

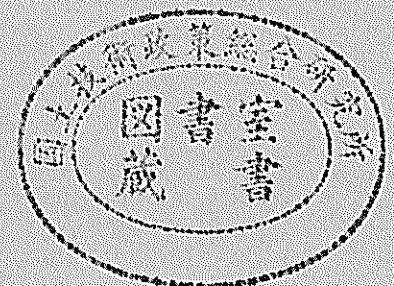
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 36 NO. 2 JUNE, 1997

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第36巻 第2号 (Vol.36, No.2), 1997年6月 (June, 1997)

目 次 (CONTENTS)

1. Stability of Reinforced Retaining Systems under Artificial Gravity
..... Ali PORBAHA 3
2. 兵庫県南部地震におけるニューマチックケーソン式の橋梁基礎の変形に関する有効応力解析
..... Hanlong LIU・井合 進・一井康二・森田年一・岡下勝彦 19
EVALUATION OF DEFORMATION TO THE PNEUMATIC CAISSON
FOUNDATIONS OF THE KOBE OHASHI BRIDGE
Hanlong LIU, Susumu IAI, Koji ICHII, Toshikazu MORITA, Katsuhiko OKASHITA
3. 兵庫県南部地震におけるケーソン式岸壁の挙動の有効応力解析
..... 一井康二・井合 進・森田年一 41
Effective stress analyses on the performance of caisson type quay walls during
1995 Hyogoken-nanbu earthquake
Koji ICHII, Susumu IAI, Toshikazu MORITA
4. 鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性
..... 山田昌郎・清宮 理 87
Pure Torsional Properties of Composite Members Composed of Steel Plate and Concrete
Masao YAMADA, Osamu KIYOMIYA

鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性

山 田 昌 郎*
清 宮 理**

要 旨

最近、港湾構造物に鋼板・コンクリート合成部材が使用されるようになった。本研究ではこの種の合成部材の基本的なねじり特性を検討した。静的載荷実験として、RC、オープンサンドイッチ、およびサンドイッチ構造の供試体（断面寸法25cm×100cm、長さ200cm）に純ねじりを載荷した。RC供試体とオープンサンドイッチ供試体には2方向に同量の鉄筋を配置し、供試体ごとに鉄筋比を変化させた。解析方法として、RCはりを対象にしたHsuの軟化トラス理論を、合成部材に拡張して用いた。本研究の解析方法により、純ねじりを受ける鋼板・コンクリート合成部材の変形、ひずみ、ひび割れ幅等の性状を解析的に予測できることが、実験結果との比較から判明した。

キーワード：合成部材、RC部材、ねじり耐力、ねじれ率、ひずみ、ひび割れ

* 構造部 主任研究官

** 構造部 構造強度研究室長

Pure Torsional Properties of Composite Members Composed of Steel Plate and Concrete

Masao YAMADA*
Osamu KIYOMIYA**

Synopsis

Recently steel concrete composite members are used for port structures. Basic torsional properties of the composite members were discussed in this study. Pure torsion was applied to test specimens (dimensions of cross section : 25cm × 100cm, length : 200cm) of reinforced concrete, open sandwich, and sandwich types. Steel bars were arranged equally in two directions for reinforced concrete and open sandwich specimens, and the amount of the steel bars was varied for each specimen. Hsu's softened truss model theory for reinforced concrete beams was extended for composite members and used in the analysis. Comparing the analysis results with the test results, it was found that deformation, strain, crack width and other properties of steel plate concrete composite members subjected to pure torsion could be predicted with the analysis method.

Keywords : composite member, reinforced concrete member, torsional capacity, twist, strain, cracking

* Senior Research Engineer, Structural Engineering Division

** Chief of Structural Mechanics Laboratory, Structural Engineering Division

目 次

要 旨

1. まえがき	91
2. 実験方法	92
2.1 供試体	92
2.2 載荷方法	96
2.3 計測方法	98
3. 実験結果	105
3.1 ねじれ率	105
3.2 ひずみ	107
3.3 ひび割れ	115
4. 解析方法	118
4.1 既往の解析方法と本研究の関係	118
4.2 RC部材	118
4.3 サンドイッチ部材	122
4.4 オープンサンドイッチ部材	124
5. 実験結果と解析結果の比較	126
5.1 RC部材	126
5.2 サンドイッチ部材	129
5.3 オープンサンドイッチ部材	130
5.4 ひび割れ幅	133
6. 結 論	139
7. あとがき	139
謝 辞	140
参考文献	140
記号表	140

1. まえがき

最近、港湾構造物を構成する板部材として、鋼板とコンクリートの合成部材が使用されるようになった。合成部材の種類としては、オープンサンドイッチ部材（図-1.1）やサンドイッチ部材（図-1.2）が多く用いられている。

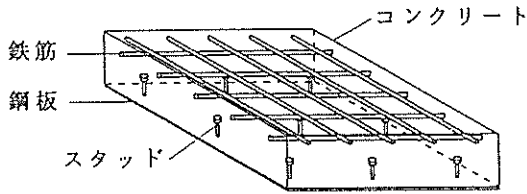


図-1.1 オープンサンドイッチ部材

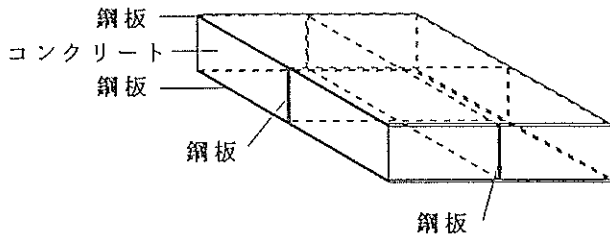


図-1.2 サンドイッチ部材

オープンサンドイッチ部材は、コンクリート板の片面を鋼板で補強し、片面を鉄筋で補強した部材である。鋼板とコンクリートの界面のずれ止め（シアコネクタ）として、頭付きスタッドや形鋼が用いられる。

サンドイッチ部材（フルサンドイッチ部材とも呼ぶ）は、コンクリート板の両面を鋼板で補強した部材である。鋼板を溶接して製作した鋼殻に、締め固め不要の高流動コンクリートを充填して製作する。

合成部材を用いる港湾構造物は、防波堤や護岸用のケーソン、沈埋トンネルの函体などである。これらの構造物には従来は鉄筋コンクリート（RC）部材が使用されている。種々の要因により、RC部材の代わりに合成部材を用いる方が総工費を削減できる場合がある。これは、合成部材の強度と靱性が大きいこと、鉄筋工や型枠工を削減できることなどによる。

合成版式ケーソン¹⁾（ハイブリッドケーソン²⁾とも呼ぶ）では、側壁、底版、フーチング等にオープンサンドイッチ部材を使用する（図-1.3）。合成版式ケーソンは、昭和63年に横浜大黒埠頭の護岸ケーソンに採用されて以来、

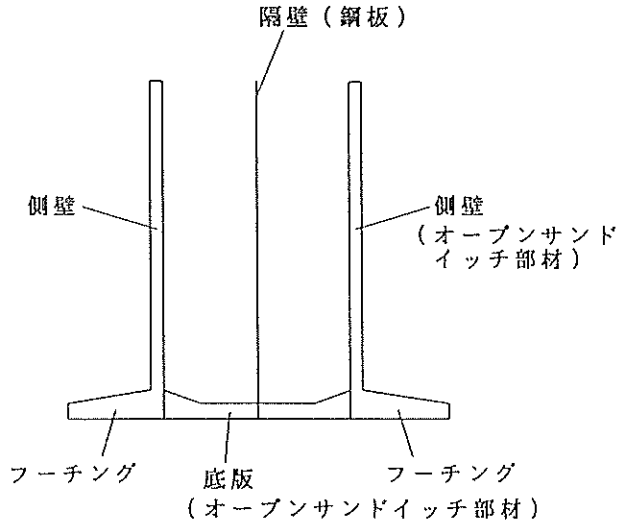


図-1.3 合成版式ケーソンの断面の一例

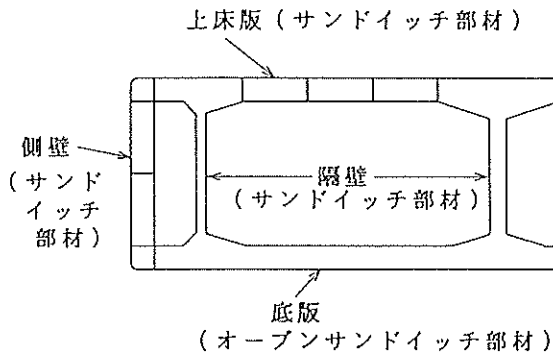


図-1.4 合成構造を用いた沈埋トンネルの断面の一例

現在まで護岸で総延長約1100m、防波堤で総延長約300mが、完成あるいは建設中である。

大阪南港トンネル³⁾、神戸港島トンネル⁴⁾等の沈埋トンネルにも、合成部材が採用されている。大阪南港トンネルでは、下床版と側壁にオープンサンドイッチ部材が使用された。神戸港島トンネルでは、上床版、側壁、隔壁にサンドイッチ部材、下床版にオープンサンドイッチ部材が使用された（図-1.4）。衣浦港や那覇港で計画中の沈埋トンネルでも合成部材の採用が検討されている。

一般に板部材には断面力として、面内軸力、面内せん断力、面外曲げモーメント、ねじりモーメントが生じる。鋼板とコンクリートを合成した板部材についても同様である。面外曲げモーメントを受ける合成部材の力学特性は、これまでの研究でかなり明らかにされている⁵⁾。し

かし、面内軸力、面内せん断力、あるいはねじりモーメントを受ける合成部材の力学特性については検討例が少ない。

港湾構造物の設計では、ねじりに関する検討を通常省略している。しかし合成部材を用いた大型構造物では、無視できないねじりモーメントが作用する場合がある。構造物の大型化にともない、浮遊時の波浪、設置後の軟弱地盤の不同沈下、マウンドの不陸などによる作用ねじりモーメントが増大するためである。

例えば1992年に高知港に設置された長さ100mの長大ケーソンの構造設計では、ねじりに対する安全性が重要な検討課題とされた。著者らは模型載荷実験を行って安全性を検討した⁹⁾。実験は開放断面を有する長さ5mの模型ケーソンを用いて行った。その解析において、合成板要素のねじり特性に関する基礎的な研究が不足していることを認識した。このことが本研究を行う動機となっている。

本研究は、特定の構造物を対象を限定しない基礎的な研究であり、ねじりを受ける鋼板・コンクリート合成部材の変形、ひび割れ、破壊などの挙動を解析的に予測することを研究の目的としている。ねじり特性が予測できれば、大きなねじりモーメントが作用するような構造形式を自由に採用し、これを合理的に設計することが可能となる。

本研究ではまずRC構造、オープンサンドイッチ構造、およびサンドイッチ構造の板供試体のねじり載荷実験を行い、変形と破壊の状況を把握する。とくにRCとオープンサンドイッチについては、鉄筋比をパラメータとして実験を行う。そして得られた実験結果を、RCはりのねじりに関する既往の解析手法を応用して再現できるかどうか検討する。

なお、本研究では、純ねじりを対象としている。すなわち、板部材に生じ得る断面力のうち、面内軸力、面内せん断力、面外曲げモーメントが0で、ねじりモーメントだけが0でない場合を対象としている。また、RC部材とオープンサンドイッチ部材の鉄筋について、等方配筋の場合を対象としている。すなわち、直交する2方向の鉄筋の断面積、弾性係数、降伏強度、配置間隔等が等しい場合を対象としている。

2. 実験方法

2.1 供試体

(1) 供試体の構造

表-2.1に供試体の種類を示す。鉄筋の径と間隔が異なる9体のオープンサンドイッチ供試体、鉄筋の間隔が

異なる3体のRC供試体、および1体のサンドイッチ供試体をねじり載荷実験に用いた。

オープンサンドイッチとRCのいずれの供試体でも、鉄筋表面までのかぶりは25mmとした。また鉄筋を曲げ加工する際の曲率半径は、鉄筋径の2.5倍とした。

鉄筋としてD22を用いた3体のオープンサンドイッチ供試体の構造を図-2.1~2.3に示す。いずれのオープンサンドイッチ供試体でも、公称厚さ6mm、実測厚さ5.80mmの鋼板を使用した。またずれ止めとして、直径16mm、長さ100mmの頭付きスタッドを、30cm間隔で鋼板に溶接した。

鉄筋を鋼板に定着する際、溶接すると鋼板にひずみが生じて除去できない恐れがあったため、ナットを用いて定着した。鉄筋の端部をねじ状に加工し、D22ではM20、D19ではM16、D16ではM14のナットを用いて鉄筋を鋼板に定着した。ただし後述するようにねじり載荷の際に供試体を載荷フレームで挟む必要があったため、載荷フレームに接する箇所では鉄筋を鋼板に溶接した。

表-2.1 供試体の種類

供試体名	鉄筋		鋼板
	呼び名	間隔 (mm)	公称厚さ (mm)
OS-22-200	D22	200	6
OS-22-150	D22	150	6
OS-22-100	D22	100	6
OS-19-200	D19	200	6
OS-19-150	D19	150	6
OS-19-100	D19	100	6
OS-16-200	D16	200	6
OS-16-150	D16	150	6
OS-16-100	D16	100	6
RC-19-200	D19	200	なし
RC-19-150	D19	150	なし
RC-19-100	D19	100	なし
SW-4.5	なし		4.5

OS: オープンサンドイッチ供試体

RC: RC供試体

SW: サンドイッチ供試体

鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性

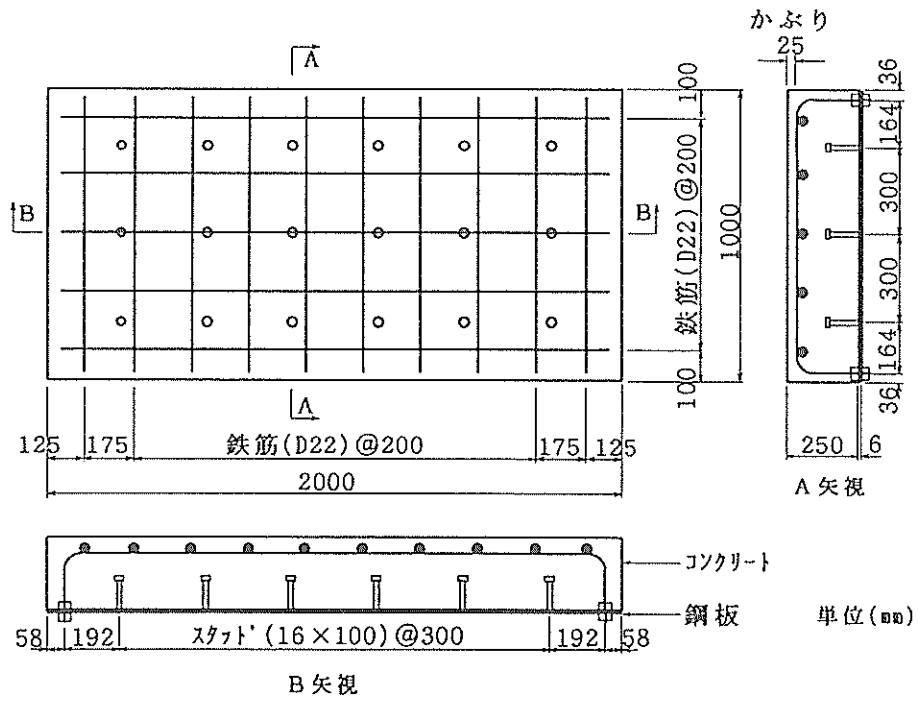


図-2.1 オープンサンドイッチ供試体 OS-22-200の構造

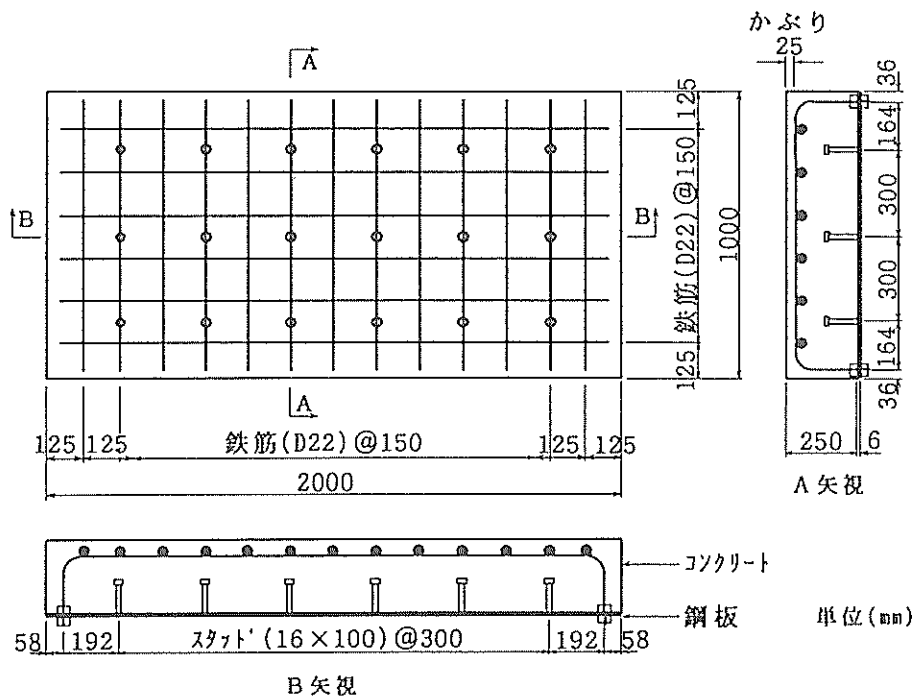


図-2.2 オープンサンドイッチ供試体 OS-22-150の構造

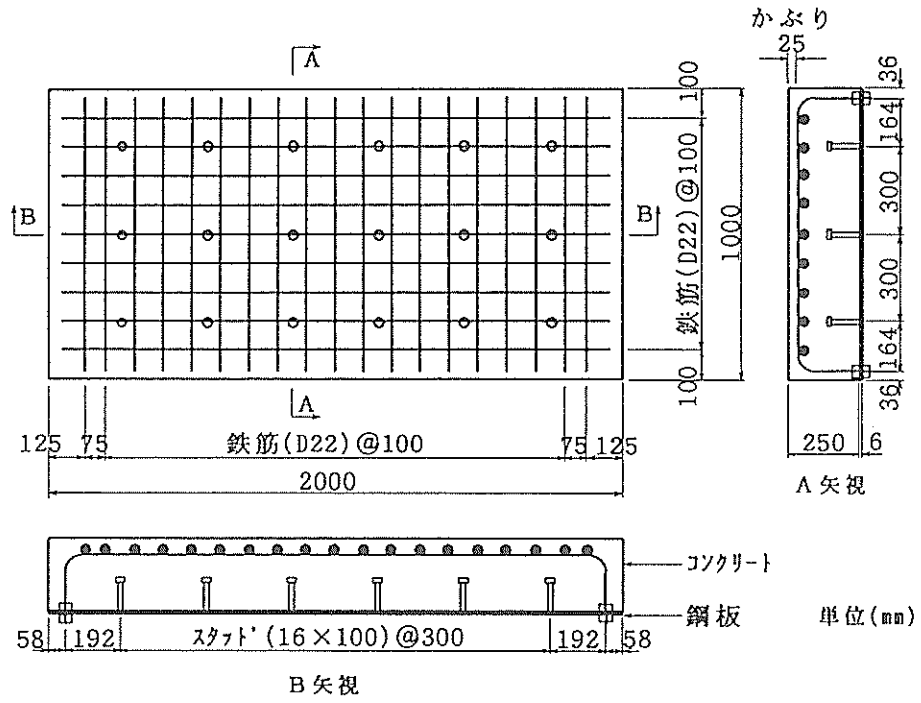


図-2.3 オープンサンドイッチ供試体 OS-22-100の構造

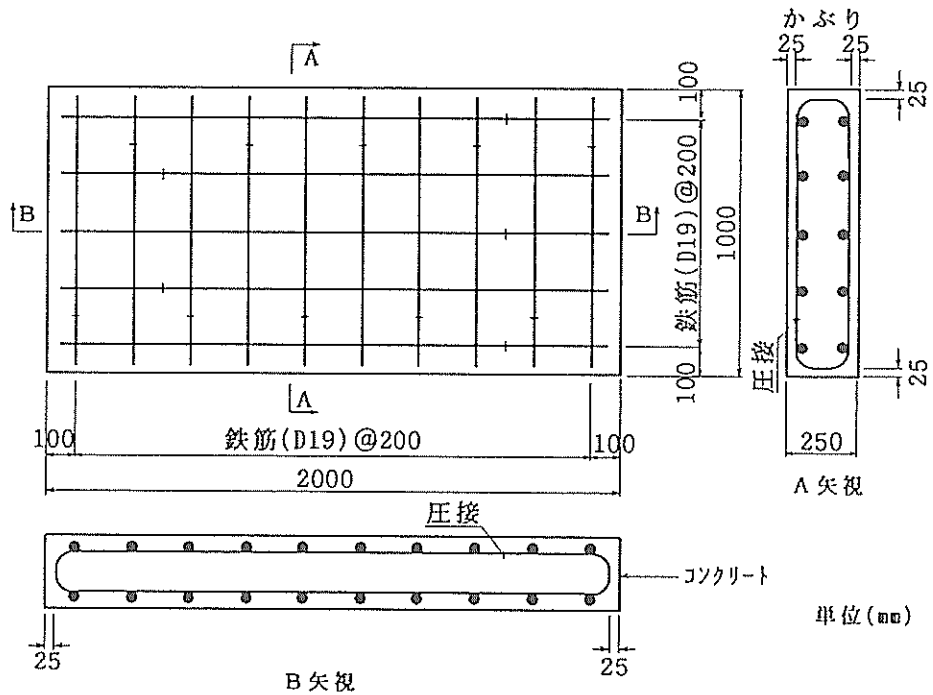


図-2.4 RC供試体 RC-19-200の構造

鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性

供試体RC-19-200の構造を図-2.4に示す。RC供試体の鉄筋は、圧接によりリング状に加工した。供試体SW-4.5の構造を図-2.5に示す。サンドイッチ供試体の鋼殻は、0.25m×1m×2mの直方体の内部に、隔壁を0.5m間隔で配置した構造とした。溶接は脚長4mmの隅肉溶接とした。使用した鋼板の厚さは、公称値4.5mm、実測値4.27mmであった。下面の鋼板と隔壁と側壁をまず組み立て、その中にコンクリートを打設した。打設後上面の鋼板(495.5mm×4.5mm×495.5mm、8枚)を隔壁と側壁に溶接

した。スタッドは使用しなかった。

(2) 使用材料の特性

鋼材の引張試験を、JIS Z 2241 (金属材料引張試験方法)に従って行った。試験片のひずみは、ひずみゲージを鋼材表面に貼り付けて計測した。ゲージ貼付前の鋼材表面の研磨方法は、実験供試体に使用した鋼材にゲージを貼る際の研磨方法と同一とした。各鋼材について3本の試験片を試験し、得られた値を平均した結果を、表-2.2と表-2.3に示す。

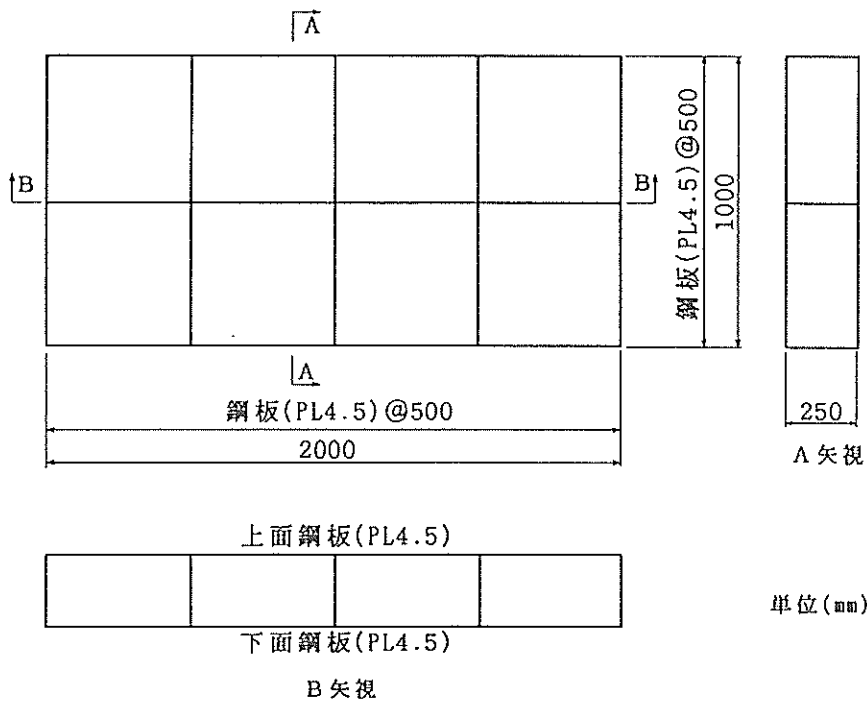


図-2.5 サンドイッチ供試体 SW-4.5の構造

表-2.2 鋼板の引張試験結果

種類	実測厚 (mm)	降伏強度 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)	ポアソン比	降伏 ひずみ	せん断弾性 係数 (kgf/mm ²)
公称厚4.5mm	4.27	35.0	43.5	2.11×10 ⁴	0.28	0.00166	0.82×10 ⁴
公称厚6mm	5.80	32.6	46.7	2.11×10 ⁴	0.28	0.00155	0.82×10 ⁴

表-2.3 鉄筋の引張試験結果

種類	規格	公称断面積 (cm^2)	降伏強度 (kgf/mm^2)	引張強度 (kgf/mm^2)	弾性係数 (kgf/mm^2)	伸び (%)	降伏 ひずみ
異形鉄筋 D16	SD345	1,986	36.0	52.6	2.12×10^4	14	0.00170
異形鉄筋 D19	SD345	2,865	36.6	53.9	2.08×10^4	14	0.00176
異形鉄筋 D22	SD345	3,871	38.8	56.6	2.08×10^4	14	0.00187

表-2.4 コンクリートの配合

呼び強度 (kgf/cm^2)	スランプ (cm)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメ ント比 (%)	単 位 量 (kg/m^3)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
210	18	20	60	172	287	861	975	2.870

使用材料 セメント：早強ポルトランドセメント（比重3.14）
 細骨材：千葉県君津産 山砂（粗粒率2.65 表乾比重2.60）
 粗骨材：高知県鳥形山産 砕石（実積率61.0 表乾比重2.70）
 混和剤：AE減水剤標準形1種

表-2.5 コンクリート強度試験結果

圧縮強度 (kgf/cm^2)	弾性係数 (kgf/cm^2)	ポアソン比	引張強度 (kgf/cm^2)
363	3.30×10^5	0.20	29.7

表-2.4にコンクリートの配合を示す。載荷実験は材齢87日から115日の間に行った。供試体と同一条件で養生した直径10cm高さ20cmの円柱管理供試体を用いて、圧縮試験と引張試験を行った。静弾性係数（ヤング係数）は、JSCE-G 502（コンクリートの静弾性係数試験方法（案））に準じて、単調増加載荷により求めた。ひずみの測定には、コンプレッソメータを用いた。縦方向と横方向のひずみを測定し、ヤング係数とポアソン比を求めた。圧縮強度は、静弾性係数測定に用いた同じ供試体を用いて、JIS A 1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）に従って求めた。引張試験の方法は、JIS A 1113（コンクリートの引張強度試験方法）に従い、円柱供試体の側面に加圧し割裂破壊させて引張強度を求めた。圧縮、引張各3本の円柱供試体の試験結果の平均値を表-2.5に示す。

2.2 載荷方法

図-2.6に載荷装置の概要を示す。載荷フレームは箱形断面を有する鋼桁とPC鋼棒から成る。鋼桁の断面寸

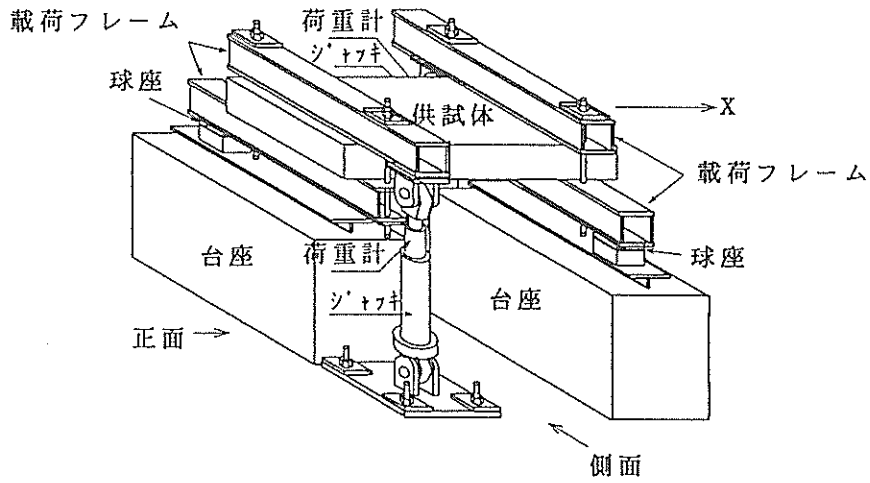
法は270mm×250mm、長さは1590mmとした。鋼桁のフランジの厚さは25mm、ウェブの厚さは16mmとした。鋼桁の材料はSM490材を用いた。上下2本の鋼桁を供試体を挟むように取り付け、PC鋼棒（φ32）とナットで固定した。

