

(29) 突起付き鋼板を用いたSC構造はりの曲げ特性
およびひびわれ分散性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON FLEXURAL BEHAVIOR AND DISPERSION OF CRACKS OF STEEL AND
CONCRETE COMPOSITE BEAMS USING ROLLED STEEL PLATES WITH CHECKERED RIBS

長山 秀昭* 納見 昭広** 伊藤 壮一*** 島岡 久壽****
Hideaki NAGAYAMA, Akihiro NOMI, Soiti ITO, Hisatosi SIMAOKA

Experimental studies were carried out on the characteristics of flexural behavior and dispersion of cracks of a steel and concrete composite beam(SC beam). The SC beam is composed of rolled steel plates with checkered ribs(height 2.5mm) instead of reinforcing bars. In results, the following conclusions were obtained ; (1)Bond strength of steel plates with checkered ribs was about 70% of that of reinforcing bars.(2)The flexural strength of a SC beam can be approximately estimated using the theory of a RC beam. (3)The dispersion of cracks of a SC beam using steel plates with checkered ribs were improved much better than the one using flat steel plates.(4)It is more effective to use together small lattice of deformed bars in order to disperse the cracks of a SC beam.

1. まえがき

鉄筋コンクリート(RC)セグメントの高強度化や施工の省力化を目的として、突起付き鋼板の付着力特性に注目し、突起付き鋼板を従来の異形棒鋼のかわりに使用する鋼板コンクリート(SC)セグメントについて検討している。本研究のSC構造は、図1に示すように圧縮側および引張側主鋼材に突起高さ2.5mmの縞鋼板を用いて、鋼板同士をせん断補強材(スターラップ鉄筋)でつないだ骨組とし、コンクリートとの合成構造とするものであり、はり構造や版構造に適用が可能である。

本報告では、SCセグメントの実用化を図る上で、SC構造はりについて突起付き鋼材の付着力特性、SC構造部材の強度およびひびわれ分散性などの基本的特性について検討したので、その結果について報告する。

2. 突起付き鋼材の付着強度特性

突起付き鋼材の付着強度特性を把握するために、引抜試験およびはり型試験を実施した。

2.1 引抜試験

(1) 試験概要

突起付き鋼板、平鋼および異形棒鋼について引抜試験を行い、それぞれの付着応力度-すべり関係を調べた。図2に試験体の形状寸法を示す。突起付き鋼板は、図3のような縞鋼板、横ふし状のリブ付き鋼板の2

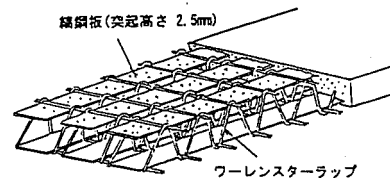


図1 SC構造の一例

* NKK基盤技術研究所

** NKK建材センター建設鋼材営業部

*** NKK基盤技術研究所

**** NKK建材センター建材技術開発部

種類とし、それぞれの表面形状は、突起間隔40mm、突起高さ2.5mmとしている。

異形棒鋼(D25)について棒鋼直径dの6倍(=15cm)の立方形試験体とし、付着区間を3d(=7.5cm)とした。

平鋼板、リブ付鋼板、縞鋼板については、鋼材幅を4cmとし鋼材の側面にはビニールテープを貼って付着をなくし、異形棒鋼(D25、周長8cm)と付着周長を等しくなるようにした。

また、この試験では付着応力度はコンクリートが鋼材軸方向に縦割れするか或は鋼材が降伏するかどちらか小さい方の引抜き荷重によって決まる。そこで、付着長を7.5cmとして、鋼材が降伏する前に鋼材が引抜けるようにした。

さらに、コンクリートの割裂が小さいすべり量で起こることを防ぐために、すべての試験体を直径6mmの鉄筋をピッチ4cmのらせん状に配置して補強した。使用した鋼材はSS400(降伏点強度3068kgf/cm²)、異形棒鋼はSD35(降伏点強度3853kgf/cm²)、コンクリートは早強セメント、粗骨材最大寸法10mmとし、試験時の圧縮強度は445kgf/cm²であった。

