

# 活荷重レベルにおける連續非合成桁橋の挙動に関する一考察

中島章典<sup>1</sup>・溝江慶久<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 宇都宮大学助教授 工学部建設学科建設工学コース (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2)

<sup>2</sup>正会員 工修 川田工業株式会社 技術開発本部 技術研究室 (〒114-8562 東京都北区滝野川1-3-11)

非合成桁橋に用いられるスラブ止めは、実際には鋼桁とコンクリート床版間のずれに対してかなり抵抗する。したがって、非合成桁橋の実挙動は設計上考えている挙動とは異なることが予想される。本研究では、スラブ止めを有する連續非合成桁橋の活荷重レベルにおける実挙動を再現するとともに、これらを設計値と比較することを目的として、剛体ばねモデルを用いた非線形解析により、コンクリート床版のひび割れ、たわみ、スラブ止めに作用する水平せん断力の大きさを検討した。その結果、スラブ止めの合成功果を考慮した場合、連續非合成桁橋の中間支点付近にひび割れは生じるが、そのひび割れ幅はある程度の大きさに収まると予想され、また、最大たわみは大きく低減することが明らかとなった。

**Key Words :** continuous plate girder bridge, slab clamp, crack width, rigid-body-spring model

## 1. はじめに

通常、非合成桁橋と呼ばれるコンクリート床版を有する鋼桁橋に用いられるスラブ止めは一般に柔なずれ止めと見なされ、その主な役目は鋼桁とコンクリート床版の相対的な位置の確保であり、道路橋示方書・同解説II鋼橋編<sup>1)</sup>(以下、道示II)の基準をはじめとして、設計上は鋼桁とコンクリート床版間に働く水平せん断力を伝達しないとされている。しかし、スラブ止めも実際には合成桁橋の標準的なずれ止めとして用いられるスタッドと同程度のずれ止め剛度を有していることが明らかにされてきた<sup>2)</sup>。つまり、スラブ止めを取り付けた非合成桁実橋の挙動は、設計上考えている鋼桁とコンクリート床版との合成作用を考慮しない挙動とは異なる可能性があり、どちらかといえば合成桁橋の挙動に近いことも予想される。したがって、非合成桁橋においても、スラブ止めに作用する繰返しの水平せん断力による疲労問題や連続桁の負曲げ領域におけるコンクリート床版のひび割れの問題などが懸念される。

道路橋では、合成桁あるいは非合成桁に関わらず、その終局耐力よりも活荷重の作用がもたらす使用性や耐久性の問題が重要であることが認識されている<sup>3)</sup>。また、連續合成桁橋の負曲げ領域を非合成とし、その領域のコンクリート床版のひび割れを低減しようとする断続合成桁の考え方は古くからあり<sup>4),5)</sup>、最近においても、連續合成桁橋の負曲げ領域に柔ジベルを取り付けて、その領域のコンクリート床版のひび割れ低減効果を検討した研究が行われている<sup>6)</sup>。一方、スタッドの根

元にウレタンを巻きつけてずれ止め剛度を低減し、できるだけ非合成桁橋の挙動を再現しようとする研究も行われている<sup>7)</sup>。著者らも押抜き試験体および桁試験体のスラブ止めの水平せん断力とずれ変位の関係あるいは疲労強度特性などを検討してきている<sup>8)</sup>。

本研究では、コンクリート床版と鋼桁との間にスラブ止めを配置した連續形式桁橋(以後、連續非合成桁橋と呼ぶ)の活荷重レベルにおける実挙動の解明を主たる目的とし、一般的な諸元を有する連續非合成桁橋の挙動を検討するとともに、これらの結果を連續合成桁橋あるいは連續非合成桁橋の設計値と比較することとした。合成桁橋の使用性に関しては、引張を受けるコンクリート床版のひび割れ幅、活荷重によるたわみ、車両走行などによりずれ止めに作用する繰返しの水平せん断力などが重要な問題となる。ここでは、おもにスラブ止めを有する連續非合成桁橋を対象とし、これらの問題点について剛体ばねモデルを用いた非線形解析により検討を行った。

## 2. 剛体ばねモデル解析

### (1) 連續非合成桁橋の剛体ばねモデル

著者らは不完全合成桁の弾塑性挙動を検討するに際して、剛体ばねモデルを用いた弾塑性解析結果を実験結果と比較し、その解析法の有効性を示した<sup>9)</sup>。本研究で行う連續非合成桁橋の解析に際しても、非線形挙動の追跡方法など基本的にはその解析法と同じ手法を用いるので、以下には各ばね要素の構成関係の概要を示す。

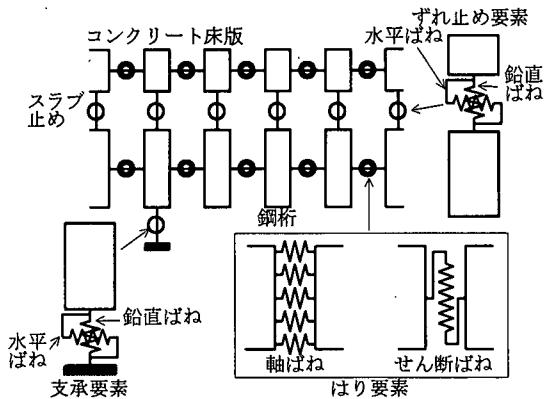


図-1 剛体間ばね要素形状

## (2) ばね要素特性

剛体ばねモデルを用いて非合成桁橋を解析する際には、図-1 のように鋼桁および鉄筋コンクリート床版を橋軸方向に分割し、分割された剛体間には、はり要素として、複数の軸ばねと 1 本のせん断ばねを設ける。また、コンクリート床版と鋼桁の剛体間には、スラブ止めの挙動を模擬するすれ止め要素として、水平方向の力に抵抗する水平ばねと鉛直方向の力に抵抗する鉛直ばねを設ける。さらにここでは、支承位置の鋼桁下フランジ下面と固定面との間に、水平ばねと鉛直ばねでモデル化した支承要素を設ける。

各ばねは材料の構成関係を表すものであり、剛体ばねモデルを用いて非合成桁橋の非線形挙動を追跡するためには、各ばねが表す材料の非線形の構成関係を決定しておく必要がある。

鋼桁およびコンクリート床版内に配置する鉄筋の軸ばね特性は完全弾塑性型の一軸の応力-ひずみ関係で表現し、弾性係数  $E=206\text{GPa}$ 、降伏応力  $\sigma_y=314\text{MPa}$ とした。

