

連続合成桁への取組み

TRYING FOR A DEVELOPMENT OF CONTINUOUS COMPOSITE STEEL GIRDERS

安松敏雄*, 中須誠*, 長谷俊彦*

Toshio YASUMATSU, Makoto NAKASU, Toshihiko NAGATANI,

八部順一**, 橘吉宏**, 春日井俊博**, 三ツ木幸子**

Jun-ichi YABE, Yoshihiro TACHIBANA, Toshihiro KASUGAI, Yukiko MITSUGI

ABSTRACT With particular regards to durability and economy, reduced steel girder bridges with prestressed concrete slabs have recently become a promising solution for the next generation steel bridges.

In the Japan Association of Steel Bridge Construction (JASBC), *longitudinally non-prestressed composite continuous girder* structures were considered a rational such above mentioned type bridges. So in 1996, *the continuous composite girder working group* was set up in JASBC with the purpose of studying and making a design manual on composite continuous girders.

This paper will describe the outline of achievements made with the above group members as centrally.

KEYWORDS : PC床版、少主桁、連続合成桁、経済性、耐久性、次世代橋梁
pre-stressed concrete slabs, reduced steel girder bridges,
continuous composite girders, economy, durability,
next generation steel bridges

1. まえがき

連続合成桁橋は、我が国では昭和30年代初頭より40年代前半にかけて、かなり実績のある橋梁構造形式である。その場合、中間支点付近の負の曲げモーメントを受ける領域に対しては、PC鋼材や支点のジャッキアップ・ダウンにより、床版コンクリートにプレストレスを導入する方式が用いられてきたが、これは設計の煩雑さや現場作業工程が長くなるなどの点で必ずしも有利な方式とはならなかった。

このような問題を改善する方策として考え出されたのが、「プレストレスしない連続合成桁」である。これは、床版コンクリートに対して引張り力の負担を期待せず、圧縮力のみを負担させ、引張り力に対しては鋼材のみが負担するという、いわゆる鉄筋コンクリート部材と同様に考えたものである。すなわち、正の曲げモーメントに対しては、床版コンクリートと鋼桁からなる合成断面で、負の曲げモーメント領域に対しては鋼桁と床版内に配置された鉄筋断面で負担するというものである。このような考え方は現行の道路橋示方書にも生かされている。

しかし、1970年頃から道路橋の鉄筋コンクリート床版、特に鋼橋の床版のひび割れ損傷事故が多発してから、連続形式の鋼桁に鉄筋コンクリート床版を合成させて使用することは避けられており、最近ではほとんど採用されなくなっている。一方、ヨーロッパ諸国では鋼連続合成桁が標準的に採用されており、かつ、床版コンクリートのひび割れ損傷事故は稀であると言われていることにより、この点再考の余地があるものと思われる。

* 日本道路公団 試験研究所 橋梁研究室 (〒194-0035 東京都町田市忠生 1-4-1)

** 社団法人 日本橋梁建設協会 (〒104-0061 東京都中央区銀座 2-2-18)

日本道路公団では、鋼橋の経費削減・耐久性向上の方策として、床版にプレストレストコンクリートを用い、かつ、床版支間を広げた2主桁、3主桁などの少主桁橋梁の本格的採用が進められている。この案では必然的に床版は従来に比し厚いものとなる。

現在、損傷が問題となっている床版は、昭和48年の道路橋示方書改定前の薄い床版で、これらの床版の損傷原因は、交通荷重によるせん断疲労だといわれている。鉄筋コンクリート床版の疲労耐力は厚さの十数乗に比例すると言われており、従って、床版厚が厚くなれば現在の床版でもひび割れによる損傷問題が起きる可能性は少なくなるものと思われる。また、床版へのプレストレストコンクリートの採用により、その耐久性は飛躍的に向上し、超長期的な健全性が保証されることが著者ら始め幾つかの実験検証において確認されている。

更に、少主桁橋では構造特性上、対傾構・横構を省略し、主桁間の荷重伝達をほとんど床版に頼る構造が一般的である。このため、床版は十分強固なものにする必要があり、かつ、主桁との一体化が必要である。他方、床版コンクリートの厚肉化により、コンクリートの乾燥収縮、クリープ等が鋼桁に与える影響度合いも大きくなり、従来より標準的に採用されてきた鋼桁に対して床版コンクリートの影響を考慮しない「非合成桁」の考え方では幾つかの問題を生じることから、床版を主構造部材として盛り込んだ合成構造として取り扱うべきと考えられる。事実、ヨーロッパ諸国で用いられている鋼橋は、少主桁合成構造が標準的に採用されており、床版支間は大きく、厚肉の床版となっており、床版損傷もあまり問題となっていないようである。

以上のような理由により、今後、プレストレストコンクリート床版（以下、PC床版と称す）を有す少主桁形式の橋梁の普及が予想されることから、（社）日本橋梁建設協会では、平成6年より「連続合成桁ワーキンググループ」を設け、日本道路公団 試験研究所 橋梁研究室のご指導のもとに、耐久性に優れた強固なPC床版を主構造部材として積極的に取り入れ、かつ、中間支点付近の負曲げモーメント処理に勝る「プレストレスしない連続合成桁」に着目し、設計・施工資料作成のための関連諸検討に着手した。

以下、上記ワーキンググループでの活動成果を中心に（社）日本橋梁建設協会における連続合成桁への取組みについて報告する。

2. 活動期間および活動内容

【活動期間】 平成6年8月～平成9年3月

【活動内容】 1) 連続合成桁設計マニュアル作成

2) 関連諸検討

①各種資料等の収集

- ・文献収集および邦訳
- ・連続合成桁の実態調査

②試設計および解析

- ・連続合成2主桁橋の試設計
- ・ジベル作用力の検討

③検証実験

- ・連続合成桁中間支点の負曲げ実験
- ・25φ大口径スタッドジベルに関する各種実験
 - 押し抜き実験
 - 溶接性施工実験
 - ジベル付き鋼板の疲労実験

3. 活動成果の概要

3.1 連続合成桁設計マニュアル（『PC 床版を有すプレストレスしない連続合成桁 設計要領（案）』

(1) 基本的な考え方

マニュアルの作成に当たっては、現行の道路橋示方書「第9章 合成げた」をベースに、中間支点付近のひび割れを許容した「（橋軸方向には）プレストレスしない連続合成桁」を設計する上で、実務者の手引きとなるものを目的とした。

なお、PC 床版少主桁構造としては、長支間 PC 床版、少主桁（2、3 主桁）に関する検討課題も多々残されているが、これらに関しては別途検討するものとし、当ワーキングにおいては検討の発散を防ぐため、PC 床版少主桁構造を念頭に置くものの、対象を連続合成 I 断面桁に絞って実施した。

(2) 特 徴

マニュアルの特徴としては以下の事項があげられる。

- ① 中間支点付近の床版コンクリートのひび割れ制御
 - ・床版の耐久性確保からひび割れ幅を制限
 - ・作用曲げモーメントによるひび割れ幅の照査方法を記載
- ② 断面力算定時の中間支点付近の床版剛性の取扱い
 - ・外力（後死荷重、活荷重）、内力（クリープ、乾燥収縮、温度変化）に対して記載
- ③ 床版の引張り領域における応力度の照査
 - ・乾燥収縮、クリープに対する応力度算出方法を記載
- ④ φ 25 大口径スタッドジベルの使用
 - ・少主桁を対象とした効率化より、実験結果を踏まえ大口径ジベルを採用
- ⑤ スタッドジベルの設計法
 - ・中間支点付近のずれ止めの破壊に対する照査
 - ・水平荷重（地震・風）に対する中間支点付近のずれ止め照査
 - ・横桁位置での引抜きに対する照査

