

外部拘束された無鉄筋コンクリート床版の数値解析的研究

NUMERICAL STUDY ON STEEL-FREE CONCRETE SLABS EXTERNALLY RESTRAINED

構造及びコンクリート工学分野 植村 亮太
Structural and Concrete Engineering Ryota UEMURA

土木構造物の経年劣化対策としてカナダで採用されている外部拘束された無鉄筋コンクリート床版に着目した。本構造は床版下面に帯鋼板を設置することにより荷重載荷時に床版内に圧縮力を生じ荷重に抵抗する。本構造に関する研究は少なく国内の道路橋への適用性も不明であるため汎用解析ソフトを用いて数値解析を行った。その結果、帯鋼板の断面積や配置間隔が床版の挙動に寄与し、終局状態は押抜きせん断破壊であることを明らかにした。また、終局に至るまでに帯鋼板が降伏するモデルが床版に対する拘束効果を有効に使用できることを示した。

The focus of this study is Steel-Free concrete slabs externally restrained adopted as a countermeasure for aging degradation of the structure in Canada. This structure resists load by producing axial compression in slabs. There are few studies on this structure, and the applicability to a domestic land bridge is unclear. In this study, these were examined by numerical analysis. As a result, it was revealed that the area and interval of steel strap influence on the behavior of concrete slabs. And it was found that the steel strap yield by the ultimate is high effectiveness of restriction to concrete slabs.

1. 序論

昨今、供用後 50 年を超えた土木構造物に対する経年劣化対策に加えて構造物の維持管理負担軽減が喫緊の課題である。その解決策として北米を中心に開発および実用化された外部拘束された無鉄筋コンクリート床版に着目した。本構造は図-1.1 に示すようにスタッドにより主桁と合成された床版の下面に帯鋼板と呼ばれる外部拘束材を離散的に設置することにより床版の水平方向変位を拘束し、面外荷重が作用した際に荷重点と拘束点を結ぶように圧縮力（アーチ機構）を生じ荷重に抵抗する力学的な機構である。本構造では床版内に鉄筋を配置しなくても死荷重や活荷重に耐えることが可能である。カナダでは 1995 年に世界で初めて本技術を取り入れた橋梁である Salmon River Bridge²⁾が建設され、2000 年には道路橋設計規準 Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC) 内に本技術が掲載された³⁾。また、アメリカにおいても American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) に CHBDC を参考にした設計基準が導入された⁴⁾。本構造は従来 RC 床版に比して供用後のメンテナンスを削減できることに加えて建設費を減少できる可能性があるとも報告されている²⁾。今後、この技術の有効性が確認され国内への導入が可能となれば土木構造物の経年劣化対策や維持管理軽減に対す

る有用な手段になると期待される。

しかしながら、外部拘束された無鉄筋コンクリート床版が実際に建設された例はわずかに数橋にとどまっております⁵⁾、供用から数十年後の床版の挙動は明確になっていない。また、日本において本技術は確立されておらず、合成床版にアーチ機構を適用した研究もごくわずかとなっている⁶⁾。既往研究⁷⁾では実験供試体を対象に 3 次元数値解析を実施し、外部拘束された無鉄筋コンクリート床版の数値解析モデルの構築や力学的な挙動の解明が行われた。それを踏まえて、本研究では実橋梁を対象に汎用解析ソフトを使用して 3 次元数値解析を行う。そして、各種パラメータがコンクリート床版の挙動や耐荷力に与える影響について検討を行う。また、本構造が適切な挙動を生じるように設計を行う

