

論文 二次元格子状連続繊維補強材の格子接点強度に関する実験

宇田川貴章*¹ 望月重*² 幸村憲衛*³

要旨：二次元格子状連続繊維補強材（以下、補強材と略す）の付着・定着に対する主な破壊モードは縦筋の横筋に対するずれであり、又ずれに伴い格子接点は面外にふくらむことが明かにされている。本実験での無拘束状態での格子接点の最大耐力はカーボン繊維を成形したカーボン補強材で、265kgf～350kgf、カーボン繊維とガラス繊維を組み合わせ成形したハイブリッド補強材で625kgf～740kgfであるのに対し、面外変位拘束を与えた場合はカーボン、ハイブリッドそれぞれ520kgf～600kgf、1160～1290kgfとなり、既往のコンクリート内の付着・定着実験¹⁾より算定した格子接点最大耐力とほぼ等しい。

キーワード：二次元格子状連続繊維補強材、格子接点、格子接点強度、面外変位拘束

1. はじめに

連続繊維を二次元格子状に成形した補強材の定着は、主に交差する横筋の抵抗によって得ることができ、その耐食性を生かした面材への利用が大きく期待されている。著者らが行ったコンクリート中での補強材の付着・定着に関する実験¹⁾より、補強材の付着・定着機構は、主に交差する横筋の格子接点近傍での曲げ・せん断抵抗および縦筋と横筋が交互に積層している格子接点の複雑な挙動のために、従来の溶接金網とは異なることが示されている。

本研究は、補強材の付着・定着機構をより明らかにするために、無拘束及び面外変位拘束の格子接点の耐力を求める実験を行い、コンクリート中での格子接点のずれ挙動を考察するものである。

2. 実験概要

本研究で対象とする補強材は、カーボン繊維とガラス繊維のトウをビニルエステル樹脂に含浸させた後、縦方向と横方向に、交互に4層ずつ積層させて成形したもの（以下、ハイブリッドと略す）とカーボン繊維のみを同様に成形したもの（以下、カーボンと略す）である。それらは既往の実験¹⁾で用いたものと同一のものである。以下、本研究では、格子接点において、縦筋の層が上になっている面を表面と呼び、横筋の層が上になっている面を裏面と呼ぶことにする。

試験体の形状を図2に示す。試験体は、補強材の一部を切りだしたものであり、試験体の上部には、外径35mm、内径25mmの鋼管に膨張圧 600kgf/cm²の膨張材を充填した掘み部を設けている。