(3) 概 要

設計マニュアルより特徴のある事項を抜粋し、その概要を解説する。

1) 適用の範囲

この設計マニュアルは、鋼桁本数を 2～3 本に減らした少主桁と橋軸直角方向にプレストレスした現場打ち PC 床版を、ずれ止めにより強固に結合した橋軸方向にはプレストレスしない連続合成 I 桁の一般的な設計方法について示しており、このマニュアルに示されていない事項については、日本道路公団 設計要領、道路橋示方書・同解説、土木学会コンクリート標準示方書によるものとしている。

なお、PC 床版および少主桁特有の問題に関しては、関連設計要領によるものとする。

2) 設計一般

設計は許容応力度法を原則とするが、負の曲げモーメントを受ける床版コンクリートに対してはひび割れを許容し、ひび割れ状態を考慮した設計を行うものとする。

[解 説]連続合成桁の中間支点付近の負の曲げモーメントを受ける領域の床版コンクリートがひび割れて行く状況は、負の曲げモーメントが作用した時の曲率と曲げモーメント、およびひび割れの進展状況から次のように説明できる。

合成桁に負の曲げモーメントが作用し曲率が増加すると、床版コンクリートは初期には全断面有功として働き、弾性的な挙動（状態 I）を示すが、床版コンクリートが引張り強度に達すると、ひび割れが発生する。コンクリートが曲げ引張り強度に達すると、床版コンクリートが分担していた軸力が鉄筋で負担され、ひび割れの開口とともに鉄筋応力が急増する。最初のひび割れが発生するモーメントは初期ひび割れ発生モーメント M_R と称し、コンクリートの曲げ引張り強度と乾燥収縮や床版と鋼桁の温度差により発生する引張り応力、および合成断面の断面諸量により決定される。また、ひび割れ幅は鉄筋とコンクリート間の付着特性や鉄筋比および鉄筋径などの影響を受ける。

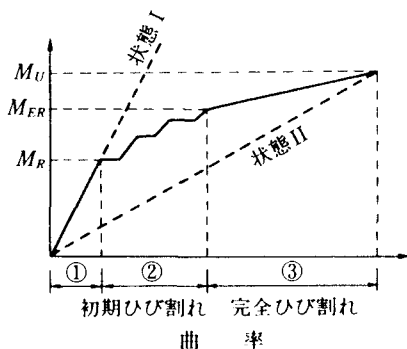
M_R を越えて荷重が載荷されると、曲率の増加に伴いひび割れが発生していない領域の床版コンクリートが負担する引張り力が増加しようとするが、新しいひび割れが順次発生し、ひび割れの開口とともに床版軸力の減少と鉄筋応

力の急増が繰り返され、ひび割れ間隔は細かくなって行く。この過程（状態Ⅱ）では、ひび割れ幅はほとんど増加しない。

なお、コンクリートと鉄筋が一体となって挙動するにはある程度の距離（導入長さ L_{ER} ）が必要であり、ひび割れ位置から導入長さ L_{ER} の範囲では鉄筋コンクリート間に滑りが生じる。従って、曲率の増加に伴い床版コンクリートの負担する引張り力が増加するのは、滑りの生じない領域、すなわち、ひび割れ間隔が導入長さの2倍よりも大きい領域であり、ひび割れ間隔がこれより小さくなると新しいひび割れの発生は終了する。

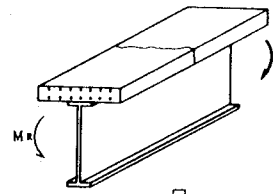
初期ひび割れ状態の終了した時のモーメントを初期ひび割れ完了モーメント M_{ER} と称し、その後は完全ひび割れ状態になり、ひび割れ幅の増加とともに鉄筋の応力度も増加し、やがて鉄筋の降伏モーメント M_U を迎える（状態Ⅲ）。

本設計要領では、このようなひび割れを考慮した設計を行い、主桁作用として負の曲げモーメントを受ける床版コンクリートに対しては、鉄筋によるひび割れ幅の制御を取入れた設計を行うものとする。

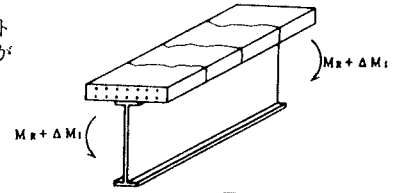


図一解 合成桁の曲率と曲げモーメントの関係

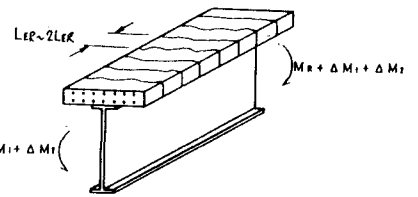
①ひび割れ発生モーメント M_R に達するとひび割れが発生する。ひび割れ幅は、鉄筋とコンクリート間の付着特性や鉄筋比、および鉄筋径などの影響を受ける。



②ひび割れ完了モーメントまでは新しいひび割れが順次発生する。



③ひび割れの発生は、初期ひび割れ完了モーメント M_{ER} まで続く。この時のひび割れ間隔 L は、 $L_{ER} \leq L \leq 2L_{ER}$ である。ひび割れの分散性については導入長さ L_{ER} により表される。これについては初期ひび割れ完了後の完全ひび割れ状態で議論される。



図一解 初期ひび割れ状態におけるひび割れの発生

3) ひび割れ制御

一般事項

- ①引張力を受けるコンクリート床版は、過度のひび割れを防止するため、使用する鉄筋径に対する鉄筋量、および、ひび割れ位置における鉄筋応力度を照査するものとする。
- ②ひび割れ制御の照査は、設計時における中間支点付近の床版コンクリートに加え、架設時の床版ひび割れ照査にも適用できるものとする。

[解説]

①一般に、同一の作用モーメントのもとでは鉄筋量を多く、鉄筋径を小さくすれば、発生するひび割れ幅は小さくなる。ここでは、最小鉄筋量と限界の鉄筋径について照査を行う。ここで、ひび割れ制御に対する照査を行う上で、床版のために配置された鉄筋を橋軸方向鉄筋の一部として考慮してもよい。

②本設計要領で対象とした現場打ち PC 床版を有する少主桁連続合成桁では、床版施工は移動型枠を用いたブロック施工で行われるのが一般的である。ブロック施工を行うにあたり、従来は床版コンクリートの許容応力度を定めて、床版にひび割れが発生しないように施工順序を照査している。許容引張り応力度の設定にあたり、コンクリートの引張り強度のばらつきや施工時に生じる乾燥収縮や温度差による引張り応力を考慮しなければならないが、これらの予測が難しいことから、必ずしも現実的な方法であるとは言えない。また、この方法ではひび割れが発生した場合に、ひび割れ幅の指標を与えることも出来ない。従って、ひび割れ幅を制限する照査方法がより現実的であると考えられ、本設計要領では床版施工時の検討方法として、ひび割れ制御による照査を適用してよいものとした。

なお、本設計要領に従えば一般的な連続合成桁の範囲では、床版厚 30cm に対して D19 を中間支点付近の配力鉄筋に用いた場合、鉄筋を床版上下均一に 125mm~100mm ピッチ（鉄筋比 $p=1.5\sim1.9\%$ ）で配置すれば、許容ひび割れ幅 0.2mm を満足することが出来る。