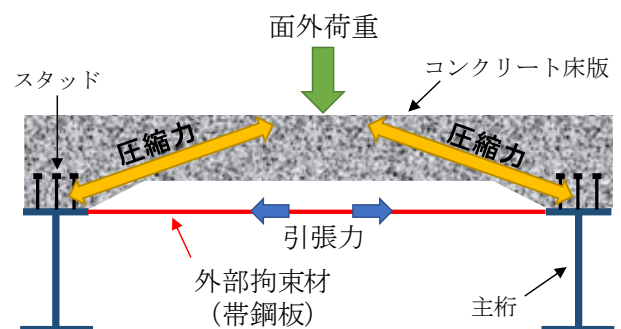


図-1.1 外部拘束された無鉄筋コンクリート床版

際に考慮すべき各種パラメータの値や傾向を提言することを目的とする。

2. 解析概要

2.1 解析モデル

対象構造物は床版厚 240mm、主桁間隔 2600mm の合成 2 主桁橋とした。また、床版内の鉄筋を省略し、主桁間に帯鋼板を設置した橋梁とした。帯鋼板の設置間隔は主桁間隔と同等の 2500mm とし、断面積は CHBDC に定められている帯鋼板の最小断面積を求める式により 1760mm² とした。帯鋼板の板厚は上フランジの板厚と同値の 16mm、板幅を 110mm とした。図-2.1 に橋梁の概要図を示す。解析モデルは対称性を考慮して 1/4 領域をモデル化した。また、上フランジより外側の床版張出部については面内圧縮力の発生に寄与しないためモデル化を行わなかった。図-2.2 に解析モデルを示す。使用要素はコンクリートがソリッド要素、主桁はシェル要素、帯鋼板と対傾構はトラス要素、スタッドは界面要素とした。境界条件は対称面に対称条件と、下フランジ端部の中央 1 節点に X 方向と Z 方向の並進を固定した。荷重は床版中央に道路橋示方書⁸⁾に規定されている T 荷重 1 輪相当の載荷板(上面:厚鋼板, 下面:ゴム板)を作成し、その上面節点を鉛直下向きに強制変位させることにより行った。各種自重は考慮しなかった。

2.2 材料値と材料構成則

コンクリートは一般的な強度である圧縮強度 24N/mm² とし材料構成則は圧縮側を Thorenfeldt, 引張側を Hordijk とした。また、圧縮側には Selby and Vecchio の拘束効果を導入した。鋼材は SM400 材を想定し、帯鋼板は降伏後応力を維持する完全弾塑性モデル、その他の部材は弾性体とした。スタッドは軸径 19mm、高さ 80mm とし、複合構造標準示方書⁹⁾に従ってずれ特性を定めた。表-2.1 に材料値を示す。

3. 帯鋼板の諸量をパラメータとした解析

3.1 帯鋼板の断面積をパラメータとした解析

(SA シリーズ)

帯鋼板 1 本あたりの断面積 $A_s(\text{mm}^2)$ をパラメータとして解析を行った。解析ケースを表-3.1 に示す。表中に示す軸剛性比とは単位幅当たりの帯鋼板の橋軸直角方向の軸剛性を単位幅当たりのコンクリートの橋軸直角方向の軸剛性で除した値である。基準モデルは帯鋼板断面積を CHBDC³⁾により定めた最小断面積 1760mm² であるモデルとし、帯鋼板断面積を 5 倍から 0.5 倍まで変化させた。また、帯鋼板を設置していないモデルについても検討を行った。解析モデルの呼称は“SA_

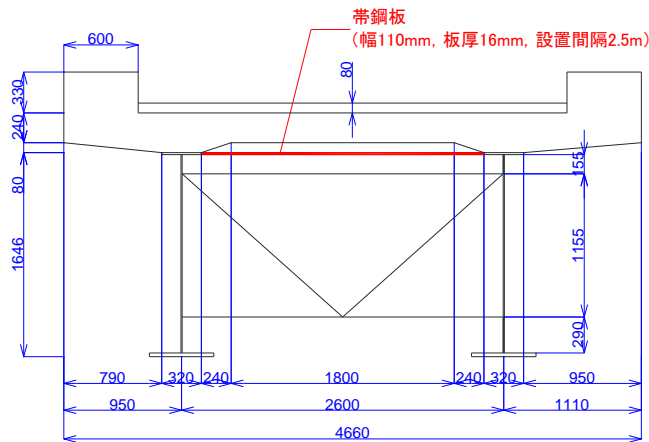
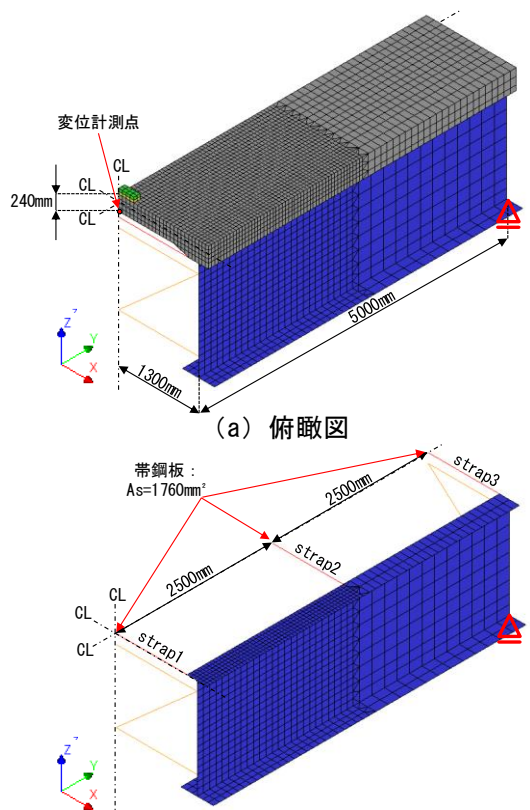