コンクリート床版の軸ばね特性は、コンクリートの一軸の応力-ひずみ関係で表現した。圧縮領域の終局圧縮ひずみ  $\epsilon_{cu}(=0.35\%)$  までは、図-2 のようにコンクリート標準示方書<sup>10)</sup>に従った応力-ひずみ関係とした。ここに、圧縮強度  $\sigma_c$  およびそれに対応するひずみ  $\epsilon_c$  はそれぞれ、33MPa および 0.2% とした。一方、引張領域においては、引張強度  $\sigma_t(=3.14\text{MPa})$  までは圧縮側の初期弾性係数 ( $=33\text{GPa}$ ) に従い、それ以後は引張強度に相当するひずみ  $\epsilon_t$  の 20 倍までひずみが緩やかに減少するものとした。

はり要素のせん断ばね特性には常に弾性関係を仮定し、鋼およびコンクリートのせん断弾性係数は、それぞれ  $79.2\text{GPa}$  および  $12.3\text{GPa}$  とした。ただし、鋼桁に作用するせん断力にはウェブのみが抵抗するものと考え、その形状係数を考慮してせん断ばねのばね定数を

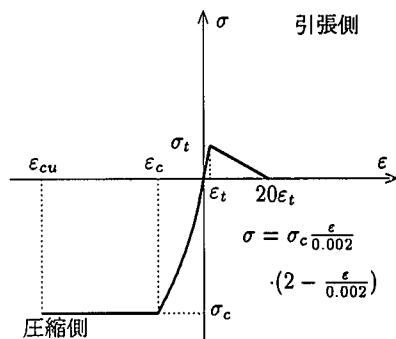


図-2 コンクリート床版の軸ばね特性

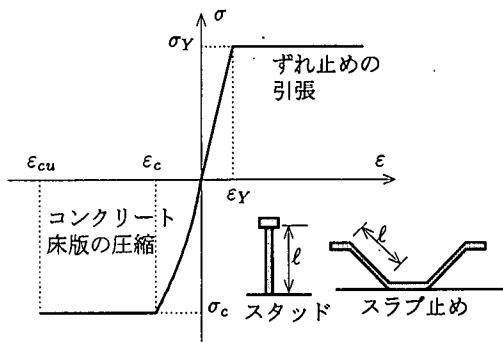


図-3 すれ止めの鉛直ばね特性

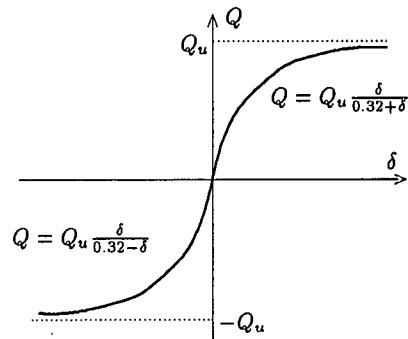


図-4 すれ止めの水平ばね特性

決定した。また、コンクリート床版に作用するせん断力にはコンクリート部のみが抵抗するものと考えた。

スラブ止めやスタッドなどのすれ止めの鉛直ばね特性を図-3 に示す。引張側の応力-ひずみで表した構成関係は、すれ止めがコンクリート床版の浮き上がりに抵抗すると考えて、近似的にすれ止めの軸部断面積（スラブ止めでは、スラブ止め 1 本の断面積の 2 倍）と軸部長さ（それぞれ図-3 の  $l$ ）に基づいて、鋼材の応力-ひずみ関係で表した。一方、圧縮力は連結している剛体間の界面全域（1 つの剛体要素の鋼桁上フランジ上面

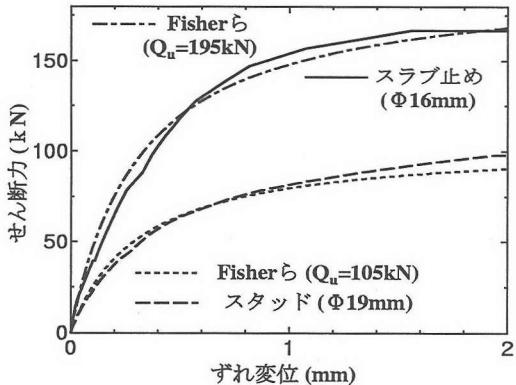


図-5 静的押抜き試験結果

の面積)で伝達されると考え、コンクリートの一軸の応力-ひずみ関係を構成関係として用いている<sup>9)</sup>。

ずれ止めの水平せん断伝達を表す水平ばね特性には、図-4に示すように、Fisherら<sup>11)</sup>によって提案された一般化されたせん断力  $Q$ (kN)とずれ変位  $\delta$ (mm)の関係を適用した。この曲線は、漸近値であるせん断強度  $Q_u$ のみで定まる形になっており、静的押抜き試験より得られるずれ止めの水平せん断力-ずれ変位関係を容易にモデル化することができる。

そこで、スラブ止めの静的押抜き試験より得られた水平せん断力とずれ変位の関係<sup>2)</sup>をFisherらの提案式を用いてモデル化する。この実験ではスラブ止めとして、実寸大の直径16mmの丸鋼を用いている。図-5に径16mmのスラブ止めの押抜き試験結果を実線で示す。縦軸はスラブ止め1本に作用するせん断力であり、横軸はスラブ止めのずれ変位である。一点鎖線で示したFisherらの提案式は実線で示した実験値を近似するように、せん断強度  $Q_u = 195\text{kN}$ でモデル化した。これと同様にして、破線で示す軸径19mm、全高150mmのスタッドの押抜き試験より得られた水平せん断力-ずれ変位関係から、そのスタッド1本の水平せん断力-ずれ変位関係は、点線で示すようにせん断強度  $Q_u = 105\text{kN}$ でモデル化した。以下で行う連続桁橋の解析では、この最終的に得られたずれ止めの水平せん断力-ずれ変位関係を剛体ばねモデル解析に導入するずれ止め要素の水平ばね特性として使用することとする。つまり、ばね定数としてはその水平せん断力-ずれ変位関係の接線勾配を用いることになる。

支承要素の水平ばねおよび鉛直ばねは、常に弾性範囲で挙動するものとし、水平ばねのばね定数の大きさによって、支承の可動(ばね定数  $9.8\text{kN/m}$ )および固定(ばね定数  $980\text{GN/m}$ )を仮定した。

