

氏 名 くら た ゆき ひろ 倉 田 幸 宏
授 与 学 位 博士 (工学)
学位授与年月日 平成26年7月9日
学位授与の根拠法規 学位規則第4条第2項

学 位 論 文 題 目 道路橋コンクリート床版の若材齢時の挙動と
その対策に関する研究

論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 鈴木基行 東北大学教授 岩熊哲夫
東北大学教授 京谷孝史 東北大学教授 久田 真

論 文 内 容 要 旨

本論文は、社会インフラの老朽化問題の大きな課題である、道路橋コンクリート床版の損傷に対して、その大きな要因である鋼桁拘束下におけるコンクリート床版の若材齢時の挙動について検討を実施し、設計・施工方法の対策について提案を行ったものである。論文は1章から7章で構成される。以下に、各章の要旨について概説する。

第1章では、国内社会インフラの現状を見たときに、老朽化の問題が顕在化してきており、その中でも特に道路橋コンクリート床版の損傷事例が数多く発生している。この事が本論文に筆者が取りくむ動機となっている。

設計基準は、コンクリート床版の損傷の毎に改訂されたにも関わらず、床版の損傷事例はいまだに報告されている。また、コンクリート床版の損傷事例の特徴を観察すると、橋軸直角方向にひび割れが発生する事例が数多く散見される。この方向にひび割れが発生するということは、鋼桁の拘束が原因である事が推定される、つまりコンクリート床版と鋼桁が「合成」しコンクリート床版の歪み変化を鋼桁が拘束してひび割れを誘発させたと考えられる。

一方、国内では連続合成桁は、コンクリート床版の損傷が多発した事と床版打替え時の課題が多いため、鋼桁とコンクリート床版の合成挙動を考慮しない非合成桁が主流となっている。鋼桁は非合成で設計する事は安全側の設計となるが床版にとっては、非合成であっても実際は、鋼桁の拘束の影響があるため非合成桁で設計する事は危険側の設計となる。また床版の損傷の多くはコンクリート床版施工後の比較的早い時期に橋軸直角方向のひび割れが発見される事例が多いことから、鋼桁拘束下における床版コンクリートの若材齢時の歪み挙動について特に留意した。

このような経緯により筆者は、これらの「誤った非合成桁の概念」による道路橋床版の設計方法に対して警鐘を鳴らすと共に、コンクリート床版施工の鋼桁拘束下における若材齢時の床版の挙動を明らかにして、耐久性に優れた床版の設計・施工方法を提案する事を目的に本論文を記述した。

第2章では、既往の研究についての概要と課題について記述し、研究のほとんどが実際にコンクリートを鋼桁に拘束された状況で打ち込んだ若材齢時に発生するコンクリートの挙動についての検

討は成されていない事が問題点を挙げ、これらの事から、本研究の目的と意義を以下とした。

1) 本研究の目的

- ・ 現状の床版設計において考慮していないコンクリート打込みの際に発生する橋軸方向応力を評価する解析方法を提案して、実物大実験により検証する。
- ・ 提案した解析方法について、実橋梁の計測結果で検証するとともに、シミュレーション解析により、現場施工時における留意点を明らかにする。
- ・ コンクリート床版の若材齢時の挙動を考慮した合理的な設計・施工方法を提案する。

2) 本研究の意義

現状の橋梁架設現場において、床版を施工した直後でまだ道路として供用して無い段階で、コンクリート床版に橋軸直角方向ひび割れが発生するケースが多く散見されている。本研究の成果を国内の橋梁エンジニアに周知することで、このような事態を減少させる事により、床版コンクリートの耐久性向上に貢献できると考える。

第3章では、鋼桁拘束を起因とする橋軸直角方向ひび割れの原因を探るため、実物大供試体実験の計測結果に対して、数値的解析評価を試みた。鋼桁拘束を起因とする橋軸直角方向ひび割れは、施工して比較的早い時期に発見されるため、若材齢時のセメント水和反応によりコンクリート床版断面内で温度上昇・降下が生じて温度歪みが発生して、さらにコンクリート打込みによる自己収縮歪みと乾燥収縮歪みなどを鋼桁が拘束する事が原因と考えられた。これらの応力は現状の非合成桁は勿論の事、合成桁であっても考慮されて設計されていない。

