

コンクリートはり部材の圧縮束による耐荷機構に関する数値解析的研究

NUMERICAL STUDY ON LOAD CARRYING MECHANISM OF COMPRESSIVE STRUTS IN CONCRETE BEAMS

構造及びコンクリート工学分野 村西俊樹
Structural and Concrete Engineering Toshiki MURANISHI

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。その新たな解決手段として、カナダで、Compressive Membrane Action(CMA)の原理(外部拘束によって形成される圧縮束による耐荷機構)により配筋を省略する方法が提案された。しかし、その施行例は少なく、また、日本での研究実績がほとんどない。そこで、2次元数値解析により、圧縮束による耐荷機構と影響因子について明らかにした。また、3体の模型実験により、その妥当性を検証した。

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. There are, however, a few bridges with such deck slabs and related literatures there and also in Japan. In this study, the compressive struts in concrete beams as 2 dimensional problem were examined with material nonlinear finite element analysis. Loading tests of three concrete beams, moreover, were carried out to verify the validity of the analysis herein.

1. 研究背景と目的

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って生じる床版内部の鉄筋腐食が挙げられる。その解決手段としてカナダにおいて、Compressive Membrane Action(CMA)の原理を利用する新たな提案がなされた¹⁾。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。ここで、その原理について説明する。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位置を結ぶ斜め方向に圧縮力(以下、圧縮束と呼ぶ)が生じて荷重に抵抗するというメカニズムのことである。実際の道路橋では、図-2に示すように主桁上フランジに鋼製帯板を溶接し、外部から水平方向の拘束を与える。世界初のCMAを適用した自動車用道路橋(Salmon River Bridge²⁾)がカナダで建設され、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た。そのことを踏まえ、CHBDCの2006年

の改定でひび割れ制御の規定が追加された。今後さらにこの技術の有効性が確認されていけば、構造物の長寿命化に対する有効な解決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、この技術を適用した事例は主に北米が中心で、適用された事例もまだ少ない。また、日本では、CMAの研究がほとんどされておらず、特殊な構造であるため、日本への導入はまだ難しいと考えられている。そのため、日本での適用を考える場合、まずCMA機構の有効性を確認する必要がある。そこで、本研究では、2次元問題として外部拘束されたコ

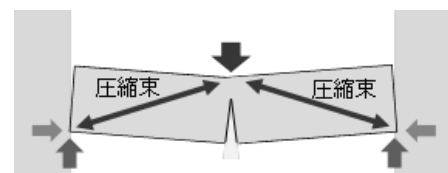


図-1 CMAの原理

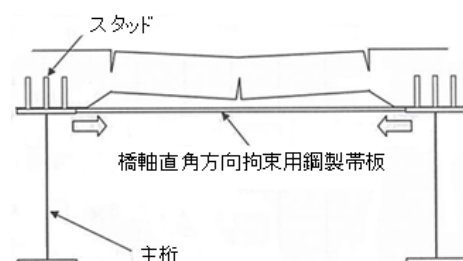


図-2 CMAの合成桁橋への適用方法

ンクリートはり部材内に形成される圧縮束について明らかにし、それと同時に圧縮束に影響を及ぼす因子について把握することを目的とする。まず数値解析を用いて圧縮束に対する影響因子を検討し、その解析結果の妥当性を確認するために3体の模型実験も行った。

2. 数値解析による圧縮束の検討

2.1 着目因子

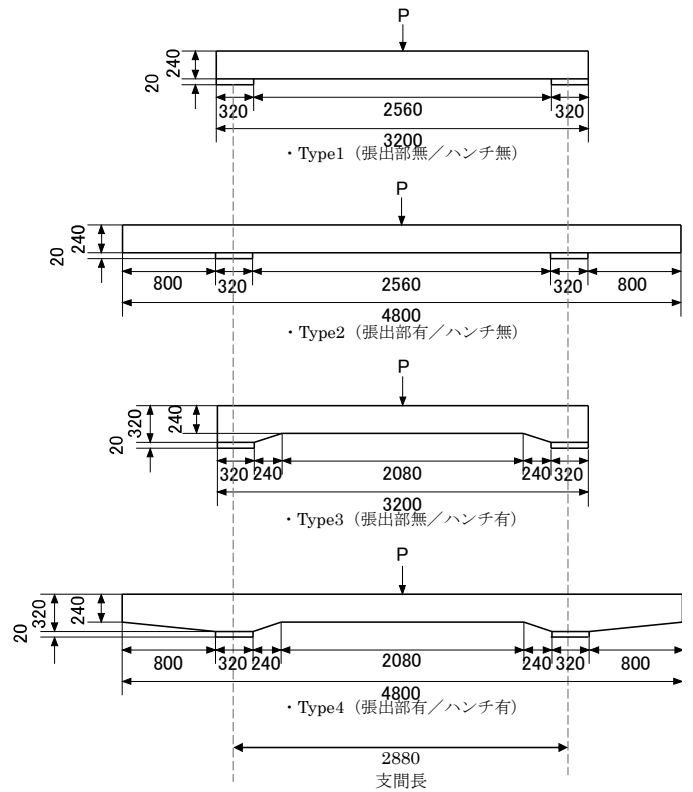
圧縮束の形成に影響を及ぼす4つの因子を次のように設定した：1)外部拘束の有無，2)張出部の有無，3)ハンチの有無，4)鉄筋の有無（無筋・単鉄筋・複鉄筋）。これらの因子を組合せ、計24体を解析対象モデルとした。組合せた因子の一覧を表-1および図-3に示す。寸法・大きさに関しては、設計例等⁴⁾を参考に決定した。なお、外部拘束は水平方向の支持条件をピン・ピンローラー支持[拘束無]，またはピン・ピン支持[拘束有]と変化させることで表現する。そして、張出部とハンチの組み合わせでType1～Type4に場合分けをしている。

