

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

NUMERICAL STUDY ON CONCRETE SLABS EXTERNALLY RESTRAINED BY STEEL STRAPS

構造及びコンクリート工学分野 松本涼
Structural and Concrete Engineering Ryo MATSUMOTO

コンクリート床版に対する劣化現象として鉄筋腐食が挙げられる。その解決手段としてカナダで圧縮膜機構(Compressive Membrane Action)の原理により配筋を省略する方法が提案された。しかし、供用後の明確な挙動は明らかになっていない。そこで、帯鋼板により外部拘束されるコンクリート床版を対象に3次元数値解析手法を検証し、床版の応力性状を調べた。また、帯鋼板の諸量を変数としたパラメトリックスタディを行い、外部拘束が床版の特性に及ぼす影響について考察した。

Corrosion of steel re-bars in reinforced concrete deck slabs is known as a serious deterioration. In Canada, the slabs without reinforcement has been proposed based upon a load carrying mechanism due to Compressive Membrane Action: CMA by external restriction. However, the behaviors after service have not been clarified. In this study, three dimension analytical method was examined for the concrete slabs externally confined by steel straps and the stress properties of the slabs were investigated. The influence of external restraint on the properties of the slabs was examined with parametric study.

1. 序論

コンクリート床版の劣化現象として融雪剤や飛来塩分によるコンクリート床版の塩害が挙げられる。その解決手段としてカナダにおいて、圧縮膜機構(Compressive Membrane Action, CMA)の原理を利用する新たな提案がなされた¹⁾。CMAとは、**図-1**に示すように水平方向に拘束された状態の部材に鉛直方向の荷重が作用すると、荷重作用位置と水平方向への拘束を与えた支点位置との間において、斜め方向に圧縮力(圧縮膜)が生じて荷重に抵抗するという機構のことである。この原理を利用することで、床版内に鉄筋を配置しなくても、床版自重や自動車荷重に耐えることが可能となる。実際の道路橋では、**図-2**に示すように上フランジに鋼製帯板を溶接することで外部拘束を与えている。1995年にカナダで世界初のCMAを利用した道路橋であるSalmon River Bridge²⁾が建設され、2000年に制定されたカナダにおける道路橋設計基準Canadian Highway Bridge Code (CHBDC)において本技術が盛り込まれた³⁾。しかし、供用開始後に床版下面にひび割れが確認され、美観上好ましくないことから床版底面付近にGFRP(ガラス繊維強化プラスチック)ロッドやCFRP(炭素繊維強化プラスチック)ロッドを配置して、ひび割れ制御をすることが望ましいと考えられ、

CHBDCの2006年の改定でひび割れ制御の規定が追加された。今後CMAを利用した道路橋の有効性が確認されていけば、構造物の長寿命化に資する有用な手段になると考えられる。

しかし、海外において道路橋設計基準にCMAの規定が盛り込まれたが、実例の数が少なく、供用後の明確な挙動は明らかになっていない。また、日本においても研究が進められているが、ひび割れ制御の問題などがあり実施工に至っていない。そのため、日本での適用を考える場合、外部拘束されたコンクリート床版の挙動を確認する必要がある。そこで、帯鋼板により外

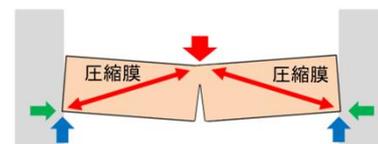


図-1 CMAの原理

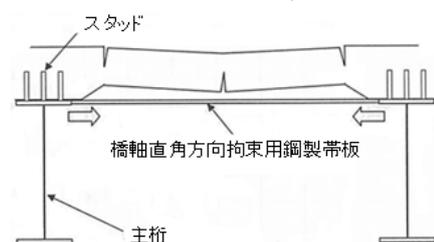


図-2 CMAの合成桁橋への適用方法

部拘束されるコンクリート床版を対象に、3次元数値解析手法の検証し、床版の応力性状を調べる。また、帯鋼板の諸量を変数としたパラメトリックスタディを行い、外部拘束が床版の特性に及ぼす影響について考察する。