下側の鋼桁の下部には半径100mmの凸面を取り付けた。この凸面を、半径100mmの凹面を有する支点上に置いた。支点は、平面図の左上と右下の2箇所とした。支点の凹面座は、高さ900mmのコンクリート製の台座に埋め込んだH形鋼にボルトで取り付けた。平面図の左下と右上の2箇所、上側の鋼桁の下部に、荷重計付きジャッキを取り付けた。鋼桁と荷重計の接合部には球面ジョイントを用いた。また、ジャッキの反力床への取付部にも同様の球面ジョイントを用いた。

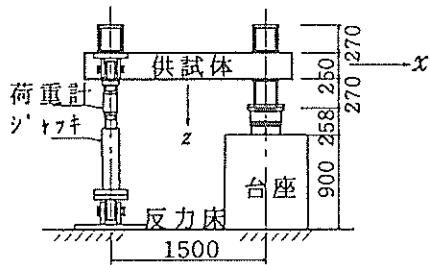
ジャッキとしては、押し引き両用油圧ジャッキ（容量：押し35tf、引き50tf）を2台使用した。油圧ポンプとして、手動油圧ポンプ（有効貯油量6ℓ）を1台使用し、油圧ホースを分岐させて2台のジャッキを操作した。ジャッ

鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性

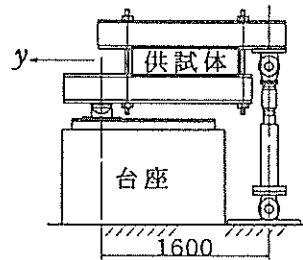
俯瞰図



側面図



正面図



注) 側面図、正面図では、手前のジャッキ・台座のみ示し、他の一組のジャッキ・台座を省略している。

平面図

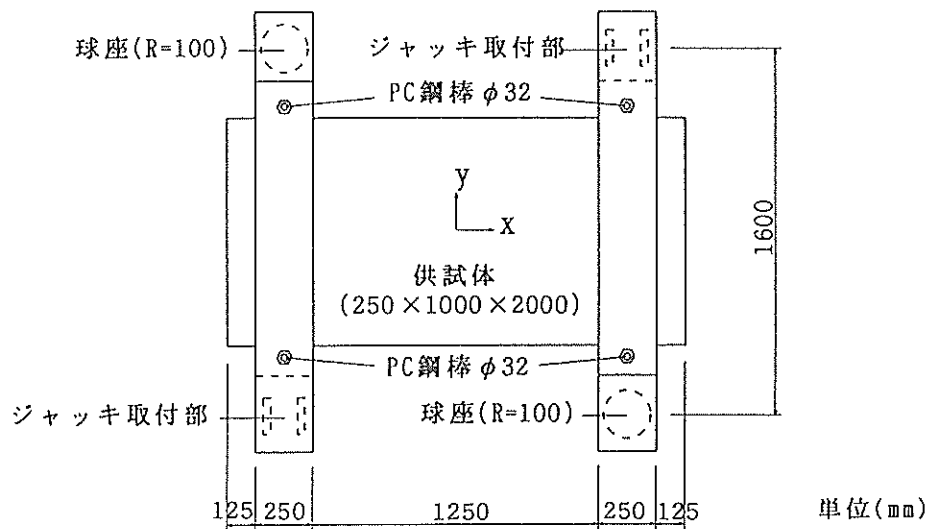
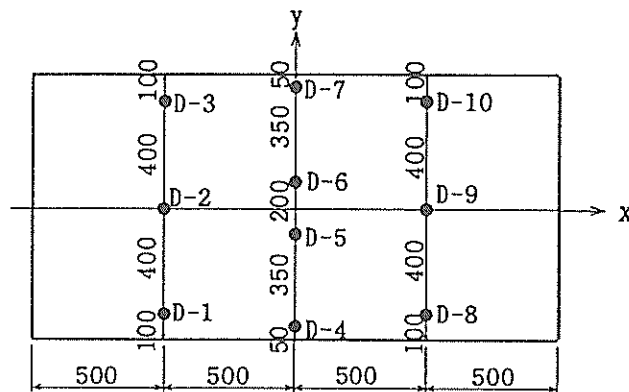


図-2.6 ねじり载荷装置の概要

表-2.6 計測項目

計測項目	計測器	計測点数	計測器の仕様	計測値を基にして間接的に求めた量
荷重	荷重計	2	引張圧縮両用型 容量50tf 感度 $40 \times 10^{-6}/tf$	ねじりモーメント
変位	変位計	10	容量50mm 感度 $200 \times 10^{-6}/mm$	ねじれ率
ひずみ	ひずみゲージ	鉄筋 22または26 (OS) 40または48 (RC)	ゲージ長3mm	鉄筋の平均ひずみ
		コンクリート 7 (OS) 12 (RC)	3軸 (45度/90度) ゲージ長60mm	圧縮ひずみ (45度方向)
		鋼板 5 (OS) 14 (SW)	3軸 (45度/90度) ゲージ長3mm	鋼板の面内せん断ひずみ
		スタッド 6 (OS-22-200)	ゲージ長3mm	
ひび割れ幅	π ゲージ	13 (OS, RC)	標点距離100mm 容量 $\pm 5mm$ 感度約 $1000 \times 10^{-6}/mm$	引張ひずみ (45度方向)

図-2.7 変位計設置位置



単位 (mm)

キで2本の鋼桁を同時に下向きに引き下げることにより、供試体にねじりモーメントを載荷した。

平面図に示すように、供試体の長手方向（長さ2000mmの辺の方向）にx軸をとる。また、長さ1000mmの辺の方向にy軸をとる。支点とジャッキの中心間のx軸方向の距離は1500mm、y軸方向の距離は1600mmとした。

ジャッキの引張力が3tf, 6tf, 12tf, 24tfに達した時点で除荷・再載荷を行った。荷重が最大値に達したあと除荷し、載荷を終了した。

2.3 計測方法

計測項目、計測器、計測点数、計測器の仕様、および計測値を基にして間接的に求めた量を表-2.6に示す。

荷重はジャッキに取り付けた荷重計によって計測した。荷重に1.6mを掛けた値をx軸まわりのねじりモーメントとした。

変位計を図-2.7に示す位置に設置した。D-1とD-3の変位の差から $x = -500mm$ の位置での回転角を求め、D-8とD-10の変位の差から $x = 500mm$ の位置での回転角を求め、これらの回転角の差から、単位長さあたりの回転角の変化量としてのねじれ率を求めた。x軸、y軸上の6台の変位計 (D-2, D-4~7, D-9) は、予備として取り付けたものであり、ねじれ率の算定に用いなかった。

鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性

ひずみの計測に関しては、基本的に $x=0$ の断面におけるひずみを計測するようにゲージを配置した。オープンサンドイッチ供試体で鉄筋間隔が200mm, 150mm, 100mm

の場合の鉄筋ひずみ計測位置をそれぞれ図-2.8, 2.9, 2.10に示す。RC供試体で鉄筋間隔が200mmの場合の鉄筋ひずみ計測位置を図-2.11に示す。

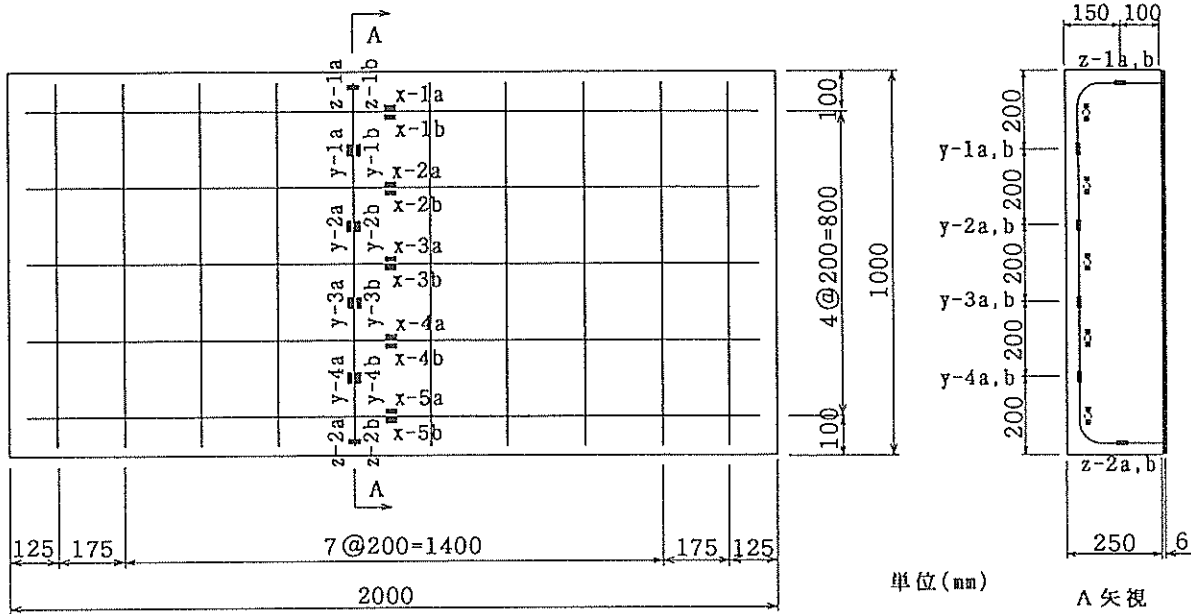


図-2.8 鉄筋ひずみ計測位置 (供試体 OS-22-200, OS-19-200, OS-16-200)

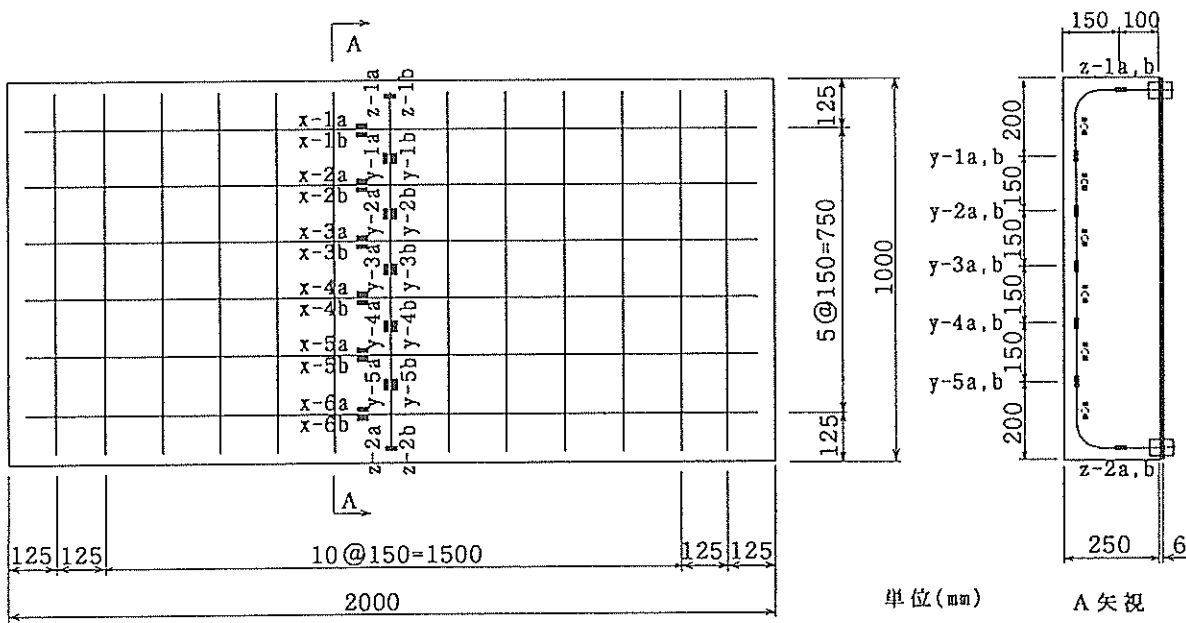


図-2.9 鉄筋ひずみ計測位置 (供試体 OS-22-150, OS-19-150, OS-16-150)

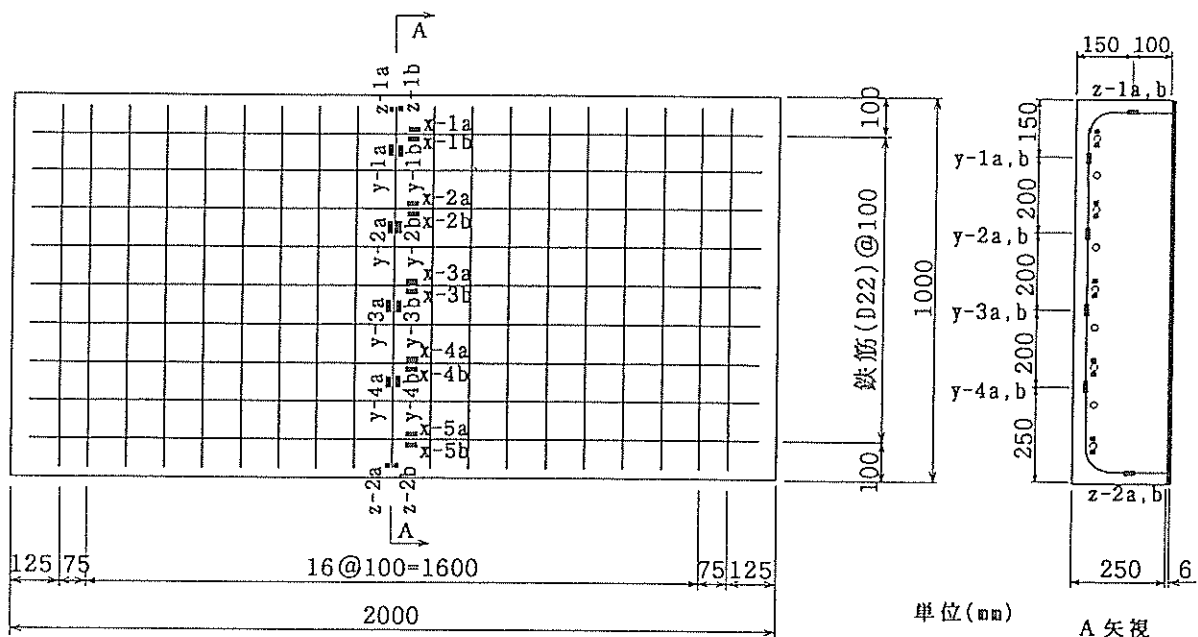


図-2.10 鉄筋ひずみ計測位置 (供試体 OS-22-100, OS-19-100, OS-16-100)

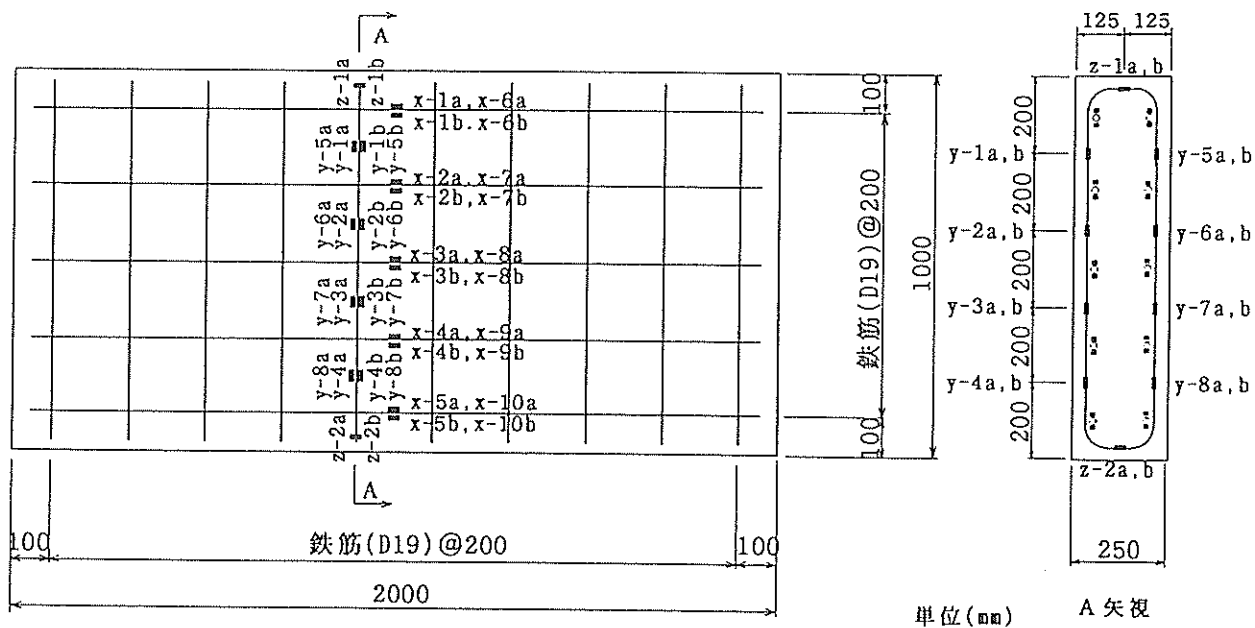


図-2.11 鉄筋ひずみ計測位置 (供試体 RC-19-200)

供試体OS-22-200のみスタッドのひずみを計測した。計測位置を図-2.12に示す。鉄筋とスタッドには計測位置1箇所あたり表裏2枚のひずみゲージ(a, b)を、コンクリート打設前に設置した。

図-2.13に、オープンサンドイッチ各供試体のコンクリートと鋼板のひずみ計測位置を示す。3軸ゲージとして、45度/90度ゲージを使用した。45度方向(d方向)のゲージは、コンクリートでは、ねじりによって最小主

鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性

ひずみ（主圧縮ひずみ）が生じる方向に設置し、鋼板では、ねじりによって最大主ひずみ（主引張ひずみ）が生じる方向に設置した。

図-2.14に、RC各供試体のコンクリートのひずみ計測位置を示す。また、図-2.15に、サンドイッチ供試体の鋼板のひずみ計測位置を示す。サンドイッチ供試体では内部に隔壁がある位置を避けてひずみゲージを配置した。このため $x=0$ の断面ではなく、 $x=-250\text{mm}$ の断面でひずみを計測した。

オープンサンドイッチとRCの各供試体の上面のコンクリート表面に、図-2.16のように π ゲージを設置した。

π ゲージは変位計の一種であり、標点間の距離の変化を計測する。標点間にひび割れが1本生じたとき、 π ゲージによる変位計測値はひび割れ幅とほぼ等しい。

図-2.6の荷重装置では、荷重フレームを取り付けた供試体を支点上に載せた時点で、重力によるねじりが供試体に生じる。供試体と荷重フレームの合計重量のOに相当する力を各ジャッキで上向きに荷重した状態が、ねじりモーメント0の状態である。この状態で計測値の初期値（イニシャル）を取り、その後荷重を開始した。

計測データは、荷重増分0.5tfごとに取得した。また荷重増分1tfごとに、ひび割れ状況を観察して記録した。

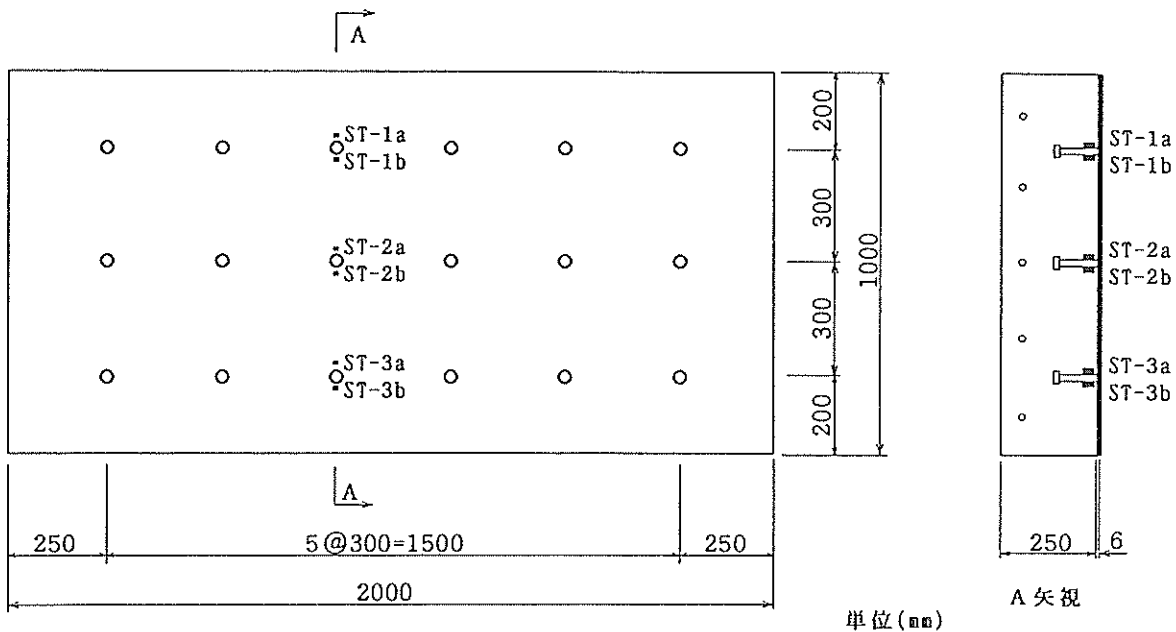
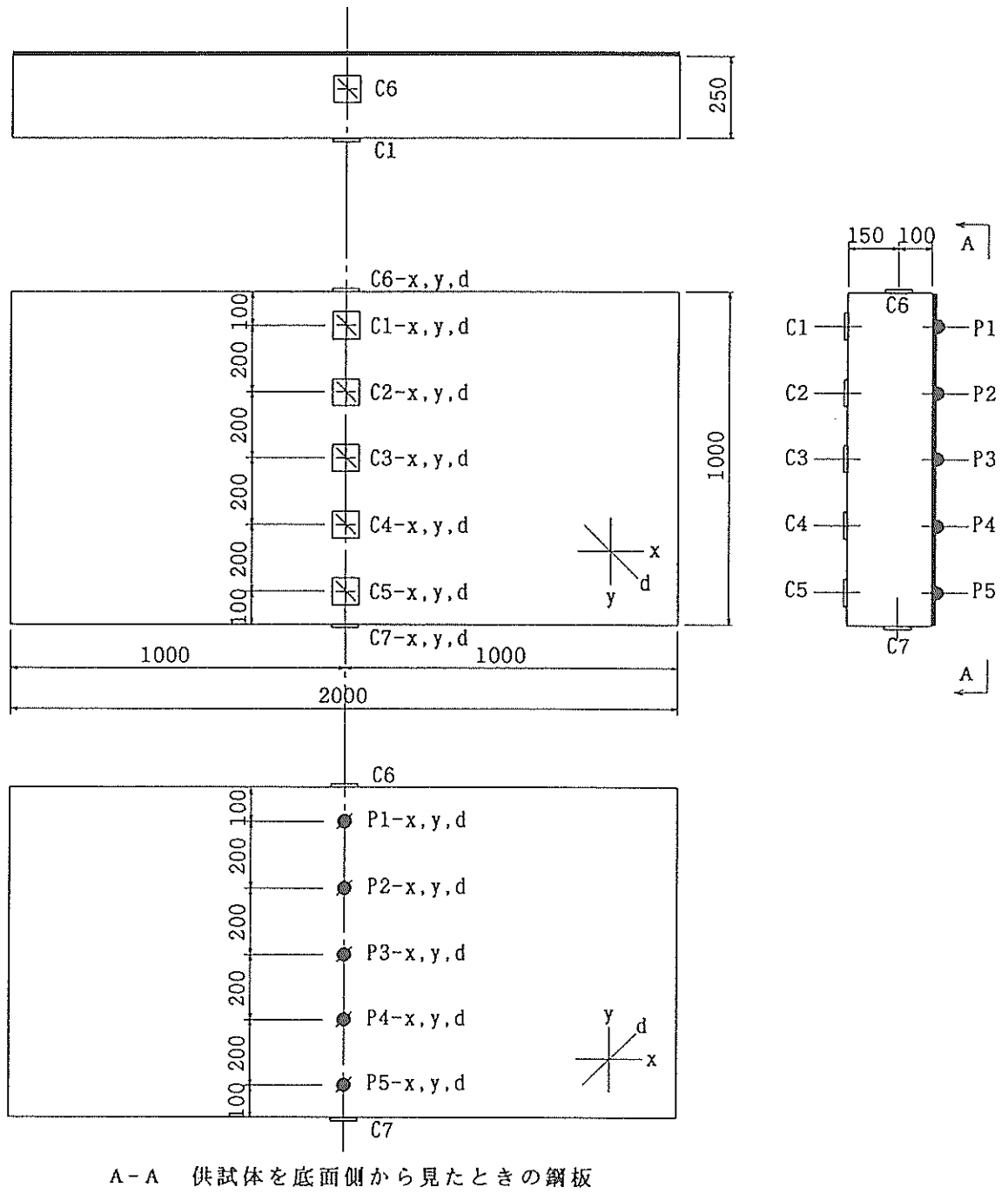


図-2.12 スタッドのひずみ計測位置（供試体 OS-22-200）



☒ コンクリートひずみゲージ

● 鋼板ひずみゲージ

図-2.13 コンクリートと鋼板のひずみ計測位置 (OS各供試体共通)

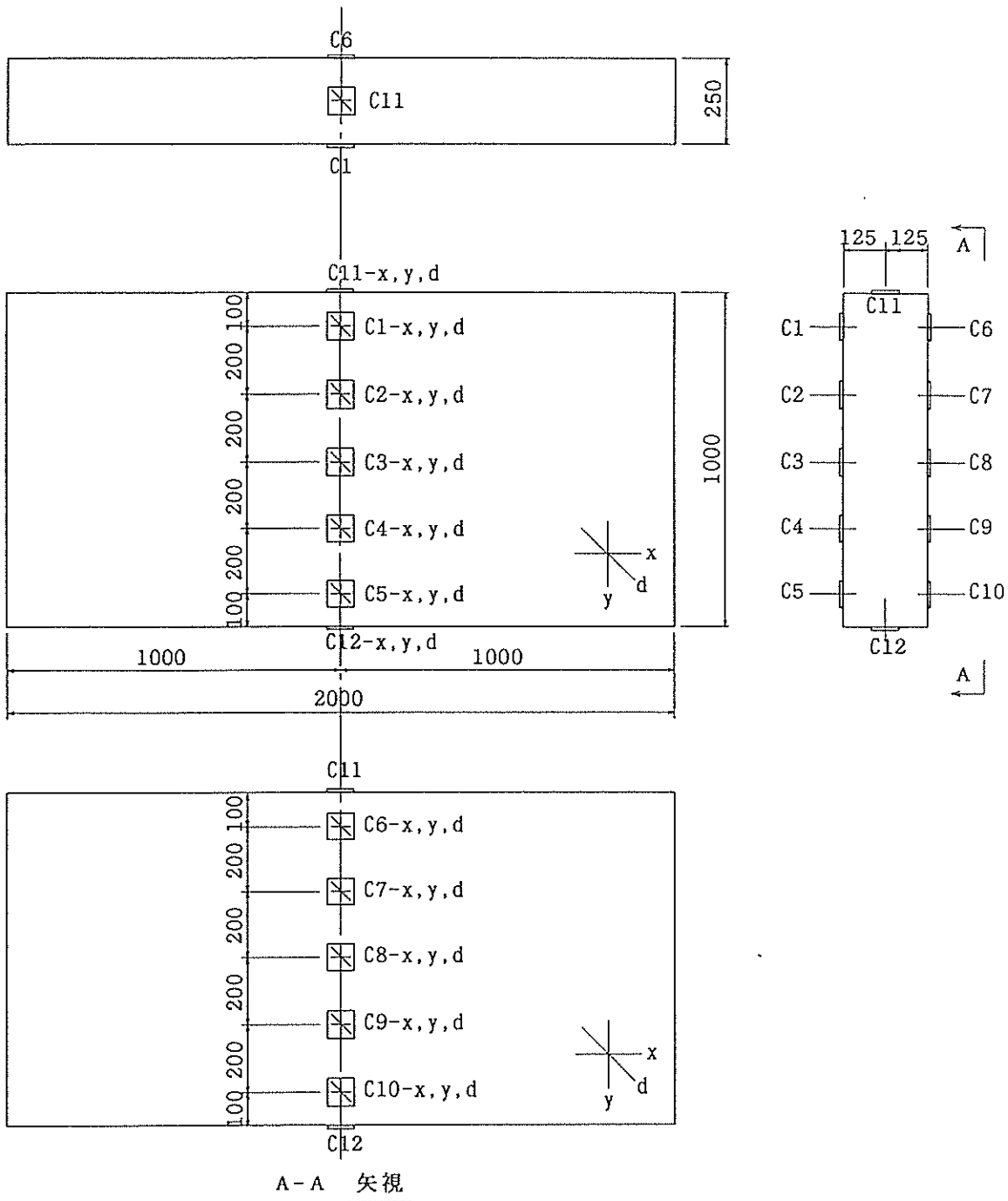
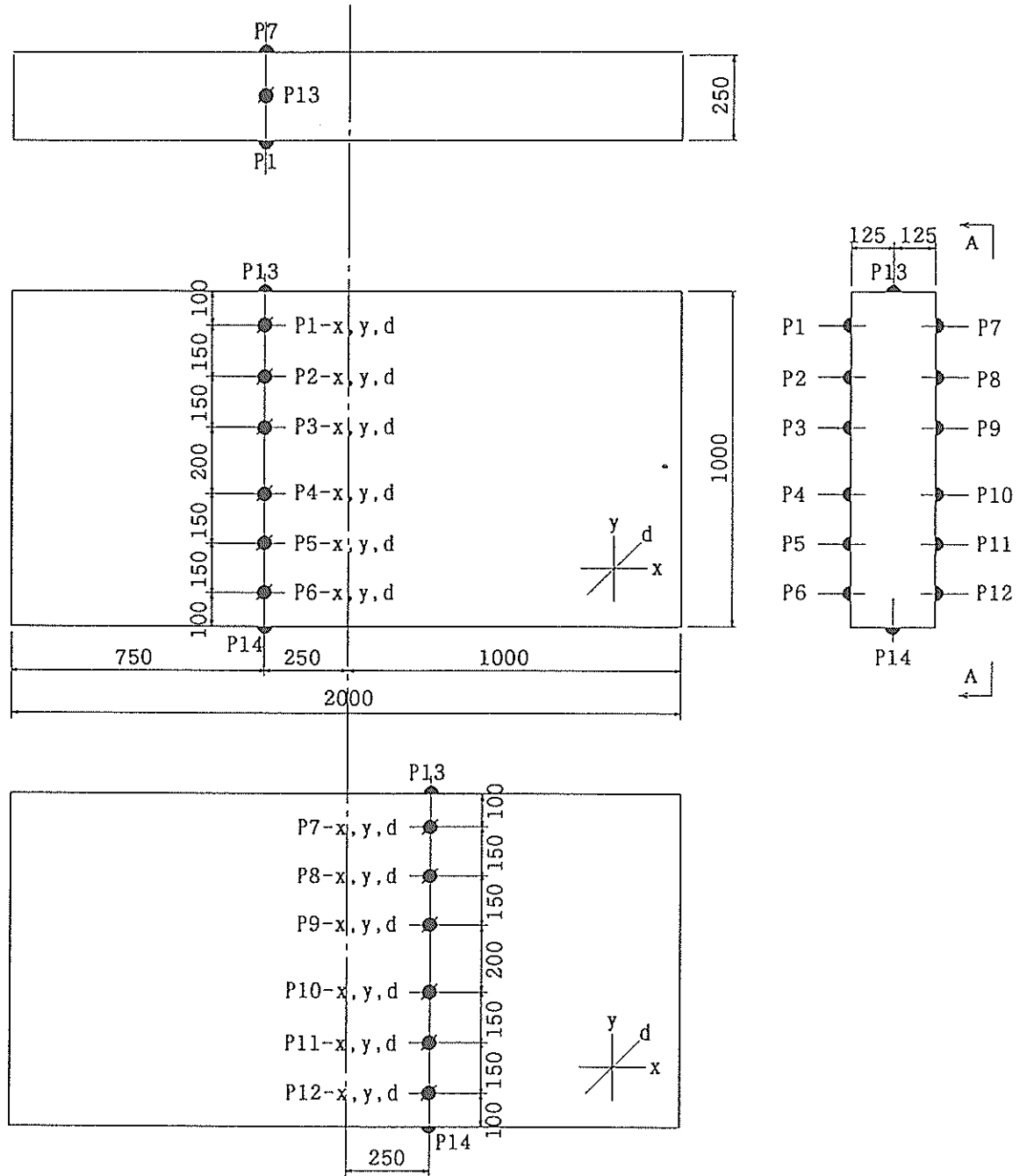


