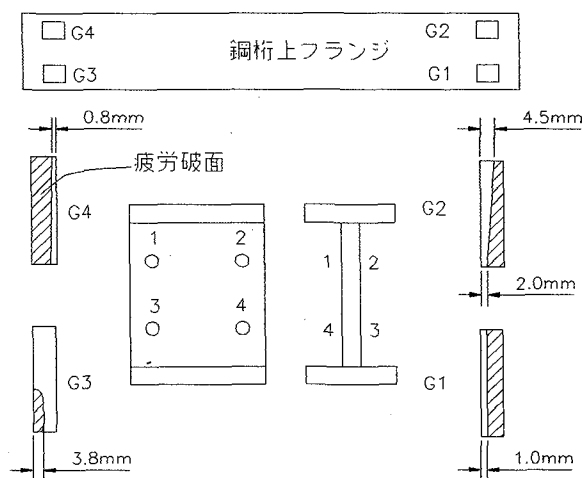


図-23 200万回終了後の亀裂（試験体E）

ジベル溶接止端部の計測値から求めた曲げ引張応力と疲労亀裂発生との関係を図-24に示す。比較のため阿部らの実験結果を応力振幅に換算して図に重ねて示し、あわせて日本鋼構造協会の十字溶接継手の荷重伝達型の疲労設計曲線D、Eを表示した。この結果、阿部ら³⁾の試験したロールH使用の場合の値を下回ったものの、日本鋼構造協会の疲労設計曲線のD等級を上回っていることが確認できた。

各試験体の疲労試験後のひび割れ観察結果を図-25に示す。試験体Fのひび割れが、数、長さとも顕著である。また、そのひび割れは裏面にまで及んでいた。この観察からも、2.1、2.2における静的試験と同様、柔ジベルを用いることによってコンクリートスラブの引張応力が緩和されることが再確認できる。

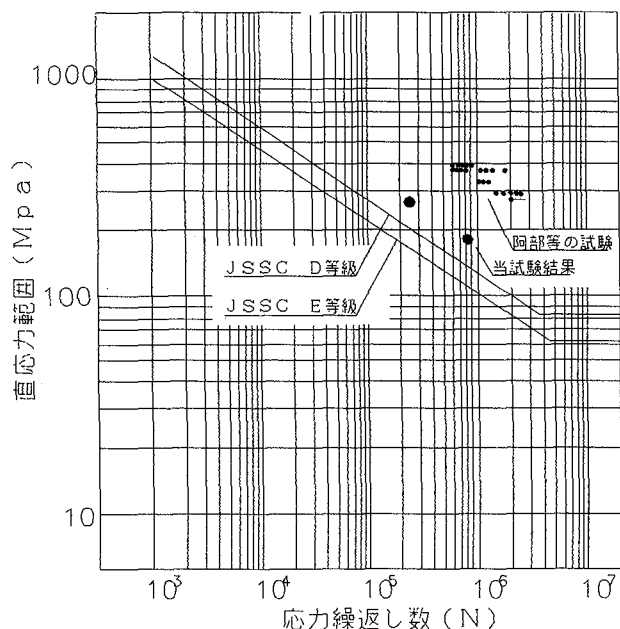


図-24 ジベル溶接止端部のS-N線図

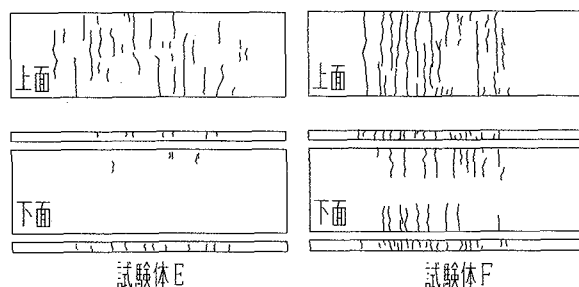


図-25 ひび割れ状況(200万回載荷後)

実験的に得られた特性は以下のように整理される。

- ① 疲労試験に先立って実施した静的試験から、たわみ分布は柔ジベルが剛ジベルより大きくなる傾向は先の試験と同様である。
- ② 柔ジベルの疲労強度は日本鋼構造協会疲労設計指針(案)のD等級を上回ることが明らかとなった。

