

(41) 斜角を有する鉄骨鉄筋コンクリート桁に対する 用心鉄筋の効果に関する検討

谷口 望¹・NGUYEN VAN QUANG²・福本 守³・池田 学⁴

¹正会員 前橋工科大学 社会環境工学科 准教授 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐島460-1)
E-mail:n-tani@maebashi-it.ac.jp

²学生会員 前橋工科大学大学院 建設工学専攻 博士前期課程 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐島460-1)

³正会員 西日本旅客鉄道 構造技術室 鋼構造 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島5-4-20)
(研究当時 鉄道総合技術研究所)

⁴正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 鋼複合構造 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

鉄骨鉄筋コンクリート桁 (SRC桁) は、空頭制限の厳しい都市内の鉄道橋などで多く用いられている構造である。SRC桁の設計では、コンクリート橋と同様にひび割れに対する配慮が必要となっており、斜角を有する橋梁となる場合は、ねじれ挙動に対する検討が必要となる。「鉄道構造物等設計標準・同解説、鋼とコンクリートの複合構造物」では、これに対する配慮として、桁端鈍角部床版に対して用心鉄筋を配置することを推奨している。しかし、複合標準に示された用心鉄筋の配置方法は、鉄筋コンクリート桁 (RC桁) を対象に規定されている手法を準用しており、SRC桁に対する用心鉄筋の効果についての検討は少ない。そこで本検討では、標準的な鉄道用SRC桁の事例を用いて、斜角を有するSRC桁の活荷重応答に関する有限要素解析により、用心鉄筋の効果を検証した。

Key Words : beam with the angle of skew, reinforcing bar, FEM

1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート桁 (SRC桁) ¹⁾ は、鉄骨をコンクリートの中に埋め込むことで耐荷性の向上を目指した構造である。また、SRC桁の一種であるH鋼埋め込み桁では、鋼材の露出部分が少ないため、維持管理への対応にも優れており耐久性が向上することや、鋼部材単独の橋梁よりも騒音、振動が低減することで環境適合性にも効果が期待されている構造である²⁾。

SRC桁は鉄道構造物での活用が多く、鉄道橋の設計基準である「鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼とコンクリートの複合構造物 (複合標準)」³⁾ において、様々な設計手法が規定されている。鉄道構造物で使用される場合の特徴としては、都市内の橋梁で使用されることが多いことである。この理由としては、先述の騒音、振動に配慮する必要があることのほかに、桁下空頭の確保に対して有効であるためである。SRC桁では、RC桁で設計するよりも、同等な断面で高い剛性を確保することができ、この効果により、桁高を抑えることが可能になる。都市内では、狭隘な箇所等では桁下空頭の確保が困難な事例が多くあるが、この理由により、このような場所に

SRC桁が活用されている。したがって、SRC桁の多くは、比較的薄型の板状構造物となることが多い。

SRC桁の設計上の課題の1つとしては、先述の通り板状の構造であることが多いため、ねじれによる設計上想定されない挙動が生じることがある。特に、都市内では線形の確保も困難な場合もあり、斜角を有する桁も多くみられるが、この斜角の場合では、このねじれによる影響は無視できないものとなる。これらに対する設計上の対策としては、用心鉄筋の配置が挙げられる。この用心鉄筋は、応力が集中する鈍角側の支点部に、その他の一般部よりも鉄筋を多く配置するものであり、斜角桁のねじれ挙動による鈍角部床版部の引張応力集中に対して集中緩和を目的としたものである。「複合標準」では、この用心鉄筋の配置方法に関する記載があるが、これはRC桁に対する基準⁴⁾ を準用している。しかし、RC桁とSRC桁とでは、コンクリートに対する鋼材の比率は大きく異なるため、RC桁に対しての用心鉄筋の配置手法が、SRC桁にもそのまま準用できるかどうかは疑問がある。また、SRC桁としてこの用心鉄筋の効果を検証した事例は少ないのが現状である。