上記の課題に対して、実物大の鋼桁にコンクリート床版の打込みを行う施工実験を実施して床版断面内の温度履歴、歪み履歴を計測した。また従来はマスコンクリートの拘束ひび割れのために開発された、非線形温度応力解析で実験の再現解析を実施して計測値と比較した。このプログラムはコンクリート内部で起こる水和反応について、断熱温度上昇特性を発熱項としてコンクリート内部における熱伝導率や養生方法や型枠などの伝達率をパラメータとして各部位の時刻歴毎の温度分布を算出する非定常熱伝導解析と、時刻歴毎に弾性係数や引張強度を設定して応力計算を実施する非線形解析を組み合わせたものであった。

これらの数値解析の結果、解析の物性値をコンクリート床版に合わせれば計測歪みと解析歪みの値は精度良く合致して、床版の応力についても数値的に評価可能な事が確認できた。

また、実験の際に想定してなかったひび割れ要因については、輻射熱による影響ではないか？と推測して、数値的な評価方法を提案した。実験の変形挙動より、輻射熱を原因とするひび割れの可能性が大きい事が確認でき、養生方法についての工夫が必要であることについても確認できた。

第4章では、旧日本道路公団関西支社管内の5橋梁について、第3章で対象としたセメントの水和熱反応に対する温度応力に着目して、コンクリート打込み直後から、経時的に外気温、床版内部の温度などを計測して、計測結果を整理する事により、若材齢時の鋼桁拘束を起因とする応力に大きな影響を与えるコンクリート床版の内部温度履歴の推定を実施した。計測結果を分析すると、コンクリート内部の打込み温度、温度上昇勾配、最高温度については、季節毎にモデル化が可能であることがわかった。計測結果のバラつきが最も大きかったのは、温度下降勾配であった。この事は、コンクリート床版は現場における養生環境の影響を大きく受けるためと考えられた。

また、対象5橋の非線形温度応力解析について計測値との整合性を計った後に、セメントの発熱量や熱伝達率、養生温度などをパラメータにシミュレーション解析を実施して環境条件が温度応力を与える影響を評価した。環境条件により床版コンクリートに発生する引張応力は 0.2N/mm^2 ~

0.85N/mm²まで変わる事がわかった。

実橋床版における温度計測データおよびパラメータ解析評価より、場所打ちコンクリート床版の温度ひび割れ抑制の検討に際しては、床版内部履歴を管理する上で、最高温度に達した以降の温度下降勾配を緩やかにすることが最も効果的な管理項目であると考えられた。

第5章では、第3章、第4章より、鋼桁の拘束を起因とするひび割れの多くは若材齢時のコンクリートの収縮が課題となるため、施工方法での観点で解決策を検討した。

コンクリート床版の打込みの際に、適切な養生方法を採用することは非常に重要であり、養生の適切さがコンクリートの品質に大きな影響を与えることは周知の事実である。また、第4章で得られた知見から、コンクリート打込み後、床版内部の温度が最高温度に達した以降の温度勾配を緩やかにする事に最も大きな影響を与える事がわかり、解決策として養生方法に注目した。養生の目的として保温・保湿性能があげられるが、さらに橋梁の現場環境を考慮して風速の影響、また第3章の実験・解析で確認された輻射熱の影響に対して、有効な養生方法を実験と解析により検討を実施した。また養生を設置するタイミングについても解析的に検討を実施している。養生の保温・保湿効果については養生材を変えて実験的に検証を実施しており、その中でも従来は床版コンクリートの養生には使用していなかったポリエチレン製の梱包用に使用される3層の気泡シートの効果が優れていた。

床版のように部材厚が薄く外気に触れる面積が広い薄板構造においては、風速が熱伝達率に与える影響は大きい事が推定され、実験を実施した。その結果、風速4m/secの環境条件で無養生の床版上面の熱伝達率は無風時の熱伝達率の4倍強もの値となった。また、風速の影響を受ける養生材は水分を吸収しやすいタイプで、これらの材料は風に当たるとさらに熱伝達率は大きくなる。つまり養生マットなどは水分を含んだ状態で風にあたると、急速に温度を下げるため、養生マットの上にポリエチレンを原料とするシートを設置する必要がある事が確認できた。

若材齢時の輻射熱の影響に対しては、床版コンクリート打込みの際には日射による熱影響を大きく受けるため輻射熱対策を行うことが必要であり、養生マットの上に反射率の高い遮光シートを敷設すると効果が大きい事が実験により確認できた。