3. 実橋を対象とした数値解析

連続合成桁における中間支点部のコンクリート床版に発生する引張力の低減方法として、断続合成桁構造が効果的であることがこれまでの試験によって明確になった。また、非合成区間には柔ジベルを用いて断続合成桁を構築できることも明確になった。しかし、これまでの試験では計測できなかった合成・非合成境界部の水平せん断

力の集中現象が実設計においては重要な問題となり、その集中度は非合成区間長に左右されることが過去の研究⁶⁾よりわかっている。しかし、これらの研究は道路橋を想定したもので、ずれ止めにスタッドを使用している。鉄道橋の合成桁では、疲労被害の観点から従来よりずれ止めには馬蹄型ジベルを使用している。そこで、FEMを用いて数値計算を行うこととした。ここでは、実際に設計された図-26に示す『北総線、都計道Bv』橋梁を対象に検討することとした。当橋梁はスパン約40mの2径間連続断続合成桁であり(全長80m)、合成区間長が約60m、非合成区間長が約17mである。実橋をモデルとして解析するため、3次元解析がコンピュータの処理上困難であるため2次元でモデル化することとした。2次元では、桁幅方向の応力度の変化が見られないが、マクロ的には断続合成作用を計算できると考えた。

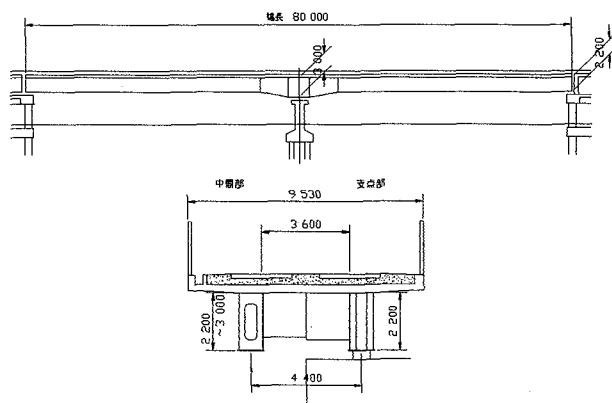


図-26 実橋モデル

(1) FEM解析方法および解析モデル

2次元FEM解析モデルは2径間連続合成桁をコンクリート床版と鋼桁上フランジおよび下フランジを梁要素とし、腹板を平面応力要素で置換えた。床版と鋼桁のずれ止めは、節点を馬蹄型ジベルおよび柔ジベルのある箇所にて水平方向と鉛直方向のバネ要素で結合した。また、柔ジベル区間はジベルピッチの1/2の箇所にも節点を設けた(図-27)。

この解析で使用するジベル1個(本)のずれ常数を、過去の研究結果⁷⁾及びこれまでの試験等から以下のように仮定した。

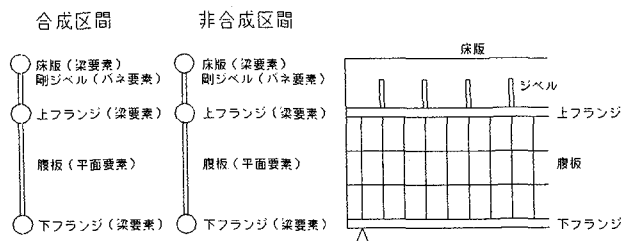


図-2.7 解析モデルの概念図

馬蹄型ジベル $3.0 \times 10^5 \text{ tf/m}$ (1個当たり)
 柔ジベル (H-150) $2.0 \times 10^2 \text{ tf/m}$ (1個当たり)

解析モデルは、非合成区間の割合を変えた表-1の4タイプとした。載荷荷重は、2径間に 1.0 tf/m の等分布荷重を載荷する全載荷と1径間に 1.0 tf/m の等分布荷重を載荷する半載荷の2種類とした。