図-2.14 コンクリートのひずみ計測位置 (RC各供試体共通)



A-A 供試体を底面側から見たときの鋼板

● 鋼板ひずみゲージ

図-2.15 鋼板のひずみ計測位置 (供試体SW-4.5)

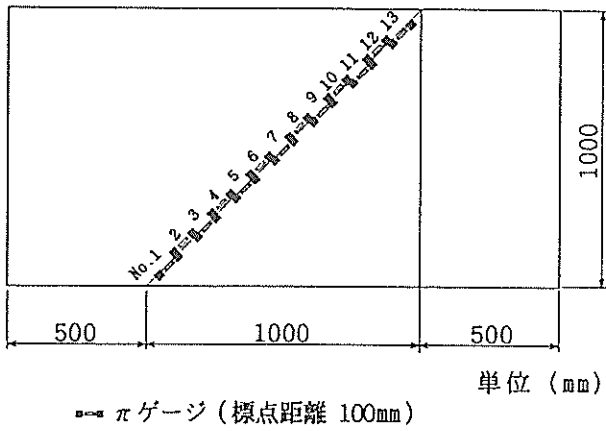


図-2.16 πゲージ設置位置

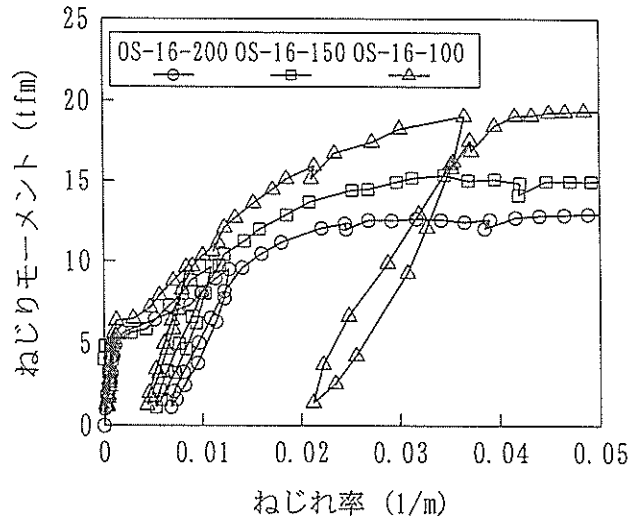


図-3.3 ねじりモーメントとねじれ率の関係 (OS-16供試体)

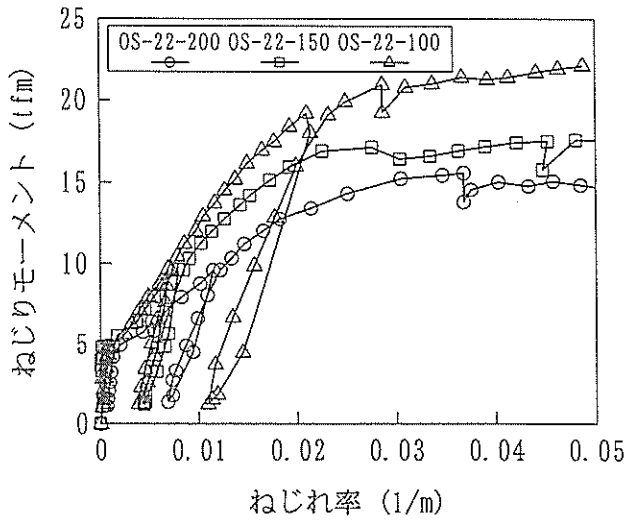


図-3.1 ねじりモーメントとねじれ率の関係 (OS-22供試体)

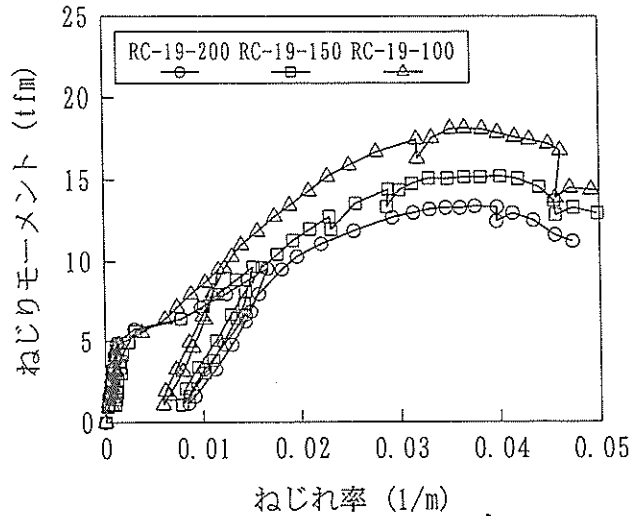


図-3.4 ねじりモーメントとねじれ率の関係 (RC供試体)

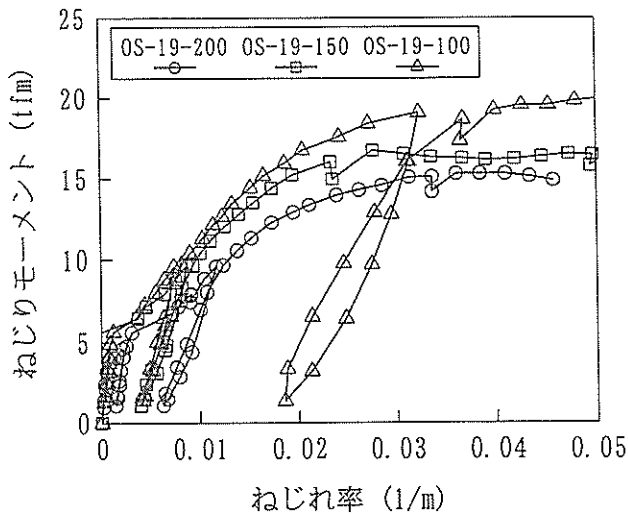


図-3.2 ねじりモーメントとねじれ率の関係 (OS-19供試体)

3. 実験結果

3.1 ねじれ率

図-3.1~3.5にねじりモーメントとねじれ率の関係を示す。オープンサンドイッチ (OS) 供試体については、鉄筋の種類が同じ3体の結果を1枚の図に示している。○が鉄筋間隔200mm, □が鉄筋間隔150mm, △が鉄筋間隔100mmの供試体の結果を示す。

オープンサンドイッチ供試体とRC供試体では、ねじりモーメントが約5tfmを超えると、ねじれ率が急増した。このときほぼ同時にコンクリート表面にひび割れの発生が認められた。ひび割れ発生後、同一ねじれ率におけるねじりモーメントは、鉄筋間隔が狭いほど大きかった。ねじりモーメントの増加とともに、曲線の勾配は徐々に緩やかになり、ねじれ率0.03(1/m)以上ではほぼ横這いになった。

図-3.5より、サンドイッチ供試体では、ねじりモーメント40tfm程度まで、ねじりモーメント-ねじれ率曲線は直線的であった。荷重24tf（ねじりモーメント38.4tfm）で除荷したときも、ねじれ率はほぼ0に戻った。ねじりモーメント40~60tfmで勾配が徐々に緩やかになった。ねじりモーメントが約60tfmを超えたあと、曲線の勾配がかなり緩やかになった。

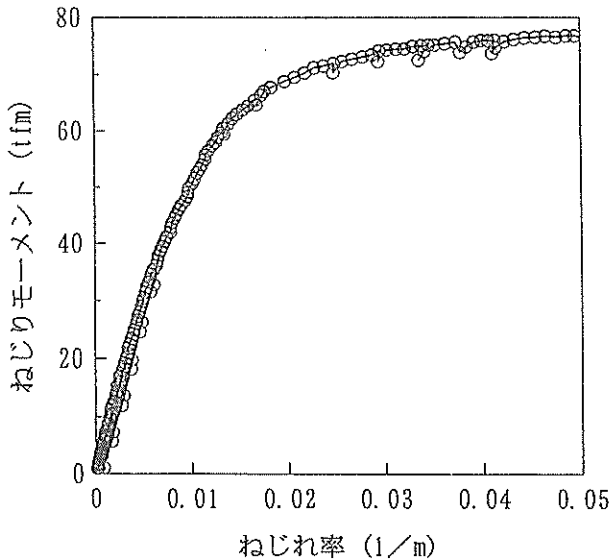


図-3.5 ねじりモーメントとねじれ率の関係
(供試体SW-4.5)

表-3.1 実験結果

供試体名	鉄筋		実験結果		
	径	間隔 (mm)	T_{cr} (tfm)	T_y (tfm)	T_{max} (tfm)
OS-22-200	D22	200	5.0	14.3	15.6
OS-22-150	D22	150	5.3	17.1	17.8
OS-22-100	D22	100	4.8	21.7	22.3
OS-19-200	D19	200	3.8	11.1	15.5
OS-19-150	D19	150	5.8	13.2	16.9
OS-19-100	D19	100	5.7	18.8	20.4
OS-16-200	D16	200	4.8	8.7	13.1
OS-16-150	D16	150	5.6	9.4	15.4
OS-16-100	D16	100	6.4	14.4	19.6
RC-19-200	D19	200	5.5	10.8	13.5
RC-19-150	D19	150	4.8	13.6	15.4
RC-19-100	D19	100	4.8	17.5	18.4
SW-4.5	鋼板 4.5mm		—	61.3	76.8

T_{cr} : ひび割れ発生ねじりモーメント
 T_y : 鋼材降伏ねじりモーメント
 T_{max} : 最大ねじりモーメント

表-3.1に、主要なねじりモーメントの値を示す。ひび割れ発生ねじりモーメント T_{cr} については、供試体ごとの有意な差は認められなかった。オープンサンドイッチとRCの差、すなわち鋼板の存在によるひび割れ発生ねじりモーメントの上昇は見られなかった。

表-3.1の鋼材降伏ねじりモーメント T_y は、鋼材のひずみ計測値の中の最大値が、表-2.2, 2.3に示した降伏ひずみに達したときのねじりモーメントである。図-3.6に T_y と鉄筋比の関係を示す。横軸は、鉄筋の1本当たりの公称断面積（表-2.3参照）を鉄筋間隔（200mm, 150mm, ないし100mm）で除した値であり、鉄筋比を表す。オープンサンドイッチ供試体で鉄筋がD22の場合を○, D19の場合を□, D16の場合を△, RC供試体で鉄筋がD19の場合を■で示す。図から T_y と鉄筋比の間に相関が

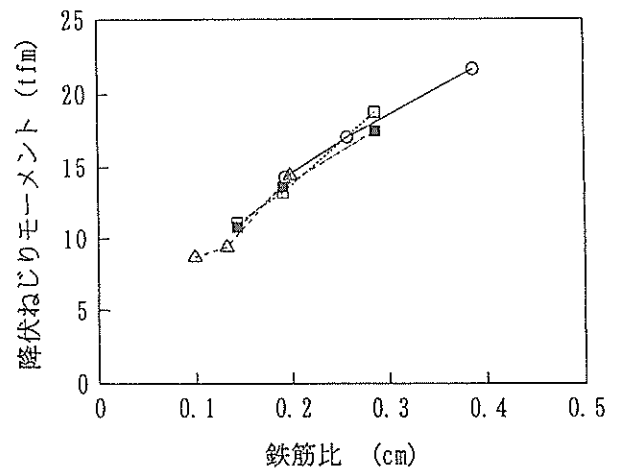


図-3.6 降伏ねじりモーメントと鉄筋比の関係

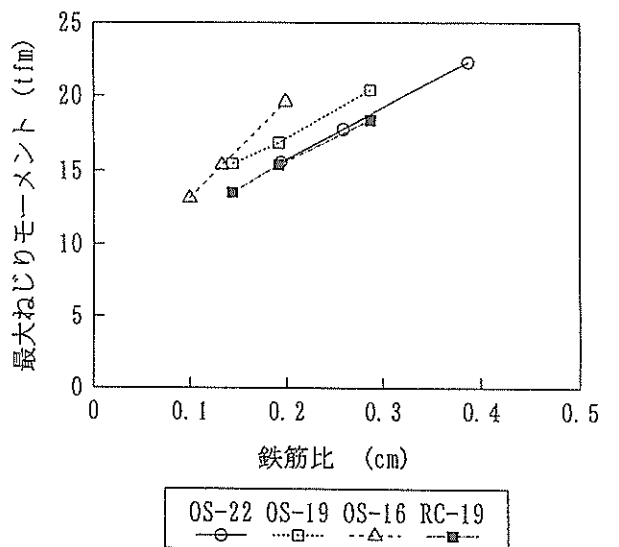


図-3.7 最大ねじりモーメントと鉄筋比の関係

認められる。オープンサンドイッチ供試体の T_y は、同一鉄筋比のRC供試体の T_y と同程度であった。また、同一鉄筋比であれば、鉄筋径の影響は見られない。

図-3.7に最大ねじりモーメント T_{max} と鉄筋比の関係を示す。 T_{max} と鉄筋比の間に相関が認められる。ただし鉄筋比が同じでも、鉄筋径が小さい方が T_{max} が大きかった。また、鉄筋比と鉄筋径が同一のオープンサンドイッチ供試体とRC供試体の T_{max} を比較すると、オープンサンドイッチ供試体の方が10~15%大きかった。

3.2 ひずみ

(1) 鉄筋のひずみ

図-3.8~3.11に x 方向の鉄筋ひずみ、図-3.12~3.15に y 方向の鉄筋ひずみ、図-3.16に z 方向の鉄筋ひずみの計測結果を示す。なお、オープンサンドイッチ供試体9体の中で、鉄筋比が最大のOS-22-100、最小のOS-16-200、およびOS-19-150の結果を示し、他の供試体については省略した。またRC供試体としては、RC-19-150の結果を示し、他の供試体については省略した。

ひび割れ発生ねじりモーメント(約5tfm)以降、 x, y 方向の鉄筋ひずみは急増した。このとき z 方向の鉄筋ひずみは急増していない。ひび割れ後の鉄筋ひずみの個々の計測値には、位置によるばらつきが若干見られた。3体のオープンサンドイッチ供試体の結果を比較すると、鉄筋比が小さいほど、曲線の傾きは緩やかであった。 x 方向鉄筋については、OS-19-150, OS-16-200, RC-19-150では全計測点で降伏ひずみ(D19:0.00176, D16:0.00170)に達したのに対し、OS-22-100では $x-5$ 以外は降伏ひずみ(0.00187)に達しなかった。また、 y 方向鉄筋については、OS-16-200では全計測点で降伏ひずみに達したのに対し、OS-19-150とRC-19-150では一部、OS-22-100では全部の計測点で降伏ひずみに達しなかった。各供試体とも、 x 方向の鉄筋ひずみの方が、 y

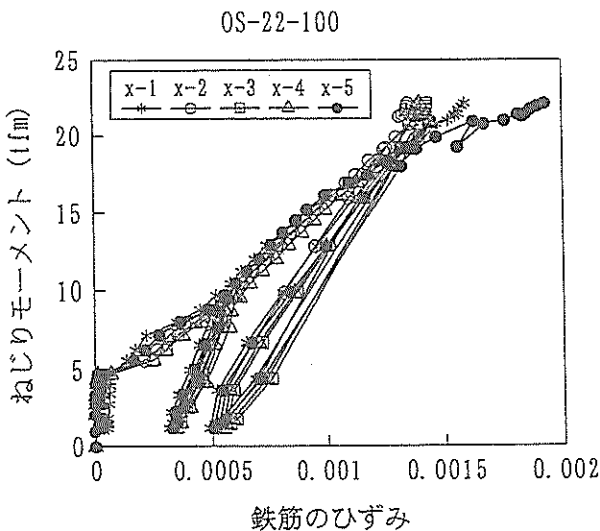


図-3.8 x 方向の鉄筋ひずみ (供試体 OS-22-100)

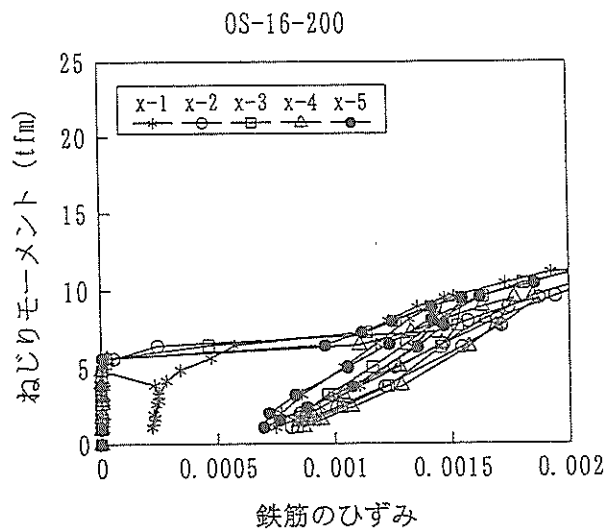


図-3.10 x 方向の鉄筋ひずみ (供試体 OS-16-200)

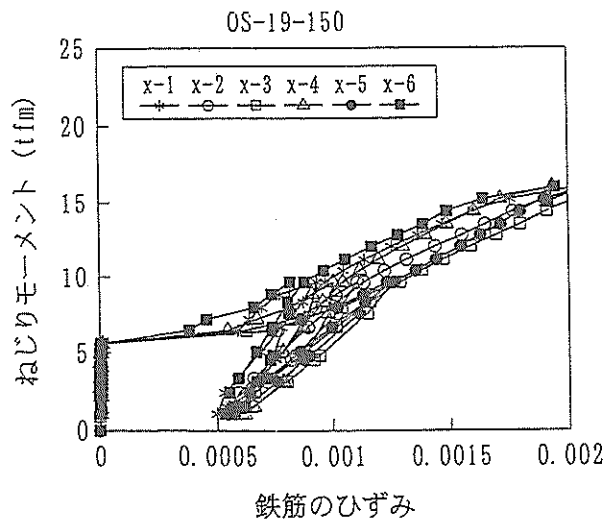


図-3.9 x 方向の鉄筋ひずみ (供試体 OS-19-150)

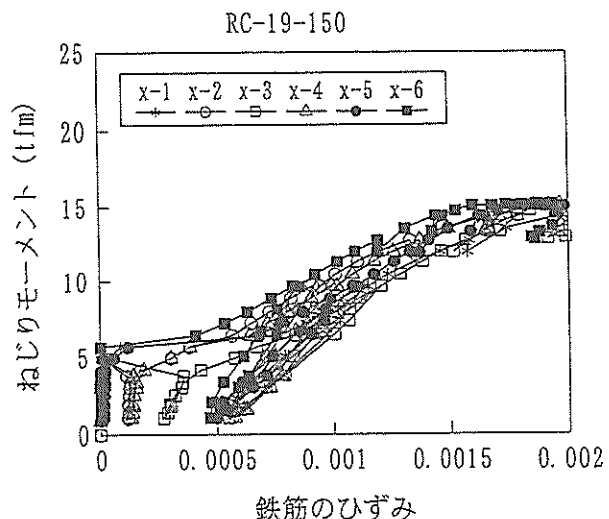


図-3.11 x 方向の鉄筋ひずみ (供試体 RC-19-150)

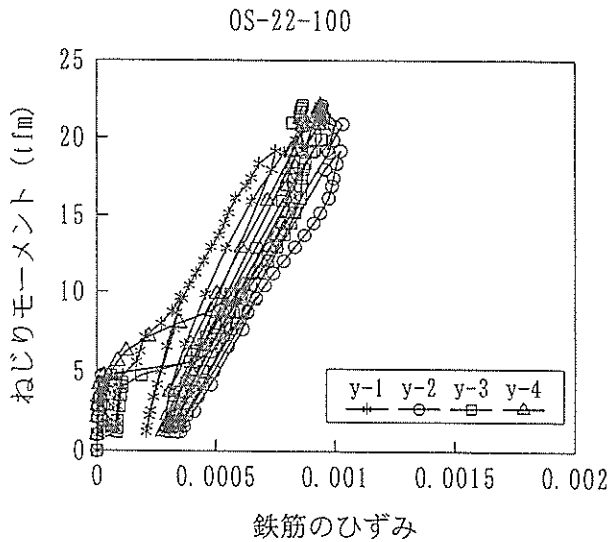


図-3.12 y方向の鉄筋ひずみ (供試体 OS-22-100)

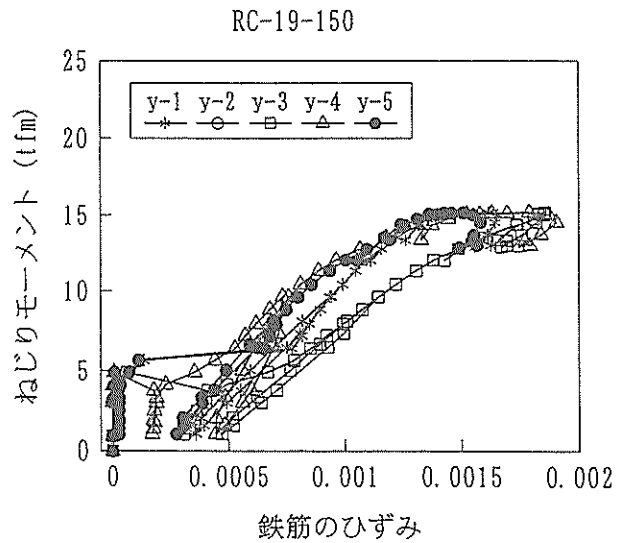


図-3.15 y方向の鉄筋ひずみ (供試体 RC-19-150)

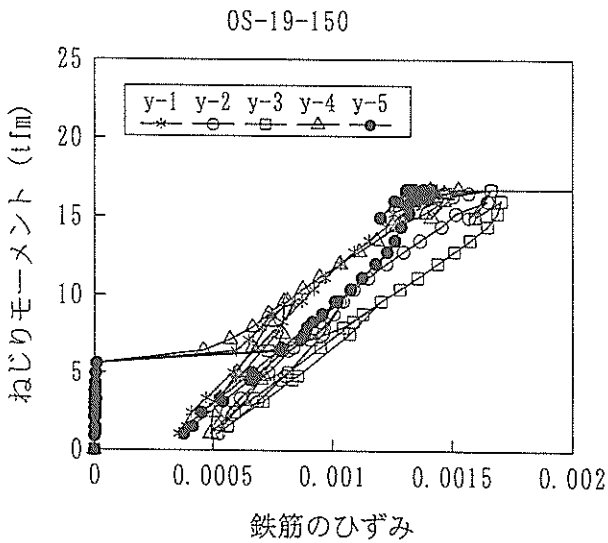


図-3.13 y方向の鉄筋ひずみ (供試体 OS-19-150)

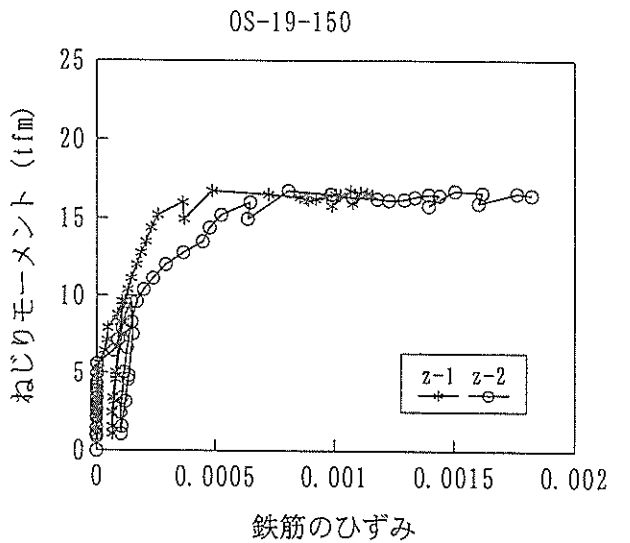


図-3.16 z方向の鉄筋ひずみ (供試体 OS-19-150)

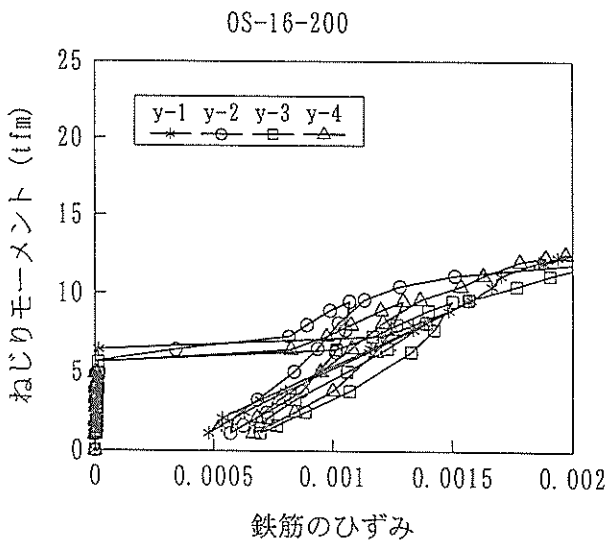


図-3.14 y方向の鉄筋ひずみ (供試体 OS-16-200)

方向の鉄筋ひずみよりもやや大きい傾向が見られた。

(2) コンクリートの圧縮ひずみ

図-3.17~3.21にコンクリートの圧縮ひずみの計測結果を示す。コンクリートには、図-2.13、および図-2.14に示したように、3軸ひずみゲージを設置した。この3軸ゲージのうち、d方向(45度方向)のゲージによる計測値を図に示した。

計測位置により、ひずみの値にばらつきが見られ、特にC2, C3, C4の値に比べて、C1とC5の値が小さかった。図によって横軸の目盛りが異なる点に注意して、鉄筋比の異なるオープンサンドイッチ供試体の結果を比較すると、鉄筋比が最大のOS-22-100ではひずみが-0.004まで達したのに対し、OS-19-150とOS-16-200では最小ひずみは-0.0013程度であった。また、RC-19-150ではひずみ