2.2 解析概要

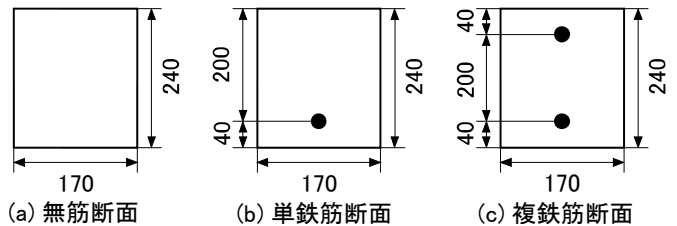
本研究の対象である床版部材は、本来、三次元問題として取り扱うことが適当である。しかしながら、本研究ではCMAと拘束材およびその他の影響因子との関係性を簡潔にするために、二次元問題として数値解析を行った。数値解析には、コンクリート構造物非線形FEM解析プログラムFINALを用いた。解析モデル例を図-4に示す。解析モデルは構造の左右の対称性を考慮したハーフモデルである。コンクリートおよび鋼板は平面応力要素，鉄筋はトラス要素を用いた。鉄筋とコンクリート間は同一節点を共有する剛結合とした。荷重は、はり中央にタイヤ1個に相当する幅に亘って変位制御(0.05mm/1ステップ)で与えた。材料構成則として、コンクリートの圧縮側は修正Ahmadモデル，コンクリートの引張側は出雲モデル，鋼材はバイリニアモデルとした。解析に用いた材料定数を表-2に示す。

2.3 解析結果

得られた中央変位4mm時のひび割れ性状とコンクリートの最小主応力図を図-5に、また、荷重-変位関



(1) 対象モデル正面図(mm)



(2) 断面形状(幅170×高さ240: mm)

図-3 対象モデル一覧

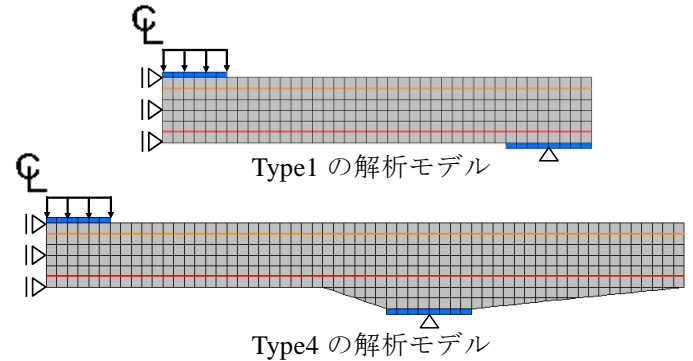


図-4 解析モデル例

表-1 解析ケース(因子の組合せ)の一覧

名称	張出部	ハンチ	支持条件	鉄筋
Type1	無	無	ピン・ピンローラー	無筋
				単鉄筋
				複鉄筋
			ピン・ピン	無筋
				単鉄筋
				複鉄筋
名称	張出部	ハンチ	支持条件	鉄筋
Type2	有	無	ピン・ピンローラー	無筋
				単鉄筋
				複鉄筋
			ピン・ピン	無筋
				単鉄筋
				複鉄筋

名称	張出部	ハンチ	支持条件	鉄筋
Type3	無	有	ピン・ピンローラー	無筋
				単鉄筋
				複鉄筋
			ピン・ピン	無筋
				単鉄筋
				複鉄筋
名称	張出部	ハンチ	支持条件	鉄筋
Type4	有	有	ピン・ピンローラー	無筋
				単鉄筋
				複鉄筋
			ピン・ピン	無筋
				単鉄筋
				複鉄筋

表-2 解析で用いた材料定数

材料		コンクリート強度, 降伏点 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
コンクリート	圧縮強度	24	25
	引張強度	1.91	
圧縮側鉄筋	D13(SD295)	295	200
引張側鉄筋	D19(SD295)		