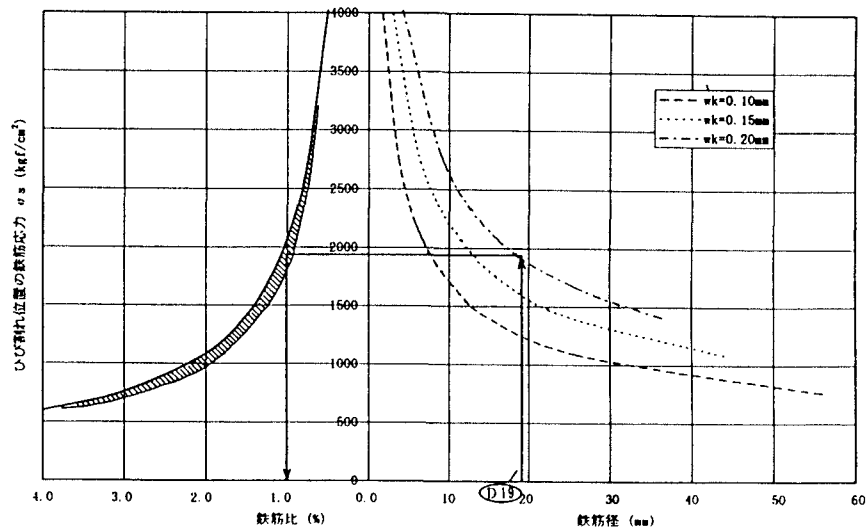
初期ひび割れ状態と最小鉄筋量

- 支間部のコンクリート床版は、初期ひび割れが生じた状態を想定し、ひび割れ位置の鉄筋応力度が降伏応力度を越えることなく、かつ、ひび割れ幅が許容値以下になるよう、鉄筋を配置しなければならない。

[解説] 図は我が国における一般的な合成桁の断面を対象に、標準的なコンクリートの配合条件で、設計基準強度 $\sigma_{ck}=350\text{kgf/cm}^2$ 、引張り強度は土木学会コンクリート標準示方書に準じ、 $\sigma_{ct}=0.5\sigma_{ck}^{2/3}=25\text{kgf/cm}^2$ 、鉄筋の付着は平均的な付着性状のもとで、Hanswille の理論に従い、鉄筋比・ひび割れ位置での鉄筋応力・初期ひび割れ状態におけるひび割れ幅・鉄筋径の関係を示したものである。ここで、ひび割れ位置における鉄筋応力とは、ひび割れ位置の局所的な応力であり、断面計算における鉄筋応力とは異なる指標である。この図では、与えられて鉄筋比に対してひび割れ発生位置における鉄筋応力度が計算される。このひび割れ位置における鉄筋応力度と使用する鉄筋直径によ

りひび割れ幅が算定される。逆に、制限したいひび割れ幅と選択した鉄筋径に対して、ひび割れ位置の鉄筋応力度を求めれば、ひび割れ制御に必要な最小鉄筋量が算定される。

この図によると、D19の鉄筋径に対して初期ひび割れ発生時のひび割れ幅が0.2mmを越えない鉄筋比は1.0%であり、第4章ではこの鉄筋比を支間部の最小鉄筋量とした。従って、D19以下の鉄筋径で第4章で規定した最小鉄筋量を満足するならば、初期ひび割れ状態に対してひび割れ幅を照査する必要はないが、D22を使用する場合や初期ひび割れ幅をさらに厳しく制限する必要がある場合は、以下に示す方法に従い照査することとする。



図一解 ひび割れ位置における鉄筋比・鉄筋応力・初期ひび割れ幅・鉄筋径の関係

以下省略

完全ひび割れ状態に対する照査

- ①完全ひび割れ状態では、作用する曲げモーメントに対し、ひび割れ幅が許容値以下になるように照査しなければならない。
- ②床版照査にあたり、荷重の組み合わせは「後死荷重+活荷重」とする。
- ③架設時は、床版と鋼桁とが合成した後に作用する曲げモーメントが、初期ひび割れ完了モーメントを超える場合に、ひび割れ幅を照査しなければならない。なお、床版打設終了時に中間支点付近が負の曲げモーメントとなる時は、更に後死荷重と活荷重を加えた作用曲げモーメントに対してひび割れ幅を照査しなければならない。

[解 説]合成桁に負の曲げモーメントが作用し、初期ひび割れ発生モーメント M_R に達すると最初のひび割れが発生し、初期ひび割れ完了モーメント M_{ER} を越えると、ひび割れ幅の増大に伴ってひび割れ位置における鉄筋応力も増加する。ここで、 M_R は次式により与えられる。

中 略

中間支点付近の床版は、一般に完全ひび割れ状態が存在するため、完全ひび割れ状態におけるひび割れ幅の照査が必要である。

一方、架設時の照査に関しては、ひび割れ発生の有無については初期ひび割れ発生モーメント M_R が参考に出来るが、ひび割れ発生後においては、一般に完全ひび割れ状態におけるひび割れ幅の照査が必要である。

完全ひび割れ状態においても、ひび割れ幅、鉄筋径、ひび割れ位置での鉄筋応力度の関係は前述の図表が適用でき、ひび割れ位置での鉄筋応力度が分かればひび割れ幅の照査が出来る。ひび割れ位置での鉄筋応力度 σ_s については次式により近似でき、 σ_s を前述の図表に示した許容ひび割れ幅と使用する鉄筋径に対する鉄筋応力度を以下のように照査すればよい。

中 略

一般的に、床版厚 30cm に対して D19 の鉄筋を中間支点付近の配力鉄筋として用いた場合、鉄筋の配置を床版上下段に均一に 125mm ピッチ (鉄筋比 $p=1.5\%$) で配置すれば、許容ひび割れ幅 0.2mm を満足することが出来る。

4) 応力度の算出

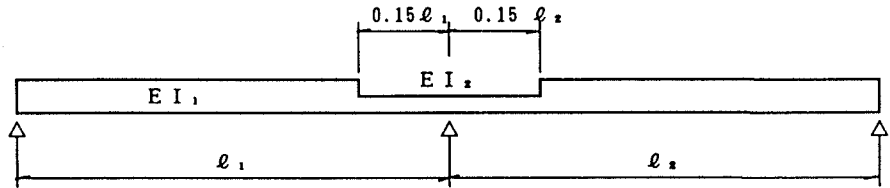
一般事項

- ①後死荷重・活荷重に対する断面力の算出および変形の計算において、中間支点付近の床版コンクリートはひび割れを考慮してこれを無視し、鉄筋のみを鋼断面に考慮する。支点付近の鋼断面とする範囲は $0.15L$ 程度とする。ここに L は各着目する支間長である。
- ②床版コンクリートのクリープ、乾燥収縮および床版と鋼桁との温度差による応力度を計算する場合の不静定力の算出には、中間支点付近においても鋼桁と床版コンクリートとの合成作用を考慮した断面剛性を使用する。

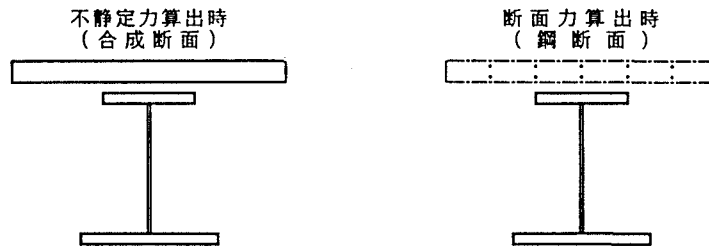
③床版コンクリートのクリープ、乾燥収縮および床版と鋼桁との温度差による応力度を計算する場合には、主荷重、従荷重による応力度との重ね合せ効果を考慮する。この際、床版コンクリートの応力度が引張り応力になった場合は、床版コンクリートを無視し、鋼断面で応力度を算出する。