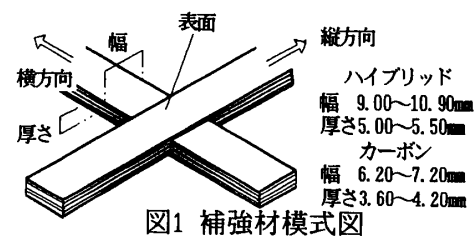


図1 補強材模式図

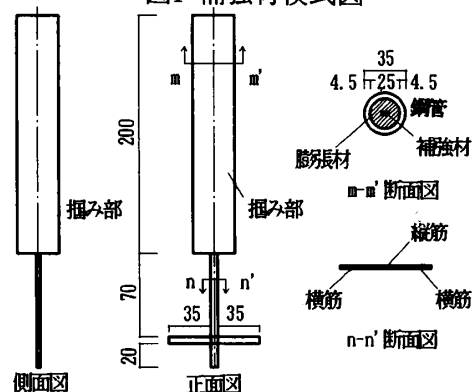


図2 試験体の形状

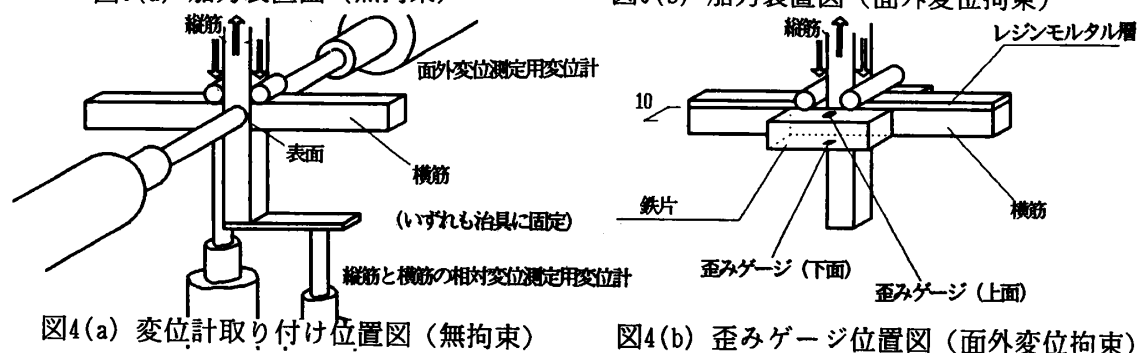
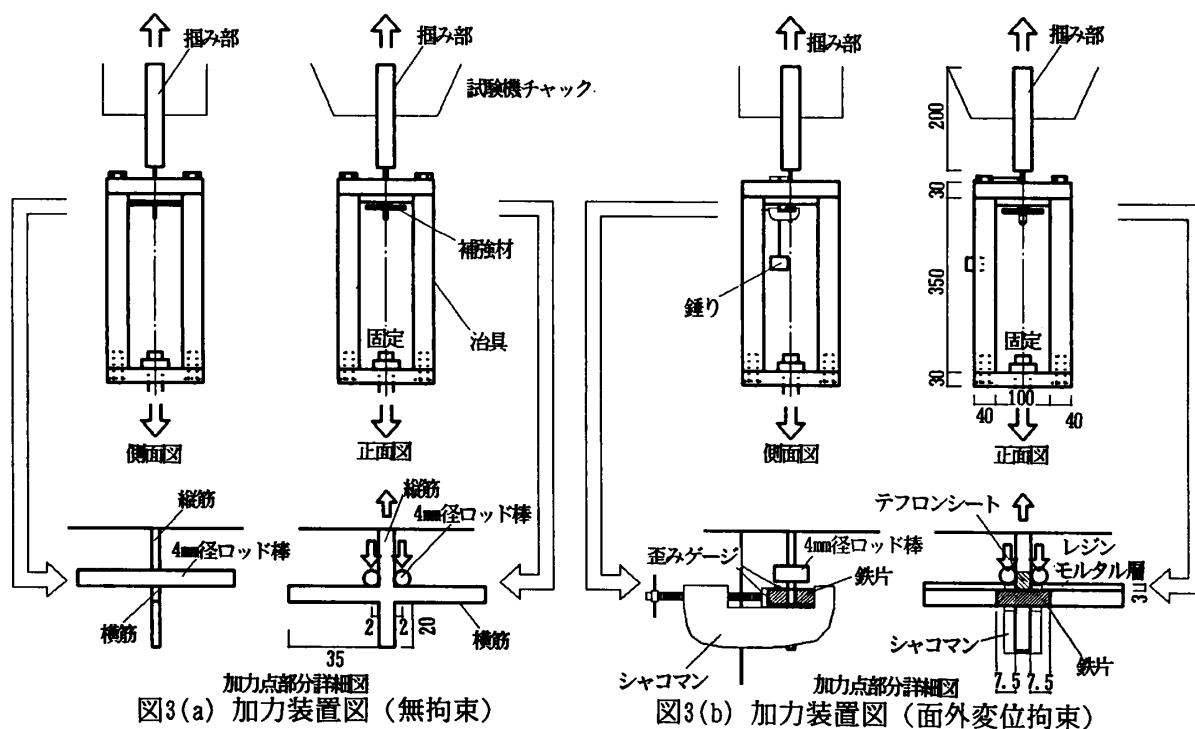
* 1 武蔵工業大学大学院 工学研究科（現 木村俊彦構造設計事務所）（正会員）

* 2 武蔵工業大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

* 3 東急建設株式会社 技術本部 建築技術部（正会員）

まず、無拘束状態下の格子接点強度を求める実験の試験体の加力及び測定方法について述べる。試験体の加力は、図3(a)に示すように、縦筋に上向き、左右の横筋の側面に直径4mmのロッド棒を介して下向きの荷重を与える三点加力としている。ここでロッド棒の中心から縦筋の外縁までの距離は2mmとなる。また横筋の側面は平らでないので、加力が均一に加わるように予め、エポキシ樹脂を塗布してその側面を平らにしてから実験を行っている。測定は、図4(a)に示すように、縦筋の外縁をはさんだ位置での縦筋と横筋の相対ずれ変位（以下、相対ずれ変位と略す）、および格子接点中央の面外方向変位について行っている。