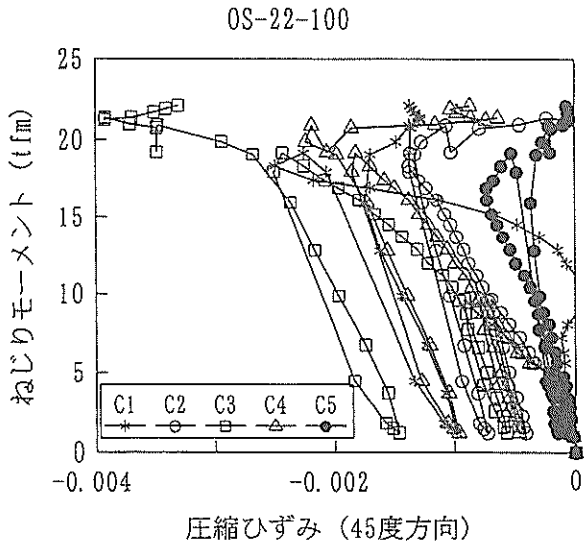


図-3.17 コンクリートの圧縮ひずみ (供試体 OS-22-100)

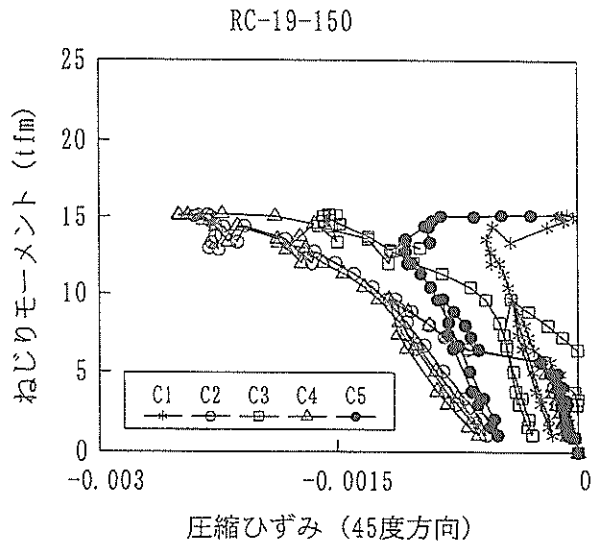


図-3.20 コンクリートの圧縮ひずみ (供試体 RC-19-150)

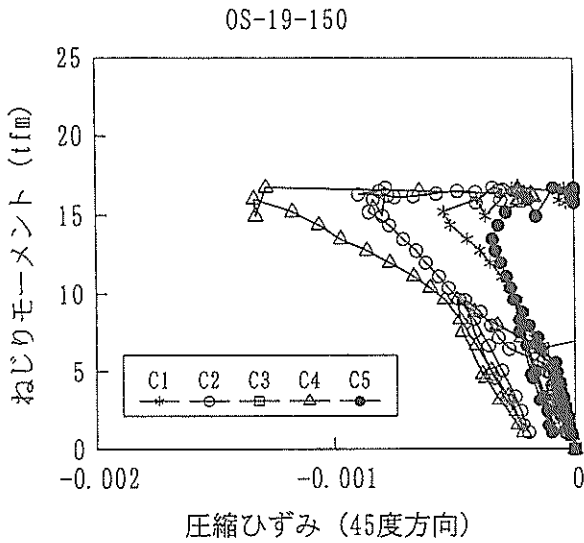


図-3.18 コンクリートの圧縮ひずみ (供試体 OS-19-150)

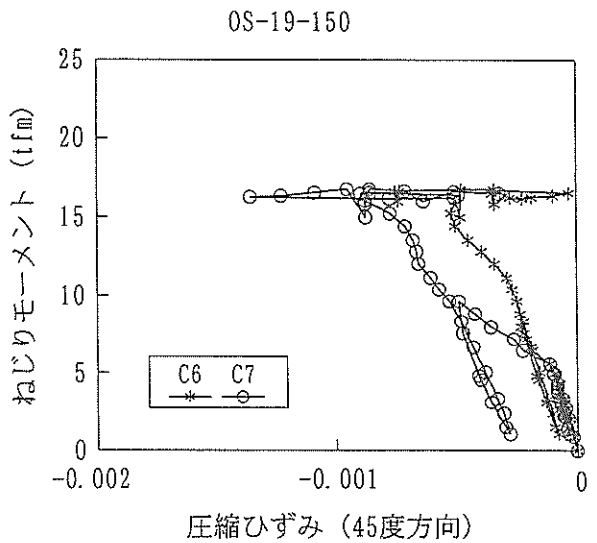


図-3.21 コンクリートの圧縮ひずみ (供試体 OS-19-150側面)

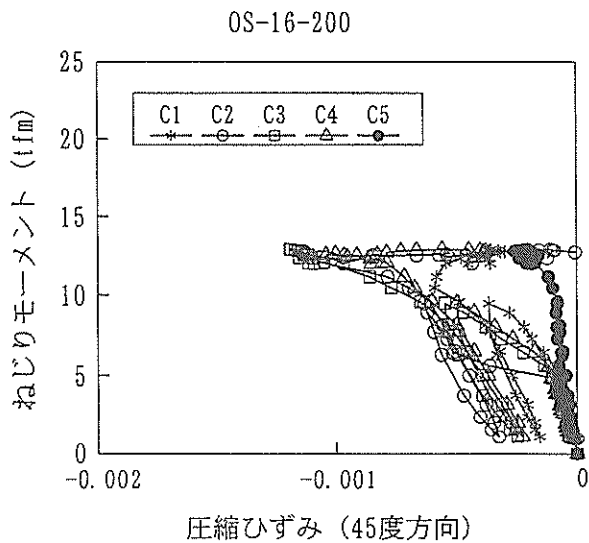


図-3.19 コンクリートの圧縮ひずみ (供試体 OS-16-200)

が約-0.0025に達した。図-3.21から、OS-19-150の供試体側面には上面と同程度のひずみが生じていた。

(3) コンクリートの引張ひずみ

図-2.16に示した13台のπゲージによる変位計測値の合計を、標点距離の合計(1300mm)で除して、x軸と45度をなす方向の平均的な引張ひずみの値とした。この引張ひずみとねじりモーメントの関係を図-3.22~3.25に示す。曲線の傾向としては、ねじれ率の結果と同様であった。いずれの供試体でも終局時には0.006を超える引張ひずみが生じていた。

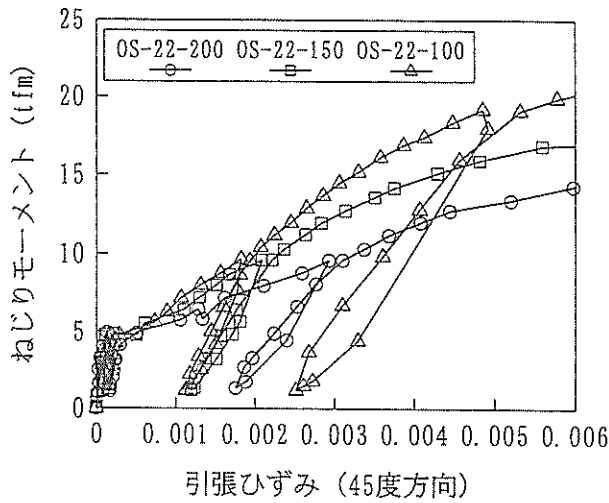


図-3.22 コンクリートの引張ひずみ (OS-22供試体)

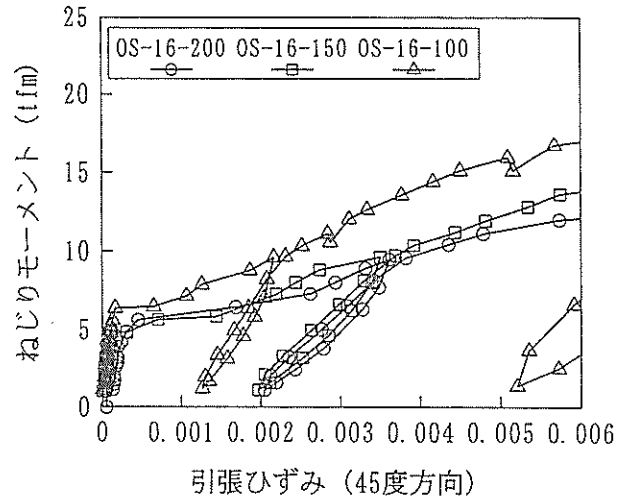


図-3.24 コンクリートの引張ひずみ (OS-16供試体)

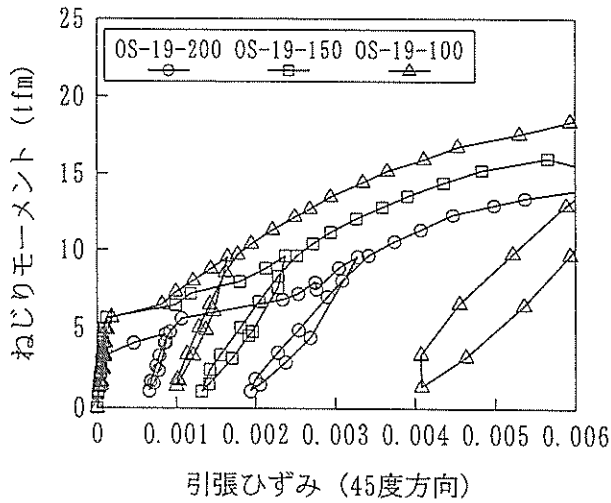


図-3.23 コンクリートの引張ひずみ (OS-19供試体)

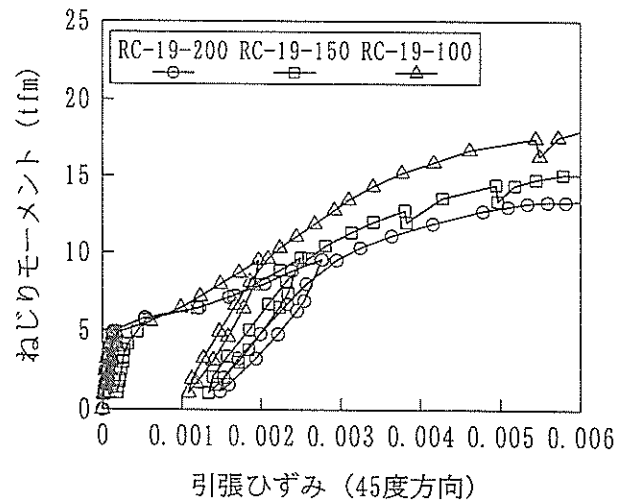


図-3.25 コンクリートの引張ひずみ (RC供試体)

(4) 鋼板のひずみ

オープンサンドイッチ供試体の鋼板には、5箇所に3軸ゲージを設置した。このゲージによるひずみの測定結果の例として、OS-19-150の結果を図-3.26~3.28に示す。図-3.26はx方向のひずみ、図-3.27はy方向のひずみ、図-3.28はd方向(45度方向)のひずみを示す。

x方向のひずみのうち、P2とP3はひび割れ発生時に急増して約0.0002となり、その後徐々に増加した。y方向のひずみは、x方向のひずみよりもやや小さかった。45度方向のひずみのうち、P2、P3、P4はひび割れ発生時に急増して約0.0003となった。45度方向のひずみは、x方向およびy方向のひずみよりも大きかった。

x、y、dの3方向のひずみと、面内せん断ひずみの関係は、図-3.29に示すモールの円から、次式ようになる。

$$e_{xy} = e_{dsp} - (e_{xsp} + e_{ysp}) / 2 \quad (1)$$

ここで、 e_{xy} : 鋼板の面内せん断ひずみ

e_{dsp} : 鋼板のd方向のひずみ

e_{xsp} : 鋼板のx方向のひずみ

e_{ysp} : 鋼板のy方向のひずみ

なお、本報告では特に断らない限り、ひずみテンソルの成分 e_{xy} の絶対値をせん断ひずみと呼ぶ。工学的せん断ひずみ(角ひずみ)を γ_{xy} で表すと、

$$e_{xy} = \frac{1}{2} \gamma_{xy} \quad (2)$$

の関係がある⁷⁾。OS-22-100、OS-19-150、OS-16-200について、式(1)で求めた鋼板の面内せん断ひずみを図-3.30~3.32に示す。いずれの供試体でも、P2、P3、P4のひずみがP1、P5のひずみよりも大きかった。曲線の傾きに関しては、供試体間に大きな差はなかった。

鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性

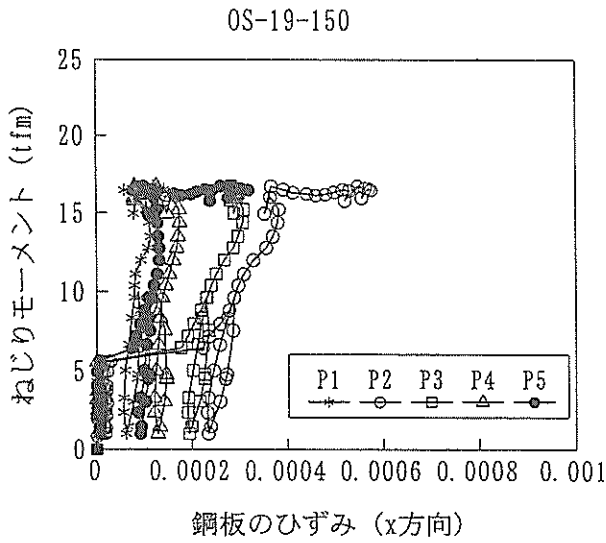


図-3.26 鋼板のひずみ (x方向, 供試体 OS-19-150)

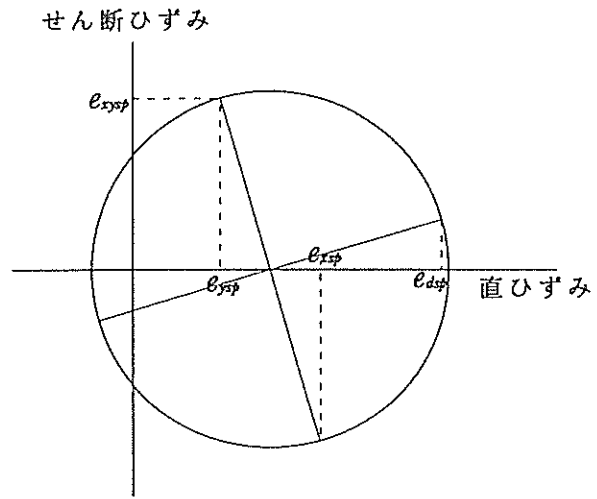


図-3.29 3軸ゲージによる計測値とせん断ひずみの関係

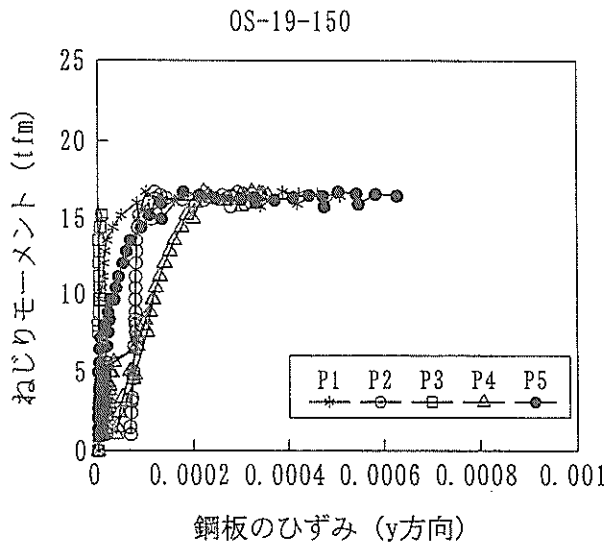


図-3.27 鋼板のひずみ (y方向, 供試体 OS-19-150)

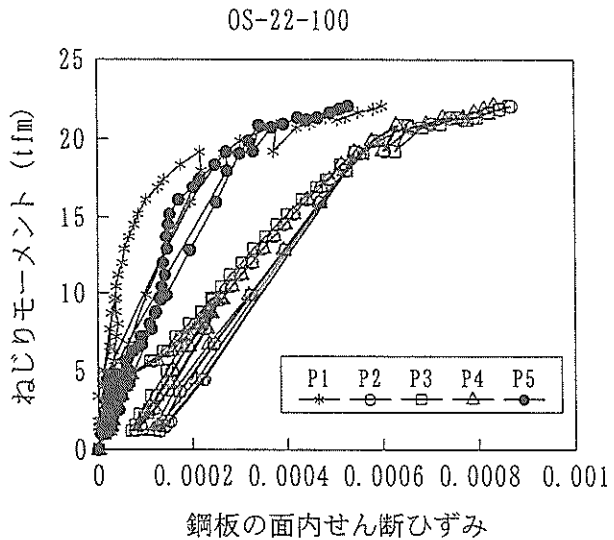


図-3.30 鋼板の面内せん断ひずみ (供試体 OS-22-100)

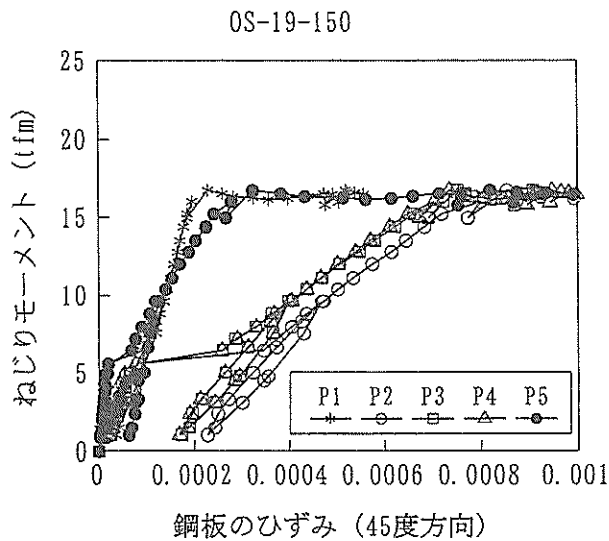


図-3.28 鋼板のひずみ (45度方向, 供試体 OS-19-150)

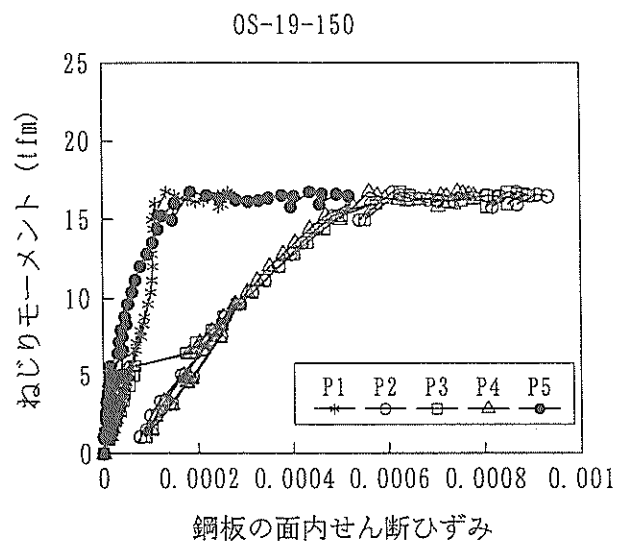


図-3.31 鋼板の面内せん断ひずみ (供試体 OS-19-150)

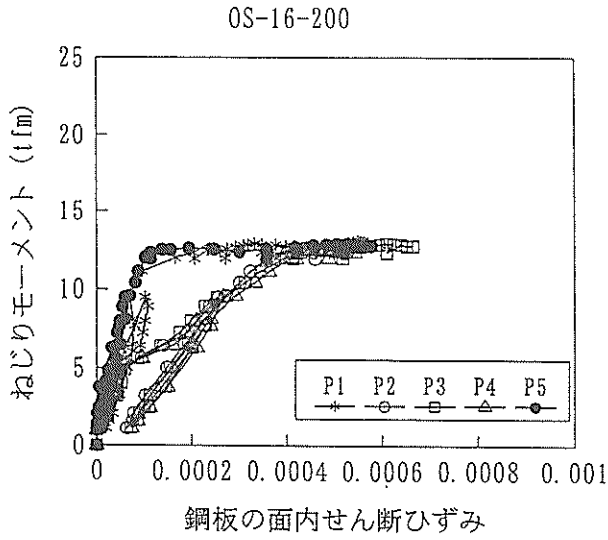


図-3.32 鋼板の面内せん断ひずみ (供試体 OS-16-200)

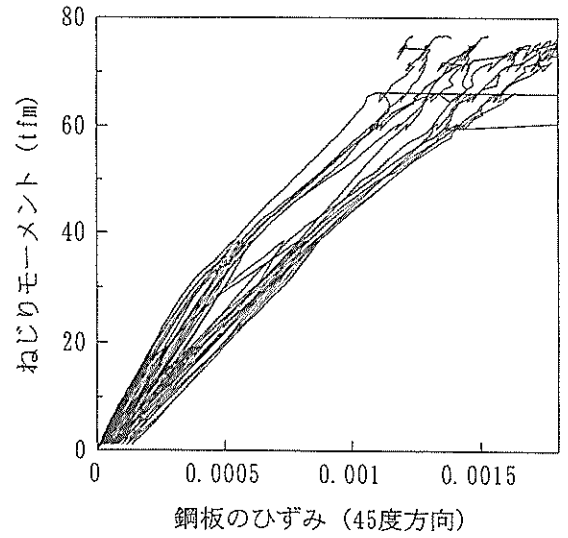


図-3.35 鋼板のひずみ (45度方向, 供試体 SW-4.5)

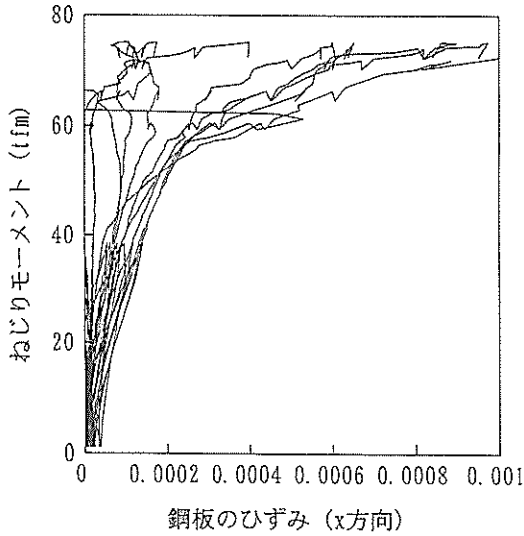


図-3.33 鋼板のひずみ (x方向, 供試体 SW-4.5)

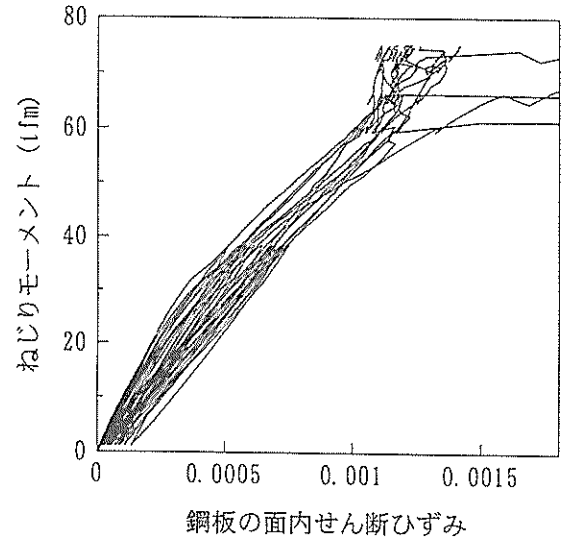


図-3.36 鋼板の面内せん断ひずみ (供試体 SW-4.5)

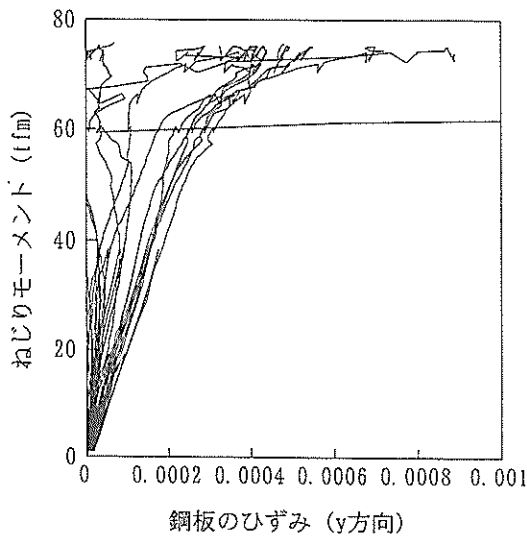


図-3.34 鋼板のひずみ (y方向, 供試体 SW-4.5)

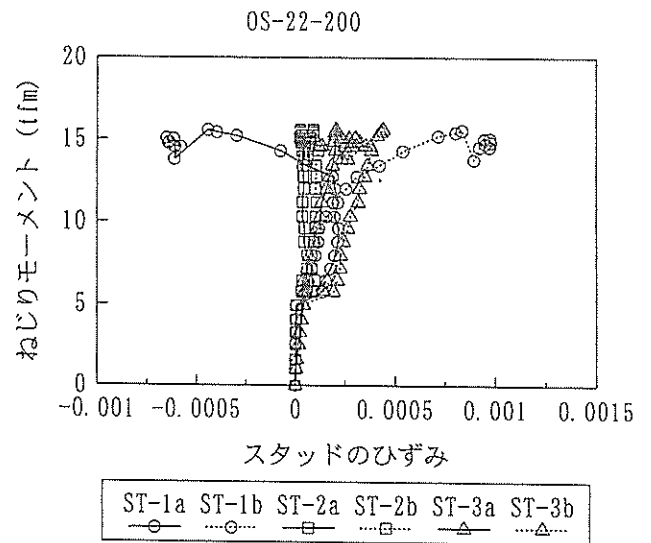


図-3.37 スタッドのひずみ (供試体 OS-22-200)

鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性

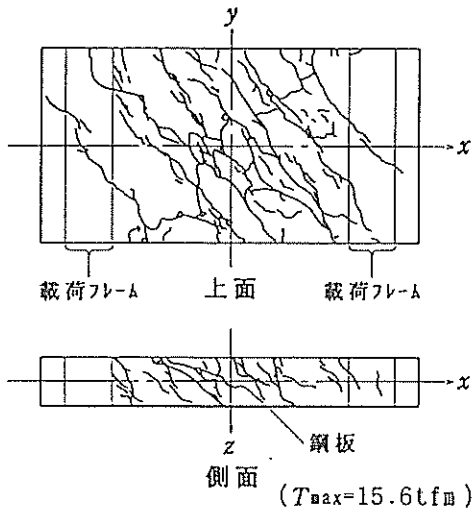


図-3.38 供試体 OS-22-200のひび割れ発生位置

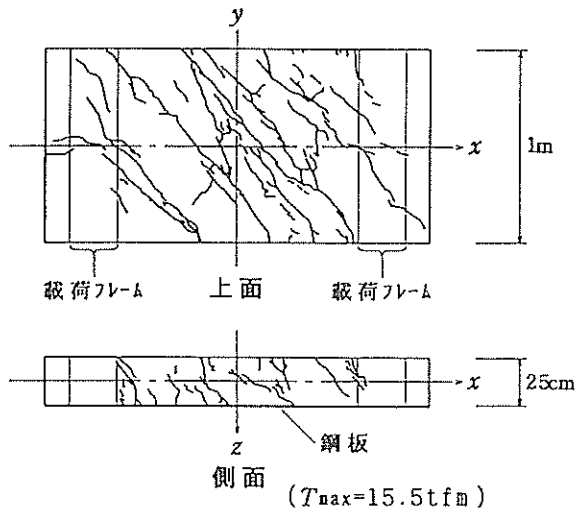


図-3.41 供試体 OS-19-200のひび割れ発生位置

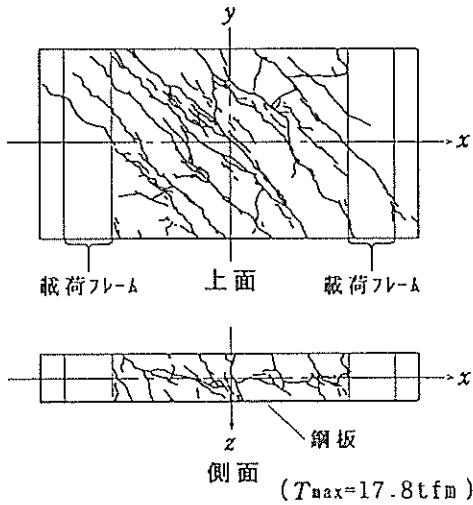


図-3.39 供試体 OS-22-150のひび割れ発生位置

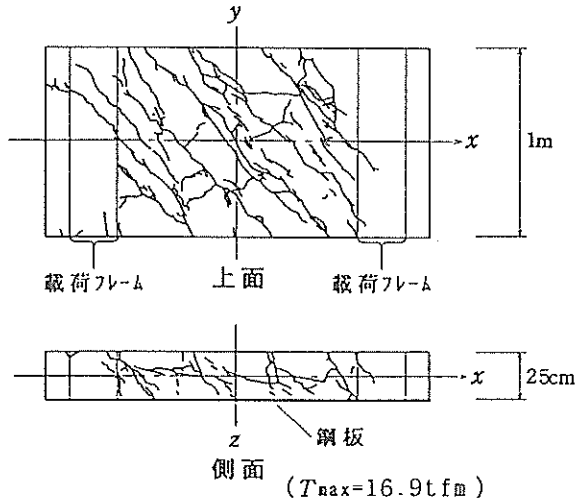


図-3.42 供試体 OS-19-150のひび割れ発生位置

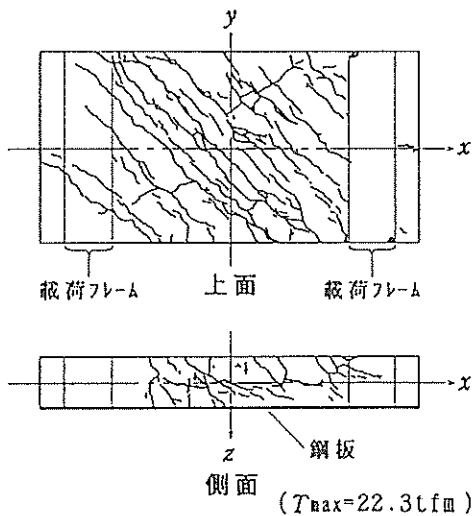


図-3.40 供試体 OS-22-100のひび割れ発生位置

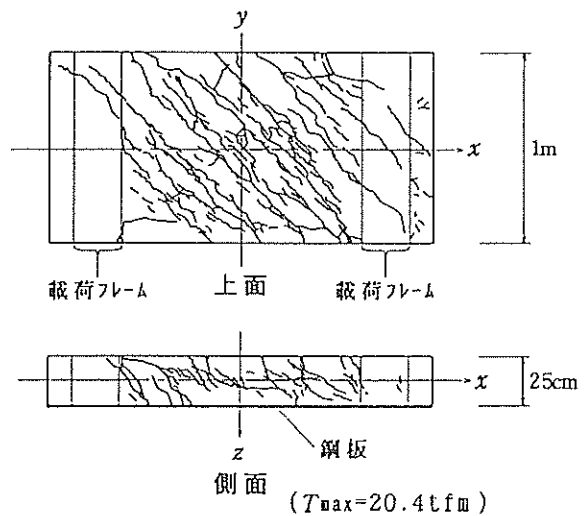


図-3.43 供試体 OS-19-100のひび割れ発生位置

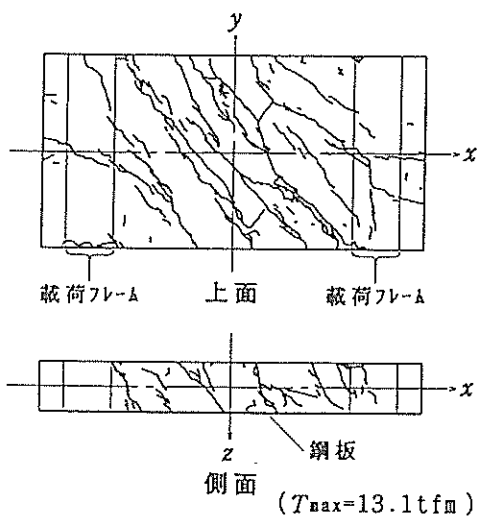


図-3.44 供試体 OS-16-200のひび割れ発生位置

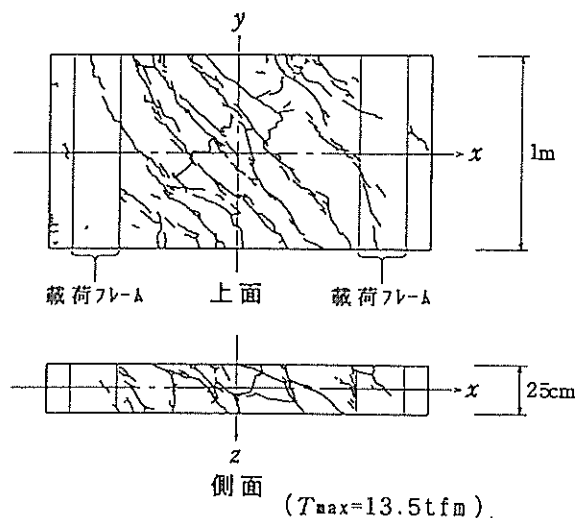


図-3.47 供試体 RC-19-200のひび割れ発生位置

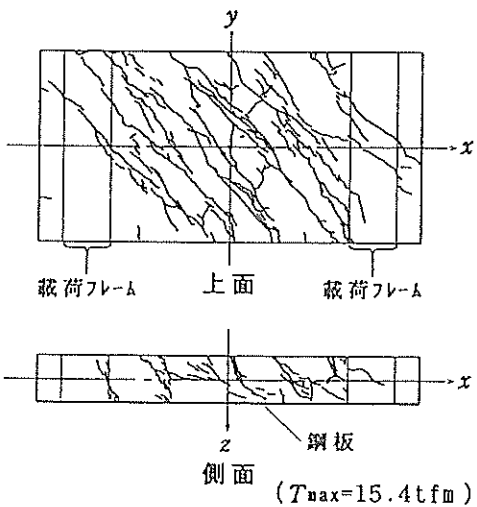


図-3.45 供試体 OS-16-150のひび割れ発生位置

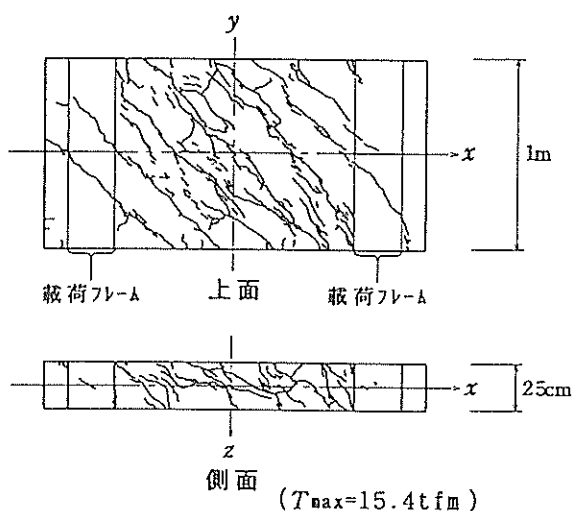


図-3.48 供試体 RC-19-150のひび割れ発生位置

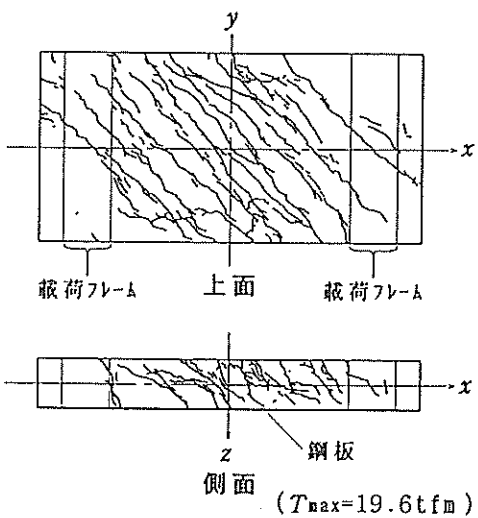


図-3.46 供試体 OS-16-100のひび割れ発生位置

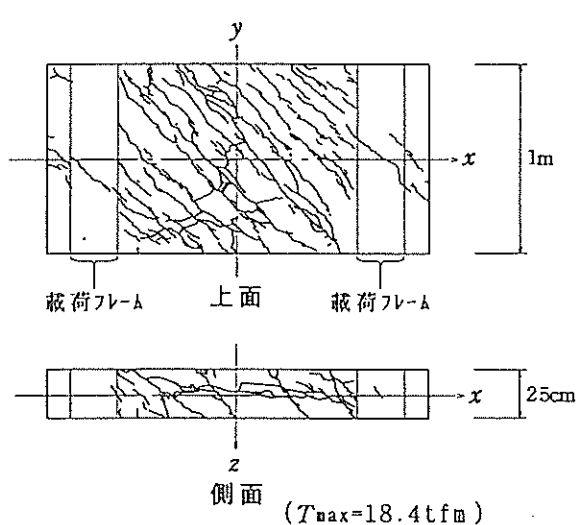


図-3.49 供試体 RC-19-100のひび割れ発生位置

サンドイッチ供試体の鋼板には、14箇所に3軸ゲージを設置した。このゲージによるひずみの測定結果を図-3.33~3.35に示す。図-3.33はx方向のひずみ、図-3.34はy方向のひずみ、図-3.35はd方向(45度方向)のひずみを示す。

x方向とy方向のひずみは同程度の大きさであった。45度方向のひずみは、x、y方向のひずみよりも大きかった。ねじりモーメント61.3tfmで、側壁のP14のひずみが急増し、鋼板が降伏を開始したことが認められた。続いて66.3tfmで、上側の鋼板のP2のひずみが急増した。他の箇所では、P14とP2で見られたようなひずみの急増は見られなかった。式(1)で求めた鋼板の面内せん断ひずみを図-3.36に示す。

(5) スタッドのひずみ

オープンサンドイッチ供試体OS-22-200のスタッドのひずみを図-3.37に示す。ST-1では、ねじりモーメント12tfm以降で曲げによるひずみが生じた。終局時のひずみの値は引張側で約0.001、圧縮側で約-0.0007に達した。ひずみの最大値は、ST-2では約0.0001、ST-3では約0.0004であった。なお目視観察した範囲では、いずれのオープンサンドイッチ供試体でも鋼板とコンクリートのずれ、または剥離は認められなかった。

3.3 ひび割れ

(1) ひび割れ間隔

オープンサンドイッチとRCの各供試体の、最終的なひび割れ発生位置を図-3.38~3.49に示す。鉄筋間隔が100mmの供試体(供試体名の末尾が100)では、他の供試体よりもひび割れが多く発生し、ひび割れ間隔が狭かった。

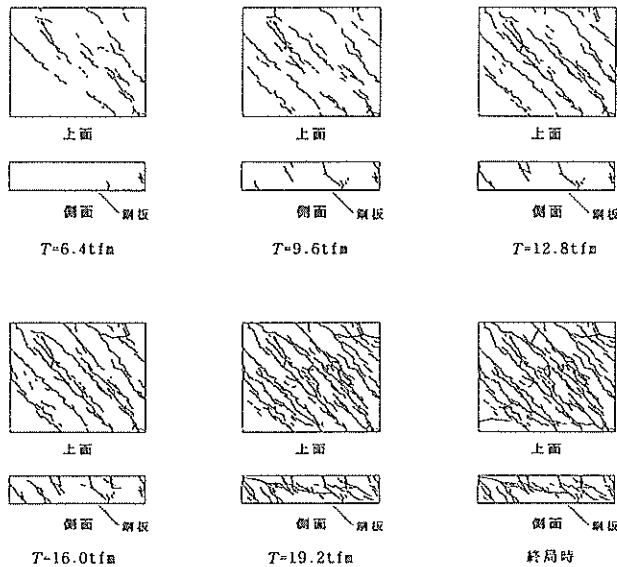


図-3.50 供試体 OS-19-100のひび割れ進展状況

た。鉄筋間隔が200mmの供試体と150mmの供試体のひび割れ間隔には、大きな差はなかった。

ねじりモーメントの増加にともなうひび割れ進展状況の一例として、供試体OS-19-100の観察結果を図-3.50に示す。ねじりモーメント $T=6.4\text{tfm}$ のとき、主なひび割れは上面中央付近に3~4本(ただし、途中で途切れているひび割れをつないで1本と数えたとき)生じていた。ねじりモーメントの増加とともに、全体にひび割れが拡がり、また、ひび割れの間にならなひび割れが生じて、ひび割れ間隔が狭くなった。

ねじりモーメントと平均ひび割れ間隔の関係を、図-3.51~3.54に示す。ここで平均ひび割れ間隔は、次式で求めた値である。

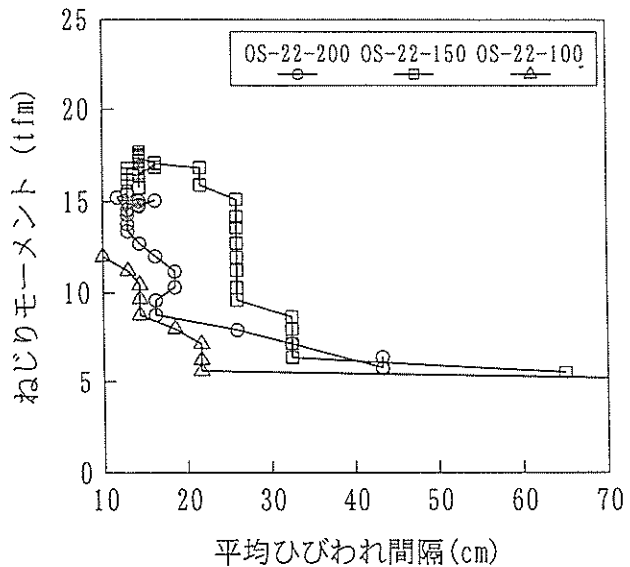


図-3.51 ひび割れ間隔 (OS-22供試体)

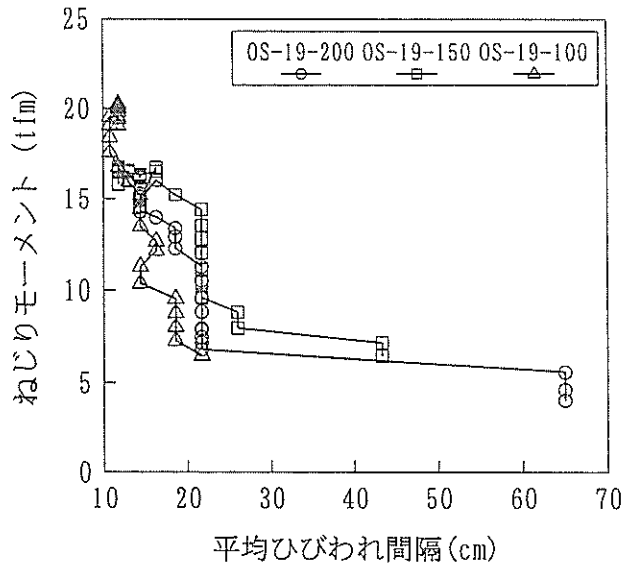


図-3.52 ひび割れ間隔 (OS-19供試体)

$$s_{cr} = L_{pt} / N_{cr} \quad (2)$$

ただし、

s_{cr} : 平均ひび割れ間隔

L_{pt} : π ゲージの標点距離の合計(100mm×13台=1300mm)

N_{cr} : ひび割れ本数 (0.04mm以上の変位を出力する π ゲージの数)

なお、標点距離100mmの π ゲージを使用したため、ひび割れ間隔が100mm未満になった場合は、平均ひび割れ間隔を求められない。

図-3.51~3.54のグラフは、双曲線に似た形状を示した。すなわち、ねじりモーメント10tfm程度までひび割れ間隔は急速に狭くなり、その後は徐々に狭くなった。鉄筋間隔による影響については、OS-22, OS-19, RC-19では鉄筋間隔100mmの場合にひび割れ間隔が最小であり、

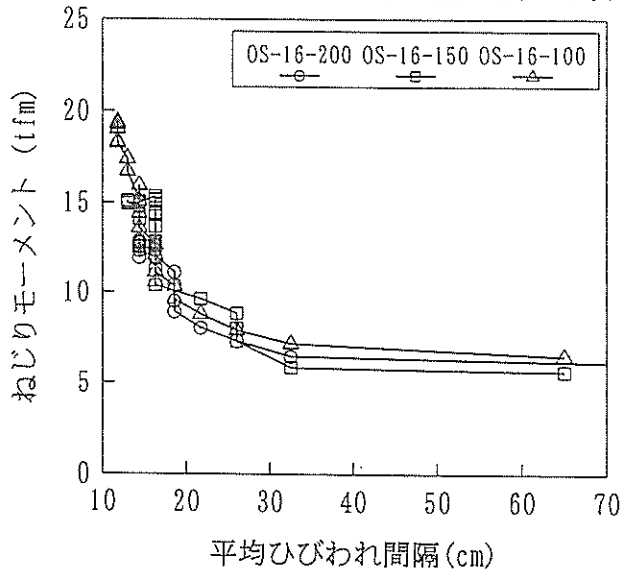


図-3.53 ひび割れ間隔 (OS-16供試体)

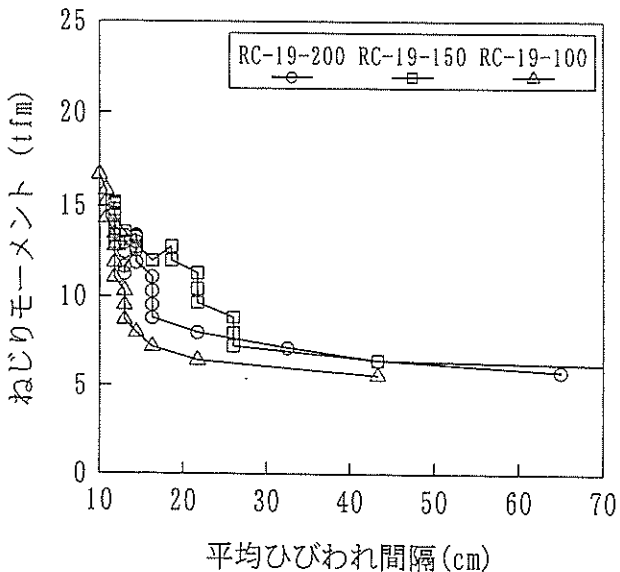


図-3.54 ひび割れ間隔 (RC供試体)

150mmの方が200mmの場合よりもひび割れ間隔がやや大きかった。OS-16では鉄筋間隔の影響があまり見られなかった。

(2) ひび割れ幅

供試体OS-19-100について、個々の π ゲージによる測定値の変化を図-3.55に示す。個々のひび割れの幅にはかなり大きなばらつきが見られた。最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅を図-3.56に示す。ここで平均ひび割れ幅は次式で求めた。

$$W_{cr} = W_{cr,t} / N_{cr} \quad (3)$$

ただし、

W_{cr} : 平均ひび割れ幅

$W_{cr,t}$: 合計ひび割れ幅 (0.04mm以上の変位を出力する π ゲージの出力値の合計)

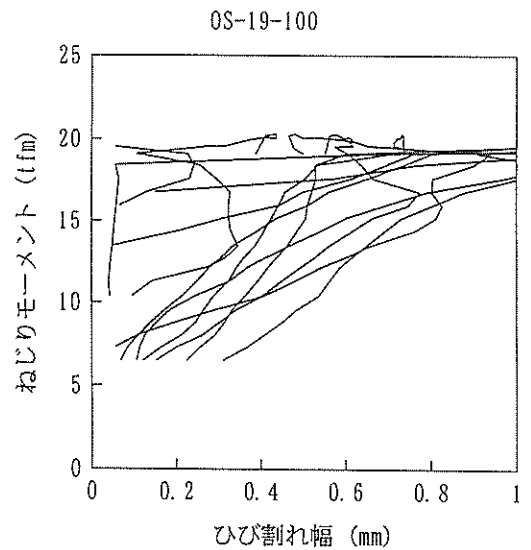


図-3.55 ひび割れ幅 (供試体 OS-19-100)

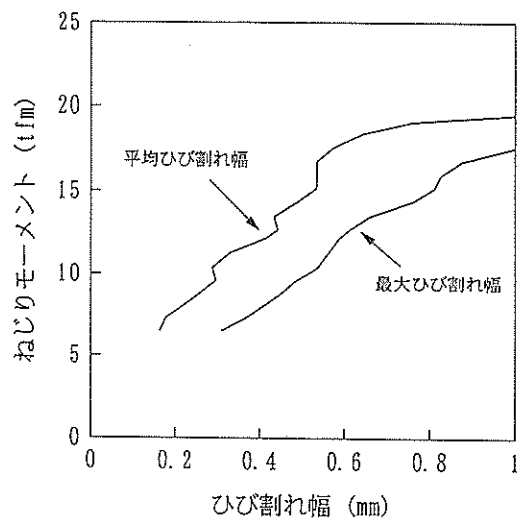


図-3.56 最大ひび割れ幅と平均ひび割れ (供試体 OS-19-100)

鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性

オープンサンドイッチとRCの全供試体について、最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の関係を図-3.57に示す。最大ひび割れ幅は、平均ひび割れ幅の1.0~2.0倍の範囲にあった。

平均ひび割れ幅とねじりモーメントの関係を図-3.58~3.61に示す。ひび割れ発生後すぐに、平均ひび割れ幅が約0.2mm（鉄筋間隔が100mmの場合）~約0.4mm（鉄筋間隔が150mmまたは200mmの場合）に達した。その後ねじりモーメントの増加とともに平均ひび割れ幅が増加した。

オープンサンドイッチ 9体とRC 3体の実験結果

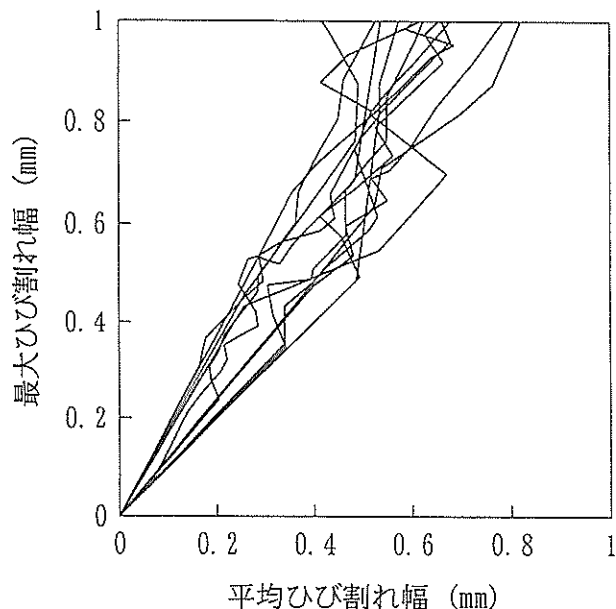


図-3.57 最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅 (OS,RC各供試体)

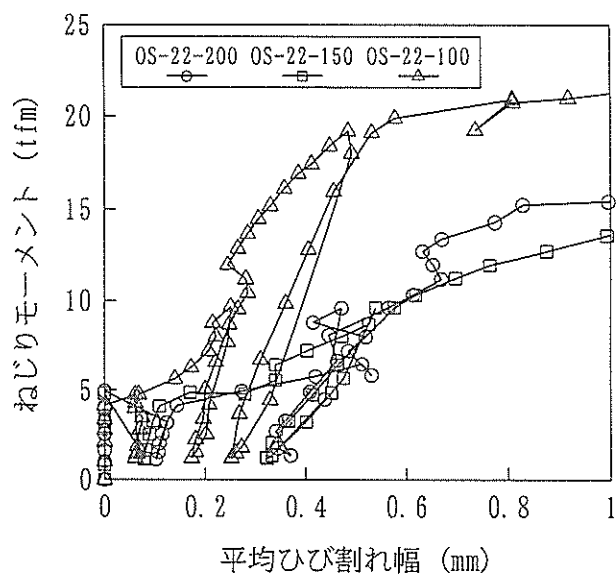


図-3.58 平均ひび割れ幅 (OS-22供試体)

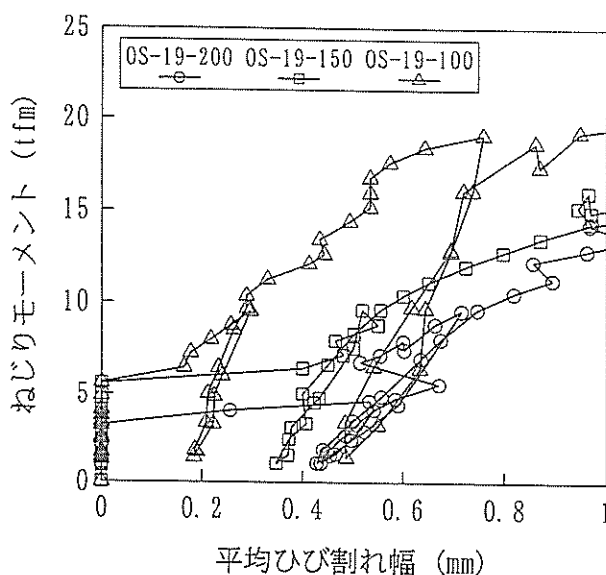


図-3.59 平均ひび割れ幅 (OS-19供試体)

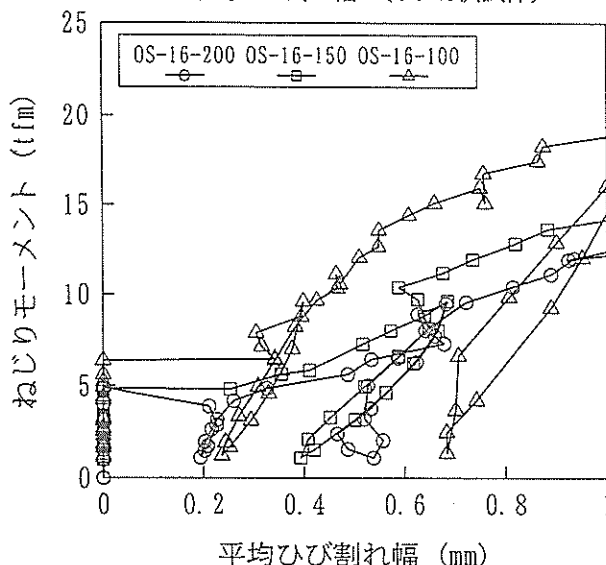


図-3.60 平均ひび割れ幅 (OS-16供試体)

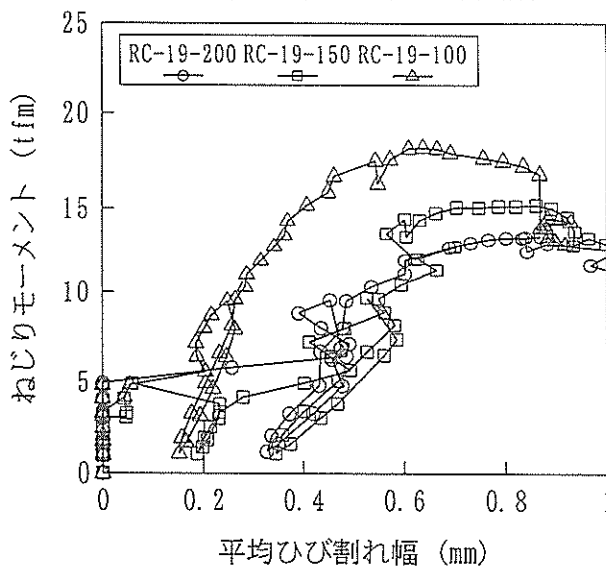


図-3.61 平均ひび割れ幅 (RC供試体)

4. 解析方法

4.1 既往の解析方法と本研究の関係

RCはり部材のねじり特性，特にひび割れ発生後の挙動については，Rauschが1929年に発表したとされる⁸⁾立体トラス理論が各国の設計基準のもとになっている^{9,10)}。この理論では，ねじりひび割れが生じたRCはりを，中心部を無視して箱形断面はりと見なす(図-4.1)。この箱形断面はりの板厚，すなわちねじりに対して有効な厚さを以下では有効厚と呼ぶ。有効厚部分のコンクリートをトラスの圧縮斜材，鉄筋をトラスの引張材にモデル化して，ねじり強度を求める。

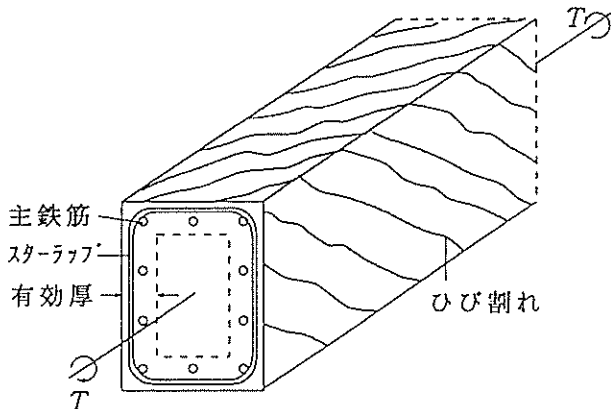


図-4.1 ねじりひび割れが発生したRCはり部材

Rauschの理論はRCはりのねじり耐力を過大評価する傾向がある。このため多くの研究者により，有効厚の設定，有効厚中の応力経路の設定，かぶりコンクリートの剥離の取り扱い，コンクリートの軟化の取り扱い等を変更することによる立体トラス理論の修正方法が提案されている。その中で，Hsu^{8,11)}による軟化トラス理論は，横引張ひずみの影響によるコンクリートの圧縮剛性の低下を考慮して立体トラス理論を修正するものである。Hsuの解析は，比較的広範囲のRCはりの実験結果と整合することが認められている。

本研究では，はじめにHsuの解析方法のRC板部材に対する適用性を検討した。次に鋼板・コンクリート合成部材にHsuの解析方法を拡張して，その適用性を検討した。サンドイッチ部材については，RCと同様にひずみの対称性を仮定する。また，最小主ひずみが負(圧縮)であるコンクリート部分の厚さを有効厚とする設定方法を，合成部材についてもRC部材と同様に用いる。合成部材での力の釣り合いと変形の適合条件の設定方法に本研究の解析の新規性がある。すなわちオープンサンドイッ