以上の各構成関係の接線勾配を各ばね要素の剛性マトリックスに導入することによって、非合成桁橋の非

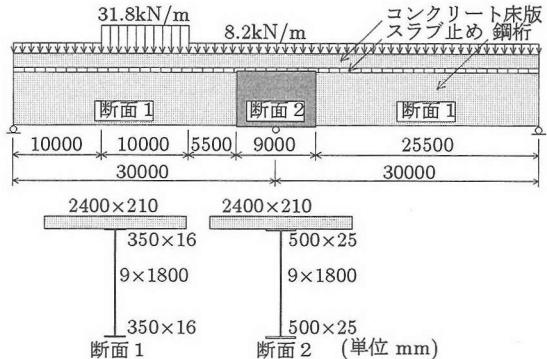


図-6 解析モデル

線形挙動を追跡することができるが、具体的な剛性マトリックスの誘導過程などの詳細については文献9)に譲り、ここでは省略する。

### (3) 解析モデル

本研究では、実際的な諸元を考慮して、1スパン30m、2車線当たりで鋼4本主桁を有する2径間連続非合成桁橋を解析対象とした。これを、桁としての挙動を検討する観点から、図-6に示すように、対応する幅のコンクリート床版と鋼桁1本を解析モデルとして用いた。鋼桁断面を中間支点付近で変化させたが、コンクリート床版断面は橋軸方向に一定で、幅を2.4m、厚さを0.21mとした。以下特に断らない限り、床版内にはかぶりを4cmとし、上側にはD19鉄筋を15cm間隔で、下側に30cm間隔で上下2段に配置する場合を想定した。この場合、上側に配置した鉄筋のコンクリート床版全断面積に対する鉄筋比は0.91%となった。ただし、取り扱いを容易にするため、鉄筋の配置は橋軸方向に一定とした。また、道路橋示方書・同解説I共通編<sup>1)</sup>に従い、活荷重として、コンクリート床版幅2.4m分に相当する等分布荷重  $8.2\text{kN/m}$ を全載させ、 $31.8\text{kN/m}$ を図-6に示すように、片側の支間中央部付近の10mの範囲に載荷させた。

剛体ばねモデル解析における橋軸方向の要素分割数は60とした。結果的に1剛体要素当たりの要素長は1mとなった。また、鋼桁断面は12の小断面に分割(上下フランジ分とウェブを高さ方向に10分割)し、鉄筋コンクリート断面も12の小断面に分割(上下の鉄筋分とコンクリート断面を高さ方向に10分割)した。

## 3. 解析結果と設計値の比較

### (1) 解析条件

連続非合成桁橋の実挙動を検討するため、上述の解析モデルを対象として剛体ばねモデルを用いた非線形

表-1 解析ケースの内容

略称	記号	略称の内容
鋼桁のみ	A	通常の連続非合成桁橋の設計値であり、コンクリート床版を無視し、荷重は鋼桁のみで受け持つと考えはり理論により求めた値
完全合成桁	B	道示IIに従った連続合成桁橋の設計値であり、完全合成を仮定し、コンクリートは全断面有効と考えてはり理論により求めた値
非合成（引張考慮）	C	スラブ止めを用い、コンクリートの応力-ひずみ関係において引張強度を考慮した解析値
非合成（引張無視）	D	スラブ止めを用い、コンクリートの応力-ひずみ関係において引張強度を無視した解析値
合成（引張考慮）	E	スタッドを用い、コンクリートの応力-ひずみ関係において引張強度を考慮した解析値
合成（引張無視）	F	スタッドを用い、コンクリートの応力-ひずみ関係において引張強度を無視した解析値
100%	G	中間支点付近のスラブ止めの配置を非合成桁橋の場合と同じにした断続合成桁の解析値
50%	H	中間支点付近のスラブ止めの配置を非合成桁橋の1/2の量とした断続合成桁の解析値
0%	I	中間支点付近にまったくずれ止めを配置しない断続合成桁の解析値

解析を行う。連続非合成桁橋では径16mmのスラブ止めを橋軸方向1mあたりに1本配置するのと同程度のずれ止め剛度をずれ止め要素の水平ばねに与える。つまり図-5に示すように、そのばねのせん断強度 $Q_u$ は195kN(=195kN×1本)となった。また、比較のために、ずれ止めにスタッドを用いた連続合成桁橋についても検討した。その場合、軸径19mm、全高150mmの頭付きスタッドを橋軸方向1mあたり12本配置する場合と同程度のずれ止め剛度として、水平ばねには1260kN(=105kN×12本)のせん断強度を与えた。ただし、この場合、鋼桁およびコンクリート床版の断面は連続非合成桁橋の断面と同じとした。さらにそれぞれの桁橋に対して、コンクリートの引張強度を図-2に示すように考慮した場合と、コンクリートが引張に全く抵抗しないものとした場合の2つのケースについて検討を行った。

なお、以下の解析結果を示す図に用いているそれぞれの解析ケースの内容を、図中に示した記号とともに表-1にまとめている。

## (2) 鋼桁およびコンクリート床版のひずみ分布

以上のような条件の下で連続桁橋を解析した場合の基本的な応答量として、まず、鋼桁上下縁およびコンクリート床版上縁の橋軸方向ひずみ分布を以下に示す。図-7-aおよび図-7-bは鋼桁上下縁の橋軸方向ひずみ分布である。縦軸はひずみを、横軸は橋軸方向位置である。一点鎖線および点線はコンクリートの引張強度を考慮した連続非合成桁橋および連続合成桁橋のひずみ分布(C, E)であり、太い実線および破線はコンクリートの引張強度を無視した連続非合成桁橋および連続合成桁橋のひずみ分布(D, F)である。また、細い実線で示す「鋼桁のみ」とは、連続非合成桁橋の設計値であり、合成効果を無視し、荷重は鋼桁のみで受け持つものと考えはり理論により求めた分布(A)である。

これに対して、細い破線で示す「完全合成桁」とは道示IIに従った連続合成桁橋の設計値であり、完全合成を仮定し、コンクリートは全断面有効として求めた(B)ものである。図-7-bより、連続非合成桁橋および連続合成桁橋の鋼桁下縁のひずみ分布(C~F)は、コンクリートの引張強度の有無に関わらずどちらかと言えば完全合成桁のひずみ分布(B)に近いことがわかる。また、コンクリートの引張強度を考慮した連続非合成桁橋および連続合成桁橋の鋼桁上縁のひずみ分布(C, E)は、完全合成桁のひずみ分布(B)に近く、コンクリートの引張強度を無視した場合(D, F)には、合成、非合成に関わらず、中間支点付近において引張ひずみの値が比較的大きくなっている。しかし、鋼桁のみを考慮した場合(A)に対しては、引張ひずみの最大値は1/2程度となっていることがわかる。