係を図-6 に例示する。

図-5(a)と(b)から、拘束の有無による比較を行う。拘束がない場合(a)は図-1 に示したような圧縮束が見られないが、拘束すること(b)で圧縮束の形成が確認できる。また、拘束を与えることで、支点付近に負の曲げモーメントが作用し、支点付近上縁からコンクリートにひび割れが進展し、両者は異なるひび割れ性状を示した。図-5(b)と(c)から、鉄筋の有無による比較を行う。鉄筋の有無に関わらず、圧縮束の形成は確認できる。

しかし、圧縮束の形状に違いが見られる。鉄筋を配置することで、無筋よりも圧縮束が細く明瞭になっていることが分かる。これは両者のひび割れ進展の領域が異なるためと考えられる。無筋の場合、正の曲げモーメントが大きく作用する載荷点直下と負の曲げモーメントが作用する支点付近において、局所的なひび割れが発生しているが、複鉄筋の場合、どちらのひび割れも分散している。ひび割れ分散により、載荷点および支点での圧縮域が広がり、圧縮応力の流れが明瞭になっている。図-5(c)と(e)から、張出部の有無による比較を行う。張出部は圧縮束には影響を与えないと考えられる。図-5(c)と(d)から、ハンチの有無による比較を行う。どちらも中央部分の圧縮束が全体的に薄い、ハンチを設けることにより明瞭になっている。ハンチがあることで、はりの高さが増加し、圧縮束の傾角が部材軸に対して、角度が大きくなり、鉛直方向の荷重により耐えることができるため、圧縮束部分に違いが見られたと考えられる。

次に、図-6 から荷重-変位関係の比較を行う。拘束を与えることで剛性が大きくなり、最大耐力の増加も確認できた。また、鉄筋を配筋することで、図-5 に示したようにひび割れが分散したため、無筋よりも2~3割程度耐力が増加している。張出部の有無による違いは圧縮束同様に見られなかったが、図-6(a)と(b)から、ハンチがあることで、若干耐力が増加している。これは前述のように圧縮束が部材角に対して、少し急になったことに関係すると考えられる。

3. 模型実験による圧縮束の検討

3.1 実験概要

本実験においては、数値解析の結果を踏まえ、圧縮束に特に影響を与えると考えられる因子の中から、外部拘束の有無と鉄筋の有無に着目し、実験因子を決定

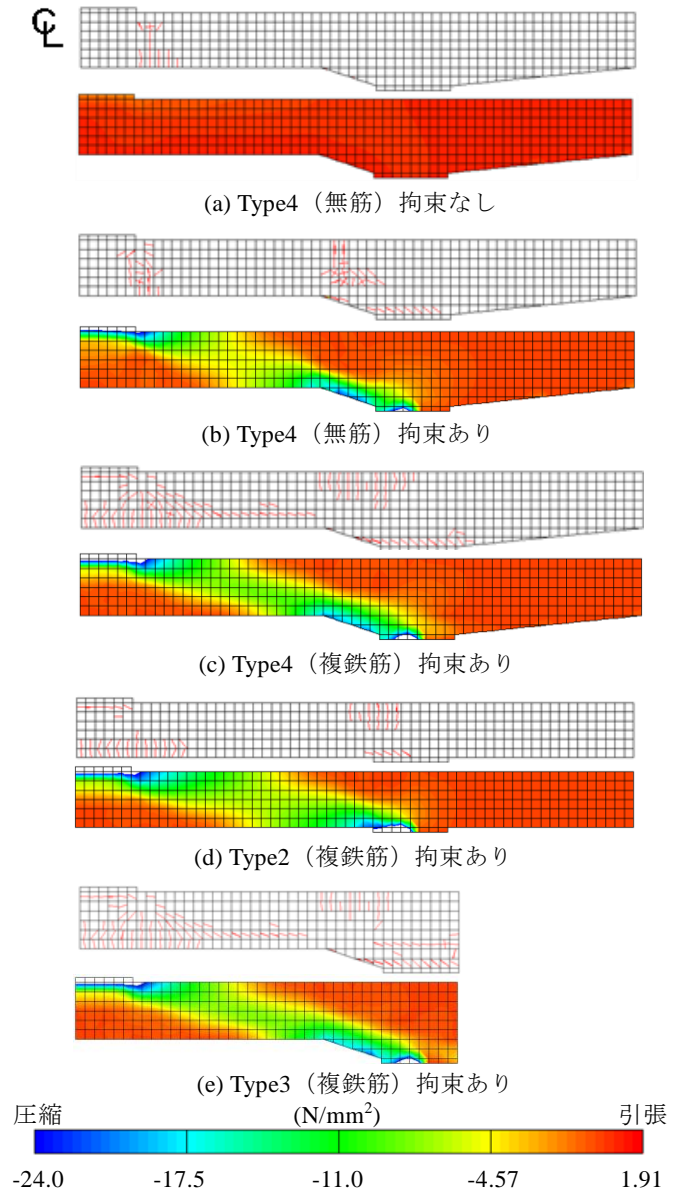
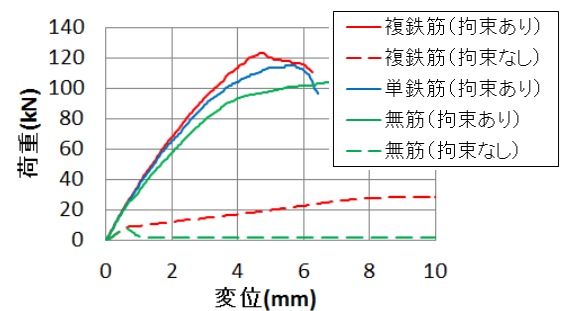
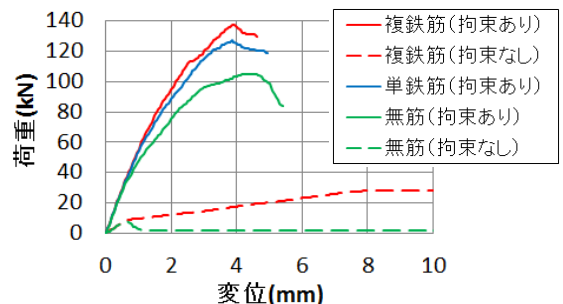