[解 説]断面力と応力度を計算する場合の床版コンクリートの取扱いについて規定したものである。

①影響線載荷を行う活荷重の場合、着目点により床版の応力が引張り力になったり、圧縮力になったりするため、着目点毎の正確な断面力を算出することは非常に煩雑となる。従って、ここでは近似的にひび割れ形成によるモーメント分配の影響を考慮し、中間支点付近の床版コンクリート有効範囲を規定することとした。



中間支点付近の断面剛性を鋼断面のみ有効とすると全断面剛性とした場合に比べて活荷重等による曲げモーメントは支間部で大きくなり、中間支点付近では小さくなる（絶対値）。しかし、乾燥収縮の影響による不静定モーメントが大きくなるので、鋼桁断面が必ずしも小さくなるとは限らない。



図一解 中間支点付近の床版の取扱い

②道路橋示方書と同様の考え方とした。

③床版コンクリートのクリープ、乾燥収縮、温度差による影響を考慮する場合、床版コンクリートの応力状態を単ケース毎の荷重による応力の値で判断すると、床版コンクリートの合計応となる。従って、合成断面を使用するか鋼断面を使用するかは、応力度の足し合せの結果により判断することとした。

曲げモーメントによる応力度

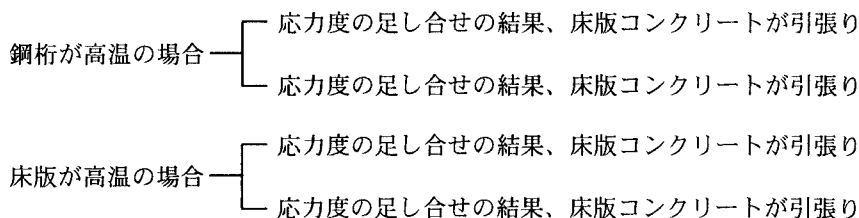
正の曲げモーメントのように床版コンクリートが圧縮応力を受けるような断面力に対しては合成断面が抵抗し、負の曲げモーメントのように引張り応力を受けるような断面力に対しては鋼断面が抵抗する。なお、鋼断面に対しては床版コンクリートの中の橋軸方向鉄筋を桁の断面に算入してよい。

[解 説]床版コンクリートの引張り応力度は、別章で規定する許容引張り応力度に関わらず、床版コンクリートに引張り応力を期待しないものとした。

温度差による応力度

①鋼桁が床版コンクリートよりも高温の場合と床版コンクリートが鋼桁より高温の場合の2つのケースについて計算する。
②抵抗断面として合成断面を使用するか、鋼断面を使用するかは前記「一般事項」に従い、組合せケースによる応力度を足し合せた結果による。

[解 説]床版コンクリートと鋼桁との間に温度差が生じると、桁は変形し、応力を生じる。プレストレスしない連続合成桁では、鋼桁と床版のコンクリートのどちらが高温となるかと、応力の足し合せ結果による床版コンクリートの応力が圧縮応力か、引張り応力かの違いにより計算法が異なる。



応力の足し合せの結果、床版コンクリートにいったんクラックが入ると、引張りに対しては鋼断面のみが抵抗するので、床版コンクリートを無視し、鋼断面によって応力を計算する。

応力の足し合せの結果、床版コンクリートに圧縮応力が働く場合には、床版コンクリートを有効とした合成断面により応力の計算を行う。

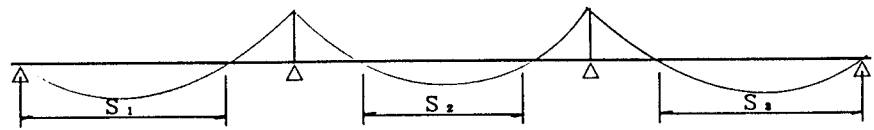
従って、鋼桁と床版コンクリートのどちらかが高温となるかにより、抵抗断面を鋼断面とするか、合成断面とするか異なる場合がある。
 温度差による不静定力を算出する場合は、床版コンクリートを考慮した合成断面の剛性を使用する。

クリープによる応力度

- ①支間部の後死荷重による曲げモーメントが正の範囲のみに対して床版コンクリートのクリープによる内部応力の移行を考慮する。
 ②応力度の算出は、前期「一般事項 ③」による。

[解 説]プレストレスしない連続合成桁において、死荷重による床版コンクリートのクリープの影響を考慮する場合、負の曲げモーメントの範囲については鋼断面が抵抗するものであるから、持続して作用する正の曲げモーメントの範囲についてのみ応力の移行を考えれば良いものとした。

また、クリープの不静定反力が小さくても、支間が長いとかかなり大きな曲げモーメントが発生する。従って、中間支点付近においてはこれに対する応力を計算する必要がある。



S_1, S_2, S_3 : クリープによる応力の移行を考慮すべき範囲

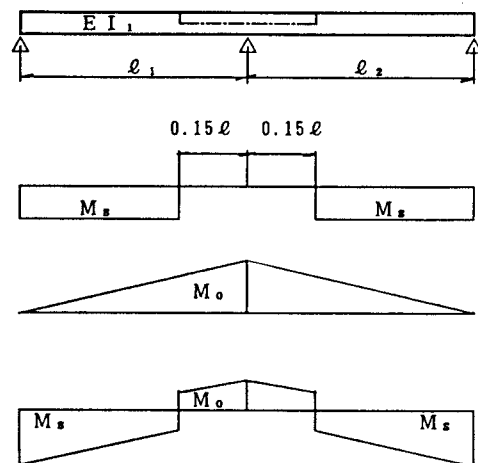
不静定反力による曲げモーメント算出時の桁の断面剛性は合成断面を使用する。

乾燥収縮による応力度

- 床版コンクリートの乾燥収縮は支間部のみ考慮し、中間支点付近は前記「一般事項 ①」と同様の範囲は考慮しない。

[解 説]床版コンクリートの乾燥収縮の影響を考慮する範囲を示した。

別途規定しているように、中間支点付近の床版コンクリートには、ひび割れを考慮しているので乾燥収縮する床版コンクリートの範囲を規定した。乾燥収縮による応力の計算についての考え方を図示すると右図のようになる。



不静定反力による曲げモーメント算出時の桁の断面剛性は合成断面を使用する。

3.2 各種収集資料

(1) 連続合成桁関連文献の収集および邦訳

連続合成桁に関する国内外の文献を調査・収集し、文献リスト並びに調査表としてまとめている。
 なお、下記文献に関しては全文邦訳を行ない、設計マニュアル作成の基本資料とした。

①鋼合成桁の設計と施工に関するドイツ指針

- Richtlinien für die Bemessung und Ausführung von Stahlverbundträgern, Ausgabe März 1981 und Ergänzende Bestimmungen, Ausgabe März 1984
- Dübeltragfähigkeit, Kopfbolzendübel bei Verbundträgern mit Stahlprofilblechchen sowie Ergänzende Bestimmungen, Ausgabe Juni 1990
- Neufassung des Abschnittes 9: Rißbreitenbeschränkung

②ユーロコード 4-1 による合成構造の設計 (Beton-Kalender 1993 より)