これに対して、図-7-cはコンクリート床版上縁の橋軸方向ひずみ分布である。連続非合成桁橋および連続合成桁橋のひずみ分布(C~F)は、中間支点付近において完全合成桁の値(B)と異なり、引張ひずみの値が局部的に大きくなっている。特に、コンクリートの引張強度を無視した場合(D, F)には、その引張ひずみの値が200μを越えることがわかる。以上のことは、中間支点付近のコンクリート床版にひび割れが生じる可能性のあることを意味している。

## (3) 引張を受けるコンクリート床版のひび割れ幅

上述のように、中間支点付近のコンクリート床版にはひび割れが生じる可能性があるので、剛体ばねモデル解析におけるひび割れ幅の概算方法を説明する。まずコンクリート床版を表すはり要素の1つの分割小断面に対応する軸ばね1本に生じるひび割れ幅を求める。図-8に示すように、長さ $d\ell$ の剛体要素間に引張力を受け、分割小断面のばねが $\epsilon d\ell$ だけ伸びたと仮定する。図-8中の $dA_c$ は、コンクリート床版の分割された1つ

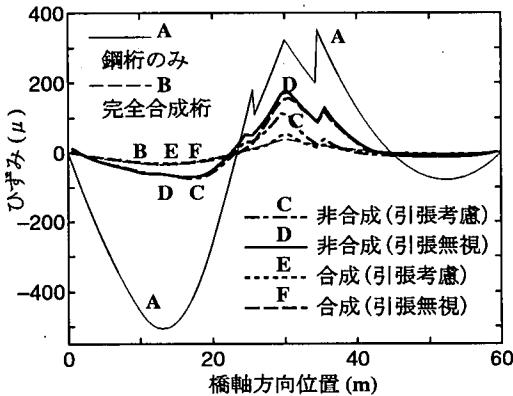


図-7-a 鋼桁上縁

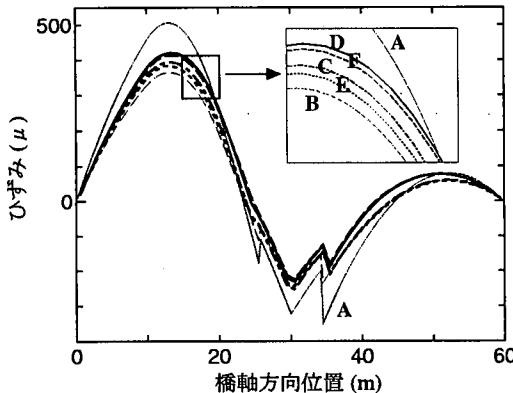


図-7-b 鋼桁下縁

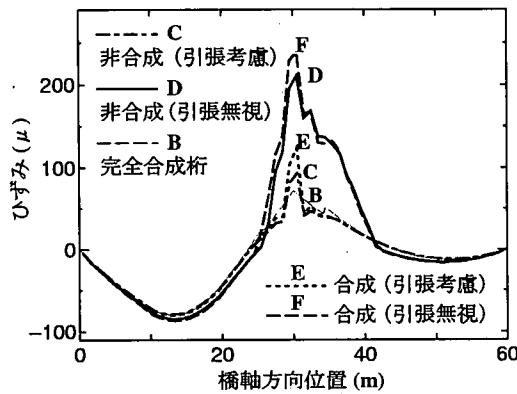


図-7-c コンクリート床版上縁

図-7 橋軸方向ひずみ分布（解析結果と設計値の比較）

の小断面の断面積である。この $\varepsilon_{dl}$ が、図-9に示すように、コンクリートの引張強度に対応する変位量 $\varepsilon_t dl$ よりも大きくなれば、そのばね要素にはひび割れが生じたと考えられる、つまり、 $\varepsilon_t dl$ からの増分 $w$ をそのばねに生じたひび割れ幅とすれば、

$$w = (\varepsilon - \varepsilon_t)dl \quad (1)$$

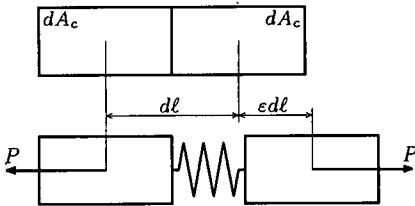


図-8 コンクリート床版の剛体と軸ばね

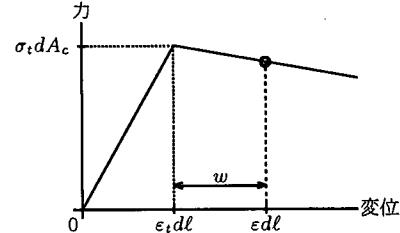


図-9 ひび割れ幅の定義

と表される。図-9中の $\sigma_t$ および $\varepsilon_t$ はそれぞれ、コンクリートの引張強度およびこれに対応する引張ひずみである。ただし、コンクリートの引張強度を無視した場合には、 $\varepsilon dl$ がひび割れ幅を表す。

一方、ここで用いたコンクリート床版のひび割れの最大間隔 $\ell_{max}$ は、コンクリート標準示方書<sup>10)</sup>を参考にすれば、

$$\ell_{max} = k \{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \} \quad (2)$$

と表される。ここに、 $c$ はかぶり(cm)、 $c_s$ は鋼材の中心間隔(cm)、 $\phi$ は鋼材径(cm)である。また、 $k$ は鋼材の付着性状の影響を表す定数で、異形鉄筋を用いる場合 $k = 1$ である。この式を用いることによって、この場合の最大ひび割れ間隔が求められる。つまり、剛体長さ $dl$ 当たりに生じると考えられるひび割れの最小本数 $n_{min}$ は、

$$n_{min} = dl / \ell_{max} \quad (3)$$

となり、この最小本数 $n_{min}$ と上に求めた剛体長さ $dl$ 当たりのひび割れ幅 $w$ を用いることによって、最大ひび割れ幅 $w_{max}$ は、

$$w_{max} = w / n_{min} \quad (4)$$

と概算できる。本研究で対象とした解析モデルでは、 $dl$ は1mであり、ここで用いた鉄筋径および配置間隔などの諸量を式(2)に代入すると、 $\ell_{max}$ は約0.25mとなった。

図-10には、このようにして得られたコンクリート床版上縁の最大ひび割れ幅の橋軸方向分布を示す。縦軸は最大ひび割れ幅であり、横軸は橋軸方向位置であり、10~50mの範囲のみを示している。図中に示す点線および一点鎖線は、コンクリートの引張強度を考慮した連続合成桁橋および連続非合成桁橋の解析結果(E, C)