(2) 試験結果および考察

引抜試験の結果の代表例を図4に示す。ここで、付着応力度は、次のように付着域で一様分布とする平均付着応力度の考え方を採用した。

また、この平均付着応力度に対するすべり量は、自由端のすべり量で代表した。

$$\tau_{av} = P / (\psi * L) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 τ_{av} ：平均付着応力度

P：引抜き荷重

($P < P_y$, P_y ：鋼材の降伏荷重)

ψ ：周長(異形棒鋼、鋼板ともに8.0cm)

L：付着区間長(異形棒鋼、鋼板ともに7.5cm)

突起付き鋼板および異形棒鋼を用いた試験体は、コンクリートが割裂破壊して最大荷重に達した後引抜けたのに対して、平鋼板は、割裂せずに、コンクリート中から引抜けた。各鋼材の最大平均付着応力度は、異形棒鋼の場合205kgf/cm²に対して、リブ付鋼板207kgf/cm²、縞鋼板236kgf/cm²、平鋼板53kgf/cm²となっている。次に、 τ_{av} と δ の関係を見ると、異形棒鋼は $\delta=0.7$ mm付近で最大付着応力度に達した後、コンクリートの割裂破壊により付着力が低下するのに対して、縞鋼板は $\delta=0.7$ mm付近で一旦ピークを示すが、その後も付着力は徐々に増加している。次に、突起形状について見ると、縞状突起および横ふし突起による付着性状の改善効果は大きく、また、両者について、同じ

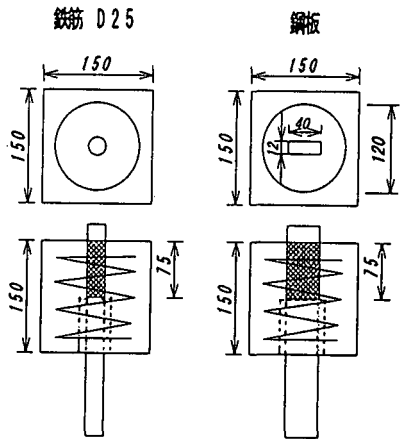


図2 引抜試験供試体

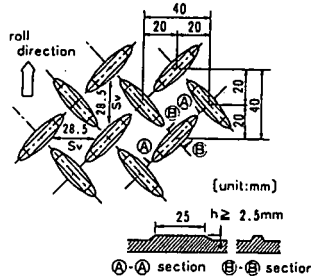


図3(a) 縞鋼板

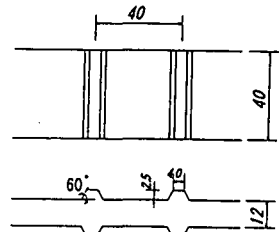


図3(b) リブ付鋼板

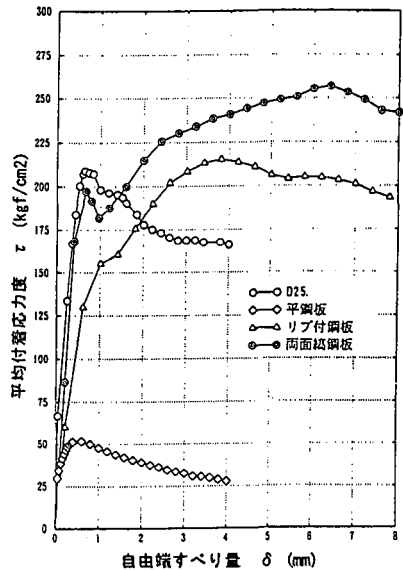


図4 付着応力度と自由端すべり量の関係

すべり量に対する付着応力度を比較すると、縞状突起の方が付着に対してより有利となることがわかる。

2.2 はり型試験

突起高さ2.5mmの縞鋼板の付着性能向上の効果が大きいことから、鋼材周囲のコンクリート応力状態を実際の構造物での応力状態に近づけた状態で縞鋼板の付着特性を調べた。