図-5 ひび割れ図(上)および最小主応力図(下)



(a) Type2 (張出部あり/ハンチなし)



(b) Type4 (張出部あり/ハンチあり)

図-6 荷重-変位関係

表-3 実験供試体と設定したパラメータ

供試体名称		鋼製帯板	
		無(N)	有(S)
鉄筋	無(F)	NF	SF
	有(R)	NR	SR

表-4 材料定数

鋼材	ヤング率 (kN/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	引張強度 (N/mm ²)
鋼板	209	280	1341	441
D6	203	382	1883	536
D10	194	351	1816	490
D13	192	376	1960	565

コンクリート	材齢 (day)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
NR	22	55.1	36.9	3.85
SR	21	55.8	34.0	3.53
SF	20	55.2	33.3	3.20

した。供試体一覧（実験因子に則した名称）を表-3に示す。外部拘束を与える目的である鋼製帯板がある供試体にはS、ない供試体にはNの記号を、一方、鉄筋を配筋した供試体にはR、していない供試体にはFの記号を用いている。鉄筋の配筋は複鉄筋とした。これらの組み合わせから計4体の実験供試体を考えた。ただし、明らかにCMAの形成が見られないと考えられるため、NFは本実験では行わないこととした。実験供試体概要の一例を図-7に示す。なお、型枠の組み立てや打設等を容易にするために、前述の数値解析で用いた寸法および形状を変更している。NR、SR、SFすべて共通の外形寸法であり、NRは一般的に想定されている曲げ破壊型の破壊形式となるように鉄筋の配筋等を決定した。また、鋼板とコンクリートを一体化させるために、頭付きスタッド（6@φ16×h100）を鋼板両支点部上面に溶接している。表-4に材料試験で得られたコンクリート、鉄筋および鋼板の材料定数を示す。荷重方法としては、輪荷重相当の大きさの鋼板をはり中央に配置し、荷重した。その際、鋼板と供試体の隙間を無くし、密着させるために、クロロプレンゴムを間に挿入した。計測項目は荷重、中央と支点での変位と、鋼板・鉄筋・コンクリート各ひずみである。

3.2 ひび割れ図

実験後の各供試体のひび割れ図を図-8に示す。図より、すべて異なる特徴的な性状を示している。まず、NRは典型的な曲げ破壊に対応するひび割れ性状である。供試体の下縁から全体的にひび割れが分散して発生していることが確認できる。次に、SRは、NRに比べると、下縁からのひび割れ範囲が狭くなり、両支点上縁からひび割れが分散して発生していることが確認できる。これは鋼板による拘束を与えたことにより、両支点到無拘束のNRでは発生しなかった負の曲げモーメントが作用したためと考えられる。最後に、SFは鉄筋が配筋されていないため、SRでみられたようなひ