解析モデル	スパンに対する非合成区間とその割合
N0	0%：完全合成桁
N13	13%
N21	21%：モデルにした実橋
N27	27%

表-1 解析モデル

(2) FEM解析結果

図-2.8及び図-2.9は、全載荷で非合成区間長を変化させた時の床版軸力及び鋼桁上フランジ軸力をそれぞれ示したものである。合成区間では各モデルとも相違はほとんどない。しかし、非合成区間である中間支点付近の床版引張力は、N13、N21、N27において、それぞれN0に対して、10%、22%、36%の低減率となるが、鋼桁上フランジ引張力は、反対に7%、22%、38%と増加している。非合成区間が長くなるにしたがい、床版の引張力が減少しその分鋼桁の負担する割合が増える形となった。

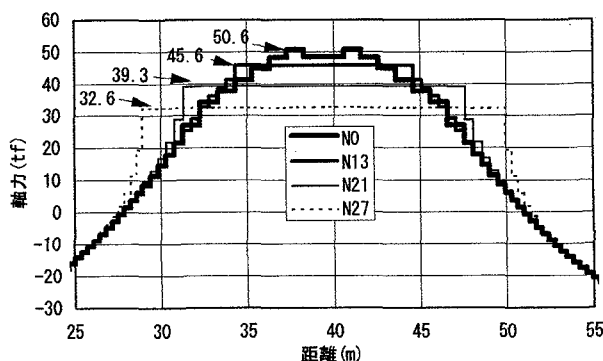


図-2.8 床版の軸力

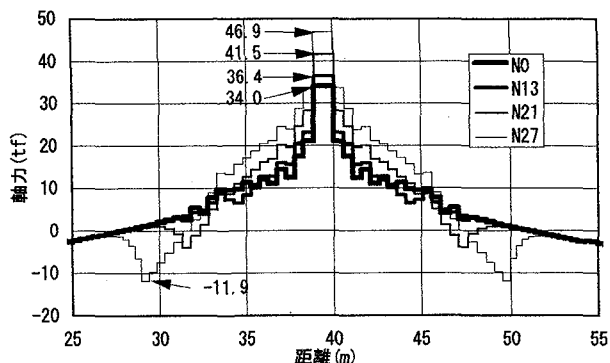


図-2.9 鋼桁上フランジ軸力

半載荷では、上記に相当する床版引張力の低減率は2%、10%、16%、鋼桁上フランジ引張力の増加率は10%、35%、47%となり、全載荷と異なった傾向が見られた。

また、非合成区間を設けたモデルの鋼桁上フランジでは境界部に局所的な圧縮力が発生し非合成区間を長くするにしたがい大きくなっている。半載荷時ではさらに大きな圧縮力となった。

図-3.0は全載荷でジベルに作用する水平せん断力の分布を示したものである。N13、N21、N27の境界部には、N0には現れない水平せん断力の集中現象がみられる。また、境界部を除いた合成区間の水平せん断力はN0の値とほぼ同じである。そのN0との割合を集中率として示したものが図-3.1である。半載荷の集中率が全載荷に比べて大きくなった。

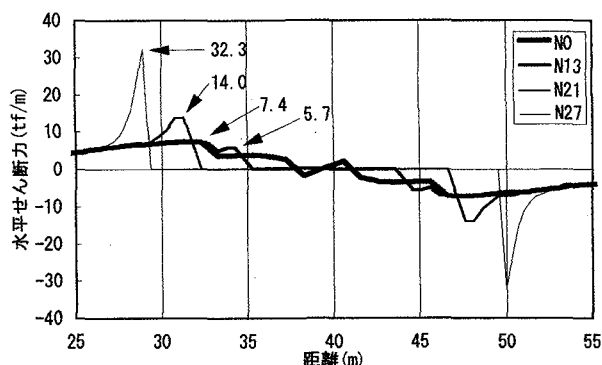
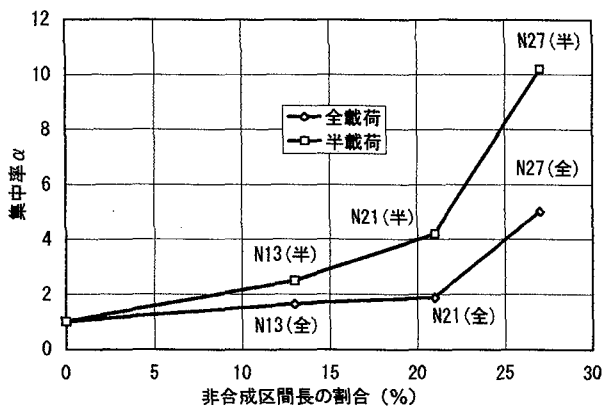