次に面外変位拘束の格子接点強度を求める実験での、試験体の加力、拘束の与え方及び測定方法について述べる。その加力装置図を図3(b)に示す。試験体の加力は、無拘束のそれと同一である。また面外変位拘束は、縦筋と横筋の交差部と縦筋の外縁から左右に7.5mmまでの横筋までを、表・裏面2つの鉄片で覆い、シャコマンでそれらの鉄片を押さえることによって与えている。また予め、鉄片が落ちない程度の最小限の拘束力を加えて実験を行っている。なお、本実験での面外変位拘束を与えた試験体の最大荷重時の表・裏面の面外変位の和は、0.1mm以内（無拘束の最大面外変位1.5mm）であることが確認されている。よって、本実験での変位拘束は、ほぼ完全変位拘束といえる。測定は拘束の度合いを調べるために、図4(b)に示すように、歪みゲージによる鉄片の上面、下面の左右上下中央の位置の歪み度について行っている。また装置の関係上、相対ずれ変位の測定は行うことができなかった。



なお、ロッド棒が拘束用鉄片に触れないように横筋側面には、厚さ3mmのレジンモルタル層を設けている。その際、レジンモルタルと縦筋との粘着を防ぐために、縦筋にはテフロンシートを巻き付けて、レジンモルタルを打設している。試験体数は無拘束のものが、カーボン、ハイブリッド各々4体ずつ、また面外変位拘束を与えたものが、同様にカーボン、ハイブリッド各々4体ずつの計16体である。表1に試験体の構造諸元、及びノギスで測定した補強材の断面寸法を示す。ここで試験体名は、最初の英字が補強材の種類を表しており、Cがカーボン、Hがハイブリッドであり、次の英字が面外変位拘束の有無で、Nが無拘束、Rが面外変位拘束である。そして最後の数字が同一種類の試験体内での番号である。表1に示すように補強材の断面は、カーボンで幅6.20～7.20mm、厚さ3.60mm～4.20mm、ハイブリッドで幅9.00mm～10.90mm、厚さ5.00mm～5.50mmである。猶、補強材の公称断面積は、カーボンで 0.182cm^2 、ハイブリッドで 0.395cm^2 である。表2(a)、(b)に本実験で用いた補強材、鉄片の材料特性を各々示す。また表2(c)に樹脂および繊維の材料特性を示す。

表1 構造諸元及び補強材の断面寸法

試験体名	繊維種類	面外拘束の有無	断面形状(幅×厚さ)(mm)		試験体名	繊維種類	面外拘束の有無	断面形状(幅×厚さ)(mm)	
			縦筋	横筋				縦筋	横筋
C-N-1	カーボン	無し	6.20x4.00	7.10x3.90	H-N-1	ハイブリッド	無し	10.40x5.00	10.55x5.25
C-N-2			6.70x3.95	6.70x4.20	H-N-2			10.90x5.30	10.65x5.05
C-N-3			6.95x3.90	6.90x4.15	H-N-3			9.05x5.50	9.00x5.50
C-N-4			7.45x3.60	6.75x3.95	H-N-4			9.70x5.10	10.90x5.10
C-R-1		有り	6.45x4.15	6.40x4.00	H-R-1		有り	9.10x5.30	10.90x5.40
C-R-2			6.55x4.20	6.40x4.05	H-R-2			9.50x5.40	10.20x5.25
C-R-3			6.60x4.00	6.90x3.60	H-R-3			10.45x5.25	10.60x5.15
C-R-4			7.20x3.90	6.65x3.75	H-R-4			10.45x5.00	9.45x5.45
平均値			6.76x3.96	6.73x3.95	平均値			9.94x5.23	10.28x5.27

表2(a) 材料特性(補強材)

繊維材料	破損*		破断	
	荷重(tf)	歪み度(μ)	荷重(tf)	歪み度(μ)
カーボン			2.31	13400
ハイブリッド	2.18	14500	2.57	24300

*カーボン繊維が破断した時の荷重

表2(b) 材料特性(鉄片)

降伏点強度(kgf/cm ²)	引張強度(kgf/cm ²)	ヤング率($\times 10^6$ kgf/cm ²)	伸び率(%)
3010	4515	1.87	24.5