2. 既往実験床版の数値解析

2.1 対象とする実験の概要

図-3に示すような、既往の実験⁴⁾で用いられた供試体を対象に数値解析を行う。供試体は2主桁の道路橋の模型で、カナダでの施工例⁴⁾の約1/2縮尺である。床版には圧縮強度 46.1N/mm^2 の繊維補強コンクリートを使用している。床版厚は100mm、主桁間隔は1067mmで、主桁に対して垂直に、断面積が 640mm^2 の帯鋼板が457mmの間隔で配置されている。また、主桁と床版は頭付きスタッドにより接合されている。荷重は輪荷重を想定し、橋軸直角方向に幅257mm、橋軸方向に奥行き127mmの矩形で、床版中央にて静的に与えている。既往の実験では荷重418kNにて押し抜きせん断破壊により終局に至った。

2.2 解析概要

汎用構造解析システム DIANA 10.1⁵⁾を用いて数値解析を行う。数値解析モデルを図-4に示す。解析モデルは構造の対称性を考慮した1/4モデルである。コンクリート床版および載荷板はソリッド要素、主桁は局面シェル要素、帯鋼板およびチャンネル材はトラス要素を用いた。また、床版と主桁の接合について、界面にずれ特性を入力することによりスタッドの考慮を行う。スタッドは軸径19mm、高さ80mmとし、複合構造標準示方書⁶⁾に従ってずれ特性を与える。載荷は、床版中央にて 0.1mm/step の強制変位を与えた。材料構成則について、コンクリートの圧縮挙動はThorenfeldtモデル、コンクリートの引張挙動はHordijkモデル、鋼材はSS400相当の降伏点を想定し、完全弾塑性モデルとした。なお、コンクリートの引張挙動について、繊維補強コンクリートの特性を考慮するために、破壊エネルギーは既往の研究⁷⁾より $G_F=2\text{N/mm}$ とした。さらに、コンクリートの圧縮挙動ではSelby and Vecchioの拘束効果⁸⁾を導入する。妥当性の検証を行うにあたり、実験にて観察された荷重変位関係と終局時の破壊形式に着目する。荷重変位関係について、変位は載荷点直下の床版下面の鉛直方向たわみとする。荷重変位関係では、最大荷重と初期剛性を比較する。終局時の破壊形式の検証方法について、荷重変位関係における最大荷重時を終局と定義し、最大荷重時のひび割れ分布により破壊形式を判断する。ひび割れ分布について、幅が0.1mm以上のひび割れを有意なひび割れとし、最大主