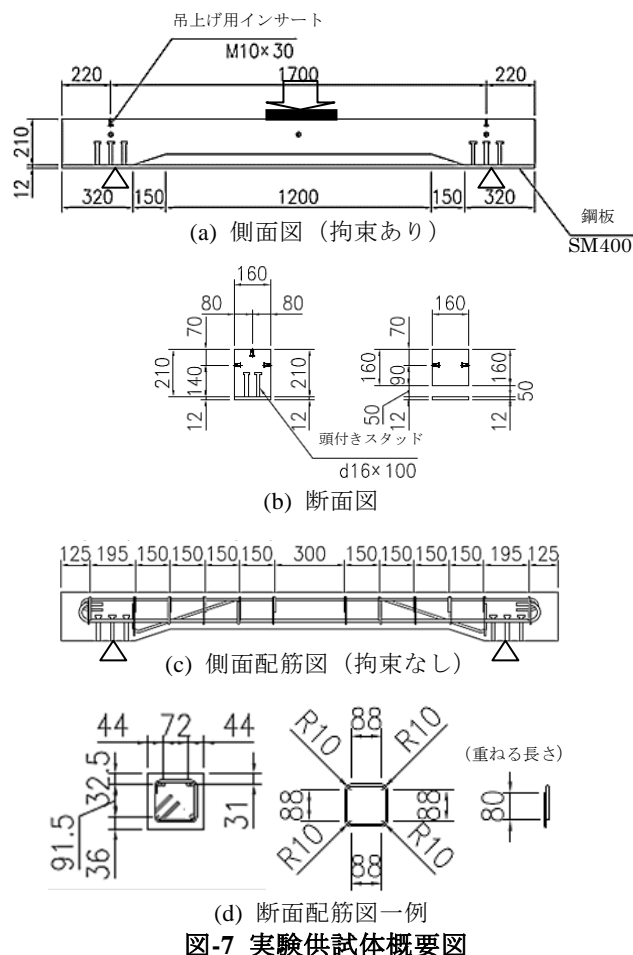


図-7 実験供試体概要図

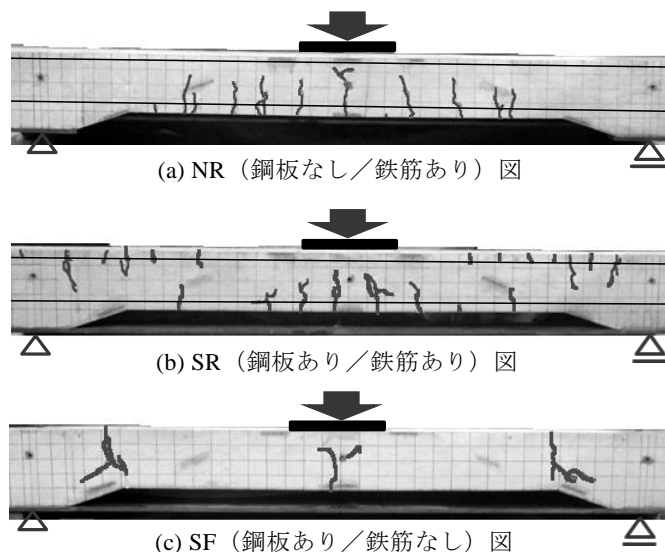


図-8 実験供試体のひび割れ図

び割れ分散はなく、局所的な大きなひび割れが進展・開口した。両支点の上縁から発生したひび割れが真下ではなく、ハンチに沿って支点に向かって伸びている。これははりに形成された圧縮束を避けようとしたためであると考えられる。

3.3 荷重－変位関係

図-9に実験で得られた荷重－変位関係を示す。なお、図中のNFの結果は実験を行っていないため、解析結果で代替している。鋼板による拘束により、SRはNR

の約5倍、SFはNFの約9倍耐力が増加した。SFには鉄筋がないにも関わらず、圧縮束の効果で大幅な耐力上昇につながった。SRとSFでは、鉄筋の有無により荷重-変位関係に差がみられた。この理由として、図-8に示したようにひび割れ性状の違いが考えられる。鉄筋がないと、SFのように載荷部下面と両支点部上面の3ヶ所のみで局所的なひび割れが進展・開口した。特に両支点のひび割れが進展した部分は圧縮束の形成できる範囲が狭くなり、形成された圧縮束の中でも特に大きな圧縮力が働いたと考えられる。また、SFのみハンチ付近のコンクリートが少し剥離していたことを確認した。しかし、鉄筋があることで、SRのひび割れ図のようにその分散が認められた。それによって、形成された圧縮束が全体的に同じ幅で形成され、SFに比べると、大きな圧縮力がハンチ付近に生じず、耐力増加につながったと考えられる。このことを図-10に示す荷重-コンクリートひずみ関係の一例により確認する。同図にコンクリートひずみの計測位置を示す。なお、ひずみは引張を正、圧縮を負としている。SRとSFの荷重80kN時をみると、圧縮束上側・中央では差がほとんど見られない。しかし、圧縮束下側ではSFの方が大きな圧縮ひずみが出ている。このことから圧縮束の形状が異なっていることが確認できる。

4. 数値解析手法の妥当性

4.1 解析概要

実験結果の評価を行うために、改めて数値解析を行った。解析手法は前述の2.3節と同様である。解析モデルの一例を図-11に示す。材料定数は表-4の値を用いた。ただし、実験と条件を合わせるために、鋼板とコンクリートの間にはバネ要素を設けることで頭付きスタッドのずれ変位を考慮し⁵⁾、さらに供試体と載荷板の間に挿入したクロロプレングムもモデル化した。解析に入力したスタッドのせん断力-ずれ変位関係を図-12に、解析に用いたクロロプレングムの材料定数⁶⁾、⁷⁾を表-5に示す。