表2(c) 材料特性

(樹脂、繊維)

	引張強度(kgf/mm ²)	最大引張歪み度(%)	ヤング係数(tonf/mm ²)
カーボン繊維	360	1.5	23.5
ガラス繊維	200	2.8	7.4
ビニルエステル樹脂	8.5	5.4	0.35

3. 実験結果

3. 1 破壊状況

無拘束の試験体については、カーボン、ハイブリッドともに、最大荷重付近（カーボンで約300kgf、ハイブリッドで約600kgf）で、パチッパチッという音が聞かれ、その後しばらく荷重が一定となり、それから徐々に荷重が低下したが、各試験体とも相対ずれ変位が2mmに達するまで載荷を続けている。

一方、面外変位拘束の試験体についても、荷重がカーボンで約300kgf、ハイブリッドで約600kgfを越えてから、パチッパチッという音が聞かれたが、それに伴う荷重の低下はみられず、その後も荷重は増加していき、最大荷重付近（カーボンで約500kgf、ハイブリッドで約1200kgf）では、格子接点をはさんで横筋が、へろの字型に変形することが観察され、その後、徐々に荷重が低下している。また、荷重がカーボンで約450kgf、ハイブリッドで約1000kgfをすぎたところから、ロッド棒がレジンモルタル層に食いこみはじめ、試験体C-R-2、C-R-3、C-R-4、H-R-3、H-R-4では、鉄片の上面のゲージのコードに一部ロッド棒が接した。然し、ゲージのコードはレジンモルタルに比して、十分軟らかいのでその影響は無視できると考えられる。

無拘束の代表的な試験体C-N-1、H-N-1の最大荷重時（相対ずれ変位C-N-1、0.608mm、H-N-1、0.794mm）の破壊状況と実験終了後の最終破壊状況を図5に示す。最大荷重時の破壊状況では、左右の加力点から、縦筋の外縁にかけて局所的な横筋の変形がみられるが、横筋の縦筋に対するずれはみられない。また交差部のずれ以外には、横筋及び縦筋には顕著な繊維の損傷や亀裂は観察されて

いない。一方最終破壊状況では、カーボン、ハイブリッドともに縦筋と横筋の交差部で、縦筋の横筋に対するずれと横筋の局所的な変形がみられ、また交差部中央から交差部下部にかけて、表面層のふくらみも観察されている。ハイブリッドの試験体では、交差部内及び交差部から上下左右に、白化がみられる。既往の研究²⁾よりこれは、樹脂の損傷によって生じていると考えられる。

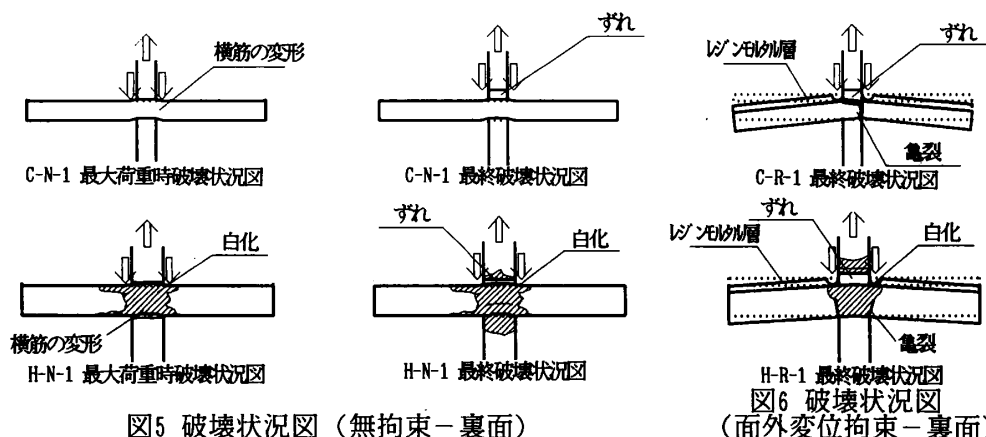


図5 破壊状況図（無拘束－裏面）

図6 破壊状況図（面外変位拘束－裏面）

面外変位拘束を与えた試験体の最終破壊状況図を図6に示す。面外変位拘束を与えた試験体では、縦筋と横筋の交差部で、縦筋の横筋に対するずれと、カーボンでは交差部中央から縦筋の外縁にかけて、ハイブリッドでは縦筋の外縁付近の横筋に亀裂がみられる。これらの破壊状況から、無拘束の試験体の破壊モードは、横筋の縦筋に対するずれであり、また面外変位拘束を与えた試験体の破壊モードは、ずれと横筋の一部破断であると考えられる。