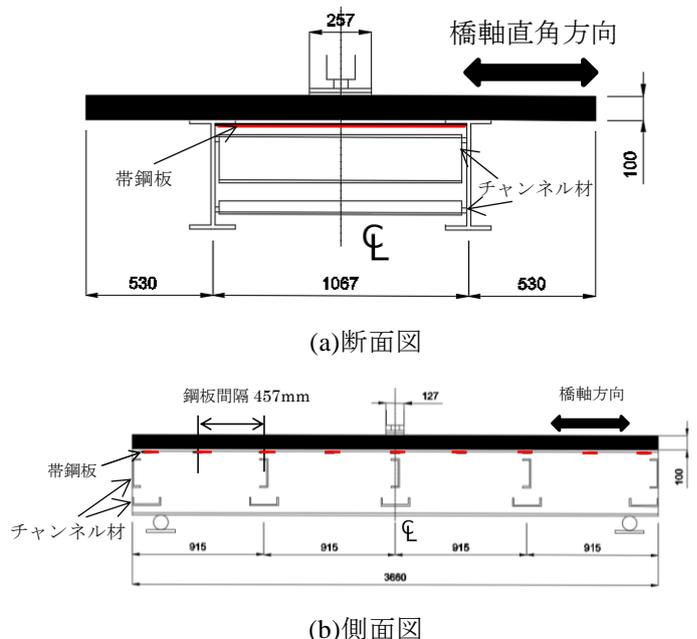


図-3 数値解析の対象

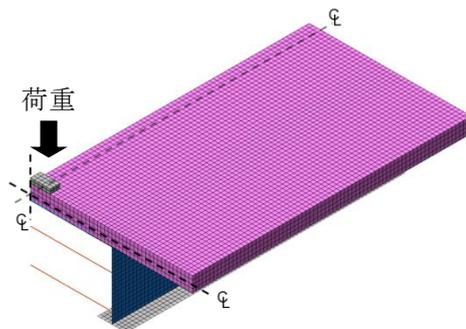


図-4 数値解析モデルの概形

応力方向のひび割れ幅コンター図を描画する。

2.3 数値解析手法の妥当性の考察

数値解析により得られた荷重変位関係を図-5に、終局時の最大主応力方向ひび割れ幅コンター図を図-6に示す。荷重変位関係について解析での終局荷重は361kNで、実験値の終局荷重418kNと比較するとやや小さく評価した。しかし、初期剛性は実験結果と概ね一致した。破壊形式について、床版の下面(図-6(a))では載荷点(図-6(a)左上)から十字にひび割れが発生し、載荷点断面(図-6(b))では載荷点から斜めひび割れが観察された。これは押し抜きせん断破壊で見られる典型的なひび割れパターンであるため、解析では押し抜きせん断破壊により破壊したと考えられる。つまり、破壊形式は実験結果と一致した。荷重変位関係と破壊形式の結果より、スタッドのずれとコンクリートの拘束効果を考慮することで、数値解析は実験結果を概ね良好に評価でき、数値解析の妥当性が検証できた。

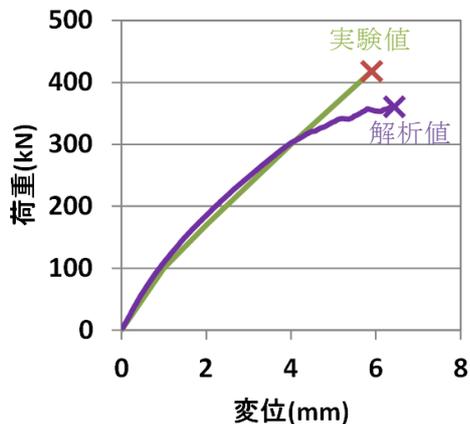


図-5 荷重変位関係

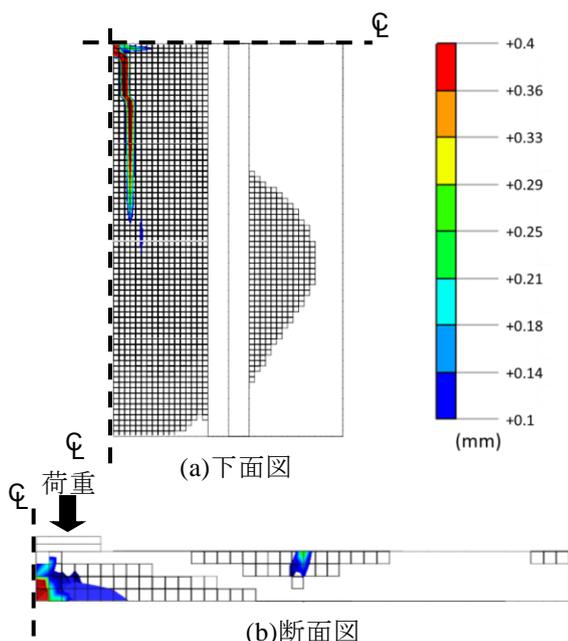


図-6 終局時の最大主応力方向ひび割れ幅コンター図

2.4 使用時でのひび割れ特性

使用時の性状を検証するために、まずは使用限界の基準を定める。本研究では、コンクリート標準示方書⁹⁾における外観に対する照査に従い、幅 0.3mm のひび割れが発生した時点で使用限界とする。次に、数値解析で得られた結果から、使用限界時の性状、つまりは幅 0.3mm 以上の単一のひび割れが発生した時点での性状を調べる。数値解析での使用限界での荷重は 180.3kN、変位は 1.9mm であり、数値解析での終局荷重と比較して 5 割程度となった。図-7 に下面における使用時の最大主応力方向ひび割れ幅コンター図を示す。0.3mm のひび割れが発生したのは、載荷点である床版中央の下面橋軸方向であった。