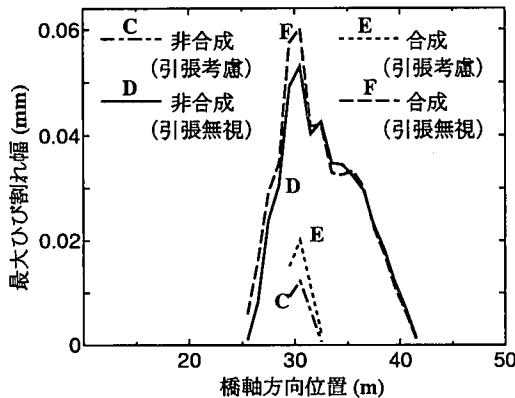


図-10 橋軸方向最大ひび割れ幅分布（解析結果の相互比較）

であり、破線および実線はコンクリートの引張強度を無視した連続合成桁橋および連続非合成桁橋の解析結果(F, D)である。これより、確かにスラブ止めの合成効果によって、非合成桁橋においても、中間支点部付近のコンクリート床版にはひび割れが生じることがわかる。しかし、その最大幅はコンクリートの引張強度を無視した場合でも約0.06mmであり、コンクリート標準示方書<sup>10)</sup>に従ったこのモデルの許容値0.2mm(0.005c, c:かぶり)よりも小さい。

#### (4) 活荷重によるたわみ

図-11は上述と同じ解析条件における橋軸方向たわみ分布を示す。縦軸は桁のたわみであり、横軸は橋軸方向位置である。この図より、スラブ止めの合成効果を考慮した連続非合成桁橋の解析結果は、コンクリートの引張強度を考慮した場合(C)も、しない場合(D)もその最大値は、図に「鋼桁のみ」として示した非合成桁橋の設計値(A)の最大値の約半分であり、どちらかと言えば完全合成桁橋のたわみ(B)に近いことがわかる。また、道示II<sup>11)</sup>に従ったこのモデルのたわみの制限値は4.5cmとなることから、スラブ止めの合成効果を考慮することはたわみ制限の観点から有利であると考えられる。

### 4. 鉄筋比の差異の影響

鋼桁とコンクリート床版の合成効果を期待する合成桁橋を連続桁として用いる場合、中間支点付近の負の曲げモーメントによるコンクリート床版の引張ひずみの問題は避けられない。また上述のように、スラブ止めをもつ非合成桁橋が実際にはかなりの合成効果を有しているとすれば、連続桁において生じる問題は合成桁橋だけのものとは言えなくなる。

そこで、コンクリート床版の引張応力を簡易に低減させる方法として、本研究ではまず床版内に配置する

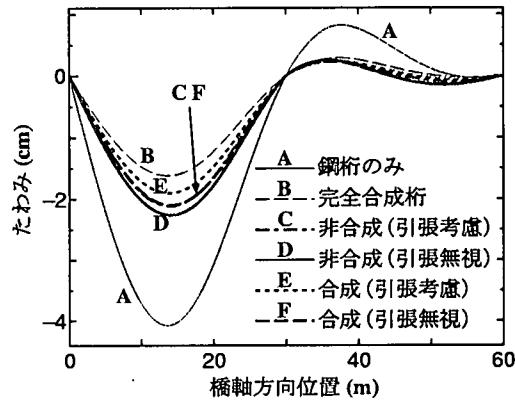


図-11 橋軸方向たわみ分布（解析結果と設計値の比較）

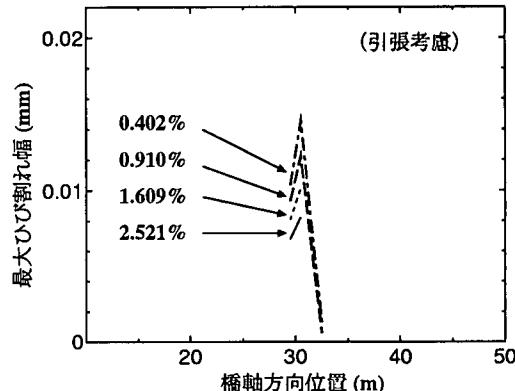


図-12 橋軸方向最大ひび割れ幅分布（鉄筋比の影響）

鉄筋量に着目し、コンクリート床版の断面積に対する比である鉄筋比をパラメーターとして検討を行なった。

解析においては、コンクリートの引張強度を考慮しコンクリート床版上側配置鉄筋比0.91%(D19, 15cm間隔)とした連続非合成桁橋モデルを基準とし、上側配置鉄筋比を0.402%, 1.609%, 2.521%に変化させた場合について検討を行なった。これらの鉄筋比は、D13, D25, D32の鉄筋をそれぞれ15cm間隔で配置する場合に対応している。ただし、いずれの場合も、下側に配置した鉄筋量は上側の鉄筋量の1/2とした。

図-12は鉄筋比を変えた場合のコンクリート床版上縁の最大ひび割れ幅の橋軸方向分布を示す。縦軸は最大ひび割れ幅であり、横軸は橋軸方向位置である。図中に破線で示す鉄筋比「0.910%」の結果は、図-10に示した結果と同じである。この図より、鉄筋量を増やすことにより、最大ひび割れ幅は幾分小さくなるが、その低減量はあまり大きくなことがわかる。

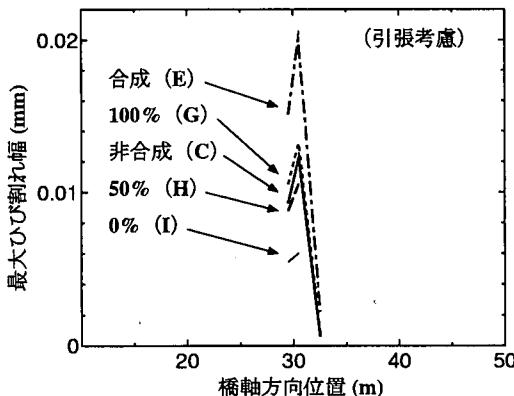


図-13 橋軸方向最大ひび割れ幅分布（ずれ止めの配置による影響）

## 5. ずれ止めの配置間隔の影響

連続合成桁橋において、中間支点上のコンクリート床版に生じる引張応力の絶対値を低減する1つの方法として考案されたのが断続合成<sup>4),5)</sup>である。断続合成桁橋では、正曲げ領域には完全合成を仮定するために、十分な量のずれ止めを配置し、負曲げ領域には非合成を仮定するために、柔なずれ止めを配置するか、もしくは少量の剛なずれ止めを配置すると考えるのが一般的である。