3. 2 格子接点の最大耐力

表3に実験結果一覧を示す。ここで、コンクリート中の格子接点の最大耐力とは、既往の実験¹⁾での横筋が1本の試験体の格子接点の最大耐力の平均値であり、カーボンで756kgf、ハイブリッドで1368kgfである。表3に示すように本実験から得られた無拘束状態での補強材の格子接点の最大荷重は、カーボンで265kgf～350kgfで、ハイブリッドで625kgf～740kgfであり、それぞれ材料特性の破断荷重の0.12～0.15, 0.24～0.29であるのに対し、面外変位拘束を与えた場合は、大きく増加し、カーボンで520kgf～600kgf、ハイブリッドで1160kgf～1290kgfとなり、それぞれ破断荷重の0.

表3 実験結果一覧

試験体名	繊維種類	面外変位拘束の有無	最大荷重(kgf)	(最大荷重)/(補強材破断荷重)	(最大荷重)/(コンクリート中の格子接点最大耐力)	最大荷重時縦筋と横筋の相対ずれ変位(mm)	最大荷重時面外変位(mm)		相対変位2mm時面外変位(mm)		最終破壊状況
							表	裏	表	裏	
C-N-1	カーボン	無し	350	0.15	0.46	0.608	0.218	-0.172	0.912	0.352	横筋のずれ
C-N-2			310	0.13	0.41	0.658	-0.102	0.108	0.242	0.468	"
C-N-3			320	0.14	0.42	0.286	-0.214	0.178	0.418	0.712	"
C-N-4			265	0.12	0.35	0.390	-0.014	0.106	0.304	0.710	"
C-R-1		有り	550	0.24	0.73						ずれと横筋部分破断
C-R-2			600	0.26	0.79						"
C-R-3			520	0.23	0.69						"
C-R-4			540	0.25	0.71						"
H-N-1	ハイブリッド	無し	665	0.26	0.49	0.794	0.132	-0.128	0.520	0.798	横筋のずれ
H-N-2			740	0.29	0.54	0.552	-0.104	0.160	0.120	0.752	"
H-N-3			625	0.24	0.46	0.556	0.382	-0.378	0.864	0.616	"
H-N-4			650	0.25	0.48	0.286	-0.114	0.228	0.352	1.078	"
H-R-1		有り	1210	0.47	0.88						ずれと横筋部分破断
H-R-2			1290	0.50	0.94						"
H-R-3			1160	0.45	0.85						"
H-R-4			1250	0.49	0.91						"

23～0.26, 0.45～0.50となる。また、無拘束の最大荷重に対するコンクリート中での格子接点の最大耐力の比は、カーボンで0.35～0.46、ハイブリッドで0.46～0.54であるのに対し、面外変位拘束の場合は、カーボンで0.69～0.79、ハイブリッドで0.85～0.94となっていることから、コンクリート中での格子接点の最大耐力は、面外変位拘束を与えた場合のそれに近いといえる。

3. 3 荷重－相対ずれ変位関係

図7に無拘束の全試験体の荷重と相対ずれ変位との関係を示す。図中破線は、既往の実験¹⁾より得られたコンクリート中での格子接点の負担力と引き抜け量の関係を表している。なお、面外変位拘束を与えた試験体については、装置の関係上、相対ずれ変位の測定は行うことができなかった。表3に示すように、C-N-3, C-N-4, H-N-4では、他の試験体に比べ、最大荷重時の相対ずれ変位は小さいが、最大荷重までの剛性は、他の試験体とほぼ等しい。本実験での荷重と相対ずれ変位関係と、コンクリート中での格子接点の負担力と引き抜け量の関係を比較すると、本実験の最大荷重付近までは、カーボン、ハイブリッドともに両者の関係はほぼ一致している。しかし、本実験ではその最大荷重以後、荷重が低下し、相対ずれ変位が増大しているのに対し、コンクリート中では、本実験での最大荷重付近で単位の相対ずれ変位に対する荷重の増分は低下するが、その後、引き抜け量の増加に伴い、荷重は増大している。この相違は、コンクリートの拘束によって生じていると考えられる。