4.2 再現解析結果

実験と解析で得られた荷重-変位関係の比較を図-13に示す。SRの解析結果は、凡例に示すひび割れ発

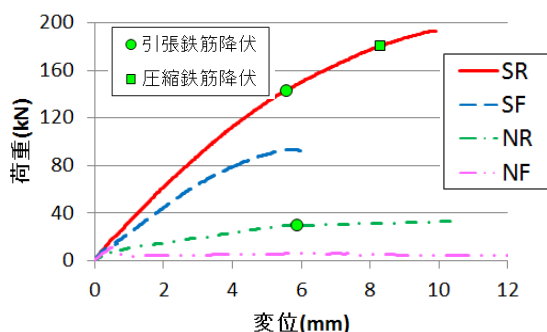


図-9 荷重-変位関係

生や鉄筋降伏などのイベント発生位置を含めて荷重-変位関係を再現することができた。図-14のひび割れ図においても、図-8(b)と同様な性状を示している。SFの荷重-変位関係は比較的再現することはできたが、耐力が少し大きくなった。これは解析では図-15中の○で示すようにひび割れが一部分散したためであると考えられる。

4.3 鋼板断面積を因子とした外部拘束の検討

実験で用いた鋼板は位置によらず、同じ断面積であった。これは型枠の組立てや打設等を容易にするためである。しかし、実際に用いる鋼製帯板に比べると、大きな断面積を有している。そこで、数値解析を用い

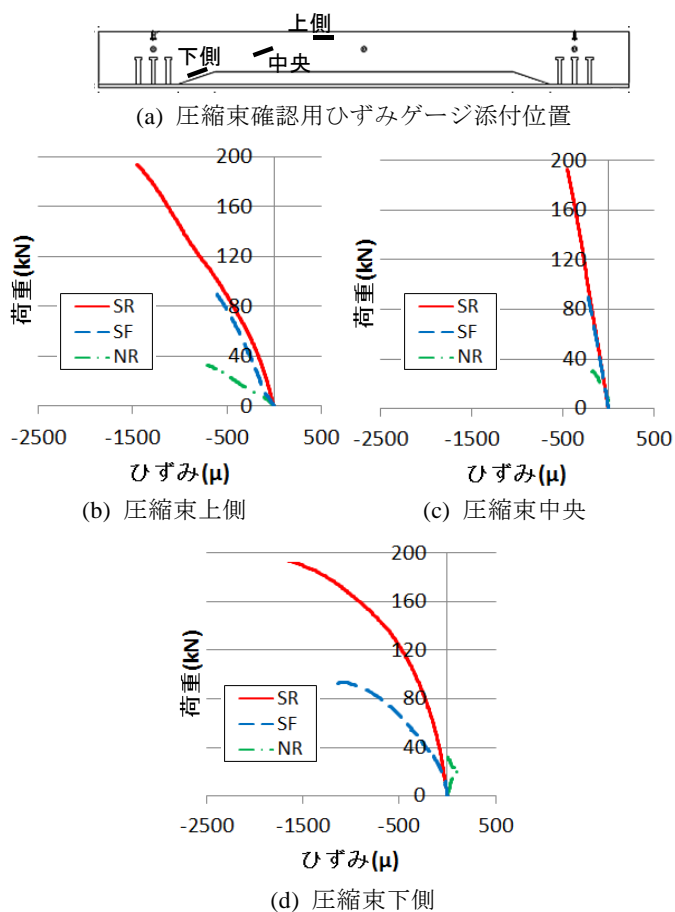


図-10 荷重-コンクリートひずみ関係

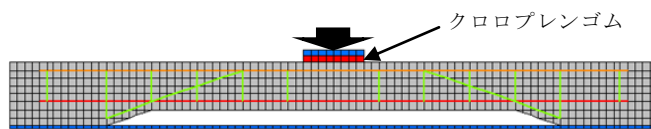


図-11 解析モデルの一例 (SR)