2.5 終局時の応力状態

2.3 節にて数値解析の妥当性が検証された解析モデルにおける、帯鋼板の引張力と床版内の応力状態を調べる。まず、帯鋼板の番号を図-8 のように定義し、図

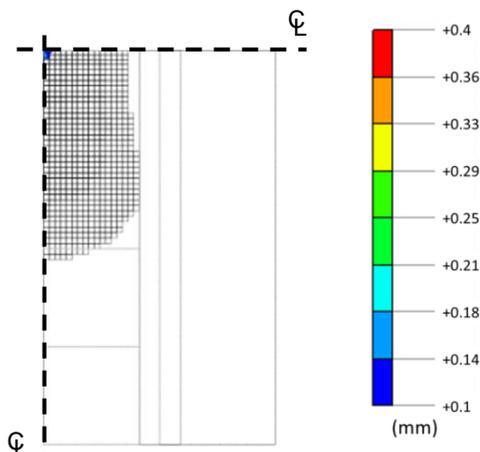


図-7 使用時の最大主応力方向ひび割れ幅コンター図

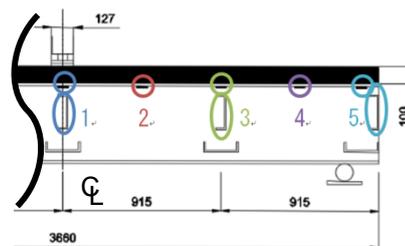


図-8 帯鋼板番号の定義

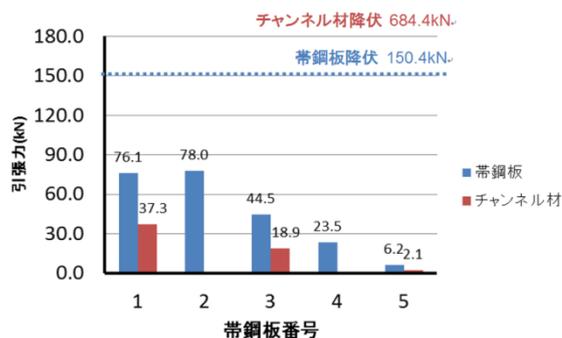


図-9 終局時の帯鋼板とチャンネル材の引張力

-9 に帯鋼板の引張力を示す。帯鋼板の引張力について、帯鋼板の引張力が最も大きくなった場所は、載荷点直下の帯鋼板に隣接する 2 番の帯鋼板であり、降伏軸力の半分程度の引張力となった。また、載荷点直下である、1 番の帯鋼板は 2 番と同等の引張力となった。3 番から 5 番の帯鋼板は、載荷点から遠くなるほど引張力が小さくなった。チャンネル材について、チャンネル材も載荷点に近いほど大きな引張力となったが、帯鋼板の 4 割程度の引張力となった。次に、応力性状について、図-10 に終局時の床版断面の最小主応力コンター図を示す。最小主応力コンター図を描画する断面は、図-10(a)に示すように、載荷点を含む橋軸直角方向の断面を 0 度断面とし、床版の中心を軸に 0、45、90 度の断面 3 種類と、帯鋼板番号 2、3 を含む橋軸直角方向の断面 2 種類の合計 5 種類の断面とする。0 度断面について、載荷点と支点を結ぶように圧縮領域が形成されていることが確認できる。特に、載荷点と支点近傍では圧縮応力が高く、載荷点付近では一軸圧縮強度