図-2.1 対象構造物 [mm]



(b) コンクリート床版を取り除いた俯瞰図

図-2.2 解析モデル

表-2.1 材料値

	コンクリート	鋼材	ゴム
弾性係数 [N/mm ²]	25000	200000	1.5
圧縮係数 [N/mm ²]	24	-	-
引張強度 [N/mm ²]	1.91	-	-
降伏強度 [N/mm ²]	-	235	-
引張側破壊エネルギー [N/mm]	0.08	-	-
ポアソン比 [-]	0.2	0.3	0.49

表-3.1 解析ケース (SA シリーズ)

モデル名	1本あたりの帯鋼板断面積 $A_s[\text{mm}^2]$	帯鋼板間隔 $S_s[\text{mm}]$	軸剛性比 $E_s A_s / E_c A_c [-]$	備考
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
SA.5	8800	2500	0.117	
SA.3	5280	2500	0.070	
SA.2	3520	2500	0.047	
SA.1.5	2640	2500	0.035	
SA.1	1760	2500	0.023	CHBDCで規定されている帯鋼板の最小断面積(基準モデル)
SA.0.5	880	2500	0.012	
SA.0	0	2500	0.000	帯鋼板の無い無鉄筋コンクリート床版

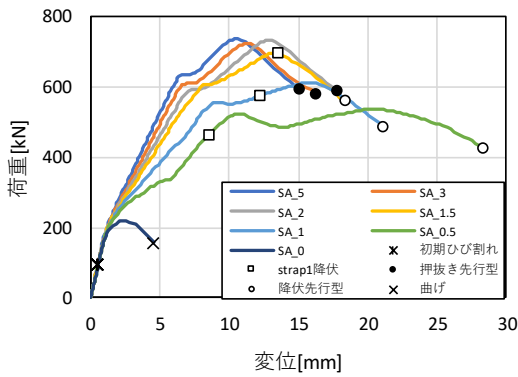


図-3.1 荷重-変位関係 (SA シリーズ)

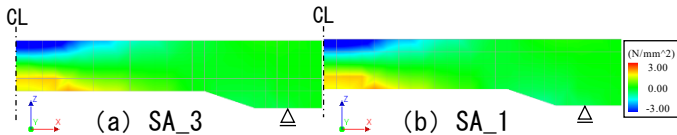


図-3.2 150kN 時の橋軸方向中央断面の X 方向直応力コンター図

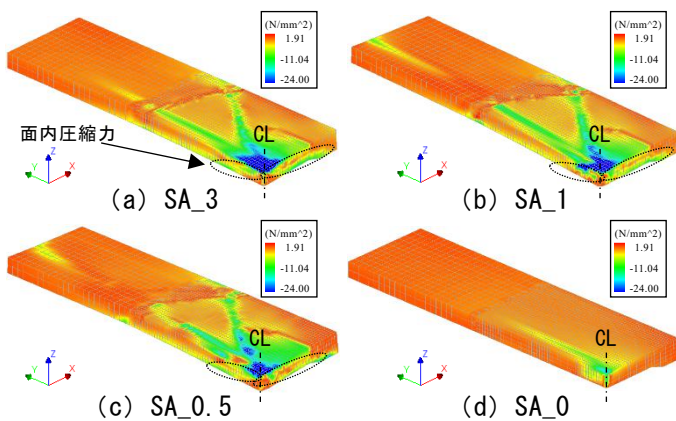
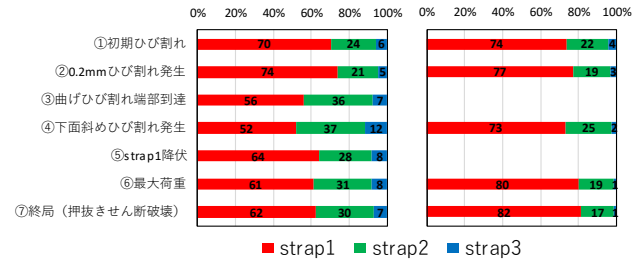