そこで本研究では、SRC構造に対してこの用心鉄筋の

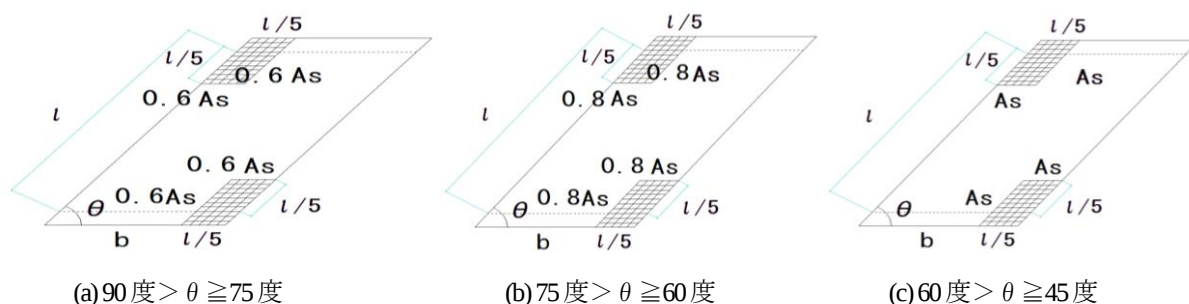


図-1 複合標準に示されている用心鉄筋の配置方法

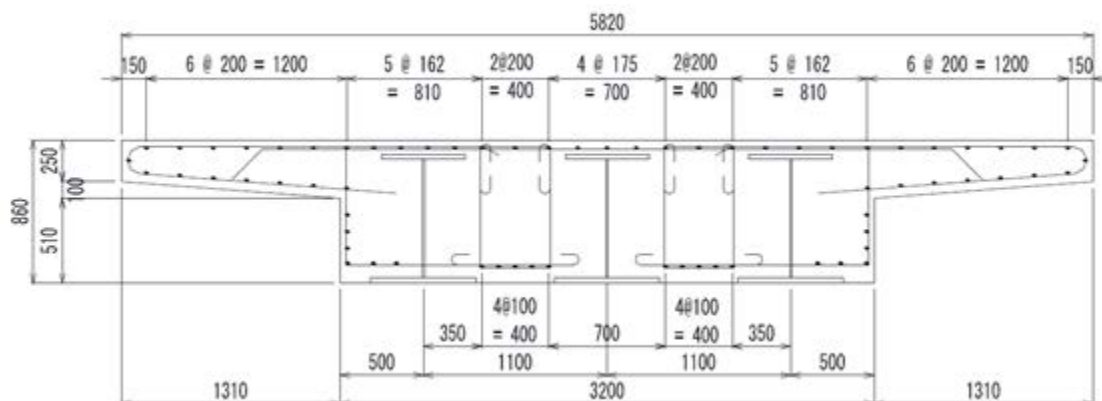


図-2 SRC 桁の断面図（単位 mm）（支間 20m, 桁長 20.7m）

効果を検証することを目的とし、一般的な鉄道用SRC桁（H鋼埋め込み桁）を対象に、解析的な検討を行うこととした。本検討では、3次元の有限要素解析によりモデル化を行い、用心鉄筋の有無を含めて、その効果を解析的に検証する。

2. 複合標準による斜角桁の用心鉄筋配置方法

複合標準によるSRC斜角桁に対する用心鉄筋の配置方法は、図-1に示すとおりである。ここに、 A_s については用心鉄筋を配置する範囲の圧縮側鉄筋の単位幅あたりの断面積である。この場合、斜角 θ が小さくなるほど用心鉄筋の量は増えるように設定されていることが分かる。本基準の問題点としては、以下の点が考えられる。

まずは、用心鉄筋の配筋量が、斜角の3段階で決められており、詳細な斜角の角度ごとの必要量とはなっていないことである。このルールによれば、設定の境界の角度で大きく鉄筋量が異なるケースが出てくる。例えば、斜角 60° と斜角 59.5° では、桁に発生するねじれ挙動にはさほど差がないことは容易に想像できるが、本設計基準では用心鉄筋の断面積は異なることとなる。また、斜角 45° 以下の場合については規定がないため、詳細な検