(1) 試験方法

RILEM³⁾で規定された

はり型供試体による試験法を

参考にして付着試験を行った。

図5に試験体を示す。鋼材は、

異形棒鋼(D19)と片面縞鋼板

(幅60mm*厚6mm)を用い、付

着区間長は19cmとした。試験体中央の上

側にスチールヒンジを設置して、2点集中

荷重を単調載荷し、鋼材に軸力のみが作用

するようにして、鋼材自由端のすべり量を

計測した。

(2) 試験結果

図6に試験結果を示す。平均付着応力度

は、異形棒鋼の場合100kgf/cm²、縞鋼板の

場合70kgf/cm²程度となっている。なお、縞

鋼板の付着応力度算定にあたっては、引抜

試験の結果より、平鋼は縞突起の1/4の付着

力であることを考慮して、片側平鋼部分を

縞突起部分の付着面積に換算して求めた。

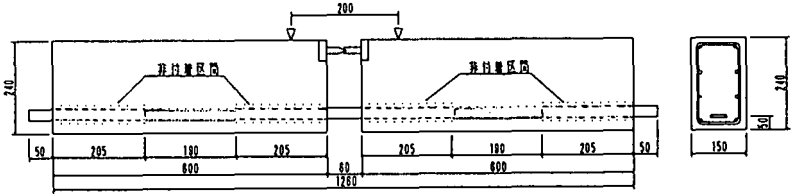


図5 はり型供試体

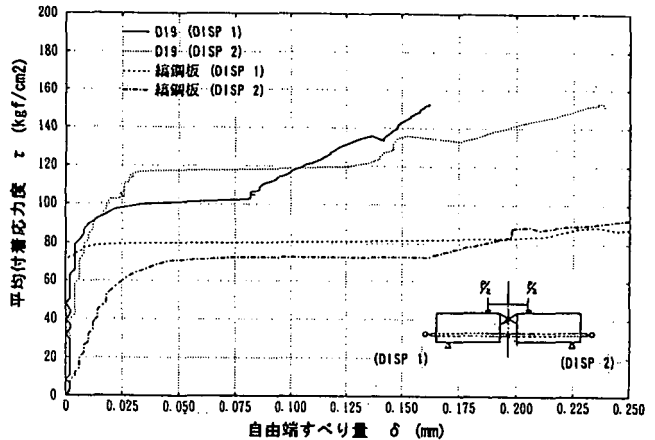


図6 付着応力度と自由端すべり量の関係

3. 曲げ強度特性およびひびわれ分散性

突起付き鋼板(縞鋼板)を用いた合成は

りの強度特性とひびわれ分散性を把握するために、断面25cm*21

cmの直線はりを用いて曲げ載荷試験を行った。

(1) 試験概要¹⁾

供試体を図7に示す。平鋼板(TYPE1)、片面縞鋼板(TYPE2)、

両面縞鋼板(TYPE3)およびRC(TYPE4)計4体である。

SCはりの鋼材量はRCはりにおける鉄筋量と同等になるように、

板厚6mmとした。

曲げ載荷試験は、両端をスパン2100mmで単純支持し、中央に間隔

900mmで2点集中荷重を単調増加で載荷した。ひびわれ幅の計測は

試験体底面に100mm間隔で取り付けたパイ型変位計により行った。

(2) 試験結果

図8にスパン中央の荷重と変位の関係、表1に載荷試験結果を

示す。SCはりの許容曲げ荷重および終局曲げ荷重はいつも鉄筋換算してRC理論で求めた計算値と比較

的によく一致している。また、荷重-変位曲線の傾き(曲げ剛性)についても許容曲げ荷重レベル付近ではRC

と同等以上を確保している。次に、最終状態におけるひびわれ分布のスケッチを図9に示す。