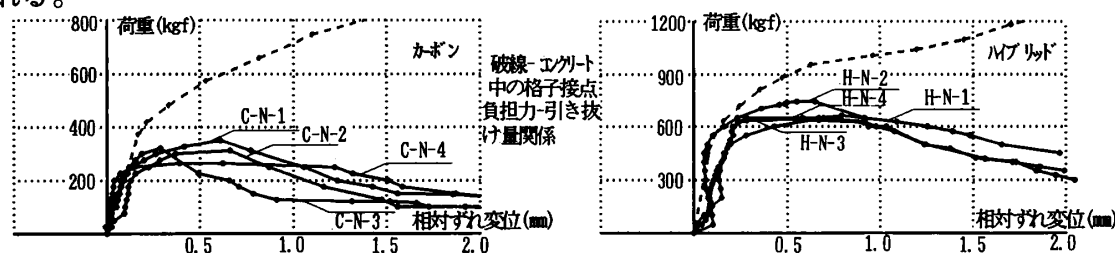


図7 荷重－相対ずれ変位関係（無拘束）

4. 面外変位拘束効果

図8に無拘束の代表的な試験体C-N-1, H-N-1の荷重と格子接点中央での表面と裏面の面外変位との関係を示す。ここで図中破線は、表面と裏面の面外変位の和を表している。補強材が表裏対称でないため、表面と裏面で違いがみられるが、最大荷重以後、表面、裏面とも面外変位が増大していることがわかる。また表3からわかるように各試験体の相対ずれ変位2mm時の表面と裏面の面外変位の和は、カーボンで0.7～1.3mm、ハイブリッドで0.9～1.5mmとなっている。

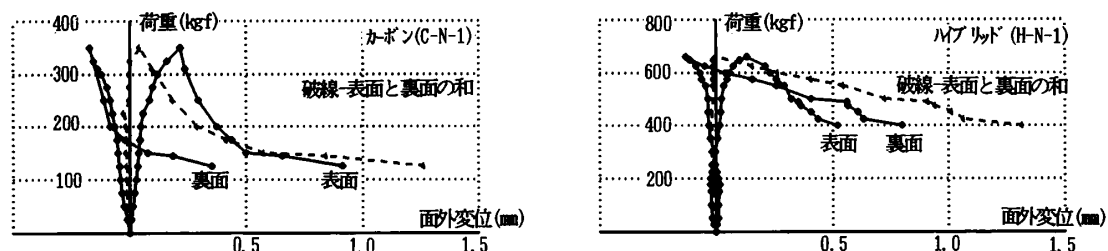


図8 代表的な試験体(C-N-1, H-N-1)の荷重－面外変位関係（無拘束）

図9に無拘束の全試験体の相対ずれ変位と表面と裏面の面外変位の和との関係を示す。ここで、破壊状況より、最大荷重以後の縦筋と横筋の相対変位の増加は、ほぼそのずれ変位の増加に等しいと考えられる。各試験体とも最大荷重以後、相対ずれ変位の増加に比例して、格子接点の面外変位が増加している。これは、補強材の織り型の為に、交差部の約2倍厚いロッド部（縦筋）の各層が、縦筋の横筋に対するずれによって、交差部内に入り込むためであると考えられる。