討を行わなければ設計困難となる。

次に、用心鉄筋の配置範囲では、橋軸方向、橋軸直角水平方向、ともにスパンの1/5とすることが規定されていることである。つまり、これは、用心鉄筋の配置としては菱形となるように配置することを意味している。本基準はRC桁に対しての用心鉄筋配置法を準用しているため、桁のスパンはさほど長くないものを想定していると考えられる。しかし、SRC桁では、その剛性の大きさから、比較的長いスパンの場合でも使用例がある。一方、橋軸直角水平方向の幅は、鉄道の場合、単線または複線分であるケースが多く、RC桁と大きく変わりはない。したがって、このルールをSRC桁に準用すると、鈍角部に対する用心鉄筋が、橋軸直角水平方向のかなり広い範囲に設置するケースが生じると考えられ、この場合、鈍角部という想定を超えた範囲となっていると言える。

さらには、SRC桁は、その多くが桁高を小さく抑える目的で使用されることから、鋼桁と床版上面のかぶり厚は極力小さく設定するケースが多い。その場合、この狭い部分にさらに用心鉄筋を配置するのは設計上および、施工上、困難なケースがある。桁端部は、鋼横桁にボルト接合を使用することが多いため、これらと用心鉄筋の干渉は、施工上問題となることが多い。

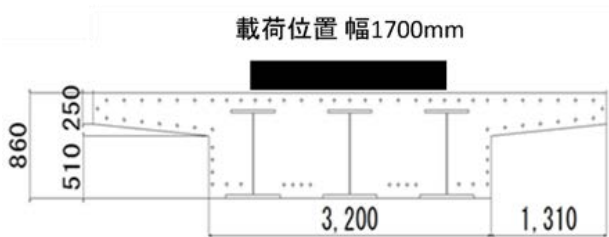


図-3 SRC桁の載荷幅 (単位:mm)

3. 解析対象構造, 解析モデルの概要

SRC桁のモデルは鉄道構造物等設計標準の設計計算例「H鋼埋め込み桁」(単純桁)⁵⁾を基に想定した(図-2)。本橋梁は単線用橋梁であり、スパンは20mを設定している。鉄筋は、軸方向圧縮鉄筋にD13を31本(かぶり59.5mm)、軸方向引張鉄筋にD16を16本(平均かぶり111.0mm)、側方鉄筋としてD13を6本、せん断補強鉄筋としてD16を250mmで配置している。なお、本橋は直橋として設計されたものではあるが、斜角の場合でも設計における格子解析モデルでは、同等な必要剛度が算出されるため、様々な斜角に対しても適用できる断面と考えた。

対応する解析では、汎用有限要素解析ソフト「Final」を用いて計算を行った。解析では、鉄骨、コンクリートはソリッド要素でモデル化し、鉄筋についてはビーム要素を用い、下フランジ面を線支承で支持した。また、解析は静的弾性解析とし、鉄骨、鉄筋のヤング係数は200kN/mm²、コンクリートのヤング係数は28kN/mm²、圧縮強度は27N/mm²と仮定した。載荷荷重は、設計荷重であるEA-17³⁾相当とし、軌道構造の幅を参考にして、図-3のようにH鋼が位置する床版上面に平均化して等分布荷重で作用させるものとした。

一般的なSRC桁の設計では、引張側のコンクリートの剛性を、安全側の観点から考慮していない。しかし、本解析にあたっては、実際の使用状況ではひび割れはほとんど生じていないことから、ひび割れによる剛性低下の影響は比較的小さいと考え、弾性解析を検討に用いることとした。コンクリートの引張強度を考慮した非線形解析を実施する場合は、SRC桁の施工条件を考慮する必要がある。つまり、地組やバント架設の場合は、コンクリート自身の死荷重を考慮する必要があるが、鉄骨を先行して架設し、その後コンクリートを橋上で打ち込む場合はコンクリート自身の死荷重を考慮しなくてもよいことになる。これらの条件の差異を厳密に考慮せずに、単純に活荷重による影響のみに対して検討するものとした。