ここでは、断続合成の考え方の有効性を確認するために、正曲げ領域には完全合成を仮定できるほどのスタッドを配置し、負曲げ領域（中間支点の左右10mの範囲）には柔なずれ止めを配置した場合について解析を行った。ただし、柔なずれ止めの配置としては、上述と同じスラブ止めと同じく1m間隔で配置した場合（以下、100%と呼ぶ）、スラブ止めの配置間隔は同じであるが、図-5に示すFisherらの提案式におけるせん断強度 $Q_u$ を1/2とした水平せん断力-ずれ変位関係をもつスラブ止めを有する場合（以下、50%と呼ぶ）およびずれ止めまったく配置しない場合（以下、0%と呼ぶ）を考えた。

図-13は以上の解析モデルにおける最大ひび割れ幅の橋軸方向分布を示す。図の縦軸は最大ひび割れ幅であり、横軸は橋軸方向位置である。図中に示す一点鎖線および実線は図-10にも示したコンクリートの引張強度を考慮した連続合成桁橋および連続非合成桁橋の解析結果（E, C）である。また図中の100%, 50%, 0%は上述のずれ止めの配置方法の差異に対応している。これより、最大ひび割れ幅の最大値は、連続合成桁橋のもの（E）が最も大きく、次いで100%断続合成桁橋（G）、連続非合成桁橋（C）、50%断続合成桁橋（H）、0%断続合成桁橋（I）の順になっていることがわかる。

また、図-14は同じ解析結果における橋軸方向たわみ

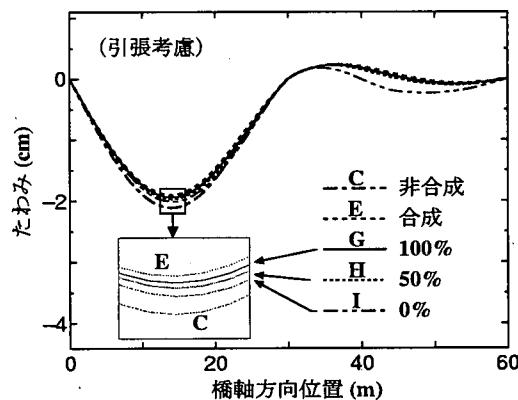


図-14 橋軸方向たわみ分布（ずれ止めの配置による影響）

分布を示す。図の縦軸は桁のたわみであり、横軸は橋軸方向位置である。これより、ここで解析対象とした断続合成桁橋のたわみ分布（G, H, I）は、合成桁あるいは非合成桁橋のたわみ分布（C, E）とほとんど変わらないことがわかる。

以上のことから、連続桁に断続合成の考え方を適用することは、コンクリート床版の引張応力を低減する観点からは有用であることが確認できる。

## 6. スラブ止めに作用する繰り返しの水平せん断力

最大ひび割れ幅および最大たわみ量を低減することができる断続合成桁橋は、以上の結果から連続桁橋として合理的な構造系であるように思える。しかし、この構造のように、ずれ止め剛度を橋軸方向に変化させる場合には、そのずれ止め剛度が変化する点で、局部的に水平せん断力が増加することが指摘されている<sup>6)</sup>。また、非合成桁橋においてスラブ止めの合成效果を考慮する場合、車両走行によってスラブ止めに生じる繰り返しの水平せん断力を検討することは、使用性の立場から重要である。

そこで、疲労の観点から、スラブ止めに生じるせん断力の振幅を概算するために、L荷重ではなく、大型車両1台（重量245kNの1/2）がここで解析対象とした2車線4本主桁のうちの1本の主桁と対応するコンクリート床版上を移動する場合について解析を行った。つまり、車両重量を任意の位置に静的に載荷させ、その載荷位置を移動させることにより、車両の移動を模擬してずれ止めに作用する水平せん断力を概算する。ここで、車両は図-15のように前輪を24.5kN、後輪を98kNの2点集中荷重としてモデル化し、これら2つの集中荷重は4mの間隔をもつものとした。

ただし、車両走行に対する動的問題を取り扱う場合、

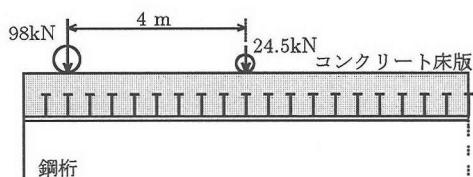


図-15 車両走行のモデル

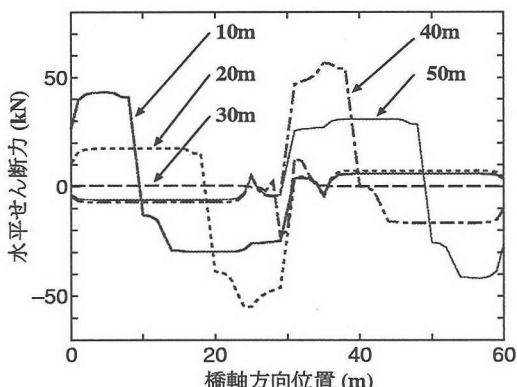


図-16 橋軸方向の水平せん断力分布

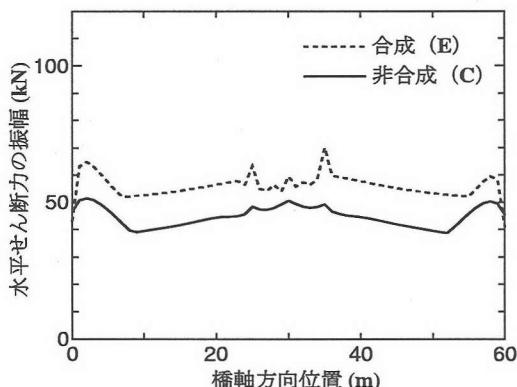


図-17 橋軸方向の水平せん断力の振幅分布

厳密にはコンクリート床版の応力-ひずみ関係あるいはずれ止めに作用する水平せん断力-ずれ変位関係などに対して繰り返しの力-変位関係を用いなければならない。しかし、ここで対象とした解析モデル上を車両が走行する場合、コンクリート床版に発生する圧縮応力およびずれ止めに作用する水平せん断力は比較的小さく、また、コンクリート床版のひび割れはほとんど中間支点付近にのみ生じると考えられることから、車両がどの位置に作用する場合に対しても、上述の非線形解析プログラムを用いて個々にずれ止めに作用する水平せん断力を概算した。