チ部材について，RC側と鋼板側のそれぞれの力の釣り合いを考えるとともに，せん断流の連続条件を仮定する。また，ひずみの非対称性を考慮する。

以下ではまずRC部材の解析方法について説明する。次に，断面が対称性を有し，RC部材との共通点が多岐にわたるサンドイッチ部材の解析方法を説明する。最後に断面が非対称性を有するオープンサンドイッチ部材の解析方法を説明する。なお，本研究では等方配筋，純ねじりの場合を対象にして，主ひずみおよび主応力の方向がx軸およびy軸と45度をなすことを仮定する。

4.2 RC部材

(1) 断面諸元と材料特性値の設定

はじめに以下の定数を設定する。

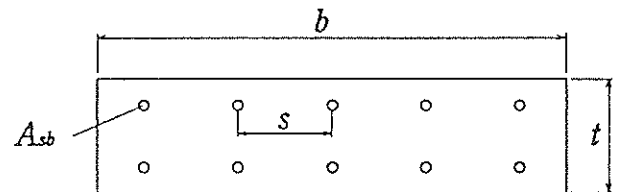


図-4.2 断面の諸元

断面諸元(図-4.2参照)

- b : 断面のコンクリートの幅
- t : 断面のコンクリートの厚さ
- s : 鉄筋間隔
- A_{sb} : 鉄筋1本の断面積

コンクリートの力学特性値

- f_c' : 圧縮強度
- f_t : 引張強度
- E_c : 弾性係数
- ν_c : ポアソン比
- e_c : 圧縮応力ピーク時のひずみで-0.002とする。

鉄筋の力学特性値

- E_{sb} : 弾性係数
- f_{ysb} : 降伏強度

設定した定数を用いて，以下の定数を求める。

A_c : コンクリートの断面積

$$A_c = b \cdot t \tag{4}$$

p_c : コンクリートの周囲の長さ

$$p_c = 2(b + t) \tag{5}$$

G_c : コンクリートのせん断弾性係数

$$G_c = E_c / 2(1 + \nu_c) \tag{6}$$

h_1, h_2 : b/t の値により決まる長方形断面の最大せん断応力とねじり剛性を求める係数，構造力学公式集¹²⁾等に係数表が与えられている。

(2) ひび割れ発生時の計算

コンクリート表面での面内せん断応力が、引張強度に達したときにひび割れが発生すると仮定する。

$$\tau_{xy} = f_t \quad (7)$$

ここで、 τ_{xy} : 表面での面内せん断応力
このときのねじりモーメント T_{cr} は、

$$T_{cr} = k_1 b t^2 \tau_{xy} \quad (8)$$

ねじれ率 ϕ' は、

$$\phi' = T_{cr} / (k^2 b t^3 G_c) \quad (9)$$

と表される。

また、ひずみは、

$$e_{xy} = \tau_{xy} / 2 G_c \quad (10)$$

$$e_{1s} = e_{xy} \quad (11)$$

$$e_{2s} = -e_{xy} \quad (12)$$

ここで、 e_{xy} : 表面での面内せん断ひずみ

e_{1s} : 表面での最大主ひずみ (主引張ひずみ)

e_{2s} : 表面での最小主ひずみ (主圧縮ひずみ)

となる (図-4.3)。

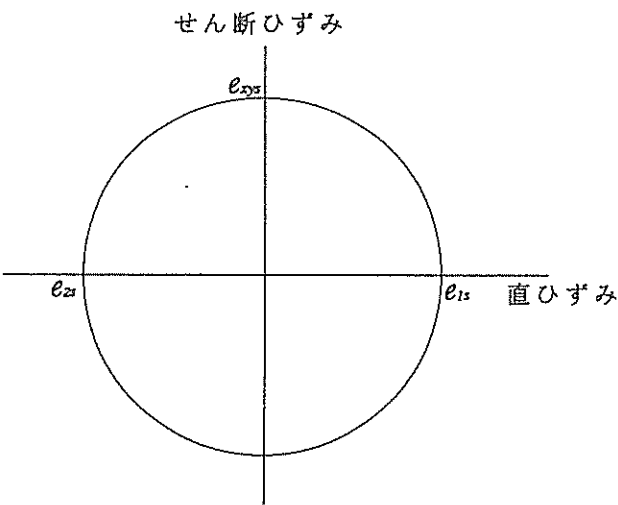


図-4.3 ひび割れ前のモールのひずみ円

(3) ひび割れ発生後の解析

a) 力の釣り合い

直交する2方向の配筋が同一のRC部材を解析対象とし、鉄筋の方向にx軸、y軸をとる。有効厚部分の力の釣り合いを考える。図-4.4は、xが一定の断面で有効厚部分を切断した状態を示す。コンクリートの引張剛性を無視すると、x方向の力の釣り合いから、

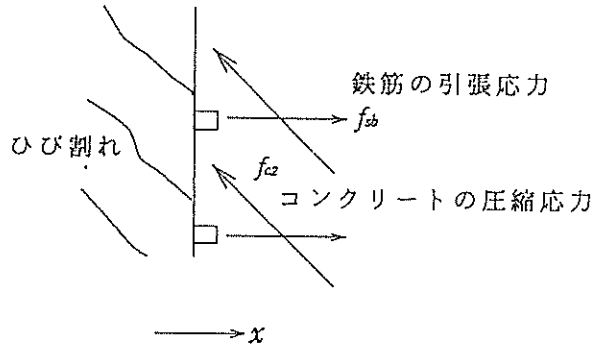


図-4.4 x方向の力の釣り合い

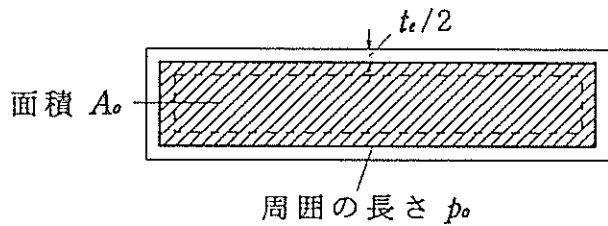


図-4.5 せん断応力の経路

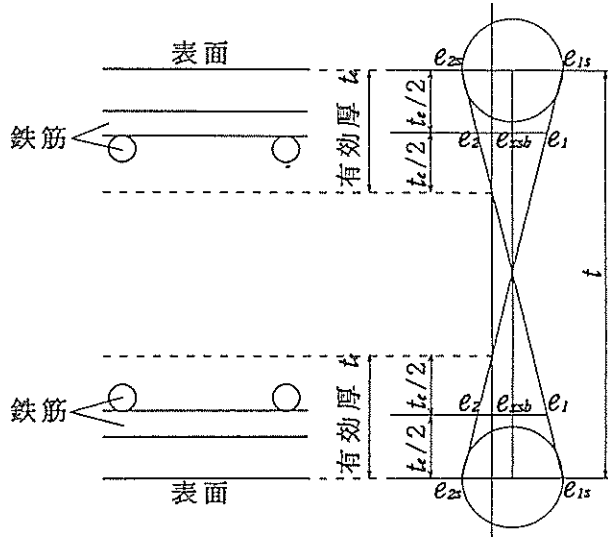


図-4.6 RC部材のモールのひずみ円

$$f_{c2} / 2 + \rho f_{sb} = 0 \quad (13)$$

ただし、 f_{c2} : コンクリートの最小主応力 (主圧縮応力)

f_{sb} : 鉄筋の応力

ρ : 有効厚中の鋼材比

$$\rho = A_{sb} / (t_c \cdot s) \quad (14)$$

t_c : 有効厚

が成り立つ。なお、式(13)の右辺が0となるのは、純ねじりの仮定による。

有効厚部分のせん断応力 τ_{xy} は、

$$\tau_{xy} = -f_c e_2 / 2 \quad (15)$$

と表される。

有効厚部分のせん断応力によって生じるねじりモーメントは、薄肉閉断面についてBredtが1896年に発表したとされる¹⁰⁾理論により、次式で表される。

$$T = 2A_0 \tau_{xy} \quad (16)$$

ただし、 A_0 ：せん断応力の経路が囲む面積（図-4.5）せん断応力の経路が、有効厚の中心に一致すると仮定すると、

$$A_0 = A_c - p_0 t_c / 2 + t_c^2 \quad (17)$$

と表される。

b) 変形の適合条件

図-4.6は、モールのひずみ円の z 方向の変化を示す。対称性から、上面と下面でのモール円は同一である。ただし主ひずみ方向が90度異なる。有効厚の中心でのひずみと、表面でのひずみには、以下の関係がある。

$$e_2 = e_{2s} / 2 \quad (18)$$

ただし、 e_2 ：有効厚の中心での最小主ひずみ

$$e_1 = e_{1s} + e_2 \quad (19)$$

ただし、 e_1 ：有効厚の中心での最大主ひずみ
有効厚の中心での x 方向のひずみの値を、鉄筋のひずみの値として用いると、

$$e_{xsb} = (e_1 + e_2) / 2 \quad (20)$$

ただし、 e_{xsb} ：鉄筋のひずみ
となる。また、有効厚の中心での面内せん断ひずみは、

$$e_{xy} = (e_1 - e_2) / 2 \quad (21)$$

ただし、 e_{xy} ：有効厚の中心での面内せん断ひずみとなる。

最小主ひずみが負（圧縮）である部分を有効厚とする。有効厚は次式で表される。

$$t_c = e_{2s} / \kappa \quad (22)$$

ただし、 κ ：曲率

$$\kappa = \phi' \quad (23)$$

なお、一般には、 $\kappa = \phi' \sin 2\alpha$ (24)

ただし、 α ：最大主ひずみと x 軸のなす角と表され¹¹⁾、 α が45度の場合に式(23)となる。また、Bredtの理論により、ねじれ率 ϕ' は、

$$\phi' = p_0 / A_0 e_{xy} \quad (25)$$

ただし、 p_0 ：せん断応力の経路の長さ（図-4.5）

$$p_0 = p_c - 4 t_c \quad (26)$$

と表される。式(18)(21)(22)(23)(25)より、

$$t_c = 4A_0 / p_0 e_2 / (e_1 - e_2) \quad (27)$$

と表される。

c) 材料の構成則

コンクリートの圧縮応力と圧縮ひずみの関係を図-4.7のように仮定する。

ただし、 ζ ：軟化係数

$$\zeta = \sqrt{\frac{e^2}{(1-p_0)e_2 - e_1}} \quad (28)$$

図-4.7の関係は、次式で表される。

$$f_{c2} = j \zeta f_c \quad (29)$$

ただし

$$j = \frac{e_{2s}}{\zeta e_0} - \frac{1}{3} \left(\frac{e_{2s}}{\zeta e_0} \right)^2 \quad (|e_{2s}| \leq |\zeta e_0| \text{ のとき}) \quad (30)$$

$$j = \left[1 - \frac{\zeta^2}{(2-\zeta)^2} \right] \left(1 - \frac{1}{3} \frac{\zeta e_0}{e_{2s}} \right) + \frac{\zeta^2}{(2-\zeta)^2} \frac{e_{2s}}{\zeta e_0} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{e_{2s}}{\zeta e_0} \right) \quad (|e_{2s}| > |\zeta e_0| \text{ のとき}) \quad (31)$$

鉄筋の引張応力と引張ひずみの関係を図-4.8のように仮定する。図-4.8の関係は、次式で表される。

$$f_{sb} = E_{sb} e_{xsb} \quad (E_{sb} e_{xsb} \leq f_{y sb} \text{ のとき}) \quad (32)$$

$$f_{sb} = f_{y sb} \quad (E_{sb} e_{xsb} > f_{y sb} \text{ のとき}) \quad (33)$$

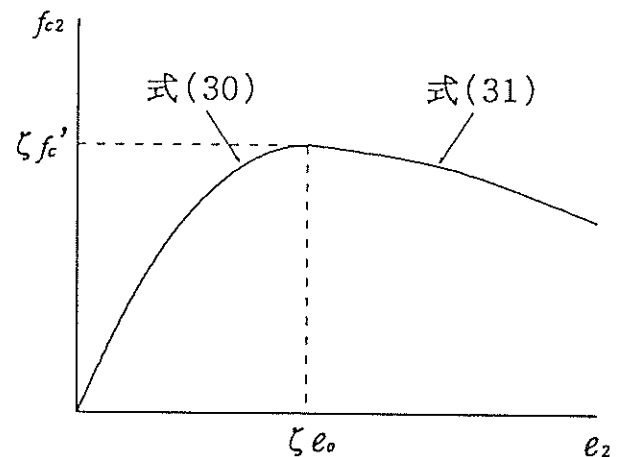


図-4.7 コンクリートの圧縮特性

鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性

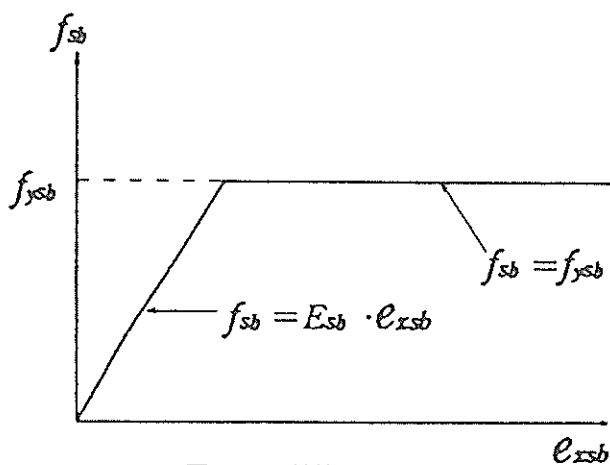


図-4.8 鉄筋の引張特性

(4) 計算の流れ

計算の流れ図を、図-4.9に示す。表面での最小主ひずみ e_2 の値を与えて、他の変数の値を計算する。その際、有効厚の中心での最大主ひずみ e_1 の値を仮定して、力の釣り合いと変形の適合条件からそれぞれ有効厚 l_e の値を計算し、両者の l_e がほぼ一致するまで e_1 を変化させて反復計算する。

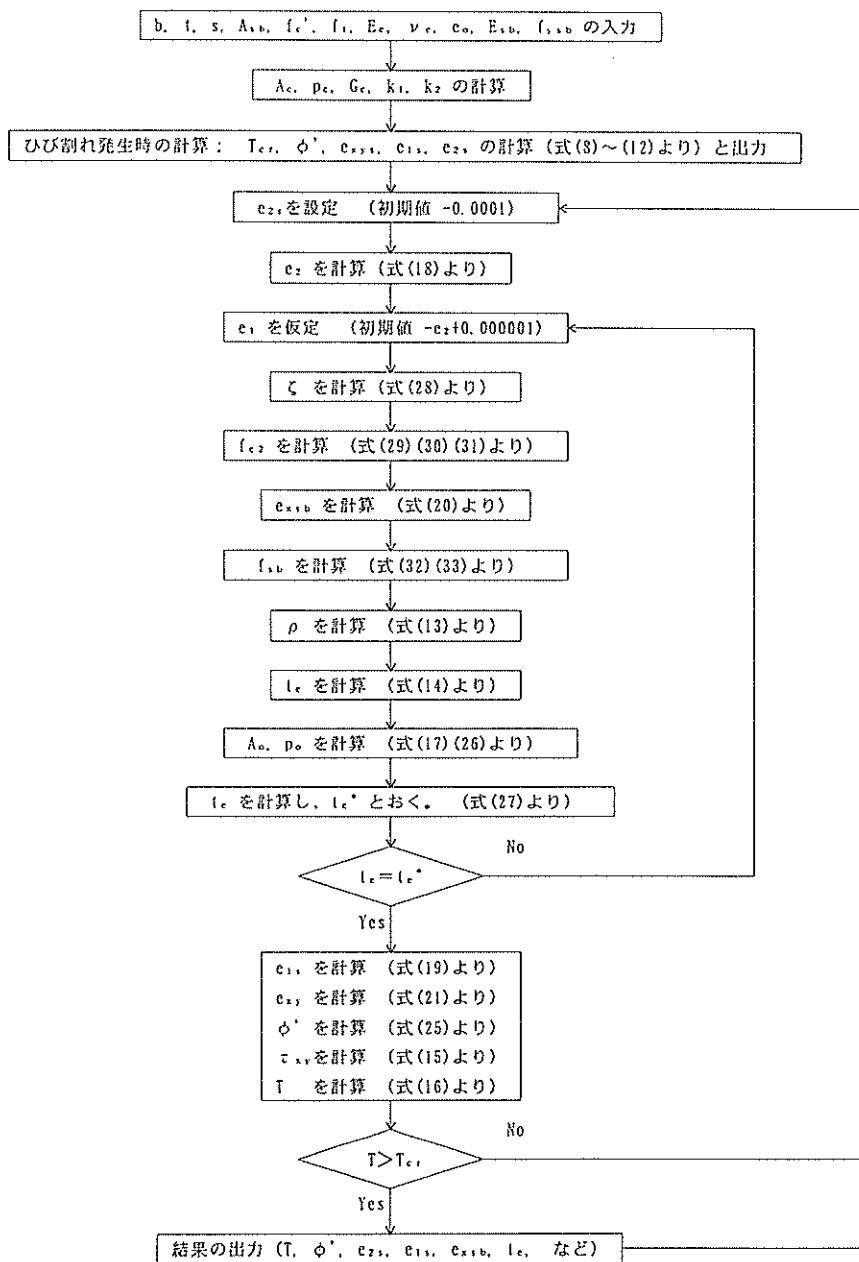


図-4.9 RC部材の計算の流れ図

4.3 サンドイッチ部材

(1) 断面諸元と材料特性値の設定

鉄筋を使用しないので、 s 、 A_{sb} 、 E_{sb} 、 $f_{y sb}$ の設定が不要である。コンクリートの力学特性値は、RCと同様に設定する。また鋼板の特性値として以下の値を設定する。

t_{sp} : 鋼板の厚さ

E_{sp} : 鋼板の弾性係数

ν_{sp} : 鋼板のポアソン比

$f_{y sp}$: 鋼板の降伏強度

設定した定数を用いて、以下の定数を求める。

A_c 、 p_c 、 G_c 、 k_1 、 k_2 : RCと同様

G_{sp} : 鋼板のせん断弾性係数

$$G_{sp} = E_{sp} / 2 (1 + \nu_{sp}) \quad (34)$$

t_{eq} : ひび割れ発生時の計算用に鋼板厚をコンクリート厚に換算して割り増しした部材厚

$$t_{eq} = t + 2 t_{sp} G_s / G_c \quad (35)$$

b_{eq} : ひび割れ発生時の計算用に鋼板厚をコンクリート厚に換算して割り増しした部材幅

$$b_{eq} = b + 2 t_{sp} G_s / G_c \quad (36)$$

(2) ひび割れ発生時の計算

式(8)(9)の t 、 b の代わりに t_{eq} 、 b_{eq} を用いる。その他はRCと同様に計算する。

(3) ひび割れ発生後の解析

a) 力の釣り合い

x 方向の力の釣り合いから、

$$f_{c2} / 2 + \rho f_{x sp} = 0 \quad (37)$$

ただし、 $f_{x sp}$: 鋼板の x 方向の応力

ρ : 有効厚中の鋼材比

$$\rho = t_{sp} / t_e \quad (38)$$

が成り立つ。なお、式(37)の右边が0となるのは、純ねじりの仮定による。

有効厚部分のせん断応力 τ_{xy} は、RCと同様に式(15)で表される。式(16)で計算されるねじりモーメント T が、有効厚のコンクリートが負担するねじりモーメントであり、 T_c で表す。

鋼板の面内せん断応力と、鋼板が負担するねじりモーメント T_s の関係は、

$$T_s = 2 A_c t_{sp} \tau_{x y sp} \quad (39)$$

ただし、 $\tau_{x y sp}$: 鋼板の面内せん断応力

と表される。ねじりモーメント T は、

$$T = T_c + T_s \quad (40)$$

と表される。

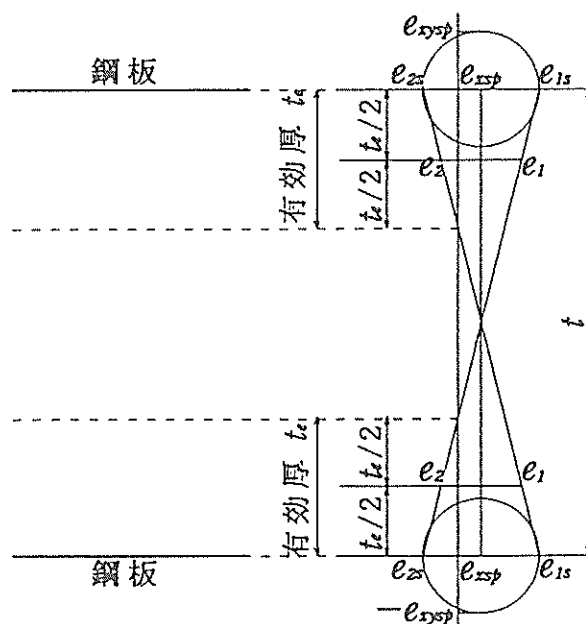


図-4.10 サンドイッチ部材のモールのひずみ円

b) 変形の適合条件

図-4.10は、モールのひずみ円の z 方向の変化を示す。有効厚の中心でのひずみと、表面でのひずみの関係は、RCと同様に式(18)および式(19)で表される。

表面での x 方向のひずみの値を、鋼板のひずみの値として用いると、

$$e_{x sp} = (e_{1s} + e_{2s}) / 2 \quad (41)$$

ただし、 $e_{x sp}$: 鋼板の x 方向のひずみ

$$e_{x y sp} = (e_{1s} - e_{2s}) / 2 \quad (42)$$

ただし、 $e_{x y sp}$: 鋼板の面内せん断ひずみ

となる。

RCと同様に、最小主ひずみが負(圧縮)であるコンクリート部分の厚さを有効厚とする。有効厚はRCと同様に式(27)で表される。なお、ねじれ率 ϕ' は、

$$\phi' = p_c / A_c e_{x y sp} \quad (43)$$

と表される。

c) 材料の構成則

コンクリートについてはRCと同様に図-4.7のように仮定する。

鋼板が降伏する以前の引張応力と引張ひずみの関係、およびせん断応力とせん断ひずみの関係を次式のように仮定する。

$$f_{x sp} = E_{sp} / (1 - \nu_{sp}) e_{x sp} \quad (44)$$

鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性

$$\tau_{xysp} = 2 G_{sp} e_{xysp} \quad (45)$$

鋼板の降伏は、最大せん断ひずみエネルギー説 (von Mises-Hencky の降伏条件)¹³⁾によって判定する。すなわち次式で表される換算応力 (等価応力) が、鋼板の降伏強度 f_{ysp} に達した時点で降伏すると仮定する。

$$f_v = \sqrt{f_{ysp}^2 + 3\tau_{xysp}^2} \quad (46)$$

ただし f_v : 換算応力

降伏後は、降伏時の引張応力 f_{xysp} とせん断応力 τ_{xysp} が保持されると仮定する。

(4) 計算の流れ

計算の流れ図を、図-4.11に示す。

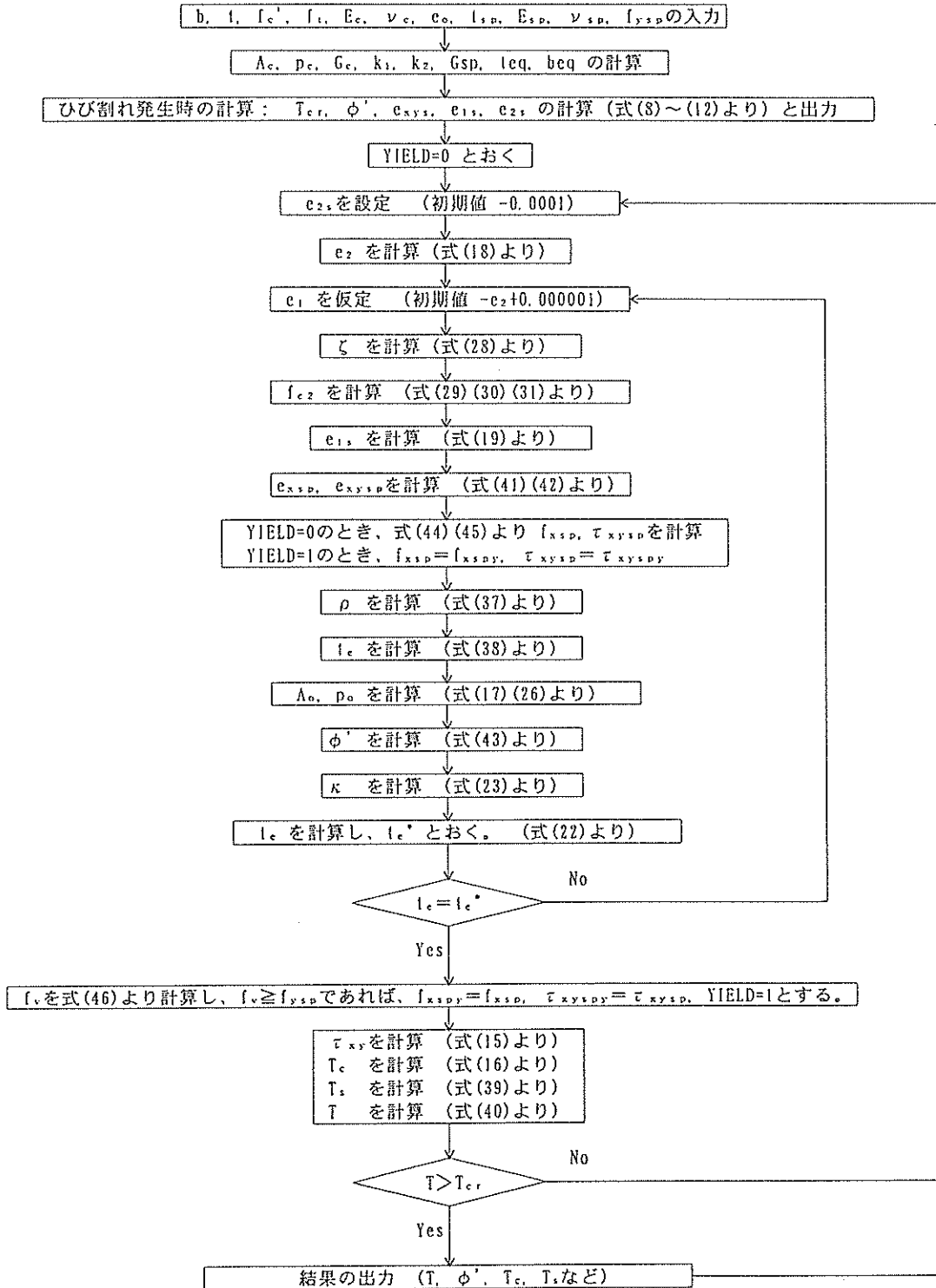


図-4.11 サンドイッチ部材の計算の流れ図

4.4 オープンサンドイッチ部材

(1) 断面諸元と材料特性値の設定

RC部材，サンドイッチ部材と同様に，断面諸元，コンクリート，鉄筋，および鋼板の力学特性値を設定し， G_c, G_{sp}, k_1, k_2 を求める。

(2) ひび割れ発生時の計算

RCと同様に計算する。

(3) ひび割れ発生後の解析

a) 力の釣り合い

RC側（鋼板を配置していない側）の力の釣り合いは，RC部材と同様と考えて次式で表す。

$$c_{f_c2} / 2 + \rho_{rc} f_{sb} = 0 \quad (47)$$

ただし， c_{f_c2} ：コンクリートの最小主応力

ρ_{rc} ：RC側の有効厚中の鋼材比

$$\rho_{rc} = A_{sb} / (c_{t_e} \cdot s) \quad (48)$$

c_{t_e} ：RC側の有効厚

RC側の有効厚部分のせん断応力 τ_{xyc} は，

$$\tau_{xyc} = -c_{f_c2} / 2 \quad (49)$$

と表される。また，RC側のせん断流（せん断応力と板厚の積） q_{rc} を，

$$q_{rc} = \tau_{xyc} c_{t_e} \quad (50)$$

と表す。

鋼板側の力の釣り合いは，サンドイッチ部材と同様と考えて次式で表す。

$$s_{f_c2} / 2 + \rho_s f_{sp} = 0 \quad (51)$$

ただし， s_{f_c2} ：鋼板側のコンクリートの最小主応力

ρ_s ：鋼板側の有効厚の鋼材比

$$\rho_s = t_{sp} / s_{t_e} \quad (52)$$

s_{t_e} ：鋼板側の有効厚

鋼板側のコンクリートのせん断応力 τ_{xyc} は，

$$\tau_{xyc} = -s_{f_c2} / 2 \quad (53)$$

と表される。また，鋼板側のコンクリートに流れるせん断流 q_c を，

$$q_c = \tau_{xyc} s_{t_e} \quad (54)$$

鋼板に流れるせん断流 q_{sp} を，

$$q_{sp} = \tau_{xyc} t_{sp} \quad (55)$$

と表す。

せん断流の連続条件⁷⁾から，次式を仮定する。

$$q_{rc} = q_c + q_{sp} \quad (56)$$

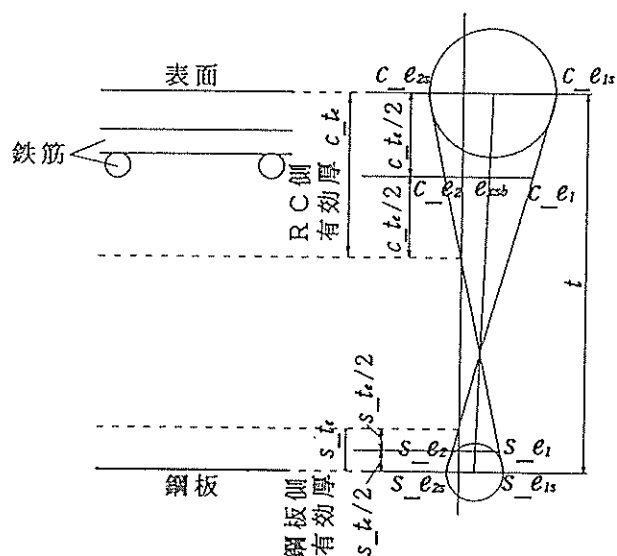


図-4.12 オープンサンドイッチ部材のモールのひずみ円

ねじりモーメントを，次式で表す。

$$T = 2 A_o q_{rc} \quad (57)$$

ただし， A_o ：せん断応力の経路が囲む面積

せん断応力の経路が，有効厚の中心に一致すると仮定すると

$$A_o = (t - c_{t_e} / 2 - s_{t_e} / 2)(b - c_{t_e}) \quad (58)$$

と表される。

b) 変形の適合条件

図-4.12は，モールのひずみ円の z 方向の変化を示す。非対称性から，上面と下面でのモール円は異なる。 x 方向のひずみは z 方向に直線的に変化すると仮定する。