図-3.0 ジベルの水平せん断力

また、その集中する長さは全載荷・半載荷いずれにおいても境界部の剛ジベルより約3m (スパンの1/10程度) であり、非合成区間長による変化はあまり見られない。



図ー 3 1 水平せん断力の集中率

(3) FEM解析と骨組解析との比較

実際の設計においては、骨組解析から求めた断面力により、主桁およびずれ止めを設計する。非合成区間については、骨組解析から求めた断面力のつりあい、床版と鋼桁の曲率及び床版の橋軸方向変位と鋼桁の橋軸方向変位が等しくなる等の条件により、床版及び鋼桁上フランジにおける軸力、曲げモーメント、水平せん断力を求め、FEM解析の結果と比較することにより、その妥当性を検討する。

骨組解析による床版の軸力は、次式⁸⁾で与えられる。

完全合成区間の軸力

$$N = \frac{F_b \cdot a_b}{n \cdot I_v} \cdot M \quad (1) \text{ 式}$$

- N : 軸力 (tf)
 F_b : 床版の断面積 (m²)
 a_b : 合成断面の中立軸から床版の中立軸までの距離 (m)
 M : 骨組解析より求めた 2 径間連続桁の曲げモーメント (tf・m)
 n : 鋼桁と床版のヤング係数比
 I_v : 合成断面の断面 2 次モーメント (m⁴)

非合成区間の軸力

$$N = \frac{a_{st} \cdot F_{st}}{I_v} \cdot \frac{1}{e} \int_0^e M \cdot dx = \frac{a_{st} \cdot F_{st}}{I_v} \cdot M_{em} \quad (2) \text{ 式}$$

- N : 軸力 (tf)
 F_{st} : 鋼桁の断面積 (m²)
 a_{st} : 合成断面の中立軸から鋼桁の中立軸までの距離 (m)
 I_v : 合成断面の断面 2 次モーメント (m⁴)
 M_{em} : 非合成区間の外モーメントの平均値 (tf・m)
 e : 非合成区間長 (m)

これらの式による計算結果は FEM 解析結果に比べ N13, N21, N27 いずれの場合にも、非合成区間の引張軸力は全載荷では約 4%、半載荷では 7% 大きく、合成区間の圧縮軸力は N0 を含めて全載荷・半載荷ともほぼ等しい値となった。なお、完全合成桁である N0 の中間支点の引張軸力は全載荷では 23%、半載荷では 4% FEM 解析結果が大きくなった。

次に、完全合成区間と非合成区間の境界部において剛ジベルに集中する水平せん断力については、骨組解析により完全合成桁として次のように計算した水平せん断力と FEM 解析で求めた集中水平せん断力の比をとった集中率で補正することとした。

$$H = \frac{Q \cdot S}{I_v} l \quad (3) \text{ 式}$$

- H : 水平せん断力 (tf)
 S : 骨組解析から求めた鉛直せん断力 (t/m)
 Q : 合成断面の中立軸に対する床版の断面 1 次モーメント (m³)
 I_v : 合成断面の断面 2 次モーメント (m⁴)
 l : 1 個のずれ止めの受持つ区間長 (m)

完全合成桁である N0 について、(3) 式から求めた水平せん断力を図ー 3 0 に示す FEM 解析と比較すると同程度の値となった。したがって、結果的に境界部の剛ジベルにおける補正すべき集中率は図ー 3 1 と同等の値となる。

4. 2 径間連続断続合成桁の設計法の提案

3. の検討をふまえて、2 径間連続断続合成桁の設計方法の要旨及び手順を以下に示す。

(1) 非合成区間長の決定

- ① 非合成区間における床版の軸方向鉄筋量はコンクリート断面積の 2% 以上、周長率は 0.0045cm/cm² 以上となるように仮定し (通常、D19@100 か D22@125) 死荷重による引張応力度の上限値を 800kgf/cm²、疲労を考慮した許容引張鉄筋応力度を 1600kgf/cm² としそれぞれの許容軸力を求める。
- ② 全区間を完全合成桁としてその断面剛度を仮定し、骨組解析より求めた断面力 (骨組解析 1) によって設計する。
- ③ 非合成区間長を仮定して、3. (3) (2) 式より床版の引張軸力を算出する。軸力は、合成後死荷重時、活荷重