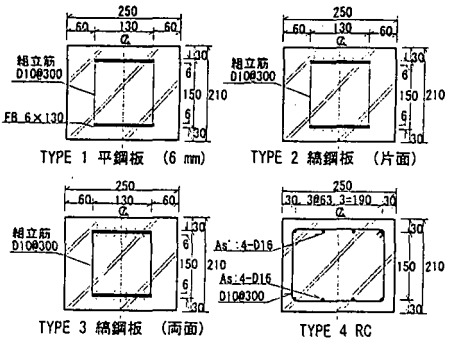


図7 試験体の形状寸法

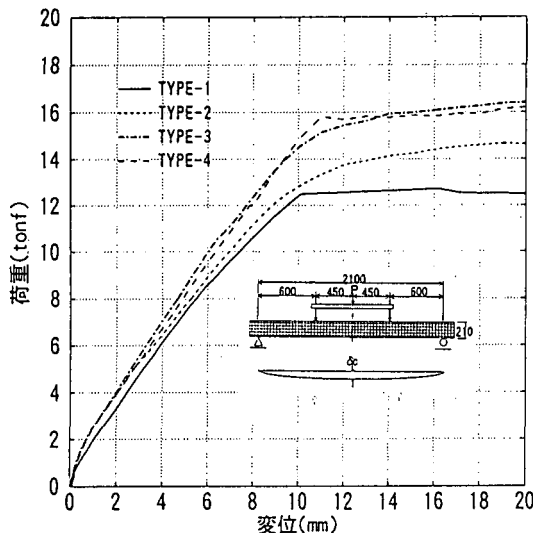


図8 スパン中央における荷重－変位曲線

平鋼板 (TYPE1) の場合は、ひびわれが局部的に集中してひびわれ間隔が大きいのにに対して、縞鋼板 (TYPE2、TYPE3) の場合はひびわれ間隔が小さく、RC (TYPE4) のひびわれ性状に近いことがわかる。

SCはりのひびわれ分散性に関して、表2は、設計荷重時 (引張側鋼材が許容応力度 $\sigma_{sa} = 1400 \text{ kgf/cm}^2$ に達するとき) の純曲げ区間のひびわれ分散性を比較したものである。最大ひびわれ幅と平均ひびわれ幅の比は、平鋼板の場合1.80、縞鋼板の場合1.28～1.33、RCでは1.28となり、鋼材表面の突起によってひびわれ分散が良好になることがわかる。また、TYPE2とTYPE3の比較より、縞鋼板の突起はコンクリート表面側に配置すると、ひびわれの分散に効果的であることがわかる。

4. SCはりのひびわれ分散性の向上

縞鋼板を用いたSCはりの場合、強度に関してはRC理論で推定が可能であるが、ひびわれに関して、評価方法が確立されていないことやひびわれ分散性をさらに向上させるひとつの方法として格子鉄筋を併用した場合のひびわれ抑制効果について検討した。

4.1 試験概要²⁾

図10に試験体の断面形状寸法を示す。試験体は表3に示すように(a)鋼板のみのSC構造、(b)鋼板+格子筋のSC構造および(c)RC構造

表1 曲げ載荷試験結果

TYPE	鋼材量		曲げ荷重 (実験値)		曲げ荷重 (計算値)			
	$A_s = A_s'$ (cm ²)	$P_t^{*1)}$ (t)	$ePa^{*2)}$ (t)	ePu (t)	$cPa^{*3)}$ (t)	ePa/cPa	$cPu^{*4)}$ (t)	ePu/cPu
1			5.48	13.0		1.07		1.07
2	7.800	0.0173	4.94	15.6	5.11	0.97	12.18	1.28
3			7.12	17.0		1.39		1.40
4	7.944	0.0177	5.52	16.8	5.36	1.03	15.90	1.06