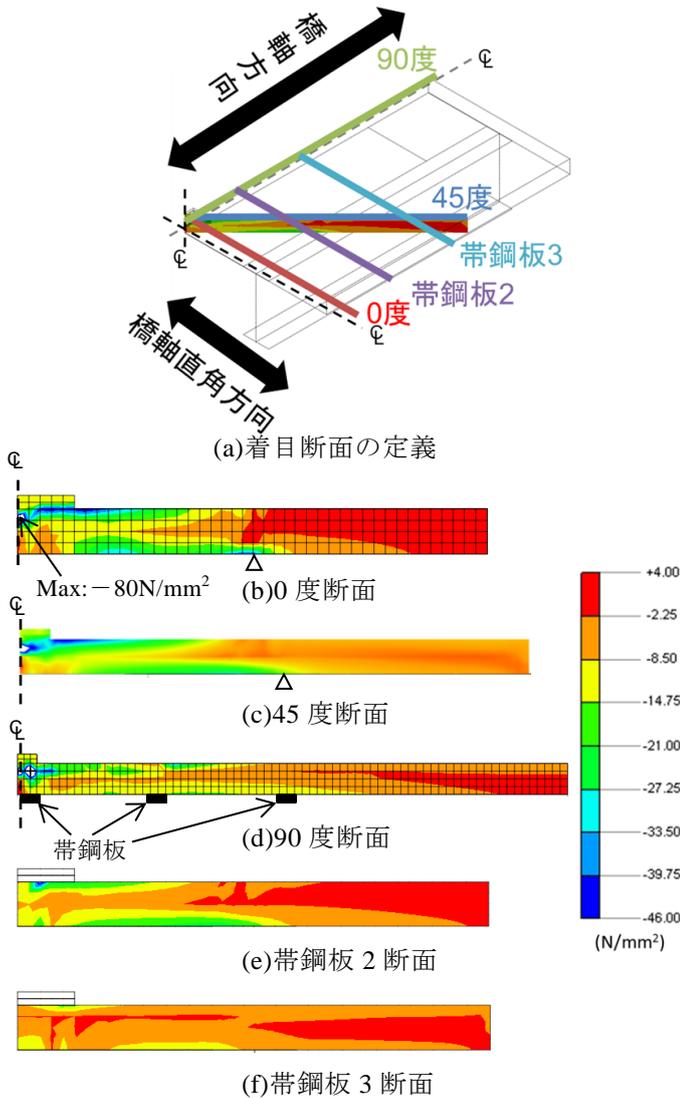


図-10 終局時の床版断面の最小主応力コンター図

を超える, 80.0N/mm^2 の圧縮応力が発生した. これは, 荷重点近傍の領域では, 圧縮膜機構が形成されることにより三軸圧縮状態となり, 数値解析における拘束効果の導入により, 圧縮強度が増加したためだと考えられる. 45度断面と帯鋼板2断面も同様に, 荷重点と支持辺を結ぶように圧縮領域が形成された. この結果から45度断面と帯鋼板2断面においても圧縮膜機構が形成されていると考えられる. 一方で, 帯鋼板3断面では荷重点近傍では圧縮応力が発生しているが, その他の領域では十分な圧縮応力が発生していないため, 圧縮膜が形成されていないと考えられる.

2.6 終局時の圧縮膜の形状

帯鋼板の引張力と床版内の圧縮応力分布をもとに, 圧縮膜の性状を考察する. 帯鋼板の引張力について, 圧縮膜の形成に有効な帯鋼板の引張力を 30kN 程度と仮定すると, 帯鋼板1~3の範囲において, 圧縮膜が形成されていると考えられる. 床版内の圧縮応力分布について, 圧縮膜の形成に有効な最小主応力を 15N/mm^2

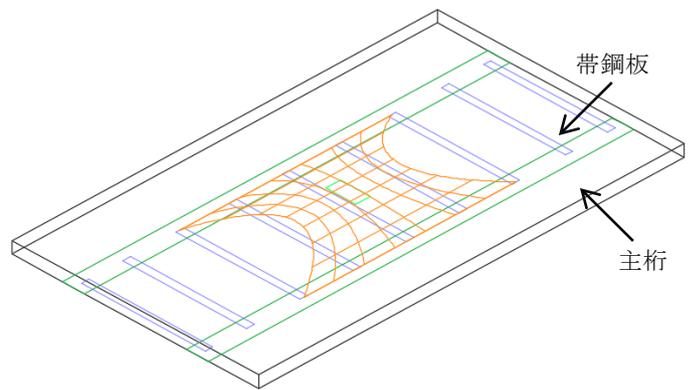


図-11 圧縮膜の形状

以上すると, 図-11に示す橙色の領域のような, 0度断面, 45度断面, 帯鋼板2断面の荷重点から支点にかけての領域と, 90度断面における帯鋼板1から帯鋼板2にかけての上面の領域に半ドーム状のように圧縮膜が形成されていると考えられる.

3. 帯鋼板の諸量を変数としたパラメトリックスタディ
2.3節にて数値解析の妥当性が検証された解析モデルをもとに, 帯鋼板の諸量を変数としてパラメトリックスタディを行う.

3.1 帯鋼板の断面積

1本あたりの帯鋼板の断面積 A_s を変数とし, パラメトリックスタディを行う. このとき, 帯鋼板の本数 n と配置間隔 S_s は変更しない. したがって, 帯鋼板の総断面積 ΣA_s と, 帯鋼板の断面積 A_s と帯鋼板の配置間隔 S_s の比率 A_s/S_s は従属的に変化する. 変数とする帯鋼板の断面積は, 基準となるモデルの4倍~1/16倍したモデルと, 帯鋼板のないモデルの計10種類とする. なお, 帯鋼板の断面積が1/5倍のモデルは, カナダの設計規準³⁾に規定される帯鋼板の最小断面積に相当する.