- Verbundkonstruktionen Bemessung auf Grundlage des Eurocode 4 Teil 1

③合成桁のひび割れ制御

- G. Hanswille: Zur Rißbreitenbeschränkung bei Verbundträgern, Techn.-Wiss. Mitteilung Nr.86-1, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Januar 1986

(2) 連続合成桁の実態調査

1) 目的

我が国において建設された連続合成桁の実態把握を目的に実施。回収したデータ数は51件。これらのデータより幾つかの分析図を作成、連続合成桁の課題を浮かび上がらせる一助とする。

2) 調査結果

①実績数

完成年毎の実績数をプレストレスする連続合成桁とプレストレスしない連続合成桁に分けて図-1に示す。今回実施した調査では1958年からである。我が国で最初の連続合成桁は大阪市の友淵橋（1957年竣工）で、その後、1959年に最初の合成桁示方書として「鋼道路橋の合成ゲタ設計施工指針」が制定され、1965年には正式にプレストレスする連続形式を含めるように改定された。

その後、件数としてはさほど多くないものの、1972年まで全てプレストレスする連続合成桁として建設されている。

この間、プレストレスしない連続合成桁の研究がなされ、1968年に関西道路研究会によりプレストレスしない連続合成桁設計施工要綱案が提案された。しかし、この要綱案に従ってプレストレスしない連続合成桁が建設されたかどうかは今回の調査では明らかにならなかった。

1973年の道路橋示方書の改訂で合成桁が章を加えて取入れられ、プレストレスしない連続合成桁も認められ、その後はプレストレスしない形式だけが建設されている。しかし、最近では連続合成桁形式そのものがほとんど建設されなくなってきている。

実績調査からでは明らかではないが、プレストレスする連続合成桁が使われなくなった理由として、設計が煩雑、工期が長くなるなどの点が挙げられているが、施工経験者とのヒアリングによると、それにも増して床版の打ち換えが困難という点が挙げられた。一方、プレストレスしない連続合成桁では床版の打ち換えの困難さは非合成桁と同程度と考えられる。しかし、1970年代にRC床版の損傷が目立ってきており、中間支点付近の床版のひび割れが、耐久性に大きな影響を及ぼすのではないかと危惧により、次第に採用されなくなったと考えられる。

②支間長

図-2は最大支間長（中央支間）毎の実績数を示している。連続合成桁（この中には箱桁も若干含まれている）が適用されている支間長としては40~70mとなっており、非合成連続桁の適用支間長30~55mより長くなっている。更に特徴的なことは、プレストレスする連続合成桁とプレストレスしないものの差が余り無いことである。

③鋼重

図-3は単位鋼重の実績を最大支間毎にプロットしている。図には非合成連続I桁の単位鋼重（橋建

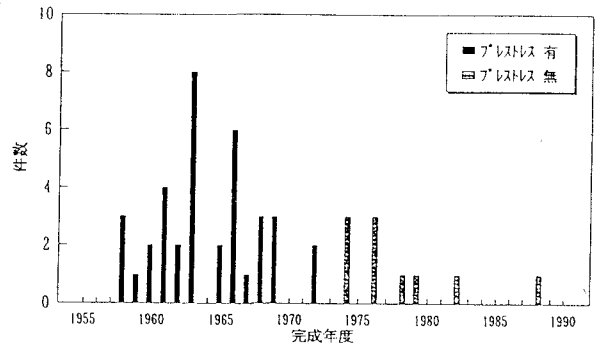


図-1 連続合成桁の実績数

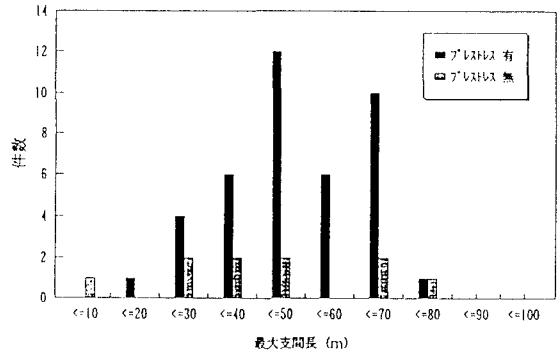


図-2 連続合成桁の最大支間長

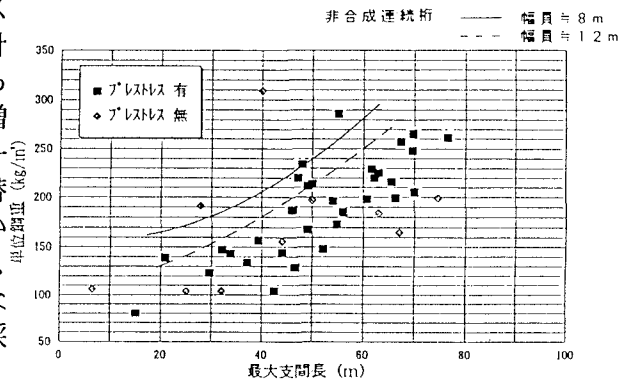


図-3 最大支間長と単位鋼重

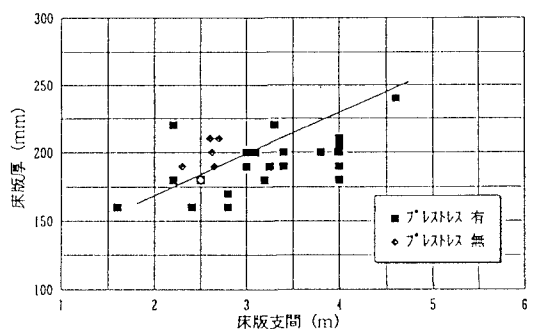


図-4 床版支間と床版厚

協：デザインデータブック)も併せ示しているが、連続合成桁の単位鋼重のほとんどはこれより小さくなっている。更に、プレストレスする連続合成桁とプレストレスしない連続合成桁の差は余り無いように思われる。つまり、プレストレスするものでは中間支点上の鋼桁断面は小さくなるが、橋梁全体に占める割合は小さく、全体鋼重には有為な差が生じない。従って、施工の煩雑さも考え合わせると、プレストレスする連続合成桁が経済的に有利とは言えない。

④床版厚

図-4は床版支間長と床版厚の実績を示す。プレストレスしない連続合成桁は1973年以降の道示に準拠しているので、 $3L+11$ (L:床版支間長)を上回る厚さとなっているが、プレストレスするものはそれより薄くなっている。床版厚の点からは、プレストレスしない連続合成桁は床版の損傷に関して有利となっているが、プレストレスしないことによる中間支点付近のひび割れの影響については明らかではない。

⑤桁高

図-5は最大支間長と桁高の実績を示している。データの中には変断面連続桁も含まれており、この場合には支間中央の桁高をプロットしている。従って、等断面の連続桁の桁高と比較すると小さいものもあるが、全体的には図中に示す非合成連続桁の桁高(橋建協：デザインデータブック)よりは小さくなっている。プレストレスする連続合成桁の中には変断面のものがやや多く含まれているので、プレストレスしないものよりは小さくなっているが、等断面では両者の差はほとんど無いと思われる。

⑥架設地点

図-6、7は都道府県別に実績数を示している。大阪市がこの形式を積極的に研究し、採用したため、大阪が飛び抜けて多い。また、日本道路公団でも東名・名神で多く採用している。