図-3.3 最大荷重時の最小主応力コンター図

(基準帯鋼板断面積に対する割合)”である。解析により得られた荷重-変位関係を図-3.1 示す。この図より帯鋼板の有無や帯鋼板断面積の大小によらず初期挙動は一定であることが確認できる。これは、図-3.2 の荷重 150kN 時の X 方向直応力コンター図に示すように、初期挙動時は上側圧縮、下側引張の床版の板曲げによるのみ荷重に抵抗しているためである。その後、帯鋼板断面積の大きいモデル程、剛性を保ちつつ荷重は上昇した。図-3.3 に最大荷重時の最小主応力コンター図を示す。帯鋼板を設置したモデルでは橋軸方向と橋軸直角方向共に面内圧縮力が確認された。対して、帯鋼板を設置していない SA_0 では面内圧縮力は確認されなかった。終局は帯鋼板を設置しているモデルは全て押抜きせん断破壊であり、SA_0 のみ曲げ破壊であった。載荷点直下の帯鋼板 (strap1) に着目すると未降伏のケースと降伏したケースが確認された。以後、前者を“押抜き先行型”、後者を“降伏先行型”と呼称し両モデルの比較を行う。まず、各イベント時の帯鋼板の全軸力に対する各帯鋼板の軸力割合を図-3.4 に示



(a) 降伏先行型 (SA_1) (b) 押抜き先行 (SA_3)
図-3.4 各イベント時の帯鋼板の全軸力に対する各帯鋼板の軸力割合

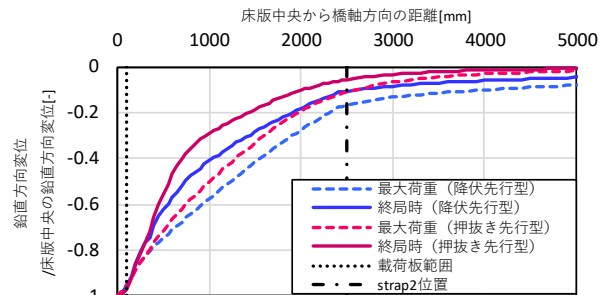


図-3.5 床版中央たわみに対する橋軸方向の相対たわみ分布

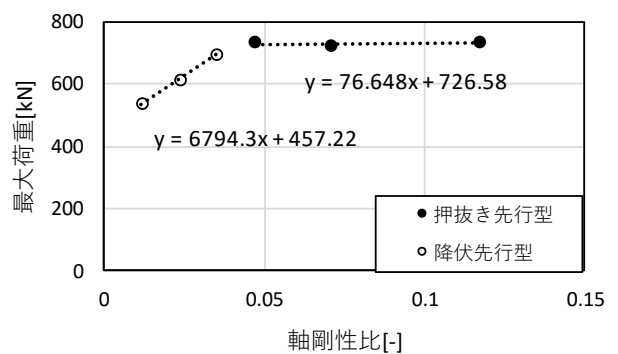
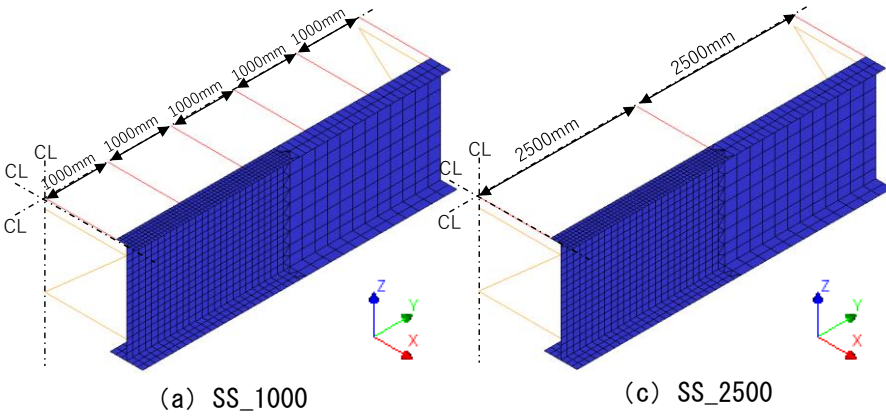


図-3.6 最大荷重-軸剛性比関係

す。ここではモデル例として押抜き先行型を SA_3、降伏先行型を SA_1 とした。初期挙動時はどちらも strap1 は 7 割、strap2 は 2 割程度の軸力を分担しているが最大荷重時、並びに終局時では降伏先行型は strap1 が 6 割、strap2 が 3 割程度軸力を分担しているのに対し、押抜き先行型は strap1 に 8 割以上の軸力が集中していることが確認できる。また、図-3.5 に示した最大荷重時と終局時の床版中央たわみに対する橋軸方向の相対たわみ (以後、相対たわみと呼称) 分布からは、押抜き先行型は載荷板付近に変形が局所化しているのに対し、降伏先行型は床版全体に渡り変形が生じていることが確認できる。以上のことから、降伏先行型の方が押抜き先行型に比べて床版全体で荷重に抵抗しており、帯鋼板による外部拘束効果を有効に使用できていると考察できる。次に最大荷重についての比較を行う。図-3.6 に最大荷重と軸剛性の関係を示す。降伏先行型は軸剛性比が増加するにつれて最大荷重も増加しているのに対し、押抜き先行型は軸剛性比によらず最大荷重は一定である。最大荷重の増加割合を比較するとおよ