斜角の種類においては、90度(直橋)、85度、80度、75度、70度、65度、60度、55度、50度、45度の10種類としている。また、各斜角時における用心鉄筋は、図-1に

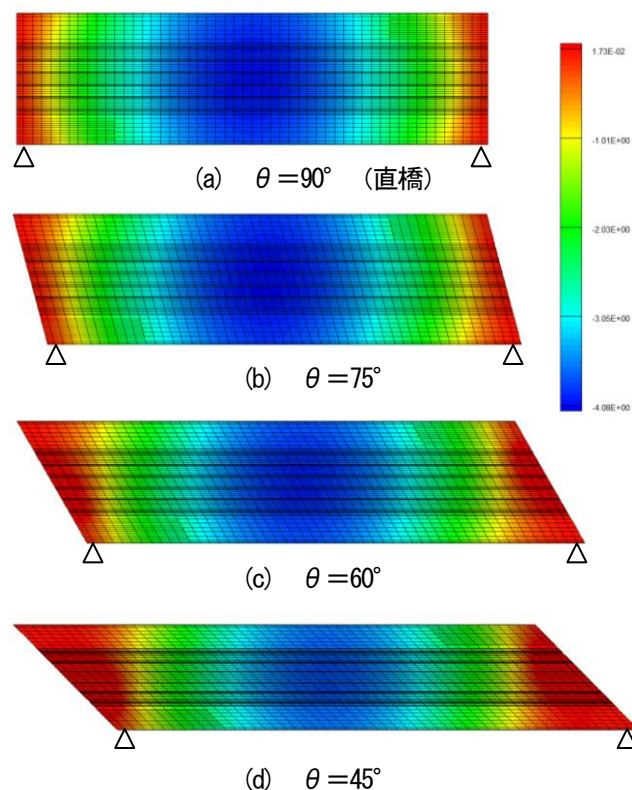


図-4 各斜角時の軸方向応力コンター (θ: 斜角)
(コンターレベルは各図共通, 単位はN/mm²)