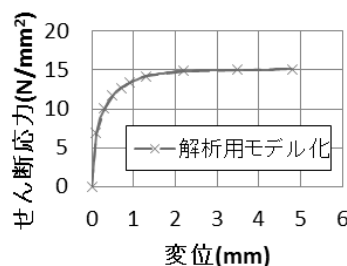


図-12 せん断応力-ずれ変位関係

表-5 ゴムの材料定数

ヤング率 (N/mm ²)	ポアソン比
1.5	0.5

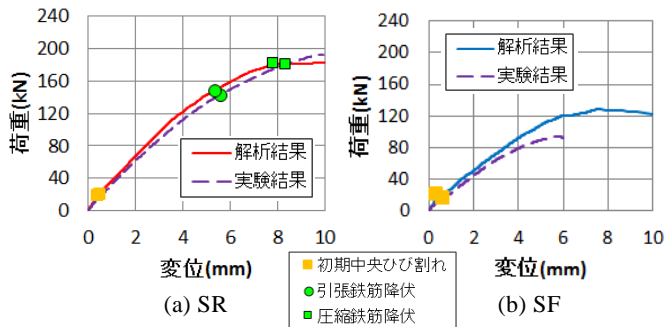


図-13 荷重－変位関係の比較

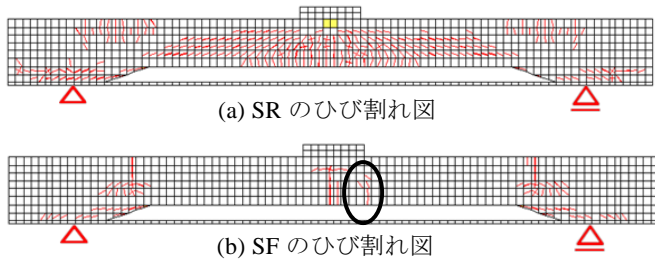


図-14 解析結果（ひび割れ図）

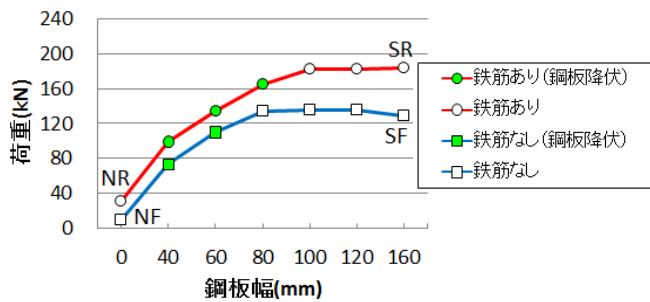


図-15 鋼板幅の違いによる最大耐力の比較結果

て、外部拘束用鋼板の断面積（鋼板奥行幅のみ）を因子とし、外部拘束に関する検討を行った。解析モデルは前述の 4.1 節と同様である。図-15 に鋼板奥行幅の違いによる最大耐力の比較結果を示す。鉄筋の有無に関わらず、鋼板が降伏するとそれ以上耐力の増加が見込めないと考えられる。しかし、鋼板が降伏せず、弾性範囲内であれば、耐力はほぼ停留している。つまり、今回の実験で用いた鋼板の断面積は十分な拘束を与え、はり奥行幅の半分程度まで断面積を減少させても、断面積減少前の鋼板による水平方向の拘束力を維持できると考えられる。また、実際床版に適用する場合、圧縮束の形成に大きな影響を与える鋼板が降伏する破壊形式にはするべきではないと考えられる。

5. 結論

外部拘束されたコンクリートはり部材内に形成される圧縮束とそれによる耐荷機構を把握するために、2次元材料非線型有限要素解析および3体のはり型模型実験を実施した。以下に得られた結果を示す。

数値解析より

1) 拘束を与えることにより、拘束を与えない場合には見られなかった圧縮束の形成が確認された。ま

た、圧縮束の形成にはひび割れの発生領域と進展・分散性状が影響することも推定された。また、鉄筋を配筋することでひび割れが分散し、圧縮束の流れがより明瞭になる傾向が認められた。

2) 張出部は圧縮束の形成に影響を与えないが、ハンチは圧縮束の形成に大きな影響を与えることが確認された。

模型実験より

- 3) 外部拘束用鋼板を配置することにより、両支座位部に偏心水平力が作用し、負曲げが生じた。
- 4) 鉄筋を配置することにより、ひび割れ分散を呈するが、一方、無筋では正・負の最大曲げモーメント発生位置にて局所的かつ支配的な曲げひび割れが生じ、大きく開口した。
- 5) 外部拘束用鋼板の配置により、ひび割れ発生を無く領域にて、圧縮束が形成され、その耐力は従来の曲げ機構に対する算定耐力を大幅に向上した。

実験結果に対する数値解析より

- 6) 頭付きスタッドのずれ剛性とクロロプレンゴムの材料定数を導入することにより、得られた荷重－変位関係・破壊性状は実験の観察結果と良好な一致を示し、数値解析手法の妥当性が認められた。
- 7) 因子の影響が明瞭な3体の模型の解析結果はそれぞれ異なる荷重－変位関係、ひび割れ性状、圧縮束の形状を示し、耐荷機構の違いが確認できた。
- 8) 鋼板が弾性範囲内であれば、鋼板断面積を小さくしても、断面積が大きい場合と同程度の水平方向の拘束を与えることができることが確認された。

参考文献

- 1) 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
- 2) Baidar Bakht et al. : Five Steel-Free Bridge Deck Slabs in Canada, Structural Engineering International, IABSE 3/98, pp.196-200, 1998
- 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) 中井博, 北田俊行 : 新編橋梁工学, 第5版, 共立出版株式会社, 2011.4
- 5) 土木学会 : 2014年制定 複合構造標準示方書[原則編・設計編], 2014
- 6) P.H Mott et al. : Limits to Poisson's ratio in isotropic materials, physical review B80, 132104, pp.1-4, 2009
- 7) Cambridge University Engineering Department : Materials Data Book 2003 Edition, 2003

討議

討議 [山口隆司先生]

①供試体のサイズはどのように決定したのか、②支間長や床版厚、鋼板の寸法等により耐力も変わるのではないかと、③鋼板厚・床版厚は減少できるのか、また圧縮束との関係はどうなるのか。