(a) SS_1000 (c) SS_2500

図-3.7 解析モデル例 (SS シリーズ)

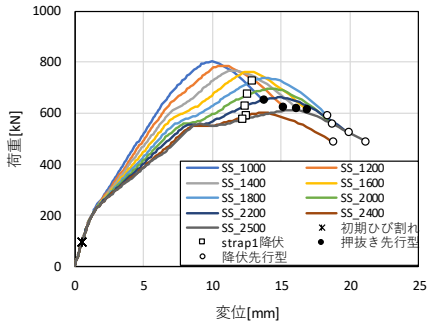


図-3.8 荷重-変位関係 (SS シリーズ)

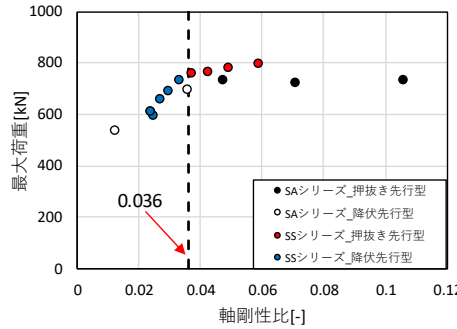


図-3.9 最大荷重-軸剛性比関係

表-3.2 解析ケース (SS シリーズ)

モデル名	1本あたりの帯鋼板断面積	帯鋼板間隔	軸剛性比	備考
[-]	As[mm ²]	Ss[mm]	EsAs / EcAc[-]	[-]
SS_1000	1760	1000	0.059	
SS_1200	1760	1200	0.049	
SS_1400	1760	1400	0.042	
SS_1600	1760	1600	0.037	
SS_1800	1760	1800	0.033	
SS_2000	1760	2000	0.029	
SS_2200	1760	2200	0.027	
SS_2400	1760	2400	0.024	
SS_2500	1760	2500	0.023	基準モデル

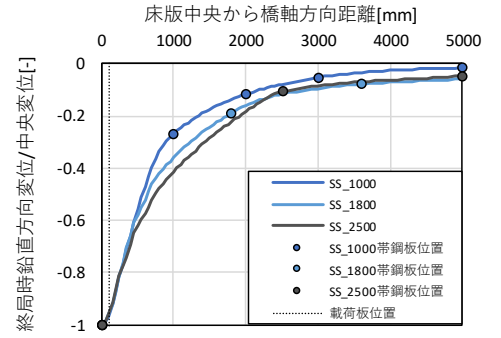


図-3.10 終局時の床版中央たわみに対する橋軸方向の相対たわみ分布

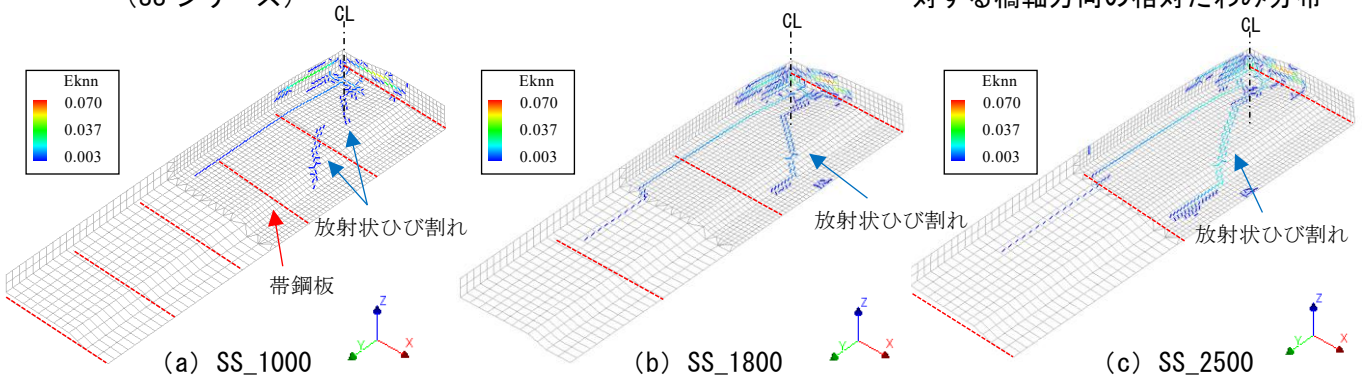


図-3.11 終局時の床版下面のひび割れ性状

そ 89 倍の差異があり、降伏先行型の方が帯鋼板断面積を増加させることによる最大荷重上昇の効果は大きい結果となった。以上の帯鋼板軸力の負担割合と床版のたわみ性状、そして最大荷重の観点から外部拘束された無鉄筋コンクリート床版の設計では終局状態を降伏先行型とすることが推奨される。