*1) $P_t = \frac{A_s}{Bd}$ *2) ePa : 鋼材が許容ひずみ (667 μ) に達したときの曲げ荷重
 *3) $cPa = \frac{1}{2} M_s$ 1: 支間 (2.1m) M_s : 許容曲げモーメント ($\sigma_{sa} = 1400 \text{ kgf/cm}^2$)
 *4) $cPu = \frac{1}{2} M_u$ 1: 支間 (2.1m) M_u : 純局曲げモーメント ($\sigma_{ck} = 254 \text{ kgf/cm}^2$)
 SS400: $\sigma_s = 3080 \text{ kgf/cm}^2$, S030: $\sigma_s = 3880 \text{ kgf/cm}^2$

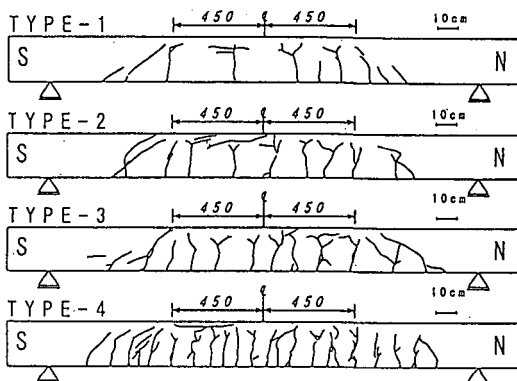


図9 最終ひびわれ分布

表2 ひびわれ分散性の比較

TYPE	梁名称	ひびわれ本数	ひびわれ幅 (mm)			ひびわれ間隔 (mm)		
			w_{max}	w_{avg}	w_{max}/w_{avg}	l_{max}	l_{avg}	l_{max}/l_{avg}
1	平鋼板	4	0.418	0.232	1.80	350	280	1.25
2	縞鋼板 (片面)	6	0.170	0.133	1.28	216	166	1.30
3	縞鋼板 (両面)	7	0.162	0.121	1.33	222	145	1.53
4	RC	9	0.127	0.099	1.28	162	117	1.38

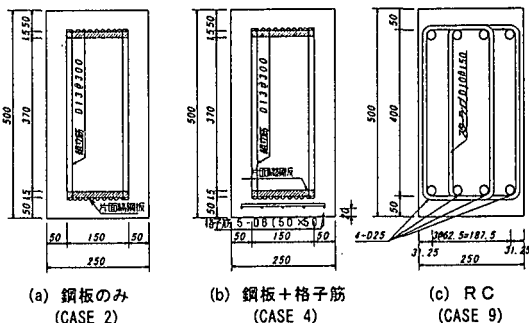


図10 試験体断面寸法

の3区分とした。縞鋼板は、突起が外側になるように配置している。SC、RCともに、引張主鋼材（鉄筋）比は2％程度であり、RCの場合、示方書⁴⁾に規定される最小の鉄筋間隔とし過密配筋となっている。SCはりの製作にあたって、引張側鋼板の充分な定着を確保するために上下鋼板には端板を溶接した。また、純曲げ区間は、ひびわれへの影響を少なくするために組立筋を鋼材内側に300mm間隔で配置した。

鋼材はSS400、SD30、コンクリートは粗骨材最大寸法10mm、早強セメントを使用し、載荷試験時の圧縮強度は360kgf/cm²であった。載荷試験は、図11に示すように両端をスパン4200mmで単純支持し、中央に間隔1000mmで2点集中荷重を加える方法とした。

4.2 試験結果および考察

(1) 鋼板のみのSC構造のひびわれ性状

図12はかぶりを変えた場合の純曲げ区間における鋼材ひずみと最大ひびわれ幅との関係を示したものである。同図より、最大ひびわれ幅は鋼材ひずみの増加とともに大きくなり、またかぶりが大きいくほど大きくなる傾向がある。すなわち、鋼材ひずみと最大ひびわれ幅との間には、式(2)のような関係が成り立つ。

$$W_{max} = k_1 * (k_2 * c + k_3) * \epsilon \quad \cdots (2)$$

ここに、 W_{max} ：最大ひびわれ幅(mm)

k_1, k_2, k_3 ：比例定数

c ：鋼材かぶり(mm)