図-12に代表的なモデルの変位荷重関係と破壊形式を示す. 破壊形式について, 帯鋼板の断面積が1/2倍以上の場合は, 図-6に類似するような床版の押し抜きせん断破壊により終局に至り, 帯鋼板の断面積が1/3倍以下の場合は帯鋼板の降伏により終局に至った. つまり, カナダの設計規準の帯鋼板最小断面積では, 帯鋼板が降伏することにより終局に至る. 既往の研究¹⁰⁾では, 帯鋼板の降伏により, コンクリートの拘束力が減少し, 床版の押し抜きせん断破壊が発生すると考えられている. したがって数値解析においても帯鋼板の降伏により床版の押し抜きせん断破壊が発生したと考えられる. 一方で, 帯鋼板が降伏しない場合は, 荷重点近傍のコンクリートの圧壊により床版の押し抜きせん断破壊が発生すると考えられている. 帯鋼板を配置

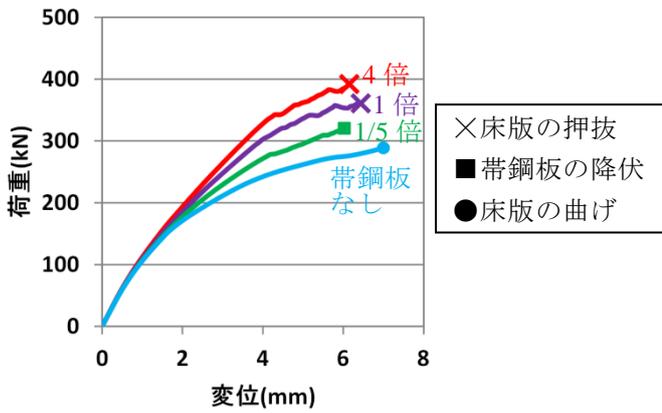


図-12 断面積を変数とした荷重変位関係

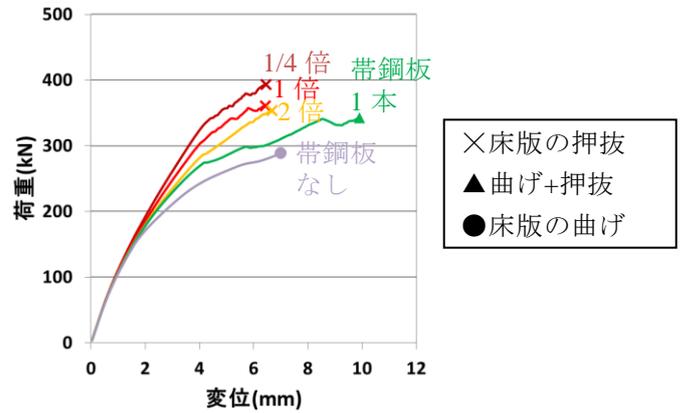


図-15 配置間隔を変数とした荷重変位関係

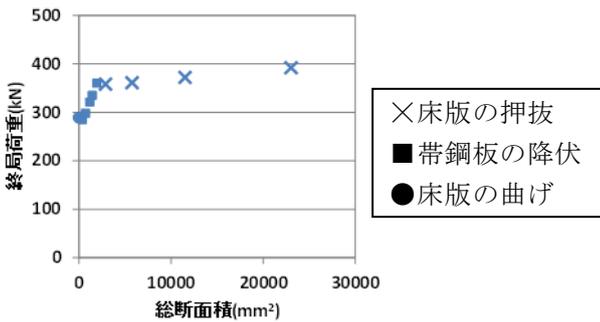


図-13 帯鋼板の総断面積と終局荷重の分布

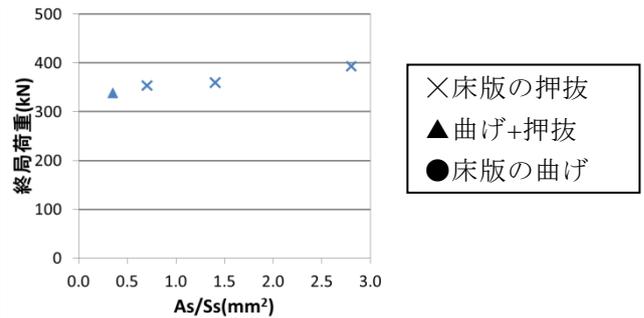


図-16 A_s/S_s と終局荷重の関係

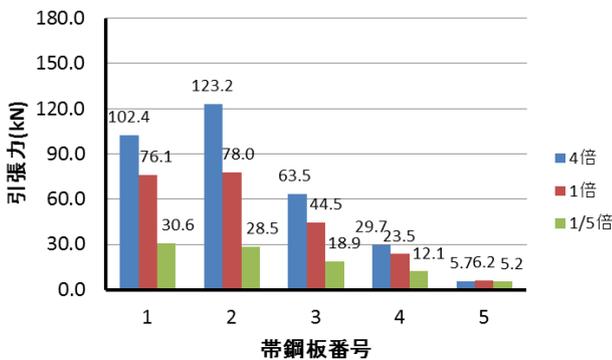


図-14 断面積を変数とした終局時の帯鋼板引張力

しない場合は床版の曲げ破壊により終局に至った。終局荷重と帯鋼板の総断面積の関係を図-13に示す。帯鋼板の総断面積が大きくなるにつれて終局荷重が大きくなる傾向が認められた。しかし床版の押し抜きせん断破壊を呈する場合は、帯鋼板の総断面積に関係なく同等の終局荷重となった。一方で帯鋼板の降伏を呈する場合は、帯鋼板の総断面積が増加するにつれて最大荷重が大きくなるという相関性が認められた。使用性について、2.4節と同様の基準で使用限界を検証すると、いずれのモデルも180kN程度で使用限界となった。つまり、帯鋼板の断面積は使用限界に影響しなかった。帯鋼板の引張力について、図-14に代表的なモ