3.2 帯鋼板の設置間隔をパラメータとした解析 (SS シリーズ)

帯鋼板の設置間隔 Ss(mm)をパラメータとして解析を行った。図-3.7に解析モデル例、表-3.2に解析ケースを示す。基準モデルは帯鋼板間隔を 2500mm とし、帯鋼板間隔を 1000mm まで変化させた。解析モデルの呼称は“SS_ (帯鋼板間隔)”である。図-3.8に荷重-変位関係を示す。この図からは SA シリーズと同様に初期挙動はモデル間に差異は無いが 2 次勾配以降は

軸剛性比が高い値である帯鋼板間隔が狭いモデル程剛性を保ちつつ荷重が上昇している。破壊形式は全て押抜きせん断破壊であり、終局状態は SS_1000 から SS_1600 は押抜き先行型、SS_1800 から SS_2500 は strap1 が降伏する降伏先行型であった。図-3.9に最大荷重と軸剛性比の関係を示す。比較のために SA シリーズの結果も併せて示す。SA シリーズと結果とは異なるものの、軸剛性比が増加するにつれて降伏先行型の最大荷重は増加し、押抜き先行型の最大荷重の増加割合は小さいことが確認できる。また、SA と SS シリーズから降伏先行型と押抜き先行型の閾値は軸剛性比 0.036 付近に存在することが明らかになり、設計ではこの値を下回るようにコンクリート床版と帯鋼板の断面を設計する必要があると考えられる。図-3.10に終局時の相対たわみ分布を示す。軸剛性比が高く押抜き先行型である SS_1000 のたわみ分布が載荷板付近に局所

表-3.3 解析ケース (SSA シリーズ)

モデル名	1本あたりの帯鋼板断面積	帯鋼板間隔	軸剛性比	備考
[-]	As[mm ²]	Ss[mm]	EsAs / EcAc[-]	[-]
SSA_1000	704	1000	0.023	
SSA_1200	845	1200	0.023	
SSA_1400	986	1400	0.023	
SSA_1600	1127	1600	0.023	
SSA_1800	1267	1800	0.023	
SSA_2000	1408	2000	0.023	
SSA_2200	1549	2200	0.023	
SSA_2400	1690	2400	0.023	
SSA_2500	1760	2500	0.023	基準モデル

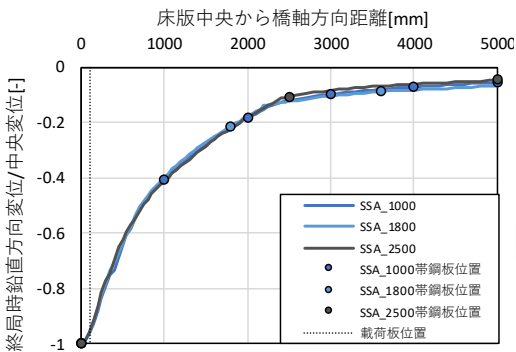


図-3.13 終局時の床版中央たわみに対する橋軸方向の相対たわみ分布

化していることが確認された。対して軸剛性比が低く降伏先行型である SS_2500 のたわみ分布では、床版全体で変形していることが確認され、これらは SA シリーズと同傾向であることが確認された。帯鋼板位置でのたわみ性状を確認すると全てのモデルで strap2 より載荷板側の床版でたわみが急増していることが確認できる。図-3.11 に終局時の床版下面のひび割れ性状を示す。載荷板直下から放射状に伸びる斜めひび割れに着目すると床版中心から 2500mm 以内に存在する帯鋼板の定着部に進展していた。よって、2500mm 以内の帯鋼板の設置位置により床版の変形が生じる範囲が決定され、終局時までには発生するひび割れの進展に影響を及ぼすと考えられる。

3.3 帯鋼板の断面積と設置間隔をパラメータとした解析 (SSA シリーズ)

帯鋼板の断面積と設置間隔をパラメータとして解析を行った。全てのモデルの軸剛性比を基準モデル (As=1760mm², Ss=2500mm) の軸剛性比である 0.023 となるように定めた。表-3.3 に解析ケースを示す。解析モデルの呼称は“SSA_ (帯鋼板間隔)”である。図-3.12 に荷重-変位関係を示す。全てのモデルで SA シリーズや SS シリーズと同様に初期挙動に差異が認められなかった。また、SSA シリーズの 2 次勾配は他シリーズと比べて各モデル間の差異が小さいことが確認された。最大荷重は基準モデルに対して最大 2 割程度の差異にとどまった。加えて、全てのモデルの終局状