ϵ ：鋼材ひずみ

図12の $c=30, 50, 70$ mmの曲線で、 $\epsilon=1000 \times 10^{-6}$ における割線勾配と c との関係より縞鋼板のみのSC構造の最大ひびわれ幅を求めると式(3)のようになる。

$$W_{max} = (3.4 * c + 290) * \epsilon \quad \cdots (3)$$

図13に式(3)の関係をプロットするとともに、RC示方書⁴⁾における許容ひびわれ幅と比較した結果を示す。図13より、最大ひびわれ幅 W_{max} を許容ひびわれ幅 W_a （例えば $0.005c$ ）以下にするためには、かぶりが小さい場合は、鋼材ひずみを低く抑え、かぶりを大きくすると鋼材ひずみも大きくとれる傾向があることがわかる。

表3 試験ケース

区分	CASE	鋼板種類	引張側鋼材量	格子筋	鋼板かぶりC	備考
(a)	1	縞鋼板 (片面)	150×15 (=22.5cm ²)	なし	30mm	かぶりの影響
	2				50mm	
	3				70mm	
	7	平鋼板	150×14(=21.0cm ²)		50mm	付着の影響
(b)	4	縞鋼板 (片面)	150×15 (=22.5cm ²)	5-D6(=1.60cm ²)	50mm	格子筋の影響
	5			3-D6(=0.96cm ²)		
	6			3-D10(=2.14cm ²)		
	8	平鋼板	150×14(=21.0cm ²)	5-D6(=1.60cm ²)	50mm	
(c)	9	RC	4-D25(=20.3cm ²)	なし	50mm	