⑦床版の損傷

図-8は名神の犬上川橋、東名の大井川橋、安部川橋の床版補修箇所を示す。これらは全てプレストレスする連続合成桁である。犬上川橋では端支間に損傷が多く、伸縮装置箱抜き部のコンクリート施工、伸縮装置の段差による衝撃力の作用に起因すると考えられる。大井川橋では、ほぼ等間隔に損傷があり、コンクリートの打ち継目の影響が考えられる。安部川橋でも大井川橋とほぼ同様の傾向が見られる。すなわち、中間支点の負曲げモーメントによる影響と考えられる損傷は認められない。

中間支点付近(0.15~0.2L)でのプレストレスが有利に作用しているとも考えられるが、この領域での損傷が皆無でないため、打ち継目の影響のほうが大きいように思われる。

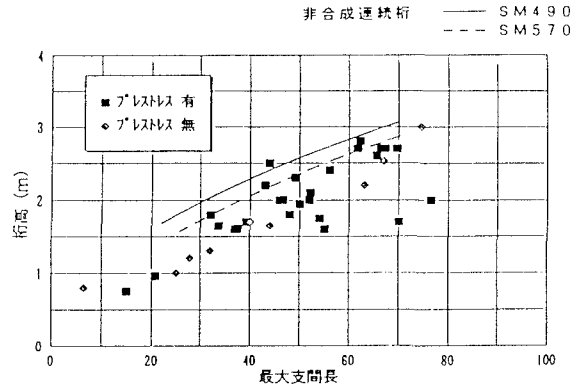


図-5 最大支間長と桁高

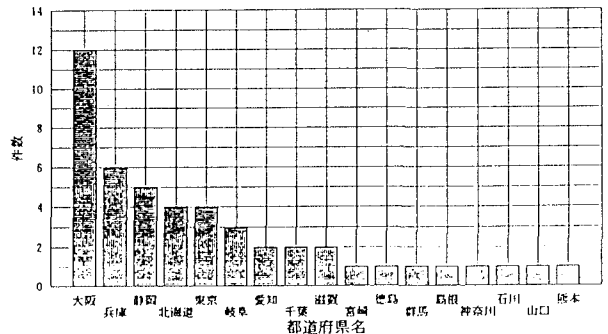


図-6 都道府県別実績数

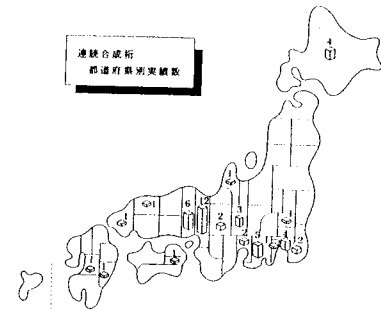


図-7 連続合成桁実績分布

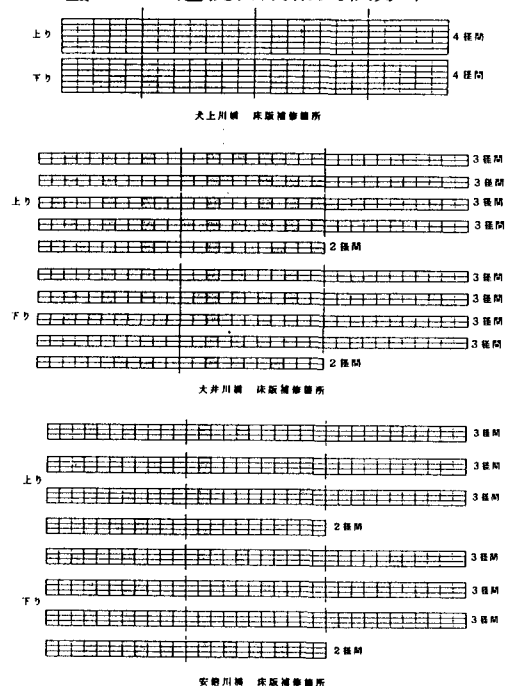


図-8 プレストレスする連続合成桁の床版損傷個所の事例

3)まとめ

限られたデータではあるが、今回の実態調査より明らかになった事項、問題点をまとめると以下のようである。

①プレストレスする連続合成桁とプレストレスしない連続合成桁の差

適用支間長、鋼重、桁高に関して両者の差はほとんど無い。施工の煩雑さを考えると、プレストレスしないもののほうが経済的に有利と考えられる。また、上述の3点に関して非合成桁の連続桁と比較すると、連続合成桁のほうが有利となっている。また、当時の論文では経済比較がなされ、支間60m程度まではプレストレスしない連続合成桁がやや有利であると報告されている。

②床版の耐久性

プレストレスしない連続合成桁の床版損傷事例の検証では、負曲げモーメントの影響ではなく、打ち継目の施工上の問題と思われる。また、非合成連続桁の実橋載荷実験より、通常の供用荷重に対しては完全合成桁としての挙動を示すとの報告も幾つか見られている。すなわち、プレストレスしない連続合成桁の床版損傷に関するデータは今回の調査では得ることは出来なかったが、プレストレスする連続合成桁や非合成連続桁と状況は余り変わらないものと思われる。

しかし、プレストレスしない連続合成桁がほとんど使われなくなった理由として、中間支点付近の床版のひび割れが耐久性にかなり大きな影響を及ぼすのではないかという危惧があると思われる。従って、プレストレスしない連続合成桁形式を採用する場合には、中間支点付近での床版の耐久性が支間部と変わらず十分であることを力学的に保証する必要がある。

3.3 試設計および解析

(1) 連続合成2主桁橋の試設計

設計マニュアルの実設計への適用上の問題、並びに連続合成桁の特性把握のため、下記橋梁について試設計を実施。

1) 対象橋梁

① ホロナイ川橋

- ・形式：2径間連続PC床版合成2主桁橋（実橋は非合成桁として設計されている）
- ・有効幅員：10.5m（在来型暫定施工幅員）
- ・支間割：2@52.0m
- ・主桁間隔：6.0m

② 第二東名仕様の広幅員連続合成2主桁

- ・形式：5径間連続PC床版合成2主桁橋
- ・有効幅員：16.5m
- ・支間割：ケース① 5@40.0m、ケース② 5@50.0m、ケース③ 5@70.0m
- ・主桁間隔：10.0m

2) 基本条件

- ①主桁断面は全て1部材1断面とし、現場継手位置（現場溶接）にて断面変化を行う。
- ②横構を省略し、横方向部材は横桁のみとする。
- ③横桁間隔は10m程度とする。
- ④現場溶接継手部の許容応力度は100%とする。
- ⑤水平補剛材は一段以下とする。
- ⑥フランジ幅は全長に渡り一定とする。
- ⑦板厚差の制限は特に設けない。
- ⑧輸送を考慮し、桁高は3.0m以下とする。

3) 設計結果

- ①非合成桁設計に比べ、鋼重減少率は5%程度である。
- ②従来の合成桁に比し、乾燥収縮・温度差の影響が著しい（乾燥収縮、温度差の評価を見直す必要がある）。
- ③非合成桁としての設計が必ずしも安全側の断面とはならない。特に、中間支点付近の下フランジ断面は、非合成桁設計のものを上回る。

(2) スタッドジベル作用力の検討

1) 検討目的

従来の合成桁では橋軸方向せん断力によりジベル配置を決定してきた。今回、床版支間の大きい少主桁合理化構造での連続合成桁の検討を進める上で、少主桁化及び床組みの簡略化に伴い、ジベルには橋軸直角方向にも設計上無視し得ない力の発生が考えられる。