図-16 はスラブ止めを有する連続非合成桁橋につい

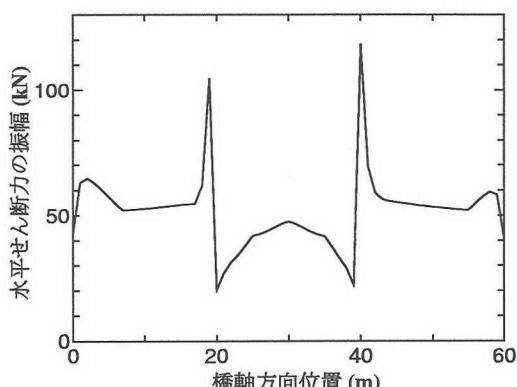


図-18 橋軸方向水平せん断力の振幅分布 (50%断続合成桁)

て、車両の前輪を左端から 10m, 20m, 30m, 40m, 50m の位置とした場合に、スラブ止めに作用する水平せん断力の橋軸方向分布を示したものである。横軸はスラブ止めの橋軸方向位置を、縦軸はスラブ止めに作用する水平せん断力を表している。この図のように、車両の載荷位置が変化するとスラブ止めに作用する水平せん断力の大きさも変化するが、車両が移動することによって任意の位置のスラブ止めに生じる水平せん断力の振幅は、その位置のスラブ止めに作用する最大の水平せん断力と最小の水平せん断力の差を取ることによって概算することができると考えられる。図-17 は、このようにして求めたずれ止めの水平せん断力の振幅の橋軸方向分布を表している。図の横軸はずれ止めの橋軸方向位置、縦軸は水平せん断力の振幅であり、実線および破線がコンクリート床版の引張強度を考慮した連続非合成桁橋および連続合成桁橋の結果 (C, E) を表している。ここで、縦軸の水平せん断力の振幅は剛体ばねモデル解析における 1 要素当たり (1m 当たり) の大きさで示している。したがって、合成桁の場合にはスタッドの配置間隔が 12 本/m であることから、スタッド 12 本分の水平せん断力であり、非合成桁の場合にはスラブ止めの配置間隔が 1 本/m であることから、スラブ止め 1 本分の水平せん断力である。この図より、連続非合成桁橋のスラブ止めに生じる水平せん断力の最大振幅は約 50kN であり、連続合成桁橋のスタッド 12 本分に生じる水平せん断力の最大振幅は約 70kN (スタッド 1 本分で約 5.8kN) であることがわかる。

ここで、著者らが実施した径 16mm の実寸大スラブ止めおよび軸径 19mm、全高 150mm のスタッドの押抜き試験体の疲労試験から得られた S-N 線図を付録に示すが、この図に照らし合わせて考えると、上に求められたスラブ止めおよびスタッドに作用する水平せん断力の振幅は十分な疲労寿命を期待できるせん断力範囲であると予想され、特に、スタッドを十分に配置した

場合の方が疲労の観点から好ましいと考えられる。一方、前節で示した50%断続合成桁橋に対して同様の手順により得られたずれ止めに作用する水平せん断力の最大振幅の橋軸方向分布を図-18に示す。この図より、負曲げ領域のずれ止め剛度を低減した断続合成桁橋では、正曲げ、負曲げ領域の境界付近のずれ止めに生じる水平せん断力の最大振幅は100kNを超えており、また、断続合成を仮定している範囲のずれ止めのせん断力の振幅はあまり低減していない。したがって、ずれ止めの疲労の観点からは好ましくない場合もあると考えられる。

## 7. 乾燥収縮および温度差の影響

コンクリート床版を有する合成桁橋では、乾燥収縮によりコンクリート床版には引張応力が生じる。また、鋼桁とコンクリート床版との温度差によっても、コンクリート床版には不利な引張応力が生じることになる。したがって、スラブ止めの合成効果を考慮した非合成桁橋においても同様の問題が起こると考えられる。

そこで、乾燥収縮および鋼桁とコンクリート床版との温度差がコンクリート床版の引張ひずみに及ぼす影響を連続非合成桁橋の線形解析により概算し、ひび割れ幅などを再検討した。ただし、ここでは乾燥収縮に伴うクリープの影響は考えていない。

まず、道示IIを参考にして、乾燥収縮の最終ひずみ $200\mu$ および鋼とコンクリートの温度差を $10^{\circ}\text{C}$ としたときの収縮ひずみ $120\mu$ を加えた $320\mu$ に相当する圧縮力を図-6に示す連続非合成桁橋の解析モデルのコンクリート床版の両端に作用させた。その後、収縮ひずみ $320\mu$ を差し引いてコンクリート床版に作用する引張ひずみを算定した。ただし、非合成桁橋を構成する材料特性はコンクリートの引張側も含めてすべて弾性範囲で挙動するものとした。

その結果、 $320\mu$ 分の圧縮力を作用させたときに、コンクリート床版の中間支点付近に生じる引張ひずみは $150\mu$ 程度となり、非線形解析において設定したコンクリートの引張強度に相当するひずみ（約 $95\mu$ ）よりも大きくなった。つまり、同様の比率で考えると約 $210\mu$ 分の圧縮力を作用させたときに、コンクリート床版の中間支点付近に生じるひずみが、コンクリートの引張強度に相当するひずみにほぼ等しくなる。

安全側を考えて、上述のひずみ差である $110(320 - 210)\mu$ 分の収縮ひずみがすべて、コンクリートのひび割れに寄与するとすれば、ひび割れ1本当たりの最大幅は、図-9と同様の考え方により、約 $0.03\text{mm}(110\mu \times 1\text{m}/n_{min})$ になると概算できる。活荷重が作用する前に、乾燥収縮および鋼とコンクリートの温度差によって、コンクリート床版にすでに上述の

$0.03\text{mm}$ のひび割れが生じていたとすれば、活荷重作用時には、中間支点付近の床版コンクリートは引張に抵抗できない。したがって、図-10に示すコンクリートの引張強度を無視した連続非合成桁橋の最大ひび割れ幅約 $0.06\text{mm}$ を、上述の $0.03\text{mm}$ に加え合わせた、約 $0.09\text{mm}$ のひび割れがコンクリート床版に生じるものと概算できる。非常に簡易な算定法による値ではあるが、それでも連続非合成桁橋の中間支点付近の活荷重によるひびわれの最大幅は $0.1\text{mm}$ 以下であり、コンクリート標準示方書に示されるこの場合のひび割れ幅の許容値（ $0.2\text{mm}$ ）以内であることがわかる。