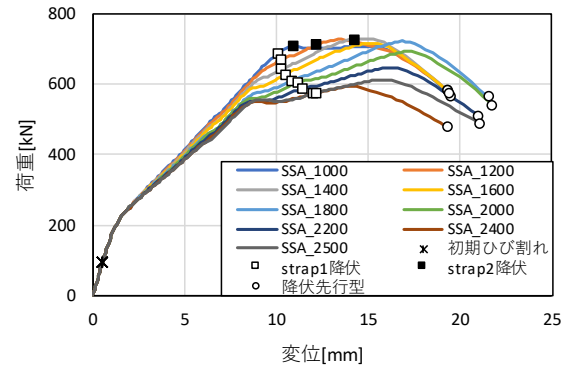


図-3.12 荷重-変位関係 (SSA シリーズ)

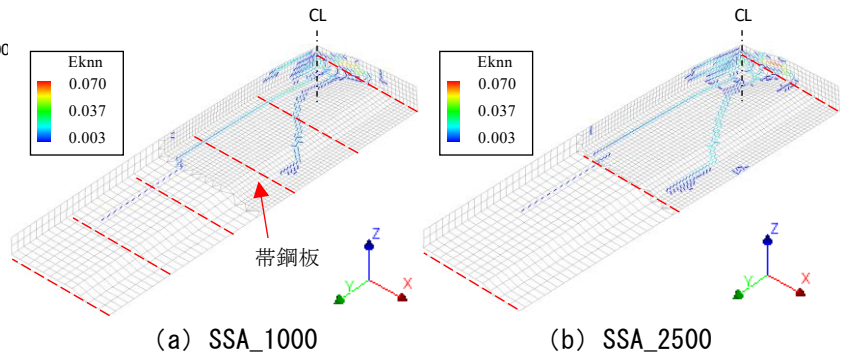


図-3.14 終局時の床版下面のひび割れ性状

態は降伏先行型となった。図-3.13 に終局時の相対たわみ分布を示す。この図から各モデル間の差異は認められず、同様のたわみ性状であったことが確認された。図-3.14 に終局時の床版下面のひび割れ性状を示す。床版下面に発生した放射状ひび割れの進展方向に差異はあるものの、ひび割れの進展範囲はモデルによらず同様の傾向であることが確認できる。以上の結果より、軸剛性比が一定であれば帯鋼板の断面積や設置間隔が変化しても床版の挙動に顕著な差異は無いことが明らかになった。

4. 外部拘束された無鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力算定

3 章で示したように外部拘束された無鉄筋コンクリート床版は全て押抜きせん断破壊であった。本章では式(4.1)に示されるコンクリート標準示方書¹⁰⁾の押抜きせん断耐力算定式をベースに耐力算定を行う。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d \quad (4.1)$$

ここに、

$$f_{pcd} = 0.20\sqrt{f'_c} \quad \text{ただし、} f_{pcd} \leq 1.2\text{N/mm}^2$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1000/d} \quad \text{ただし、} \beta_d > 1.5 \text{ となる場合は } \beta_d = 1.5$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p} \quad \text{ただし、} \beta_p > 1.5 \text{ となる場合は } \beta_p = 1.5$$

$$\beta_r = 1 + \frac{1}{1+0.25u/d}$$

f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

u : 載荷面の周長(mm)

u_p : 載荷面から d/2 だけ離れた設計断面の周長(mm)

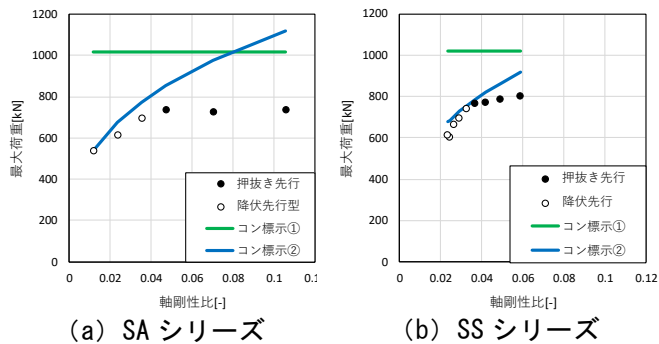


図-4.1 解析値と算定値の比較

d , p : 鉄筋の有効高さとして鉄筋比で、2方向の鉄筋に対する平均値とする。(d : mm)