回答

①に関しては、橋梁工学に関する図書¹⁾に記載されていた床版の設計例を参考に寸法等を決定しました。なお、本研究では床版の1径間を対象としているので、合成多主桁橋として設計されていた寸法や形状等を合成2主桁橋になるようにモデル化し直しました。

②に関しては、支間長や床版厚、鋼板の寸法等により耐力も変わると考えられます。しかし、本研究においては床版を形成する要素（ハンチや鉄筋など）が圧縮束にどのように影響するのかをまず検討することとしました。そのため、設定した影響因子は鉄筋の有無やハンチの有無のように床版を形成する要素がある場合とない場合としており、影響因子としては大きな枠組みとして設定しました。今回行った数値解析および模型実験により、床版のどの要素が圧縮束に影響を及ぼすのかについては把握することができましたので、今後、この結果を踏まえ、支間長や床版厚に着目し、耐力等の違いを把握していくことになると考えています。

③に関しては、CMA 機構を利用することで鋼板厚や床版厚は減少できると考えられます。今回行った模型実験で用いた鋼板は型枠の組立てや打設の容易性および頭付きスタッドを溶接することを考慮したため、比較的厚い鋼板となっており、鋼板の降伏は見られませんでした。そのため、鋼板が降伏しない範囲内であれば鋼板厚を減少させても外部拘束としての役目を十分に発揮することができると考えられます。ただし、鋼板厚や床版厚をどの程度まで減少させることができるかについては本研究では検討していませんので、今後検討していく必要があると考えています。また、圧縮束による効果は床版厚が減少すると、CMA の効果は減少すると考えられますが、従来の RC 床版に比べると、薄い床版として利用できる可能性があると考えられます。

討議 [角掛久雄先生]

①耐力レベルで比較を行っているが、活荷重作用時についてはどうなのか、②上側にひび割れが入ることは大きな問題であり、安全側に考えるのであれば鉄筋

が必要になるのではないかと、③望まれる形式としては鋼板の降伏なのか鉄筋の降伏なのか。

回答

①に関しては、本研究の目的としては、圧縮束の耐荷機構に関して把握することとしていますので、終局耐力に着目し、比較検討を行いました。終局耐力以外として、ひび割れ発生荷重や鉄筋降伏荷重を従来の RC 床版と比べてみると、拘束させたことにより正の曲げモーメントが減少したことで、ひび割れ発生荷重が約2倍程度増加しています。また、鉄筋降伏荷重も大幅に増加しており、使用時を考慮しても、従来の RC 床版よりは効果があると考えられます。

②に関しては、数値解析や模型実験の結果から、鉄筋が無ければ、上面から局所的かつ支配的なひび割れが発生しており、このひび割れから雨水等が侵入し、悪影響を及ぼす可能性はあります。そのため、ひび割れ開口の防止は必要であると考えられます。しかし、塩害対策として考えているため、鉄筋はやはり配置しないことが理想的です。そこで、鉄筋の代わりとして、GFRP ロッドや CFRP ロッドを配置することにより、ひび割れ制御を行うという方法が良いと考えています。

③に関しては、鋼板の降伏はさせたくないと考えています。鋼板による外部拘束が無ければ、CMA による圧縮束を利用することはできないため、拘束を与えている鋼板より鉄筋が先に降伏する破壊形式のほうが良いと考えています。

討議 [谷口与史也先生]

①アーチアクションを利用しても、床版では偏心荷重がかかるが、偏心荷重に対してはどうなのか、②カナダではどのように考えており、カナダの橋はどの程度の荷重を想定しているのか。

回答

①に関しては、偏心荷重に対しては本研究では確認をしていません。本研究では曲げモーメントが一番大きくなる時を想定したため、はり中央から荷重をし、数値解析および模型実験を行いました。

②に関しては、カナダで建設された世界初の CMA 適用橋である Salmon River Bridge は車道であり、自動車荷重を想定した橋です。また、CMA の規定が盛り込まれているカナダの道路橋設計基準 Canadian Highway Bridge Code (CHBDC)では、鋼製帯板の間隔、床版厚、桁間距離や鋼製帯板の断面積に対して用いることが可能な範囲が定められており、それを満たすように設計するように書かれています。

討議 [山田卓先生]

繰返し荷重（疲労）に関してはどうなのか.

回答

圧縮束が形成されるため、疲労によるひび割れが進展しても、従来のコンクリート床版よりは疲労耐久性が向上すると考えられます。また、**GFRP** ロッド等を配置することで疲労耐久性がより向上するという研究結果²⁾もあり、**CMA** 機構の利用は疲労にも効果があると考えられます。

参考文献

- 1) 中井博，北田俊行：新編橋梁工学，第5版，共立出版株式会社，2011.4
- 2) C. Klowak, A Memon, A A Mufti : Static and fatigue investigation of innovative second-generation steel-free bridge decks, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.34, pp.331-339, 2007