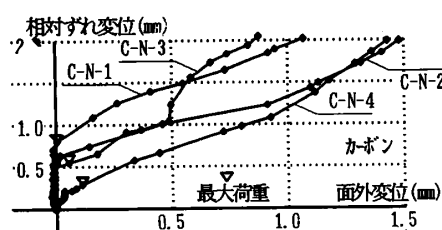


図9 相対ずれ変位—面外変位関係（無拘束）

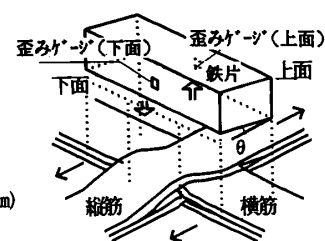


図10 格子接点のふくらみ

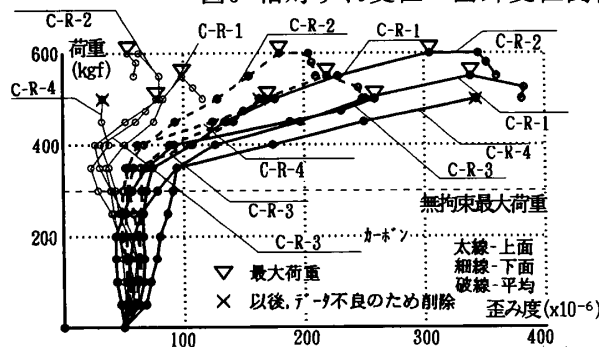


図11 荷重—歪み度（拘束用鉄片）関係（面外変位拘束）

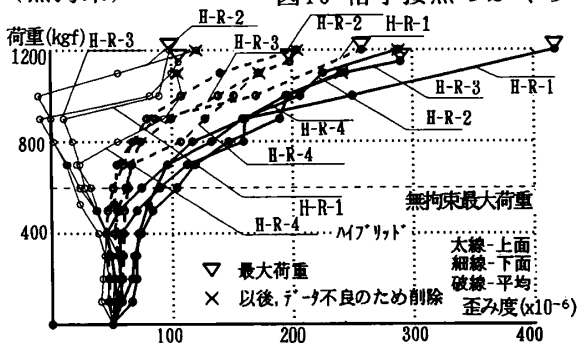


図11に荷重と面外変位拘束の試験体の拘束用鉄片の歪み度との関係を示す。図中太線は上面の歪み度を、細線は下面の歪み度を、また破線はそれらの平均をそれぞれ表している。なお、予め、鉄片が落ちない程度の最小限の拘束力(鉄片の歪み 50μ)を与えてから実験を行っている。無拘束の最大荷重付近から、上面の歪み度は増加しているが、下面の歪み度はほとんど増加していない。これは、図10に示すように、表面層のふくらみが交差部内で均一でなく、交差部中央から下部にかけて大きいため、鉄片が剛体的に回転し、主に上面に圧縮力が作用しているためと考えられる。しかし、上面と下面の歪み度の平均値は、無拘束の最大荷重付近から増加し、最大荷重時には、カーボンで $168\sim 219\mu$ 、ハイブリッドで $198\sim 258\mu$ となり、鉄片のヤング係数をかけて応力に直すと、カーボンで $314\sim 410\text{kgf/cm}^2$ 、ハイブリッドで $370\sim 482\text{kgf/cm}^2$ となる。本実験での面外拘束は均一でないため、これらが格子接点に加わる圧縮応力に等しいとは考えられないが、これらの値に近い圧縮応力が格子接点に作用し、縦筋と横筋の各層の摩擦力が増し、その結果無拘束よりも最大荷重が増加したと考えられる。また図7に示した既往のコンクリート中での実験¹⁾の、無拘束の最大荷重以後の荷重の増加は、コンクリートによる同様の面外変位拘束効果によって生じたと考察される。

5. 結論

- 1) 無拘束状態での補強材の格子接点の破壊モードは、縦筋の横筋に対するずれであり、面外変位拘束を与えた場合は、そのずれと横筋の部分的な破断である。
- 2) 補強材の無拘束状態での格子接点の最大耐力は、カーボン、ハイブリッドそれぞれ $265\sim 350\text{kgf}$ 、 $625\sim 740\text{kgf}$ であるのに対し、面外変位拘束を与えることによりそれらは大きく増加し、それぞれ $520\sim 600\text{kgf}$ 、 $1160\sim 1290\text{kgf}$ となる。
- 3) コンクリート中での格子接点強度は、面外変位拘束を与えた場合のそれに近い。
- 4) 格子接点で縦筋が横筋に対してずれる際、格子接点は面外方向にふくらむ。

謝辞: 補強材を提供して戴いた(株)清水建設に、又膨張材を提供して戴いた(株)小野田に感謝致します。樹脂を提供して戴いた(株)旭ガラスマテックスに、又、貴重な助言をして戴いた同社の林氏に御礼致します。

【参考文献】

- 1) 望月重, 宇田川貴章, 二次元格子状連続繊維補強材の付着・定着について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No.2, pp1141-1146
- 2) 太田浩他, ハイブリッドFRP積層材の曲げ強度, 日本複合材料学会誌, 13, 1(1987), 21-29