当検討ではそのような作用力の性状及び度合いを把握し、マニュアル作成の参考資料とするために実施した。

2) 検討概要

- ・対象とする橋梁は第二東名仕様の3径間連続PC床版3主桁とした（床版支間：6m、支間割：3@60m）。
- ・横桁間隔は10mを標準とし、5mのケースについても解析を行った。
- ・全体挙動の把握のため、立体FEMモデルによる解析を実施。比較のため、床版剛性、せん断変形をパラメータに格子モデルでの解析を行った。
- ・設計手法としては簡易フレームによるスタッドジベルの照査を提案し、立体FEM解析と簡易フレームモデルによる結果が適合するように簡易モデルのモデル化の検討を行った。
- ・立体FEMモデル解析では、ジベル剛性、横桁間隔、垂直補剛材間隔、載荷位置の控え部材の剛性の影響等を考慮した。

3) 検討結果

- ・橋軸直角方向のジベル配置に関しては、中間支点上及び中間横桁取付け部付近に関し留意を要するが、連続合成桁として橋軸方向に必要な本数に比べ、極端に多いものではなく、配置上の工夫で対応可能である。
- ・解析上必要なジベル本数は解析のモデル化に左右されるところが大であり、適切なモデル化設定が重要である。
- ・なお、ジベルの設計に関しては、ジベル形状、配置、強度を含め再検討の余地が残されているものとする。

3.4 検証実験

(1) 連続合成桁中間支点の負曲げ実験

1) 実験目的

本マニュアルで採用しているひび割れ制御理論の妥当性確認を目的とし縮小モデル（実橋の1/5程度）による静的載荷実験を実施した。

2) 実験内容

実験体は、連続合成桁中間支点付近を切り出した部分縮小モデルである。形状・寸法は同じで、橋軸方向の鉄筋量を変えた3体である。ひび割れ間隔、ひび割れ幅は鉄筋量、鉄筋径およびジベル配置等の影響を受けると考えられるが、本実験供試体は鉄筋径、ジベルを同じとし、鉄筋量の相違によるひび割れ性状への影響を直接比較できるものとした。

載荷は中間支点を中心として2点对称集中荷重を破壊に至るまで漸増させた。

3) 実験結果

図-9 にひび割れ状態を示す。鉄筋量が多くなると、幅の小さいひび割れが多数発生しており、ひび割れの分散効果が認められる。図-10、11 に A-3 供試体の荷重-たわみ、中立軸の変化を示す。たわみはひび割れ発生までは合成断面の傾きであり、ひび割れ発生後は鋼桁+鉄筋断面の傾きである。中立軸位置もひび割れ発生後は徐々にコンクリート断面の有効性が無くなり、鋼桁+鉄筋断面のそれに漸近している。これらは他の供試体についても同様の傾向が見られる。

この結果は合成桁の設計において、中間支点付近のひび割れを許容するとすれば、断面力並びに応力度を算出する際、中間支点付近のコンクリート断面を無視しておけば安全側であることを示している。

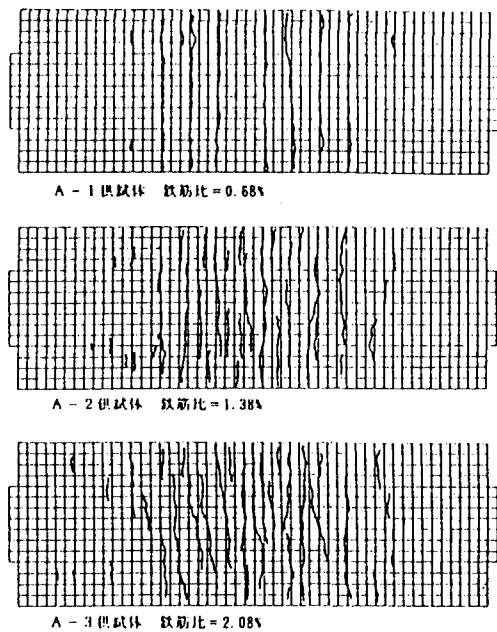


図-9 ひび割れ状況

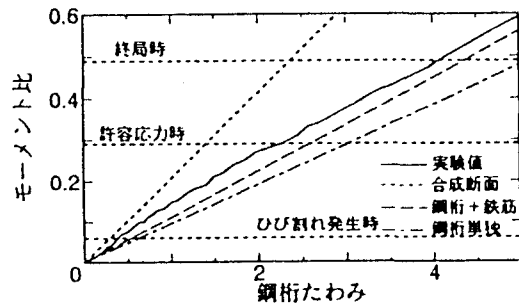


図-10 荷重-たわみ

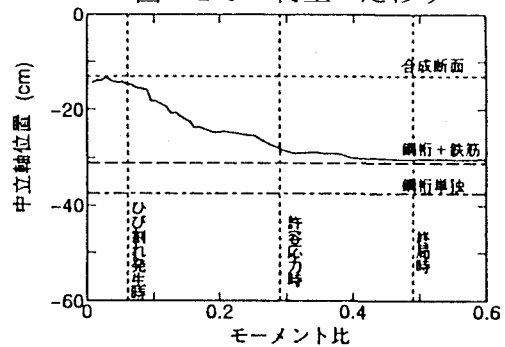


図-11 荷重-中立軸位置

4) まとめ

- ①鉄筋量が増えることによりひび割れ間隔および、ひび割れ幅が小さくなるひび割れ分散効果を確認した。
- ②Hanswille のひび割れ制御理論を用いて、ひび割れ幅・間隔・発生曲げモーメント等を正確に推定するには、乾燥収縮度や付着力等のパラメータの正確な評価が重要である。
- ③乾燥収縮度が理論値に与える影響が卓越している。
- ④今回の実験結果得られたひび割れ幅から、鉄筋比は 1.4%程度あれば十分であると考えられる。

なお、本件については、JH実験研究所にて引続き移動輪荷重による耐久性実験が行われ、鉄筋比 1.4%以上の供試体に対して影響がほとんど無いことが確認されている。また、今秋実物大供試体を用いた実験が予定されている。