RC部材，サンドイッチ部材の場合と同様に，最小主ひずみが負（圧縮）であるコンクリート部分の厚さを有効厚とする。RC側の有効厚中心と表面での最小主ひずみには，次式の関係がある。

$$c_{e2} = c_{e2s} / 2 \quad (59)$$

ただし， c_{e2} ：RC側の有効厚の中心での最小主ひずみ

c_{e2s} ：RC側の表面での最小主ひずみ

有効厚の中心での x 方向のひずみの値を，鉄筋のひずみの値として用いると，

$$e_{xsb} = (c_{e1} + c_{e2}) / 2 \quad (60)$$

ただし， c_{e1} ：RC側の有効厚の中心での最大主ひずみとなる。また，有効厚の中心での面内せん断ひずみは，

$$e_{xyc} = (c_{e1} - c_{e2}) / 2 \quad (61)$$

鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性

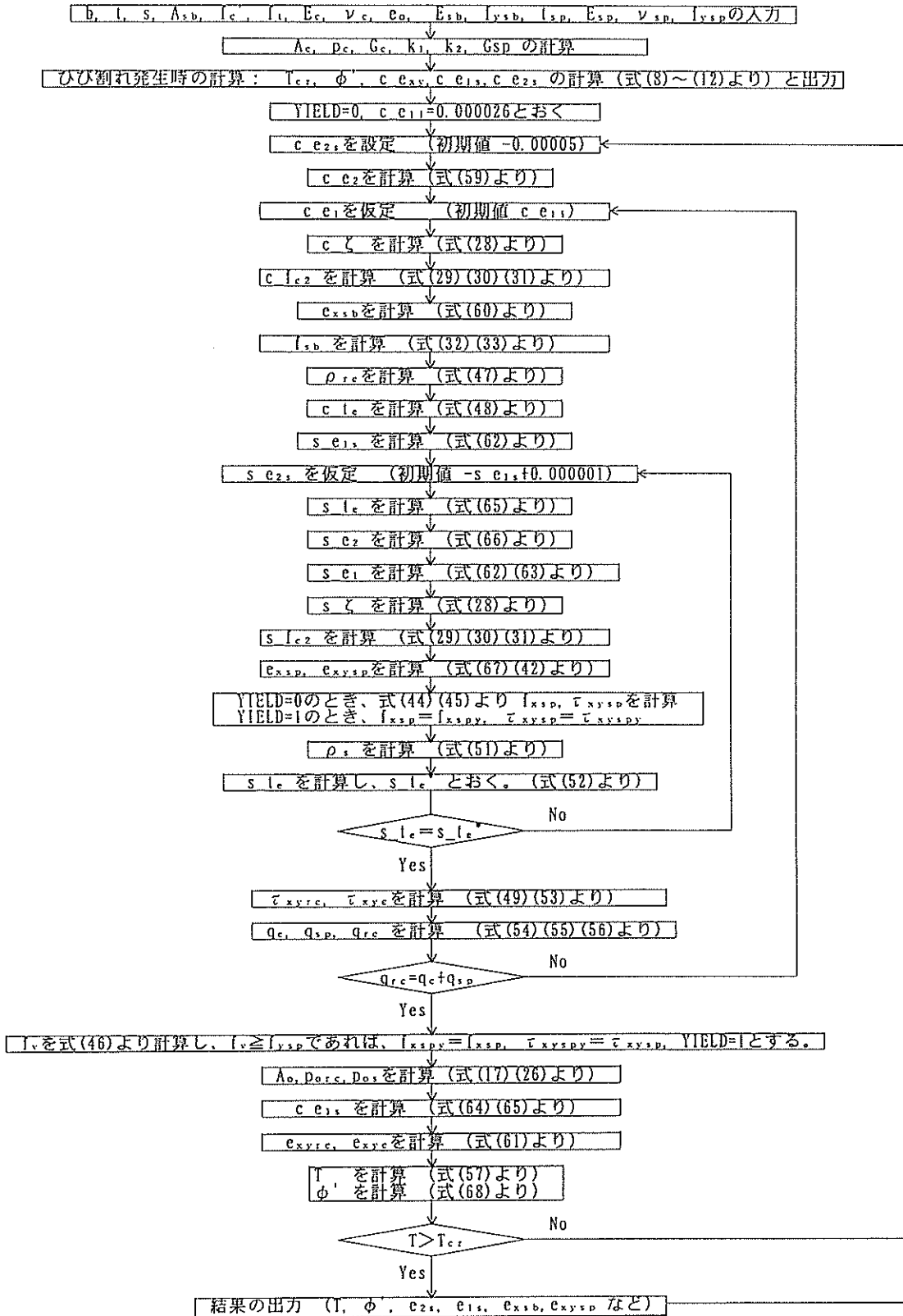


図-4.13 オープンサンドイッチ部材の計算の流れ図

ただし、

e_{orc} : RC側の有効厚中心での面内せん断ひずみ

となる、

RC側のひずみと鋼板側のひずみの関係を以下のように表す、

$$s_{e1s} = c_{e2s} (1 - t/c_{te}) \quad (62)$$

$$s_{e1} = c_{e2s} (1 - (t-s_{te}/2)/c_{te}) \quad (63)$$

$$s_{e2s} = c_{e1s} (1 - t/(t-s_{te})) \quad (64)$$

$$s_{e2s} = c_{e1} (1 - (t-c_{te}/2)/(t-c_{te}/2 - s_{te})) \quad (65)$$

ただし、 s_{e1s} : 鋼板の最大主ひずみ

s_{e1} : 鋼板側の有効厚の中心での最大主ひずみ

s_{e2s} : 鋼板の最小主ひずみ

c_{e1s} : RC側の表面での最大主ひずみ

鋼板側の有効厚中心と、鋼板での最小主ひずみには、次式の関係がある、

$$s_{e2} = s_{e2s}/2 \quad (66)$$

ただし、 s_{e2} : 鋼板側の有効厚中心での最小主ひずみ

鋼板のx方向ひずみは、

$$e_{xsp} = (s_{e1s} + s_{e2s})/2 \quad (67)$$

と表される、

ねじれ率 ϕ' を次式で求める、

$$\phi' = (p_{orc} e_{xsp} + p_{os} e_{xrc})/A_o \quad (68)$$

ただし、 p_{orc} : RC側のせん断応力の経路の長さ

$$p_{orc} = b - c_{te} + 2(t - c_{te}/2 - s_{te}) \quad (69)$$

p_{os} : 鋼板側のせん断応力の経路の長さ

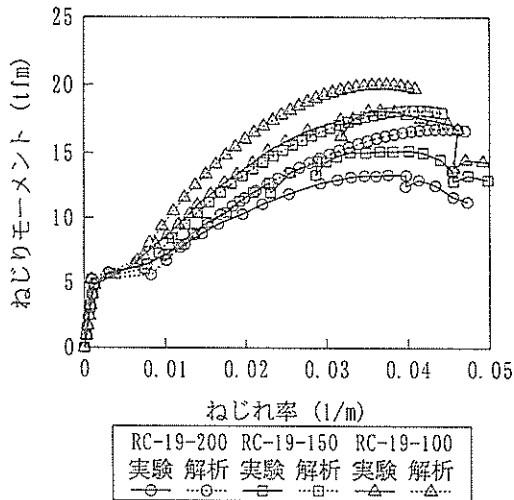


図-5.1 ねじれ率の実験結果と解析結果 (RC供試体)

$$p_{os} = b - 2 c_{te} \quad (70)$$

c)材料の構成則

コンクリートについてはRC部材と同様に、鋼板についてはサンドイッチ部材と同様に仮定する、

(4) 計算の流れ

計算の流れ図を、図-4.13に示す、

5. 実験結果と解析結果の比較

5.1 RC部材

RC供試体の実験結果と解析結果を図-5.1~5.4に示す。図-5.1から、ひび割れ発生ねじりモーメントの値と、ひび割れ発生直後のねじれ率の増加については、実験値と計算値が比較的良く一致している、しかしひび割れ発生後のねじりモーメントに対するねじれ率については、解析値の方が小さかった、

図-5.2から、45度方向の圧縮ひずみについては、実験値と計算値が比較的良く一致した、図-5.3に示した引張ひずみと、図-5.4に示した鉄筋の平均ひずみについては、図-5.1のねじれ率の結果と類似しており、解析値の方が小さかった、特に鉄筋の平均ひずみについては実験値と解析値の相違が大きかった、

実験値と解析値の相違の原因として、

- ① はり部材の解析方法を板部材に用いていること
 - ② コンクリートの構成則の仮定
 - ③ 有効厚、せん断応力の経路の設定方法
- などが考えられる、以下にこの原因について考察する、

①に関しては、板部材について今回の解析が常にねじり剛性を過大評価するのかどうか検討する必要がある、RC板部材のねじり載荷実験は、これまでMarti & Kong¹⁴⁾によって実施された例がある、Marti & Kongの実験供試体の諸元を表-5.1に示す、200mm×1700mm×

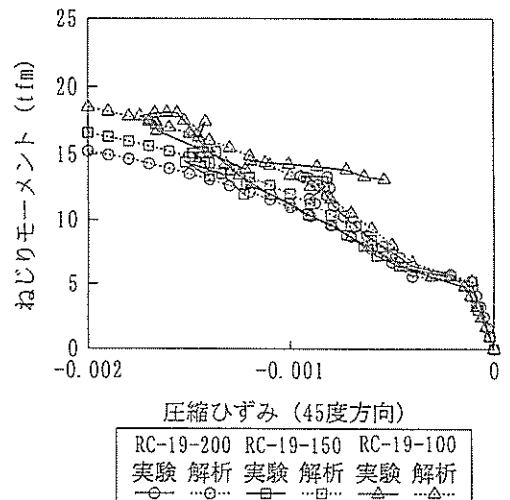
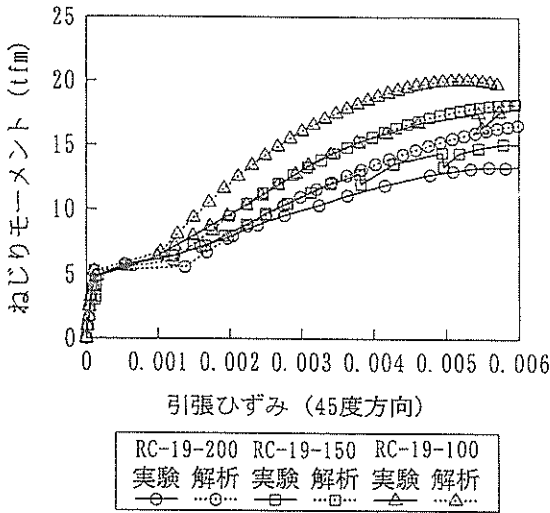


図-5.2 圧縮ひずみの実験結果と解析結果 (RC供試体)

鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性



注) 実験値はπゲージによる値

図-5.3 引張ひずみの実験結果と解析結果 (RC供試体)

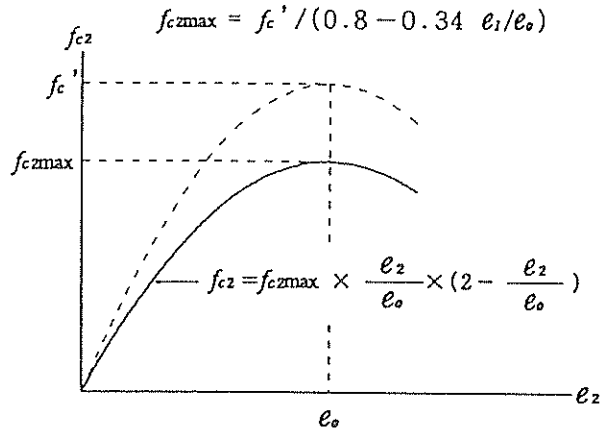


図-5.6 コンクリートの圧縮特性

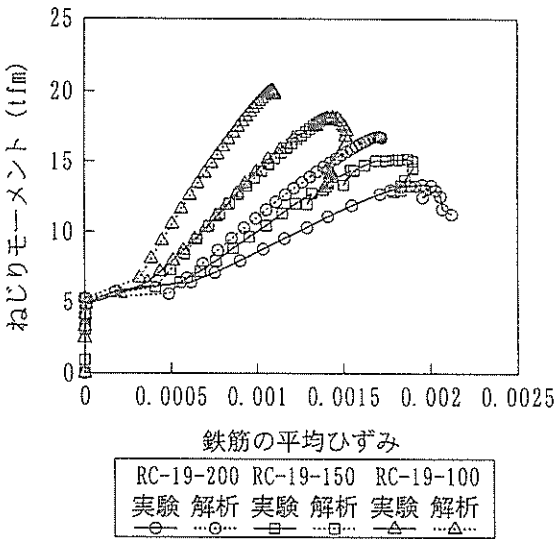


図-5.4 鉄筋ひずみの実験結果と解析結果 (RC供試体)

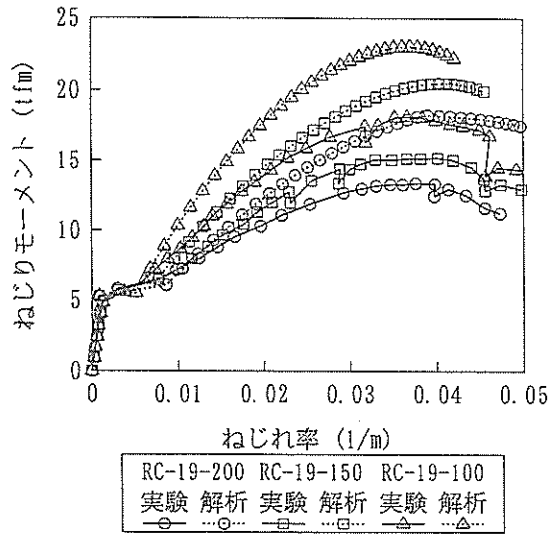


図-5.7 ねじれ率の実験結果と解析結果 (RC供試体)

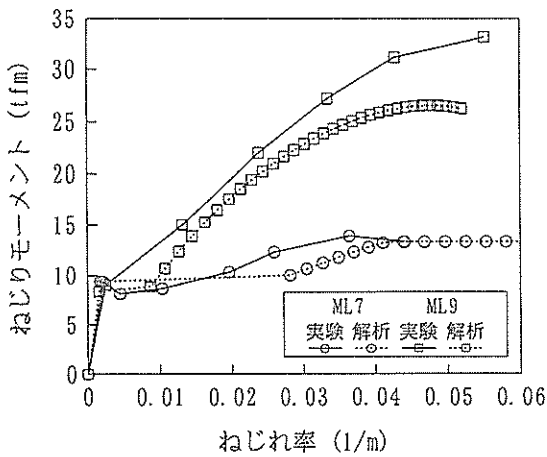


図-5.5 ねじれ率の実験結果と解析結果
(Marti & Kongの実験供試体)

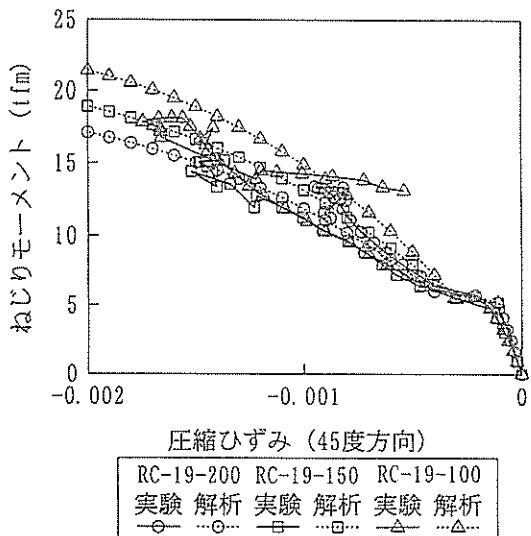


図-5.8 圧縮ひずみの実験結果と解析結果 (RC供試体)

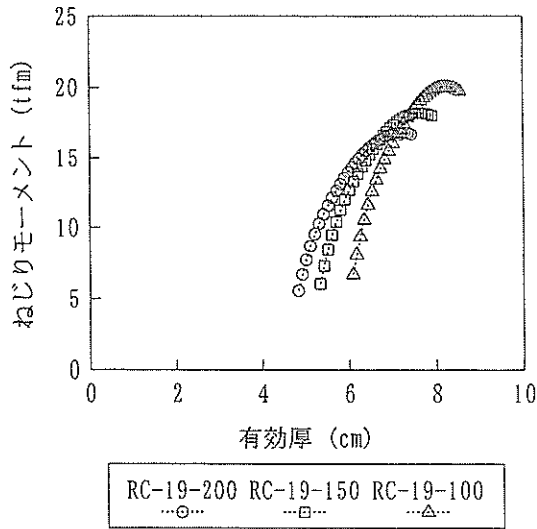


図-5.9 有効厚の解析結果 (RC供試体)

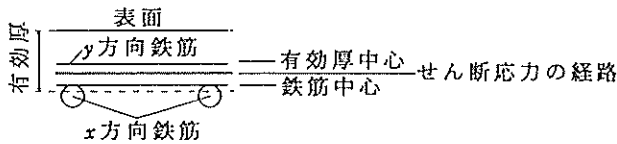


図-5.10 せん断応力経路の検討

表-5.1 Marti & Kongの実験供試体の諸元

供試体名		ML7	ML9
寸法		200mm×1700mm×1700mm	
コンクリート	圧縮強度 f'_c	453kgf/cm ²	453kgf/cm ²
	引張強度 f_t	44.8kgf/cm ²	39.8kgf/cm ²
鉄筋	断面積 A_{sb}	1.00cm ²	2.00cm ²
	降伏強度 f_{ysb}	4888kgf/cm ²	4204kgf/cm ²
	間隔 s	20cm	10cm

表-5.2 RC供試体のねじり耐力の実験値と解析値

供試体名	実験値 (tfm)	解析値 (tfm)	解析値 / 実験値
RC-19-200	13.5	16.8	1.25
RC-19-150	15.4	18.2	1.18
RC-19-100	18.4	20.0	1.09
ML7*	13.9	13.3	0.96
ML9*	33.1	26.5	0.80

* Marti & Kong の実験供試体

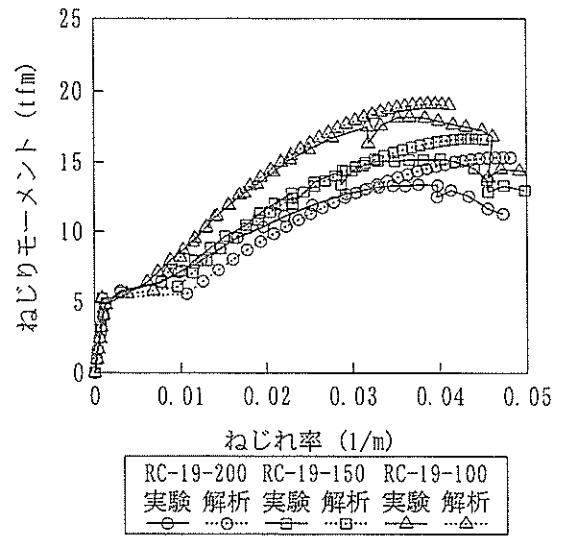


図-5.11 ねじれ率の実験結果と解析結果 (RC供試体)

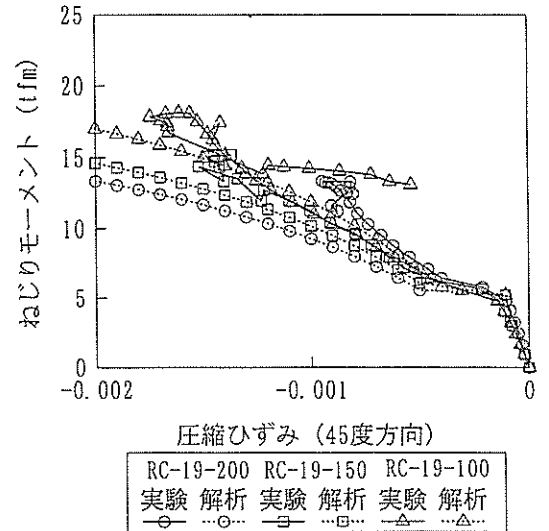


図-5.12 圧縮ひずみの実験結果と解析結果 (RC供試体)

1700mmの供試体に純ねじり載荷している。等方配筋の2体の供試体の実験結果と、今回の解析方法による解析結果を図-5.5に示す。ML7については実験値と解析値が良く一致している。また、ML9については、実験値の方がねじり剛性が大きい。このように、今回の解析が板部材のねじり剛性を必ずしも過大評価するわけではない。今回の3供試体とMarti & Kongの供試体のねじり耐力の実験値と解析値をまとめて表-5.2に示す。解析値と実験値の比は、0.80~1.25であった。

②に関して、今回の解析では図-4.7の構成則を用いた。横ひずみ存在下でのコンクリートの圧縮特性については、このほかに図-5.6に示す関係¹⁹⁾が実験との適合性がよいとされている。そこで図-5.6の関係を用いて解析した結果を図-5.7, 5.8に示す。この結果から、今回

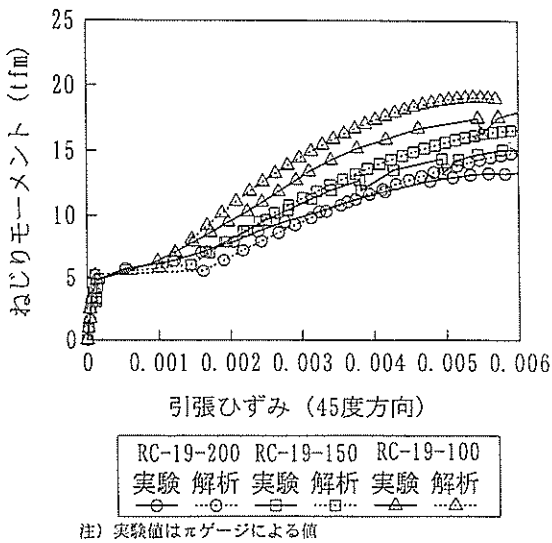


図-5.13 引張ひずみの実験結果と解析結果 (RC供試体)

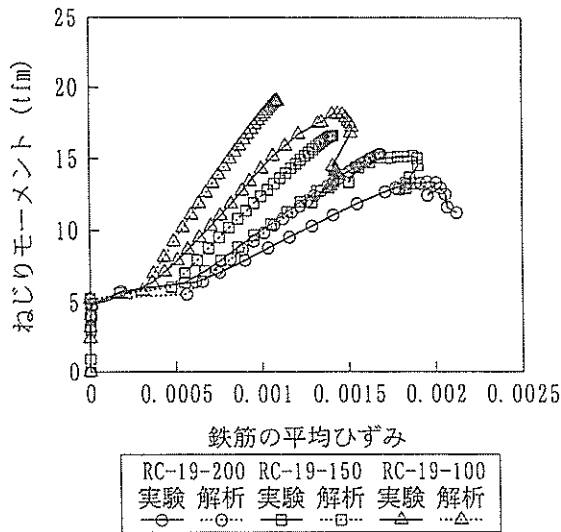


図-5.14 鉄筋ひずみの実験結果と解析結果 (RC供試体)

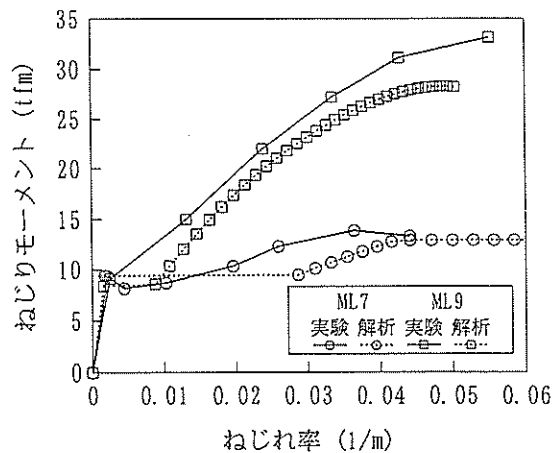


図-5.15 ねじれ率の実験結果と解析結果 (Marti & Kongの実験供試体)

の供試体については、図-4.7の構成則を用いた方が図-5.6を用いた場合よりも実験との適合性が良かった。

③に関して、今回の解析では、せん断応力の経路が有効厚の中心に一致すると仮定した。この仮定の根拠は、文献8)の付録に示されている。今回のRC供試体についての解析の結果、有効厚は図-5.9に示すような値であった。一方、供試体の表面からx方向鉄筋の中心までの距離は53.5mm、y方向鉄筋の中心までの距離は34.5mmであり、それらの平均は44mmであった。すなわち鉄筋の中心線は有効厚の中心線よりも供試体の内側に位置していた。このため式(17)で求めた A_0 よりも実際の A_0 が小さかった可能性がある。

そこでせん断応力の経路を、有効厚中心と鉄筋中心の中間(図-5.10)と仮定して解析した結果を図-5.11~5.15に示す。図-5.11では、ねじれ率の解析結果の実験結果との整合性は図-5.1より良い。ただし、図-5.12の圧縮ひずみの解析結果は、図-5.2の場合よりも実験結果と離れる傾向にある。また図-5.13および図-5.14のひずみの解析結果は、図-5.3および図-5.4よりは実験結果と近いが、やはり実験結果よりもひずみがかかなり小さい。また、図-5.15のMarti & Kongの実験ケースについての解析結果は、図-5.5とほとんど変わらなかった。このように、せん断応力の経路の設定方法を変更しても、必ずしも良い結果が得られなかった。

このように①~③のいずれも実験値と解析値の相違の主要な原因とは見なせない。本研究の範囲では、表-5.2に示したねじり耐力解析値よりも良く実験値と合う解析値を得る方法は提案できなかった。RC板部材のねじり耐力を本解析の方法で求める場合には、解析の精度を考慮して安全係数を1.3程度に設定する必要がある。

5.2 サンドイッチ部材

図-5.16に、サンドイッチ供試体のねじりモーメントとねじれ率の関係の、実験値と解析値を示す。鋼板が降伏するまでのねじり剛性は、解析値の方がやや低いものの、概ね一致している。鋼板が降伏するモーメントは、実験値の61.3tfmに対して、解析値は55.6tfmであった。降伏後のねじりモーメントの解析値は、ほとんど一定であった。これは、降伏後は降伏時の鋼板の引張応力とせん断応力が保持されると仮定したためである。一方、ねじりモーメントの実験値は降伏後も増加している。降伏後の挙動の解析は、今後の課題である。

鋼板が降伏するまでの、ねじりモーメント T 、鋼板が負担するねじりモーメント T_s 、コンクリートが負担するねじりモーメント T_c とねじれ率の関係を示す。 T_s の実験値は、鋼板の面内せん断ひずみの計測

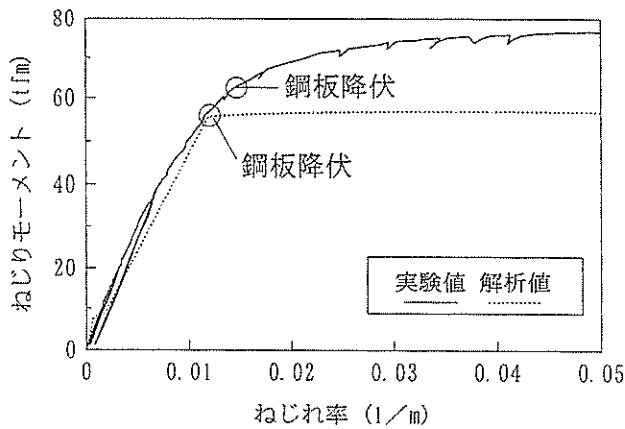


図-5.16 ねじれ率の実験結果と解析結果 (供試体SW-4.5)

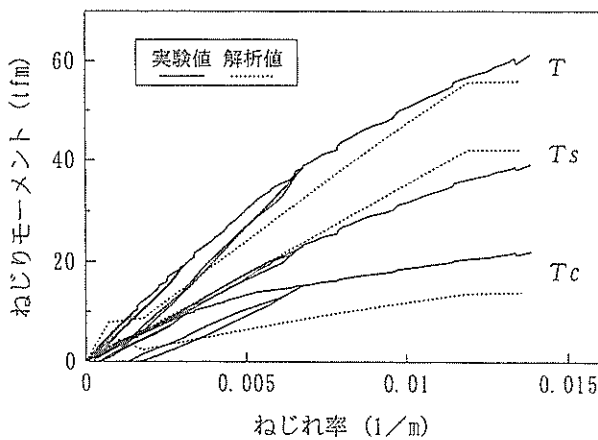


図-5.17 鋼板とコンクリートが負担するねじりモーメント (供試体SW-4.5)

結果 (図-3.36) から, 式(45)および式(39)によって求めた, T_c の実験値は, T の実験値から T_s の実験値を差し引いた値である. T_s については, 解析値の方がやや大きく, T_c については, 実験値の方が大きかった. T_c についての解析精度は十分とはいえないが, T_c を無視する計算方法よりも実際のねじり挙動に近い解析値が今回の解析方法で得られたと考えられる.