デルの終局時の帯鋼板の引張力を示す。なお、帯鋼板の番号は図-8と同様とする。いずれのモデルも1番と2番の帯鋼板の引張力が大きくなり、床版の中心から離れるにつれて引張力は小さくなった。圧縮膜の形成に有効な帯鋼板の引張力を2.5節と同様に30kN程度と仮定すると、帯鋼板の面積が4倍のモデルは、4番の帯鋼板まで圧縮膜が広がる。一方で、帯鋼板の面積が1/5倍のモデルは、圧縮膜の形成が2番の帯鋼板までに留まった。つまり、帯鋼板の断面積が大きい場合は圧縮膜の形成範囲は大きくなり、帯鋼板の断面積が小さい場合は圧縮膜の形成範囲は小さくなった。

3.2 帯鋼板の配置間隔

帯鋼板の配置間隔を変更してパラメトリックスタディを行う。なお、帯鋼板1本あたりの断面積 A_s は定数とする。つまり、帯鋼板の配置間隔 S_s を変更することで、帯鋼板の本数 n 、帯鋼板の総断面積 ΣA_s 、帯鋼板1本あたりの断面積と配置間隔の比率 A_s/S_s が従属的に変化する。変数とする帯鋼板の配置間隔は1/2倍～4倍したモデルが4種類、帯鋼板のないモデル、帯鋼板を中央に1本のみ配置したモデルの計6種類とする。

図-15に代表的なモデルの変位荷重関係と破壊形式を示す。破壊形式について、帯鋼板の配置間隔が2倍以下のモデルは図-6に類似するような床版の押し抜きせん断破壊により終局に至り、帯鋼板の配置間隔が4倍以上のモデルは床版の押し抜きせん断破壊と曲げ破壊

の複合的な破壊形式となった。つまり、帯鋼板の配置本数が多く、帯鋼板の総断面積も大きい場合は床版の押し抜きせん断破壊により終局に至り、帯鋼板の配置本数が少なく、帯鋼板の総断面積も小さい場合は曲げ破壊の様相も呈した破壊形式となる。

次に、帯鋼板 1 本あたりの断面積と配置間隔の比率 A_s/S_s に着目する。終局荷重と A_s/S_s の関係を図-16 に示す。終局荷重について、破壊形式に関わらず A_s/S_s が増加するにつれて終局荷重が大きくなるといった相関性があると考えられる。破壊形式について、 A_s/S_s が小さい場合に曲げの様相も呈した破壊形式となると考えられる。