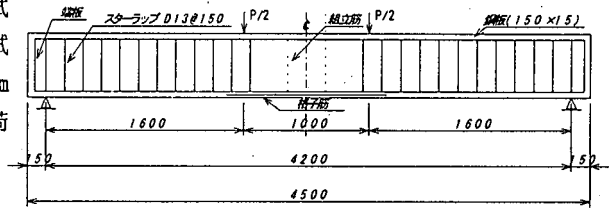


図11 載荷試験

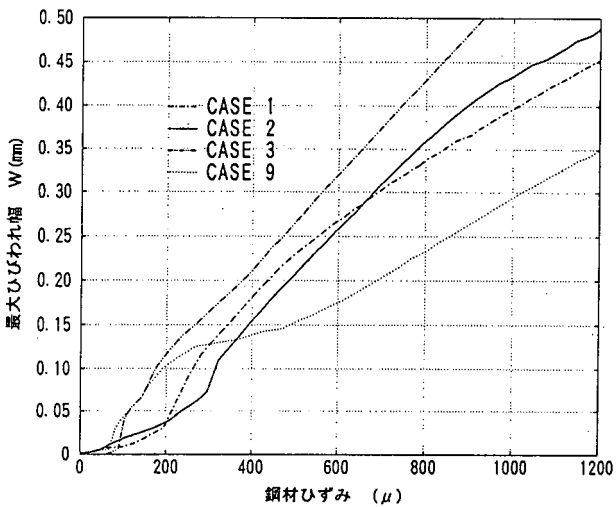


図12 鋼材ひずみと最大ひびわれ幅の関係

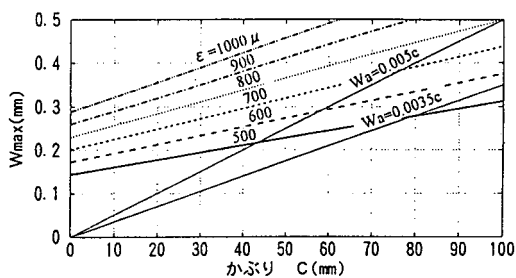


図13 かぶりと最大ひびわれ幅の関係

(2) 格子筋によるひびわれ抑制効果

ひびわれ幅の制限条件が厳しくなると、ひびわれ幅を考慮して鋼材の許容引張応力度に制限を加える必要がある。これは、鋼材の高強度化に伴って、鋼材の許容応力度を大きくしたり、施工上、厚肉鋼材を数少なく利用したい要求と矛盾する。そこで、ひびわれ対策として、スターラップ間隔を小さくしたり、かぶり部に細径の鉄筋網を配置してひびわれ分散を図る方法⁵⁾などが考えられる。ここでは、格子筋（格子筋かぶり20mm）によるひびわれ対策について検討した。図14は格子筋の鉄筋量をパラメータとして、最大ひびわれ幅を比較したものである。図12、図14より、格子筋と

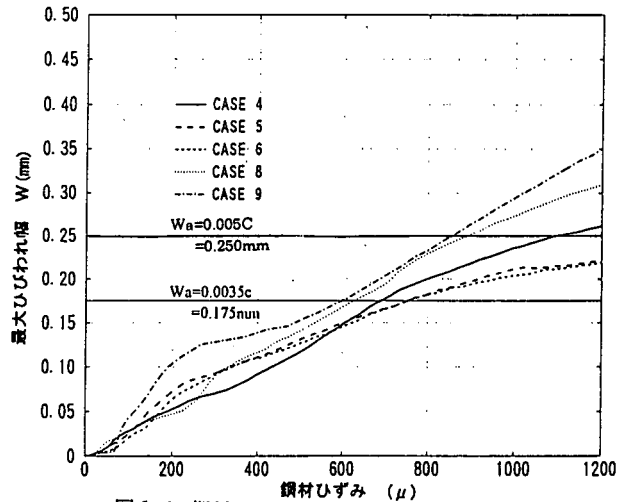


図14 鋼材ひずみと最大ひびわれ幅の関係

組み合わせることにより、ひびわれ幅を大幅に抑制することが可能であり、格子筋の鉄筋量の目安として主鋼材の4.3%以上にすれば、RC構造と同等以上にひびわれ幅を小さくすることが可能である。

5. 結論

突起付き鋼板として縞鋼板の付着特性に着目して、はり試験体により実験的研究を行い、限られた条件ではあるが、以下のような結論を得た。

- 1) 実際の応力状態に近い状態で片面縞鋼板と異形棒鋼の付着強度を比較した結果、縞鋼板の付着強度は鉄筋の7割程度の値であった。
- 2) 鋼板のみのSC構造の場合、同一鋼材ひずみ（同一鋼材応力度）におけるひびわれ幅は鋼材かぶりに比例して大きくなる。
- 3) 格子筋を用いると、鋼板のみの場合と比較してひびわれの分散性が大幅に向上する。
- 4) 縞鋼板と格子筋を併用したSC構造は、格子筋の鉄筋量を主鋼材の4.3%以上配置すれば、RC構造と同等以上にひびわれ幅を小さくすることが可能である。

謝辞

本研究の実施において、大変貴重なご意見を頂いた、大阪市立大学園田恵一郎教授、早稲田大学小泉淳教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長山秀昭、納見昭広、伊藤壮一、島岡久壽：縞鋼板を用いたSC構造梁の曲げ耐荷特性、土木学会第49回年次講演会、CS78, pp.160-161, 1994
- 2) 伊藤壮一、長山秀昭、納見昭広、島岡久壽：縞鋼板を用いたSC構造梁の曲げひびわれ性状、土木学会第50回年次講演会、I-A105, 1995
- 3) RILEM: Materials and Structures, Vol.6, No.32, pp.97-101, 1973
- 4) コンクリート標準示方書（平成3年版）設計編、土木学会
- 5) 横道英雄、角田与史雄、小野薫：鉄筋コンクリートのひびわれ制御に関する2, 3の研究、セメント技術年報1969, pp.557-561