(2) 25 φ大口径ジベルに関する各種実験

1) 実験目的

少主桁化に伴うジベル数の増大を避けるため、25 φ大口径スタッドジベル適用の可能性について検討することを目的に実施した。

実施項目としては、下記 3 項目である。

- ①押し抜き実験
- ②溶接性施工実験
- ③ジベル付き鋼板の疲労実験

2) 押し抜き実験

①実験内容

JSSCの合成構造小委員会にて審議中の「頭付きスタッドの押し抜き実験方法の標準化」(案)に準拠し、実施した。

供試体並びに荷重方法を図-12、13に示す。

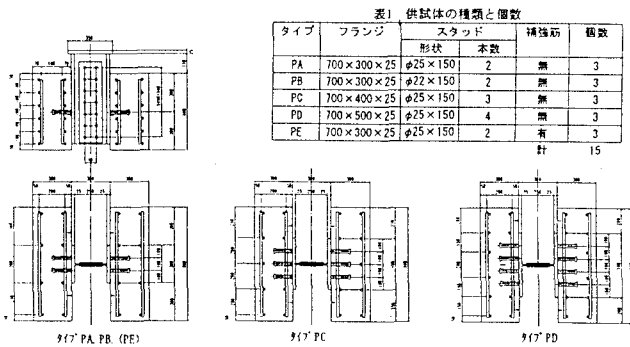


図-12 供試体の寸法諸元

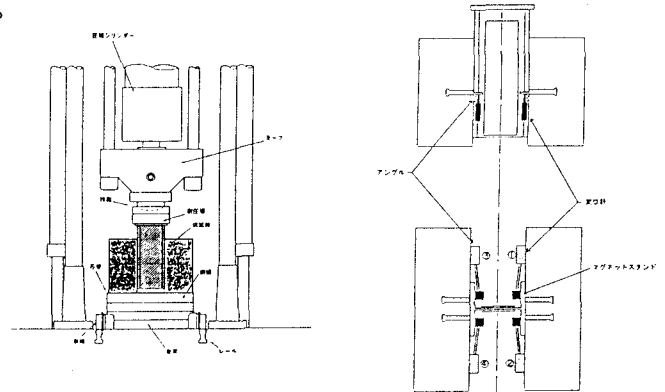


図-13 荷重状況と変位計の設置位置

②実験結果

実験結果を図-14に示す。

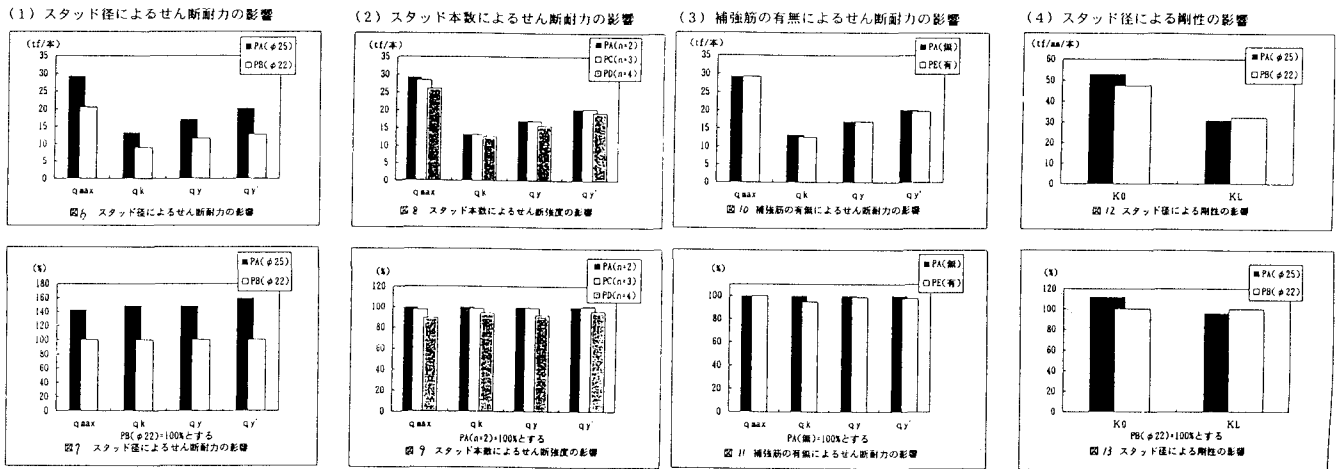


図-14 せん断耐力への各種パラメータの影響

③まとめ

- ・25φ大口径スタッドジベルは現行の道路橋示方書の考え方に基づいた設計が可能であることを確認した。25φのスタッドジベル耐力は22φのものに比べ約1.4~1.5倍大きく、25φのスタッドジベルを使用することにより、溶殖本数を低減し、省力化が図れる。
- ・スタッドジベルの列数が増えることにより耐力低下の傾向が認められた。更に本数が多くなった場合の挙動については今後、更に検討する必要があると考えられる。

3) 溶接施工実験

押し抜き実験、疲労実験に用いたスタッドジベルと同一条件で溶接施工を行い、JISに準拠し、引張り試験、曲げ試験、せん断試験、マクロ試験を実施。いずれも、所定の性能を有していることを確認した。

4) ジベル付き鋼板の疲労実験

①実験内容

図-14に示す25φのスタッドジベル1本が溶殖された鋼板供試体を用いて実施した。供試体は板厚 $t=25\text{mm}$ (SM490YB)のFA供試体1体と、板厚 $t=50\text{mm}$ (SM520C)のFB供試体6

体の計7体である。

載荷荷重としては試設計結果をもとに最大応力を 250MP とし、応力範囲を 50MP に設定し行った。この試験により 200 万回で破断しないことを確認後、従来のスタッド疲労実験を参考に、破断する可能性のある応力範囲を推定し、その荷重条件で実施した。

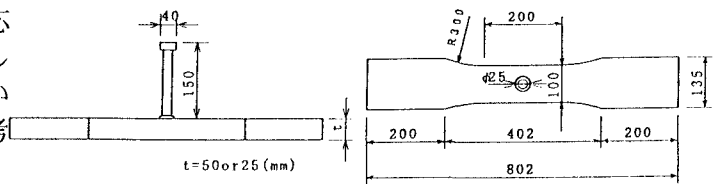


図-15 実験供試体

②実験結果

図-16 に過去のデータと比較して示す。なお、図-17 に本実験結果を JSSC (E) 及び板厚の影響を考慮して Ct で補正した JSSC(E') と比較して示す。今回の試験結果では、60Mpa では約 1500 万回で 1 体破断、50Mpa では 2000 万回で破断しないという結果が得られた。

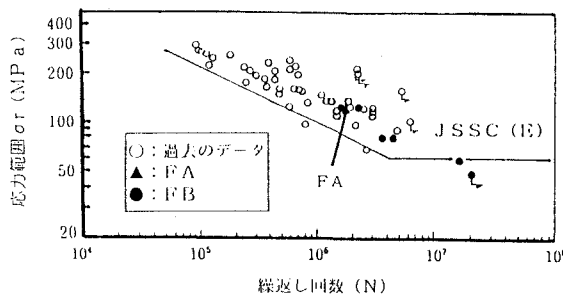


図-16 過去のデータとの比較

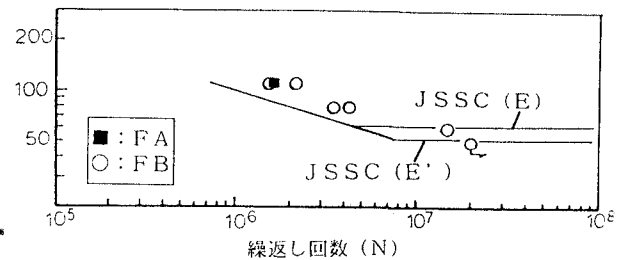


図-17 板厚による補正をした S-N 線図との比較

③まとめ

- ・ 25 φスタッドジベル付き鋼板の疲労強度は、200 万回程度の載荷では 22 φのものとはほとんど変わらない。
- ・ JSSC の疲労曲線では、200 万回程度までは安全側の値を与えている。しかし、打ち切り限界 (疲労限) については、十分なデータが無いため確実なことは言えないものの、今回得られたデータから類推すると、JSSC で与えている値にかなり近いものと考えられる。

4. おわりに

以上、(社)日本橋梁建設協会における連続合成桁への取組みについて、平成 6 年より協会内に設けられた「連続合成桁ワーキンググループ」を中心に実施して来た各種検討成果の概要を報告した。

PC 床版連続合成少主桁形式の橋梁は、我が国においてはやっと緒に就いた段階で、次世代の橋梁形式として有望視されるものの、設計・施工を通じ、いまだ、解決すべき幾つかの課題が残されている。

今後、残された諸検討ならびに実工事の着実な遂行により、上記構造の合理化へのブラッシュアップを図り、次世代標準橋梁として定着することを望むものである。

なお、本報告の諸検討は多数の方々のご協力により行われたもので、本来ならば関係者の方々のお名前を列記すべきところではありますが、紙面の関係上省略させていただきます。