である。

式(4.1)の算定式は RC 床版を対象としているため鉄筋に関するパラメータである鉄筋の有効高さ d 、鉄筋比 p とそれに伴う鉄筋のダウエル作用に関する係数 β_p が存在する。本研究の対象構造物は無鉄筋床版であるためこれらを別値で置換した。まず、鉄筋の有効高さ d (mm) は床版厚 t (mm) とした。そして、係数 β_p は算定値に影響を及ぼさないように $\beta_p = 1$ 、つまり $p=0.01$ とした。この算定結果をコン標示①と呼称する。また、鉄筋比 p の値を橋軸直角方向の帯鋼板とコンクリート断面の比とした算定結果をコン標示②と呼称する。図-4.1 に算定結果と解析結果を示す。コン標示①の算定法では帯鋼板に関する諸量の考慮がなく、軸剛性比によらず算定値が一定であったため解析値に比べて 5 割程度大きな値となった。コン標示②の算定結果は降伏先行型の解析結果に対して概ね 1 割程度の差であり良好な算定であった。つまり、床版に軸方向拘束力が作用した際の押抜きせん断耐力の表現が可能であった。

5. 結論

本研究では床版厚 240mm、主桁間隔 2600mm の合成 2 主桁橋を対象に数値解析を実施した。得られた知見を以下に示す。

帯鋼板の諸量をパラメータとした解析により

- ✓ 外部拘束された無鉄筋コンクリート床版の初期挙動は帯鋼板の諸量によらず一定挙動を示す。最大荷重時には外部拘束により床版内に面内圧縮が形成されている。
- ✓ 曲げ破壊を生じる無鉄筋コンクリート床版に外部拘束を施すと破壊形式は押抜きせん断破壊となる。
- ✓ 終局に至るまでに帯鋼板が降伏するモデル（降伏先行型）と未降伏であるモデル（押抜き先行型）が確認された。この両者の閾値は軸剛性比で 0.036 付近に存在すると考えられる。
- ✓ 帯鋼板軸力の負担割合と床版のたわみ性状、そし

て最大荷重の観点から無鉄筋コンクリート床版の設計では終局状態を降伏先行型とすることが推奨される。

- ✓ 軸剛性比が一定であれば帯鋼板の断面積や設置間隔を変化させても挙動に大きな差異は生じないことが明らかになった。

押抜きせん断耐力の算定検討より

- ✓ コンクリート標準示方書に示されている押抜きせん断耐力算定式の内、鉄筋の有効高さを床版厚、鉄筋比を帯鋼板とコンクリートの断面積の比と置換することにより解析値に対して 1 割程度の差異で算定が可能である。

今後の課題を以下に列記する。

- ✓ 本研究では荷重の載荷位置を曲げモーメントの影響を最も受ける桁間中央とした。今後は荷重の載荷位置を橋軸直角方向に移動させ、曲げに加えてせん断の影響も受けやすい位置での検討も必要である。
- ✓ 本研究では主に床版部の挙動を対象としたため、主桁は弾性体としての影響のみを考慮した。今後は主桁の挙動も含めた評価が必要である。
- ✓ 床版模型による静的載荷試験を行うことにより、床版の実挙動を確認するとともに、解析値や算定値と比較検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) Mufti, A.A., Jaeger, L., Bakht, B. and Wegner, L.D. : Experimental investigation of fiber-reinforced concrete deck slabs without internal steel reinforcement, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.20, pp.398-406, 1993
- 2) John P., Newhook, A.A.Mufti : A Reinforcing Steel-Free Concrete Deck Slab for the Salmon River Bridge, Concrete International, pp.30-34, 1996.6
- 3) Bakht, B., Al-Bazi, G., Banthia, N., Cheung, M., Erki, M.A., Faoro, M., Machida, A., Mufti, A.A., Neale, K.W. and Tadros, G. : Canadian Bridge Design Code Provisions for Fiber-Reinforced Structures, Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol.4, No.1, pp.3-15, 2000.2
- 4) American Concrete Institute : Report of Bridge Decks Free of Steel Reinforcement, ACI, 2004
- 5) Bakht, B. and Mufti, A.A. : Five Steel-Free Bridge Deck Slabs in Canada, Structural Engineering International 3/98, IABSE, pp.196-200, 1998
- 6) 秦裕彰, 松井繁之 : アーチ効果による合成床版の疲労耐久性向上度, 土木学会論文集, No.787, pp.71-80, 2005
- 7) 松本涼 : 帯鋼板により外部拘束されるコンクリート床版に関する数値解析的研究, 大阪市立大学修士論文, 2018
- 8) 日本道路協会 : 2012 年制定 道路橋示方書 [I 共通編] ・同解説, 2012
- 9) 土木学会 : 2014 年制定 複合構造標準示方書 [原則編 ・設計編], 2014
- 10) 土木学会 : 2012 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2012