全載荷時、活荷重半載荷時とし、①の許容軸力と比較し、適切な非合成区間長を決定する。概ね、スパンの20%~25%程度が良い。

(2) 断続合成桁の設計

- ① 断続合成桁としての断面力(骨組解析2)を求める。
この場合、非合成区間の鋼桁とコンクリート床版は重ね梁とする。
- ② 骨組解析2より求めた断面力に対して、合成区間は従来通りの方法により非合成区間は鋼桁+床版の鉄筋で抵抗するものとして断面を決定する。
- ③ 境界部を除く合成区間におけるずれ止めは、従来通り骨組解析1による鉛直せん断力から3.(3)(3)式の水平せん断力を求めて設計する。境界部におけるずれ止めは上記の値に図-31の集中率を乗じて求める。さらにこの値を高さとし、スパンの1/10程度を底辺とする三角形分布するものとし、これを各荷重ケース毎に行い、必要により重ね合わせて設計する。通常は、鉄道橋合成桁用ジベルの標準設計A, G, B型の中から適するものを選択することとなる。
- ④ 柔ジベルの適正な配置間隔を決定する要因は明確ではないが、供用期間中に繰り返される列車荷重により、橋軸直角方向の力や中間支承部のがたつきが生ずるなど、鋼桁と床版が離れようとする現象に対処するため、とりあえず50cm程度の間隔で配置すればよいと思われる。柔ジベルは一般にH-150x150を使用すれば、耐疲労から求められる許容ずれ量は1.3mmとなり、今回検討した断続合成桁においては問題とならない。さらに、全長が伸び非合成区間長が増加すればロールH型钢のランクアップを考慮して対処することになるが、その場合には別途そのずれ量、疲労耐久性について検討する必要がある。

5. おわりに

以上、断続合成桁の各種試験および数値解析から、2径間断続合成桁の負のモーメント域の床版の軸力は、非合成区間長を調節することにより効果的に低減することができ、概ねスパンの20%前後の長さが適当であることが判った。加えて、非合成区間に柔ジベルを用いることの

合理性も確認できた。そして、境界部のせん断力集中度を示し、基本的には、釣合い式を直接解かず、通常の計算によって求めた値に係数倍し、スパンの1/10程度の長さに分布させ、この力に適合する馬蹄形ジベルを配置する方法をとることにより、設計計算を簡略化しようとする試みの可能性も確認できた。このような方法を使うことによって、これまで曖昧に処理してきた鉄道橋用断続合成桁の設計が、ほぼ誤りなく実行できることとなる。しかし、床版と鋼桁のずれ量に対する安全性の照査法、および支点上のジベルに発生する揚力、断面諸量、荷重条件による影響については未だ未解明の部分もあるため、更に今後も追加の研究の必要性がある。

参考文献

- 1) 橋善雄, 足立義雄: 不完全合成桁について、土木学会論文第112号(昭和39年12月)
- 2) 梶川靖治: 連続合成桁の疲労に対するずれ止め配置に関する研究(昭和60年3月)
- 3) 阿部英彦, 中島章典, 堀内博: 合成桁におけるスラブ分割の影響と柔ずれ止めの開発、構造工学論文集(1989年3月)
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説、昭和48年2月
- 5) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂出版(1993年4月)
- 6) 前田幸雄, 梶川靖治, 中谷行博: 連続合成げた中間支点上の床版引張応力度の低減について、土木学会第30回年次学術講演概要集(1975年10月)
- 7) 阿部英彦: 鉄道用合成桁のずれ止めに関する実験的研究(1975年3月)
- 8) Hawranek/Steinhardt(橋善雄, 小松定夫共訳): 鋼橋の理論と計算、山海堂(1965年1月)
- 9) 鉄道総合研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説、丸善株式会社(平成4年10月)

(1994年9月14日受付)