使用性について、使用限界時の荷重は 3.1 節と同様にいずれのモデルも 180kN 程度となったため、 A_s/S_s は使用限界時の荷重に影響しないと考えられる。

5. 結論

帯鋼板により外部拘束されたコンクリート床版を対象に、3 次元数値解析手法の検証し、床版の応力性状を調べた。また、帯鋼板の諸量を変数としたパラメトリックスタディを行い、外部拘束が床版の特性に及ぼす影響について考察した。本研究により得られた知見を以下に列記する。

既往実験に対する数値解析より

- 1) コンクリートの拘束効果を数値解析において考慮することにより、十分な精度で挙動を検証でき、妥当性が確認できた。
- 2) 帯鋼板により外部拘束を受ける場合は、載荷点と支持辺を結ぶ圧縮膜の形成が認められた。

パラメトリックスタディより

- (a) 帯鋼板 1 本あたりの断面積を変数とした場合
- 3) 帯鋼板の断面積が十分に大きい場合は、床版の押し抜きにより終局に至る。一方で、帯鋼板の断面積が小さい場合は、帯鋼板の降伏により終局に至る。
- 4) 帯鋼板が降伏しない場合、帯鋼板の断面積に関係なく同等の終局荷重となる。一方で、帯鋼板が降伏する場合、帯鋼板の断面積が増加するにつれて最大荷重が大きくなるという相関性が認められた。
- 5) カナダの設計規準で規定されている帯鋼板の最小断面積で設計した場合、帯鋼板の降伏により終局に至る。
- 6) 帯鋼板の断面積が大きいほど、圧縮膜はより広い範囲で形成される。
- 7) 帯鋼板の断面積は使用時のひび割れ性状に影響

しなかった。

(b) 帯鋼板の配置間隔を変数とした場合

- 8) 帯鋼板の配置間隔が小さい場合は、床版の押し抜きにより終局に至る。一方で、帯鋼板の断面積が小さい場合は、曲げ破壊と押し抜きせん断破壊の複合的な破壊性状により終局に至る。
- 9) 指標として帯鋼板 1 本あたりの断面積 A_s と帯鋼板の配置間隔 S_s の比率 A_s/S_s を導入すると、破壊形式に関わらず A_s/S_s が増加するにつれて最大荷重が大きくなるという相関性があると考えられる。
- 10) 帯鋼板の配置間隔は使用時のひび割れ性状に影響しなかった。

参考文献

- 1) 河野哲也「外部拘束による CMA を利用した橋梁分野におけるコンクリート床版の研究開発」、コンクリート工学, Vol.47, No.8, pp.39-44, 2009.8
- 2) Newhook, J.P. and Muffi, A.A.: A reinforcing steel-free concrete deck slab for Salmon River Bridge, Concrete International, ACI, Vol. 18, No. 6, pp. 30-34, 1996.
- 3) Baidar Bakht et al. : Canadian Bridge Design Code Provisions for Fiber-Reinforced Structures, Journal of Composites for Construction, ASCE, pp.3-15, 2000.2
- 4) Aftab A.Mufti et al. : Experimental investigation of fiber-reinforced concrete deck slabs without internal steel reinforcement, Canadian Journal of Civil Engineering, 20, pp.398-406, 1993
- 5) DIANA 10.1 マニュアル, TNO DIANA, 2017
- 6) 土木学会「複合構造標準示方書 2007 年制定 設計編」, 2014
- 7) 松本高志「繊維補強コンクリートの材料特性とその利用分野」、コンクリート工学 Vol.50, No.5, pp.429-432, 2012
- 8) R.G.Selby. and F.J.Vecchio., “A constitutive model for analysis of reinforced concrete solids”, Canadian Journal of Civil Engineering, vol.24, pp.460-470, 1997
- 9) 土木学会「コンクリート標準示方書 2012 年制定 設計編」, 2012
- 10) Newhook, J.P. and Muffi, A.A.: A reinforcing steel-free concrete deck slab for Salmon River Bridge, Concrete International, ACI, Vol. 18, No. 6, pp. 30-34, 1996.