第6章では、鋼桁の拘束を起因とするひび割れに対する解決策として、設計計画の段階で合成挙動を考慮する事が最も有効な手段と考えた。完全な非合成桁を実現する事は不可能であり、鋼桁にとっては非合成で設計する方が安全側であっても、床版にとっては危険側となる。合成挙動を考慮して床版の設計をする際には、コンクリート打込み時など若材齢時に発生する引張応力や、連続桁橋の中間支点部に発生する引張応力、乾燥収縮や温度差により発生する引張応力を考慮して設計する必要がある。

1つの解決策として、若材齢時の引張応力に対して考えられる方法はコンクリート床版にプレキャスト製品を使用する事であり、コンクリートが完全に硬化するまで若材齢時に発生する悪い要因はすべて排除できる。プレキャストコンクリート床版と鋼桁を合成する手段として、無収縮モルタルを鋼桁に設置されたずれ止め箇所と鋼桁上フランジ上面に充填する手法を採用した。この工法により、鋼桁との合成する時期をコントロールする事が可能となった。

合成挙動を考慮して設計するため活荷重、後死荷重の主桁作用に対してはプレストレスを導入したが、鋼桁の拘束を排除するため、プレストレス導入は合成する前に実施する事で効率的なプレストレスの導入が実現した。プレキャスト床版を採用する事は有効な解決策である事はわかったが、輸送の問題やコストの問題により採用が困難な場合もある。2つめの対策としては、場所打ちコンクリート床版について補強鉄筋によるひび割れ幅制御の設計による対策を提案した。若材齢時の鋼桁の拘束力

の中の温度応力の算出については、第 3 章で提案した手法により解析結果を反映している。補強鉄筋によるひび割れ幅制御の設計とは、若材齢時の応力とその他主桁系応力に対してコンクリート床版の引張応力が引張強度を超えた場合、床版コンクリートに発生する引張力に対して、鉄筋で抵抗させる設計法である。設計照査は鉄筋応力を許容値とせず、鉄筋の歪みから計算されるコンクリート床版表面のひび割れ幅を制限値以内に収める方法である。

第 7 章は、本論文の結論であり、各章における結論を総括するとともに、現状の課題と今後の展望の中で鋼桁の拘束を起因とする若材齢時のひび割れは、床版厚の大きくない、多主桁でも発生する可能性が大きく、少主桁の設計と同様に配慮すべきと啓蒙している。

論文審査結果の要旨

社会インフラの老朽化は大きな社会的問題である、本論文は道路橋コンクリート床版の損傷に対して、その大きな要因である鋼桁拘束下におけるコンクリート床版の若材齢時の挙動について実験的および解析的検討を実施し、ひび割れ制御のための設計および施工方法の提案を行ったものである。

論文は全7章で構成されている。

第1章は、総論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、既往の研究について整理をするとともに、本論文で対象とする鋼桁拘束下のコンクリート床版の課題を抽出して、本研究の意義・目的について述べている。

第3章では、鋼桁拘束下における若材齢時のコンクリート床版の挙動に対して、マスコンクリートの温度ひび割れ対策で使う非線形温度応力解析を用いて実験結果を検証している。また実物大施工実験で発生したひび割れについて計測結果を分析し、要因を明らかにして解析方法についても考察している。これら若材齢時のコンクリート床版の挙動における応力の数値的な評価は初めて得られた知見である。

第4章では、コンクリート打込み直後から、経時的に外気温、床版内部の温度などを計測・分析して第3章で提案した解析手法の適用範囲を拡大させている、さらに提案した解析手法で環境条件を変えたシミュレーション解析を実施し、床版内の温度下降勾配の管理の重要性を指摘した。ひび割れ制御に対し、これらは新しい知見である。

第5章では、若材齢時のコンクリート床版の挙動に対して養生方法に着目し、温度、湿度、さらに風速や輻射熱の影響を実験的、解析的に検討し、効果的な養生方法を提案した。また養生を開始するタイミングについても解析的に検討し、若材齢時のひび割れ発生を防止する上で極めて効果的な方法を提案した。

第6章では、鋼桁の拘束を起因とするひび割れに対する解決策として、プレキャストコンクリート床版の採用を提案するとともに、場所打ちコンクリート床版についても設計上有用な対策を提案している。

第7章は総括であり、各章の成果をまとめている。

以上要するに本論文は、道路橋コンクリート床版の若材齢時における挙動について実験的、解析的に検討し、耐久性劣化の原因となるひび割れ発生の対策を提案したものであり、土木工学およびコンクリート工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。