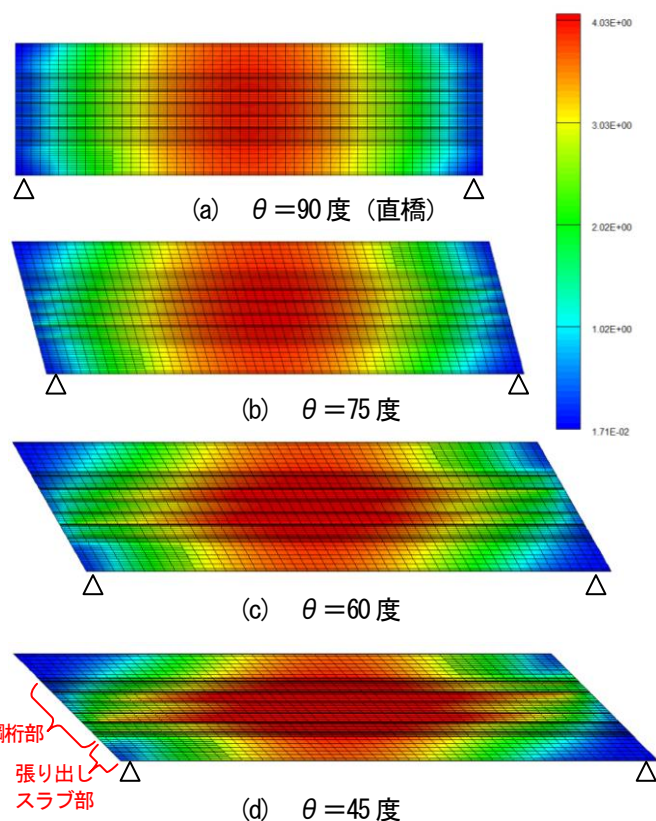
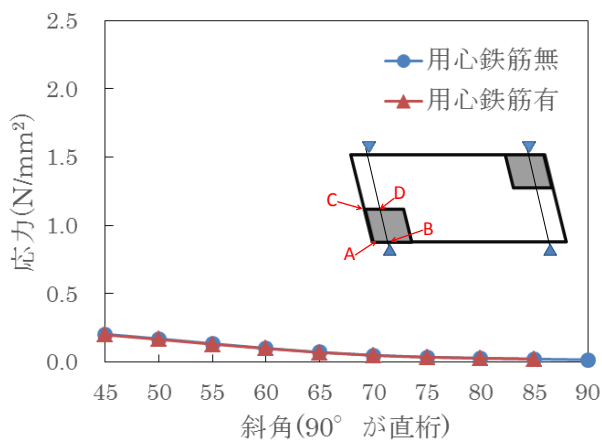
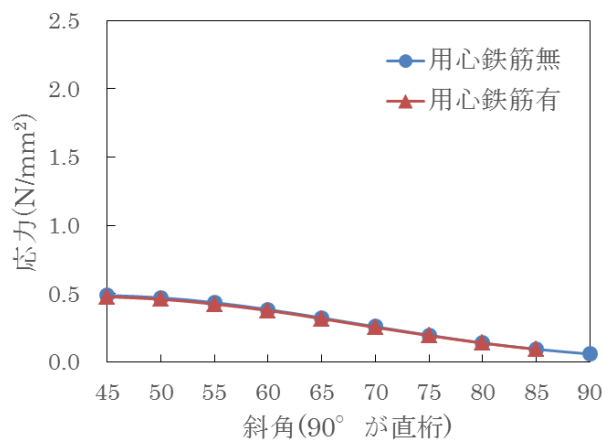


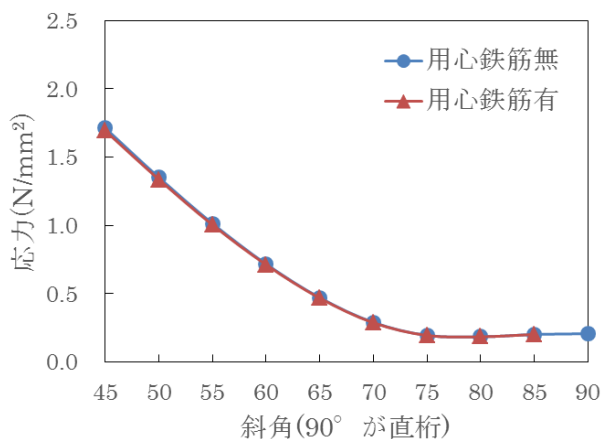
図-5 各斜角時のミーゼス応力コンター (θ: 斜角)
(コンターレベルは各図共通, 単位はN/mm²)



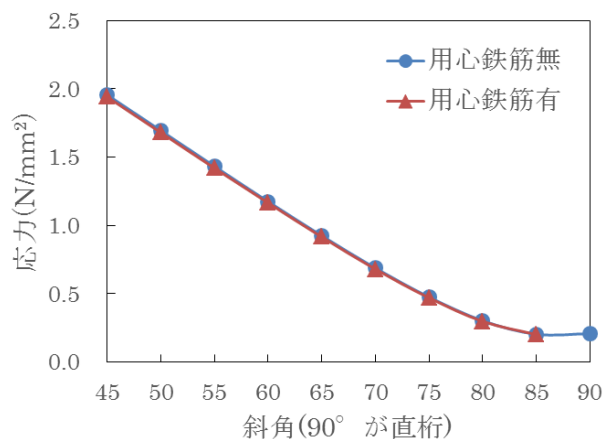
(a) A点における応力



(b) B点における応力



(c) C点における応力



(d) D点における応力

図-6 各斜角時における床版上面のミーゼス応力の比較

示された式を厳密に満足するような理想的な鉄筋を配置することとした。実際の橋梁では、必要量を満足するように規格径の異形鉄筋を配置するのが一般的であるが、本解析では理論上厳密とするために、実際には規格にはない鉄筋径を設定していることになる。なお、用心鉄筋の効果を検証するため、用心鉄筋を配置しない場合についても解析を行った。