## 8. おわりに

非合成桁橋に用いられるスラブ止めは、実際には鋼桁とコンクリート床版間のずれに対してかなり抵抗する。したがって、非合成桁橋の実挙動は設計上考えている挙動とは異なることが予想される。本研究では、スラブ止めを有する連続非合成桁橋の活荷重レベルにおける実挙動を再現することを目的として、剛体ばねモデルを用いた非線形解析により、コンクリート床版のひび割れ、たわみ、スラブ止めに作用する水平せん断力の大きさを、非合成桁橋の設計値や連続合成桁橋の挙動と比較して検討した。

その結果、以下のようないくつかの知見が明らかにされた。

1. 連続非合成桁橋では、スラブ止めの合成効果を考慮することにより、支間中間部の最大たわみは、非合成桁橋の設計値よりもかなり低減される。
2. スラブ止めを有する連続非合成桁橋あるいはずれ止めを十分に配置した連続合成桁橋では、活荷重の作用により中間支点付近のコンクリート床版にひび割れが生じる。しかし、乾燥収縮および温度差による影響の概算値を考慮しても、そのひび割れ幅は、ここで対象とした一般的な諸元の解析モデルについてのコンクリート標準示方書に規定されるひび割れ幅の許容値より小さくなると予想される。
3. スラブ止めを有する連続非合成桁橋あるいは断続合成桁の考えを取り入れた連続桁橋のずれ止めは、疲労の観点からは好ましくない場合もあると考えられ、スタッドを十分に配置した連続合成桁橋の場合の方がずれ止めの疲労の観点からは好ましい。

本研究の結果から、連続非合成桁橋の実橋においても、連続合成桁橋と同様中間支点付近のコンクリート床版にはひび割れが生じると予想される。しかし、連続非合成桁橋の使用性についての合理的な設計の観点から、たわみ照査を行う場合には、スラブ止めの合成効果を考慮した方が有利であり、また、ずれ止めを十分に配置した連続合成桁橋の方がずれ止めの疲労の観

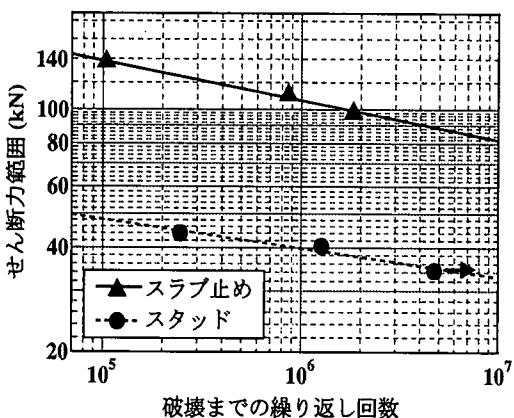


図-19 スラブ止めおよびスタッドのS-N線図

点からは好ましいことを示した。したがって、連続形式鋼桁橋は、合成桁橋として設計することの利点をさらに生かすように、いわゆるプレストレスしない連続合成桁橋のコンクリート床版のひび割れ性状を検討するための実験的研究などを進めていくことが今後の課題である。

**謝辞：** この研究の一部は、鋼材倶楽部およびスタッド協会の補助を受けたことを付記し、関係方々に謝意を表します。

#### 付録 I スラブ止めおよびスタッドのS-N線図

ここでは、スラブ止めおよびスタッドに生じる水平せん断力の大きさを疲労の観点から議論するために、径16mmのスラブ止めおよび径19mm、全高150mmのスタッドを有する押抜き試験体の疲労試験から得られたS-N線図を図-19に示す<sup>2)</sup>。縦軸はスラブ止めあるいはスタッド1本に作用するせん断力を、横軸は繰り

返し回数を表している。この図を用いることによって、本文中の解析結果において求められたスラブ止めあるいはスタッドに作用する水平せん断力と疲労強度の関係をある程度議論することができる。

#### 参考文献

- 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、I共通編、II鋼橋編、丸善、1996.12.
- 中島章典、池川真也、森内大介、西園広之、大江浩一、阿部英彦：非合成桁スラブ止めの水平せん断ずれ性状と疲労強度について、第3回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、pp.197-201、1995.11.
- 園田恵一郎：土木分野における複合構造の最近の動向と研究状況、研究展望、土木学会論文集、No.556/I-38, pp.31-42、1997.1.
- 橋善雄、足立義雄：不完全合成桁について、土木学会論文集、No.112, pp.11-19, 1964.12.
- 土木学会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン、構造工学シリーズ3, pp.57-64, 1990.3.
- 稻葉紀昭、井口光雄：鉄道橋用断続合成桁の設計法の提案、構造工学論文集 Vol.41A, pp.1085-1096, 1995.3.
- 平城弘一、松井繁之、武藤和好：柔な合成作用に適するスタッドの開発、構造工学論文集 Vol.44A, pp.1485-1496, 1998.3.
- 中島章典、溝江慶久、廣田篤、吉原知佳、西園広之、大江浩一：押抜きおよび桁試験によるスラブ止めの水平せん断ずれ性状と疲労強度の検討、構造工学論文集 Vol.44A, pp.1505-1514, 1998.3.
- 中島章典、池川真也、山田俊行、阿部英彦：ずれ止めの非線形挙動を考慮した不完全合成桁の弾塑性解析、土木学会論文集、No.537/I-35, pp.89-96, 1996.4.
- 土木学会：平成3年版コンクリート標準示方書、設計編、土木学会、1995.3.
- Ollgaard, J.G., Slutter, R.G. and Fisher, J.W.: Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normalweight Concrete, *AISC Engineering Journal*, No.5, pp.55-64, 1971.4.

(1998.10.10 受付)

## A STUDY ON BEHAVIOR OF CONTINUOUS PLATE GIRDER BRIDGE UNDER SERVICE LOAD LEVEL

Akinori NAKAJIMA and Yoshihisa MIZOE

It is predicted that plate girder bridges having a steel girder with a concrete slab connected by slab anchors behave as rather composite girder bridges actually. But the composite action due to slab anchors is ignored in present design of plate girder bridges. Therefore, there is a difference between the behavior according to the design practice and the actual behavior for continuous plate girder bridges.

In this paper, in order to investigate a behavior of a two-span continuous plate girder bridge under a service load level, a crack width of a concrete slab over the internal support, a deflection along the span and magnitude of the shear force of shear connectors is analyzed by employing a rigid-body-spring model having nonlinear material properties.