4. 解析結果および考察

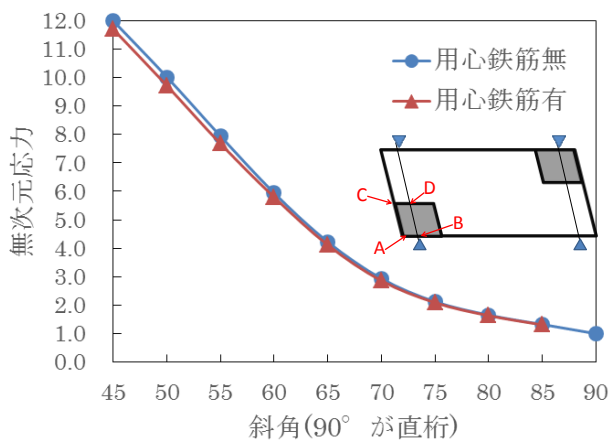
解析結果のうち、代表的な斜角時の場合の床版上面のコンター図を図-4、図-5に示す。ここで、図-4は、橋軸方向の応力分布であり、図-5は、ミーゼス応力分布である。また、図中△は支点（線支承）の位置を示している。

図-4は、床版の橋軸方向の応力を示している。単純桁の上フランジ面となるため、ほぼ圧縮応力となる範囲が大きくなっているが、桁端部には一部小さい値である

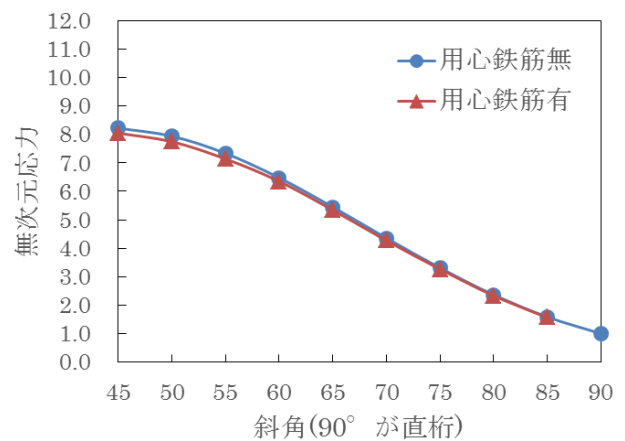
が引張応力が生じている。本図では斜角ごとにみると、両方の鈍角側支点を支点とする桁の曲げ挙動が生じていることが分かる。したがって、鋭角側の支点付近は、応力はほぼ生じない結果となっている。

一方、図-5を見ると、図-4とは異なる挙動となっていることが分かる。ミーゼス応力は、主に鋼材の最大主応力を用いる際に使用するものであるが、弾性解析であることから検討に用いることとした。本結果からすると、鈍角側支点付近にねじれ挙動による応力の集中が生じていることが分かる。また、この応力集中は、特に、H形鉄骨の鋼桁がある部分において大きくなっている。これは、荷重範囲が主に鋼桁上であることの影響が大きいと考えられ、荷重点や支点のない張出スラブ部には、大きな応力が生じていない結果となっている。

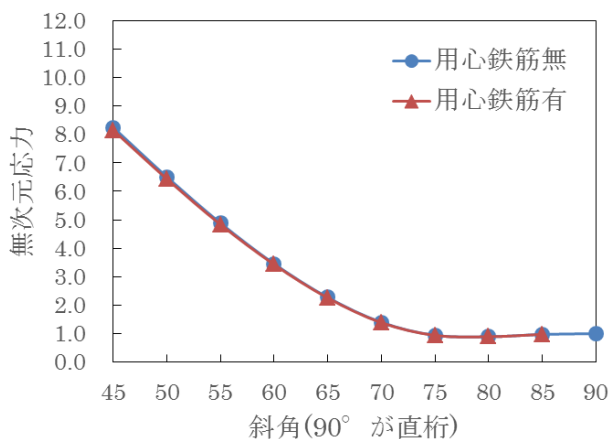
図-4、図-5より、図-1に示されている鈍角側端部に対する用心鉄筋の配置方法は、張出スラブの存在が考慮されていないため、効率的でない可能性があると考えられる。また、この場合、主桁である鋼桁上に生じる応力集



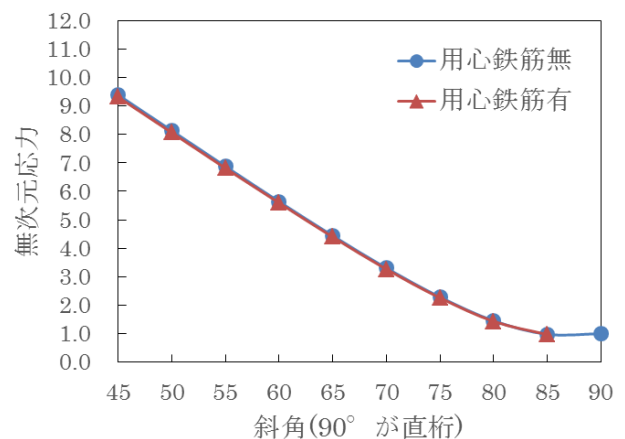
(a) A点における無次元化応力



(b) B点における無次元化応力



(c) C点における無次元化応力



(d) D点における無次元化応力

図-7 各斜角時における床版上面のミーゼス応力の比較（直橋の場合を1として無次元化）

中部に用心鉄筋が効率的に配置できない可能性もあることが分かる。

次に、床版上面における主要な点におけるミーゼス応力の各斜角時とこの変化の様子を図-6に示す。本図のA~D点は、図-6(a)に示した位置となっている。また、凡例の「用心鉄筋無」は用心鉄筋を配置せずに解析した結果、「用心鉄筋有」は、図-4、図-5のケースと同様に図-1に沿って用心鉄筋を配置した結果である。各図ともに、斜角が小さくなると応力が増加する傾向となっているが、張出スラブ上になるA点、B点ではその増加量は小さい。一方、鋼桁上となるC点、D点は斜角が小さくなるとともに応力は大きく増加し、支点部（D点）の応力が桁端（C点）よりも大きくなる結果となった。また、用心鉄筋の有無で比較すると、その応力低減効果はほとんど見られない結果となった。なお、本図からも分かるように、すべての斜角時において、コンクリートに有害なひび割れを生じさせるような大きな引張応力は生じない結果となっている。

図-7は図-6に対して直橋の場合の応力を1とする無次

元化応力として示したものである。無次元化した応力では、鈍角部桁端最外縁であるA点において、斜角が小さくなるとともに急激に応力が増加する傾向がみられる。したがって、斜角が小さくなるとともに応力が急激に増加するのは鈍角側の桁端最外縁であることが分かる。本橋の場合は、このA点には載荷点、支点がないため、応力の絶対値が小さく、用心鉄筋を配置するべき点ではなかったが、張出スラブの無い構造の場合は、この点が用心鉄筋の配置を要する点になると考えられる。また、用心鉄筋の有無については、図-6と同様に大きな効果は見られないものの、A点、B点の応力低減効果は、C点、D点よりもやや大きい傾向となっていることが分かる。これは、A点、B点は張出スラブ上にあたるが、C点、D点は鋼桁上となっているためと考えられる。つまり、鋼桁上は、鋼材の剛性が卓越するため、用心鉄筋の剛性寄与効果がさほど大きく影響していない結果となっていると考えられる。張出スラブ部は、この鋼桁の剛性の影響が少なく、RCスラブと同様な傾向となるため、用心鉄筋による対策効果が比較的大きくなっていると考えられる。

図-4～図-7より、斜角のSRC桁に対して、効率的に用心鉄筋を配置するには、鈍角部最外縁に限定するのではなく、張出スラブ部の位置や、軌道配置等の载荷位置を考慮すべきであることが分かる。また、鋼桁上のコンクリート床版に用心鉄筋により対策を行う場合は、鋼材の剛性が卓越することから、RC桁の用心鉄筋の配置手法では対策効果が十分に得られない可能性があることが分かる。なお、一般的な鉄道橋におけるSRC桁の場合、軌道構造の直下に剛性の大きな鋼桁を配置するのが一般的であり、張出スラブ上に大きな活荷重が作用するケースは非常に稀である。したがって、本検討ケースは一般的な事例であると言え、張出スラブ上に大きな応力が生じるケースは少ないものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、都市内の鉄道橋で多く使用されている斜角を持つ単線のSRC桁を対象に、従来から規定されている用心鉄筋の配置方法について、解析的に効果を検討した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 斜角を持つSRC桁は、鈍角側であっても張出スラブ部には大きな応力は生じないことがある。したがって、この部分に用心鉄筋を配置し、対策効果を期待するのは効率的ではないと考えられる。
- (2) 鉄道用SRC桁では、载荷範囲が鋼桁上にあることや、支点が鋼桁直下となることが多いため、斜角に伴う応力集中は、鋼桁部に大きく生じることが分かった。したがって、斜角に対する用心として対策を行うのは、鋼桁部とすることが効率的であると考えられる。
- (3) 斜角SRC桁鈍角側の鋼桁部床版に対策を行う場合、用心鉄筋では鋼桁に対する断面積が比較的小さいため、十分な効果が得られない可能性がある。

- (4) 今回例として扱った斜角SRC桁では、鈍角側において引張応力は生じるものの、有害なひび割れが生じるような大きさではなかった。

本研究は、一般的な鉄道橋SRC桁に対しての検討であり、様々な個別ケースでは、条件が異なる場合もあると考えられる。例えば、張出スラブの無い桁の場合や、支点条件が異なる場合など、本検討結果とは異なる挙動が生じる可能性がある。また、本用心鉄筋は、支点が不等沈下するなどの将来起こりうる変状に対して設定されているとの考え方もあり、そのような場合、本検討の考察は適用できないことがあることに注意を要する。

謝辞：本研究の実施にあたっては、研究当時に前橋工科大学4年生であった小島宏太君に、解析の実施やデータ整理等で多大な協力を得ました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 事例に基づく複合構造の維持管理技術の現状評価、複合構造レポート 04, 土木学会, 2010.
- 2) 丹羽雄一郎, 西田 寿生, 谷口望, 半坂征則: 鋼鉄道SRC 床版下路トラス橋の騒音低減効果, 土木学会第64回年次学術講演会, 講演概要集, CS2-009, 2009.
- 3) 国土交通省監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼とコンクリートの複合構造物, 丸善, 2002.
- 4) 国土交通省監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 丸善, 2004.
- 5) 鉄道総合技術研究所: 限界状態設計法による設計計算例 H鋼埋込み桁, 研友社, 1999.

EXAMINATION ABOUT EFFECT OF REINFORCING BAR FOR SRC BEAM WITH THE ANGLE OF SKEW

Nozomu TANIGUCHI, NGUYEN VAN QUANG,
Mamoru FUKUMOTO and Manabu IKADA

Steel and Reinforced Concrete (SRC) beams are often used for railway bridges. The SRC beams with the angle of skew have difficulty in design. In this case, the reinforcing bars are used for the concrete slab. However, the effects of the reinforcing bars are not clear. In this study, the effects of the reinforcing bars are examined by finite element analysis. The effectiveness reinforcement methods are shown by the examination results.