5.3 オープンサンドイッチ部材

図-5.18~5.32に, オープンサンドイッチ供試体の実験結果と解析結果を示す. 図-5.18~5.20にねじれ率, 図-5.21~5.23に圧縮ひずみ, 図-5.24~5.26に引張ひずみ, 図-5.27~5.29に鉄筋のひずみ, 図-5.30~5.32に鋼板ひずみを, 使用鉄筋別に3供試体ずつ示している.

図-5.18~5.20から, 供試体OS-22-200, OS-22-150, OS-22-100, OS-19-150, OS-19-100のねじれ率の解析値は実

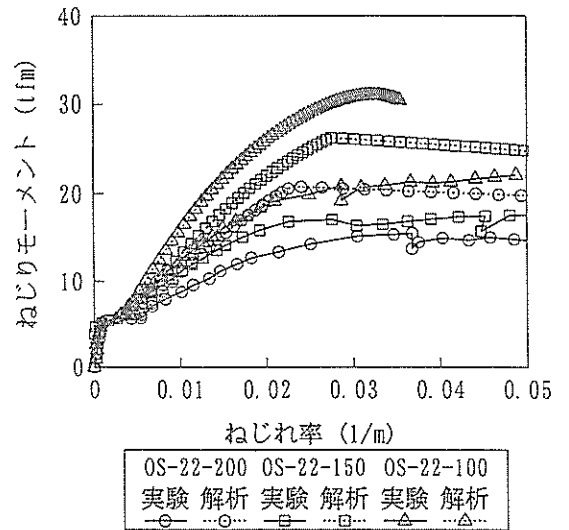


図-5.18 ねじれ率の実験結果と解析結果 (OS-22供試体)

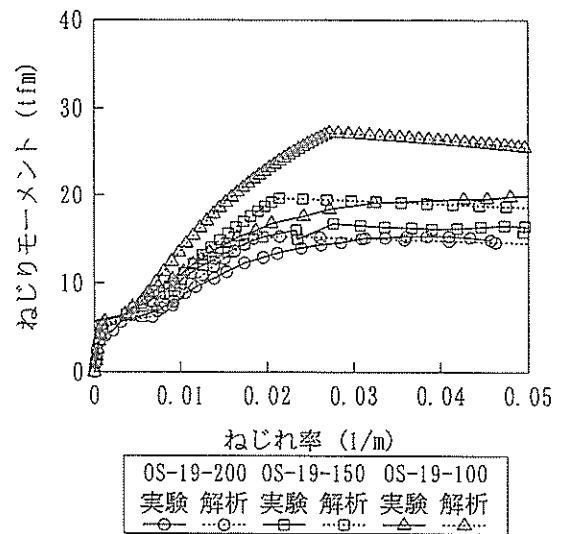


図-5.19 ねじれ率の実験結果と解析結果 (OS-19供試体)

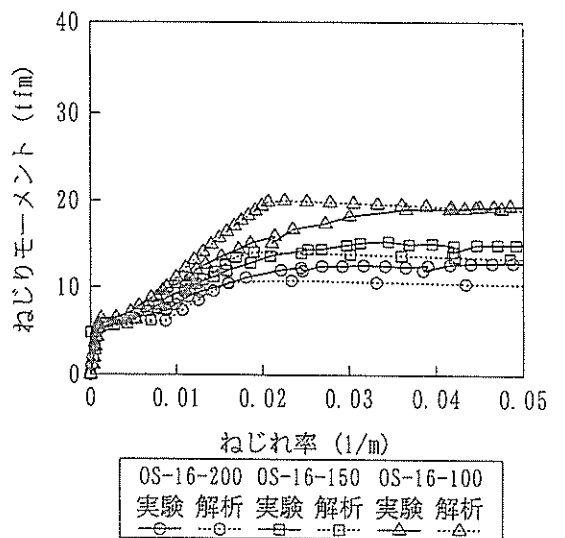


図-5.20 ねじれ率の実験結果と解析結果 (OS-16供試体)

鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性

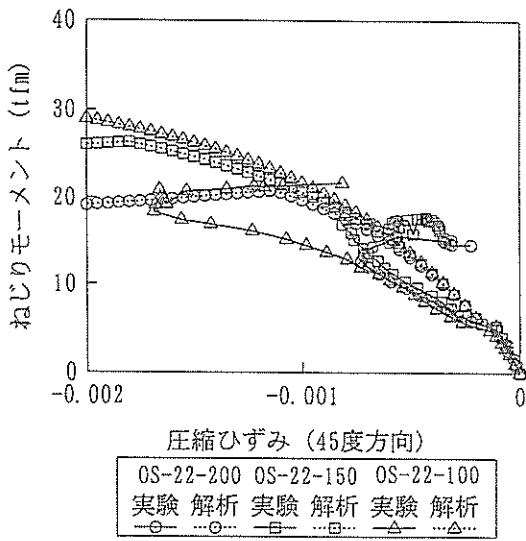


図-5.21 圧縮ひずみの実験結果と解析結果 (OS-22供試体)

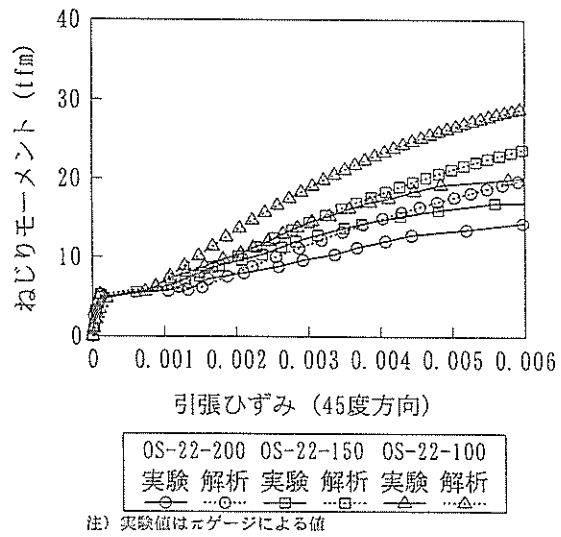


図-5.24 引張ひずみの実験結果と解析結果 (OS-22供試体)

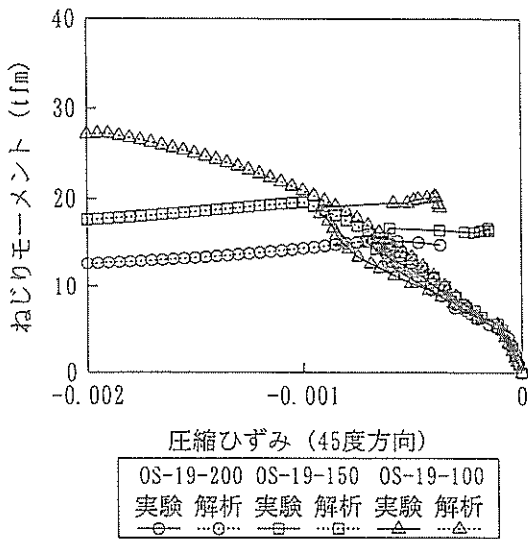


図-5.22 圧縮ひずみの実験結果と解析結果 (OS-19供試体)

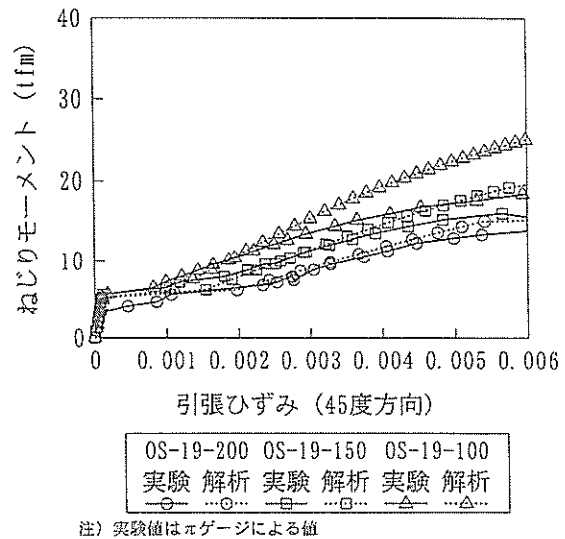


図-5.25 引張ひずみの実験結果と解析結果 (OS-19供試体)

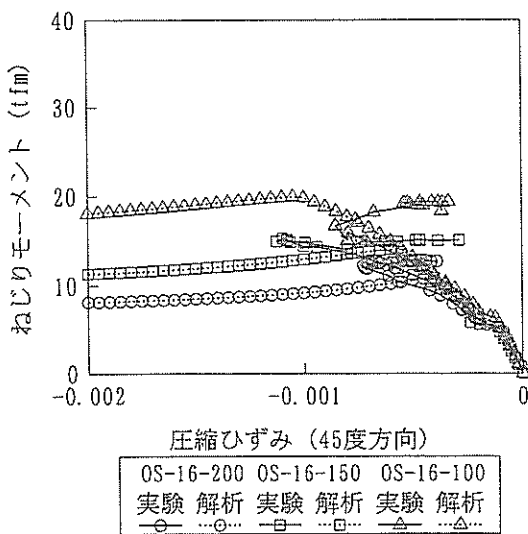


図-5.23 圧縮ひずみの実験結果と解析結果 (OS-16供試体)

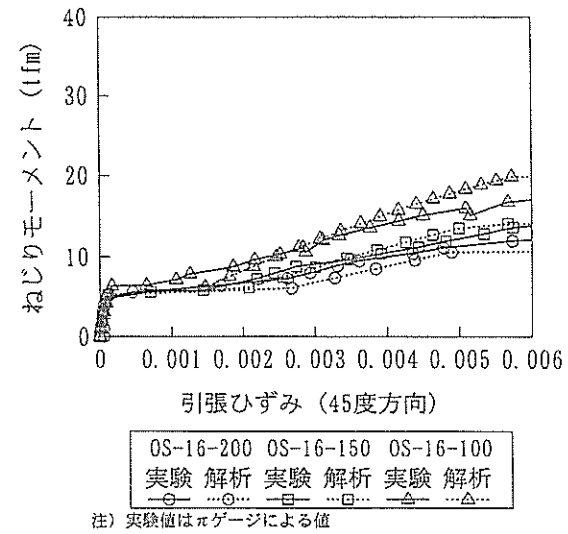


図-5.26 引張ひずみの実験結果と解析結果 (OS-16供試体)

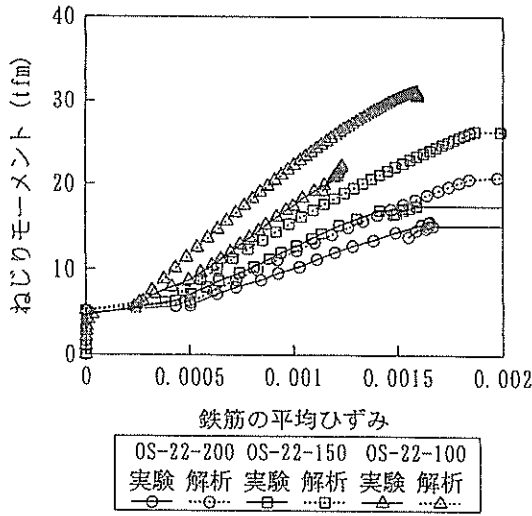


図-5.27 鉄筋ひずみの実験結果と解析結果 (OS-22供試体)

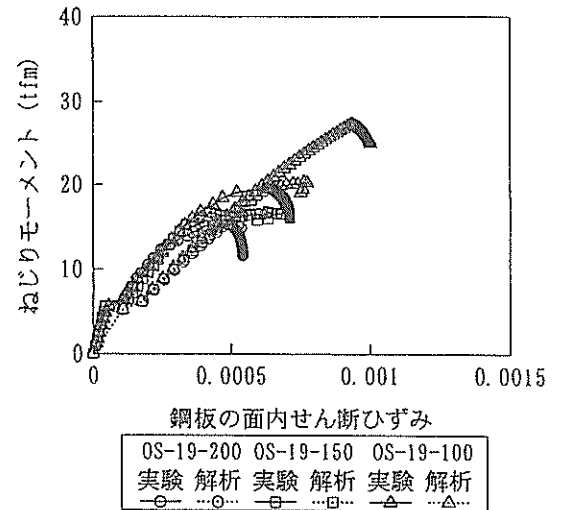


図-5.30 鋼板の面内せん断ひずみの実験結果と解析結果 (OS-22供試体)

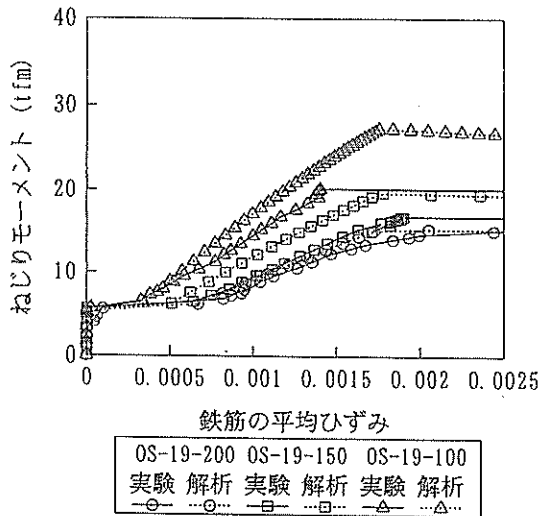


図-5.28 鉄筋ひずみの実験結果と解析結果 (OS-19供試体)

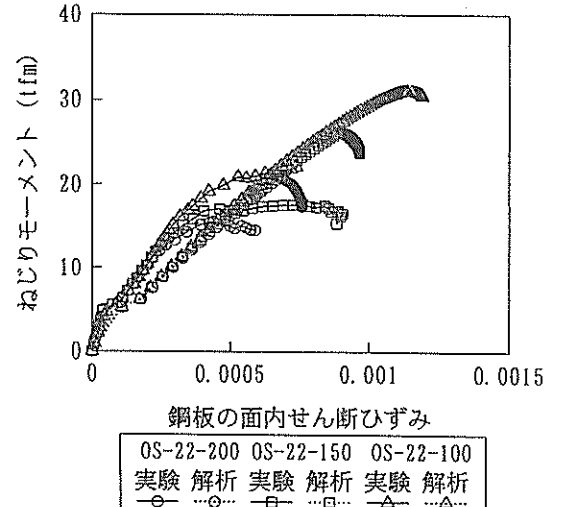


図-5.31 鋼板の面内せん断ひずみの実験結果と解析結果 (OS-19供試体)

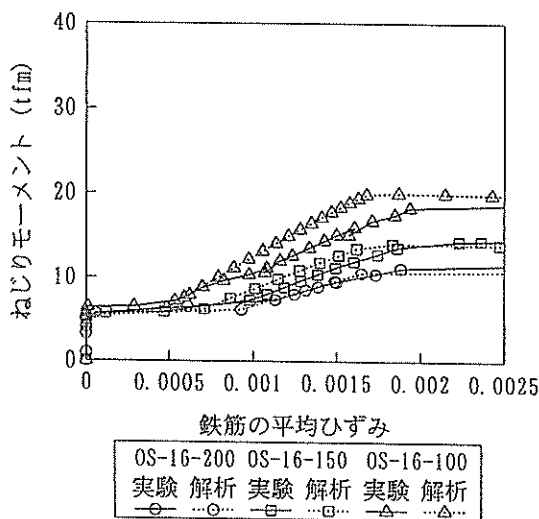


図-5.29 鉄筋ひずみの実験結果と解析結果 (OS-16供試体)

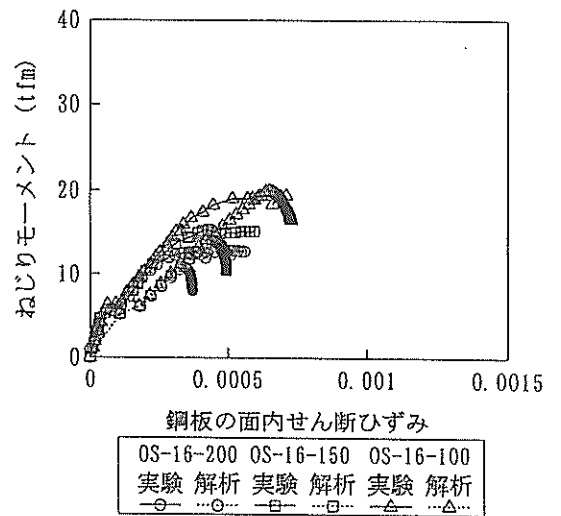


図-5.32 鋼板の面内せん断ひずみの実験結果と解析結果 (OS-16供試体)

験値より小さい。すなわち、ねじり剛性、耐力ともに実験値が解析値より小さい。OS-19-200とOS-16-100では、ねじれ率は解析値の方が実験値より小さいが、ねじり耐力はほぼ一致している。OS-16-200とOS-16-150では、ねじれ耐力の解析値は実験値よりもやや大きい。

ねじり耐力の実験値と解析値をまとめて表-5.3に示す。解析値と実験値の比は、0.82~1.47であった。鉄筋としてD22を用いた供試体では、解析値と実験値の比が1.33~1.47と大きかった。鉄筋としてD19ないしD16を用いた供試体では、鉄筋の間隔が狭くなるほど解析値と実験値の比が大きくなる傾向が見られた。

図-5.21~5.23から、OS-22-200, OS-22-150, OS-22-100, OS-19-100については、解析による圧縮ひずみの絶対値が実験値より小さい。他の供試体については、解析値と実験値が比較的一致している。図-5.24~5.26の引張ひずみ、図-5.27~5.29の鉄筋のひずみについても、ほぼ同様である。

図-5.30~5.32から、ねじりモーメントによって生じる鋼板の面内せん断ひずみの解析値は、実験値よりも大きい。ただし図-3.30~3.32に示したように、供試体中央部のP2~P4では、側面近傍のP1, P5よりもひずみが大きく、P2~P4における計測値と解析値は比較的良く一致していた。

以上の結果から、今回の解析は、実験におけるひずみの状況を概ね再現しているが、鉄筋比が大きい場合にRC側のひずみを過小に算定し、その結果ねじり剛性と耐力を過大に算定する傾向がある。この点の改良による解析精度の向上は、今後の課題としたい。今回の解析方法でオープンサンドイッチ部材のねじり耐力を算定する場合には、安全係数を1.5程度とする必要がある。

表-5.3 オープンサンドイッチ供試体のねじり耐力の実験値と解析値

供試体名	実験値 (tfm)	解析値 (tfm)	解析値 / 実験値
OS-22-200	15.6	20.8	1.33
OS-22-150	17.8	26.2	1.47
OS-22-100	22.3	31.0	1.39
OS-19-200	15.5	15.3	0.99
OS-19-150	16.9	19.6	1.16
OS-19-100	20.4	27.2	1.33
OS-16-200	13.1	10.8	0.82
OS-16-150	15.4	14.1	0.91
OS-16-100	19.6	20.0	1.02

5.4 ひび割れ幅

以上は主として終局限界状態に関する検討であった。ところで、港湾構造物は非常に厳しい腐食性環境に設置される。このためRC部材とオープンサンドイッチ部材の使用限界状態に関して、ひび割れ幅の検討が必要不可欠である。

設計では、鉄筋の応力(またはひずみ)が所定の値の時のひび割れ幅が許容値以下に収まるように鉄筋間隔、かぶり等を定める。コンクリート標準示方書¹⁰⁾では、RCはりの曲げひび割れに関して、鉄筋の応力(またはひずみ)とひび割れ幅の関係を次式で表している。

$$w_{cr} = k s_{cr} e_{s,b} \quad (71)$$

ただし、

w_{cr} : ひび割れ幅

k : 鉄筋の付着性状の影響を表す定数

異形鉄筋の場合に1.0, 普通丸鋼の場合に1.3

s_{cr} : ひび割れ間隔

$$s_{cr} = 4c + 0.7(s - d_{s,b}) \quad (72)$$

c : かぶり

s : 鉄筋の中心間隔

$d_{s,b}$: 鉄筋径

$e_{s,b}$: 鉄筋のひずみ

$$e_{s,b} = \sigma_{s,b} / E_{s,b} + \varepsilon'_{cs,d} \quad (73)$$

$\sigma_{s,b}$: 鉄筋の引張応力

$E_{s,b}$: 鉄筋の弾性係数

$\varepsilon'_{cs,d}$: コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値

平均ひび割れ幅と鉄筋の平均ひずみの実験値と、式(71)による計算値を図-5.33~5.36に示す。なお、 $k=1.0$, $\varepsilon'_{cs,d}=0$ とした。ひび割れ間隔 s_{cr} の値は、式(72)から求めた表-5.4の値を用いた。ひび割れ幅の実験値は、計算値の2倍以上の大きな値であった。

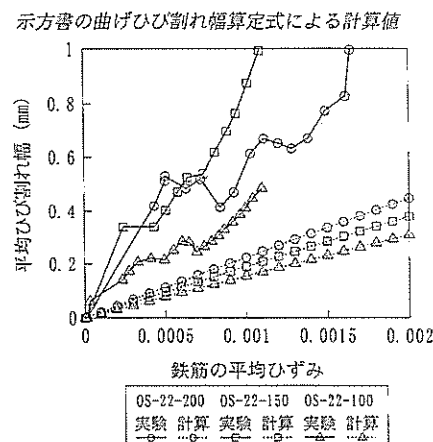


図-5.33 ひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係(OS-22供試体)

示方書の曲げひび割れ幅算定式による計算値

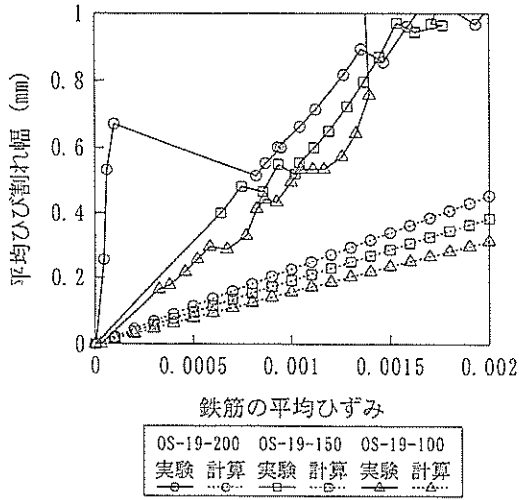


図-5.34 ひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係 (OS-19供試体)

示方書の曲げひび割れ幅算定式による計算値

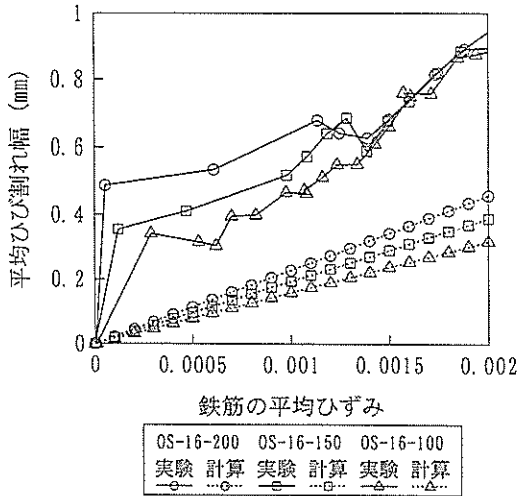


図-5.35 ひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係 (OS-16供試体)

示方書の曲げひび割れ幅算定式による計算値

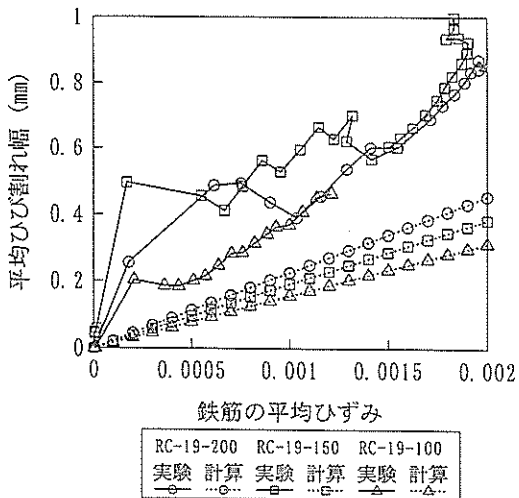


図-5.36 ひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係 (RC供試体)

表-5.4 ひび割れ間隔の値 (式(72)より)

鉄筋間隔 鉄筋径	200mm	150mm	100mm
22mm	22.5cm	19.0cm	15.5cm
19mm	22.7cm	19.2cm	15.7cm
16mm	22.9cm	19.4cm	15.9cm

表-5.5 ひび割れ間隔の値 (式(78)より)

鉄筋間隔	200mm	150mm	100mm
ひび割れ間隔	14.1cm	10.6cm	7.1cm

コンクリート標準示方書では、特に厳しい腐食性環境での許容ひび割れ幅を、

$$w_a = 0.0035c \quad (74)$$

ただし、 w_a : 許容ひび割れ幅

c : かぶり

と定めている。今回の供試体では $c=25\text{mm}$ であるから、式(74)によれば $w_a=0.0875\text{mm}$ である。実験結果から、各供試体の平均ひび割れ幅は、ひび割れ発生直後にこの許容ひび割れ幅の値を超えていた。

ねじりひび割れ幅の実験値が、曲げひび割れ幅の算定式を用いた計算値よりも相当大きくなる理由は、図-4.6と図-4.12に示したモールのひずみ円を用いて説明できる。これらの図において、コンクリートの表面における主引張ひずみ e_1 は、鉄筋のひずみ e_{xsb} よりも2倍以上大きい。式(71)では、ひずみの値として e_1 ではなく e_{sb} を用いているため、計算値が実験値よりも小さくなるのである。

Leonhardt & Schelling¹⁰⁾のRCはり部材のねじり実験でも、引張と曲げに対して導かれた式では評価できない大きなひび割れ幅が示されている。Leonhardt & Schellingは、平均ひび割れ幅を次式で表している。

$$w_{cr} = s_{cr} (e_{xsb} + e_{ysb}) \quad (75)$$

ただし、 e_{xsb} : x方向の鉄筋のひずみ

e_{ysb} : y方向の鉄筋のひずみ

$$s_{cr} = (s_x + s_y) / 2\sqrt{2} \quad (76)$$

s_x : x方向の鉄筋の間隔

s_y : y方向の鉄筋の間隔

今回の実験供試体では、 $e_{xsb} = e_{ysb}$, $s_x = s_y (=s$ とおく)より、式(75)(76)は、

$$w_{cr} = s_{cr} 2e_{xsb} \quad (77)$$

$$s_{cr} = s / \sqrt{2} \quad (78)$$

となる。したがって s_{cr} の値は表-5.5のようになる。

式(77)および式(78)による計算値と実験値を図-5.37~5.40に示す。式(77)では式(71)における $e_{x,b}$ の代わりに $2e_{x,b}$ が用いられている。これによって、 $e_{x,b}$ と主ひずみ e_1 の違いが一部考慮されている。しかし表-5.5のひび割れ間隔 s_{cr} は、表-5.4の値よりかなり小さい。この結果、ひび割れ幅の計算値は実験値よりかなり小さかった。このように今回の実験におけるひび割れ幅は、Leonhardt & Schellingの式による計算値よりもかなり大きかった。

なお、Leonhardt & Schellingのねじり実験では、最大ひび割れ幅/平均ひび割れ幅=2.5という非常に大きなばらつきが出ている。このため、Leonhardt & Schellingは、ひび割れ幅の信頼度90%値を次式で表している。

$$w_{90} = 2.0w_{cr} \quad (79)$$

今回の実験でも、図-3.55~5.57に示したように、ひび割れ幅の値には大きなばらつきが出ており、最大ひび割れ幅/平均ひび割れ幅が2.0に達する供試体もあった。このため式(79)は、RC板部材とオープンサンドイッチ板部材に対しても有効と考えられる。

今回の実験でのひび割れ幅が、式(71)(72)および式(77)(78)による計算値よりも大きかった理由として、前述したように、鉄筋のひずみ $e_{x,b}$ と表面での引張ひずみ e_1 の差が考えられる。図-5.41~5.44は、 $e_{x,b}$ と e_1 の実験値と、今回の解析方法による解析値を示している。実験結果から、 e_1 は $e_{x,b}$ の約3倍の値であっ

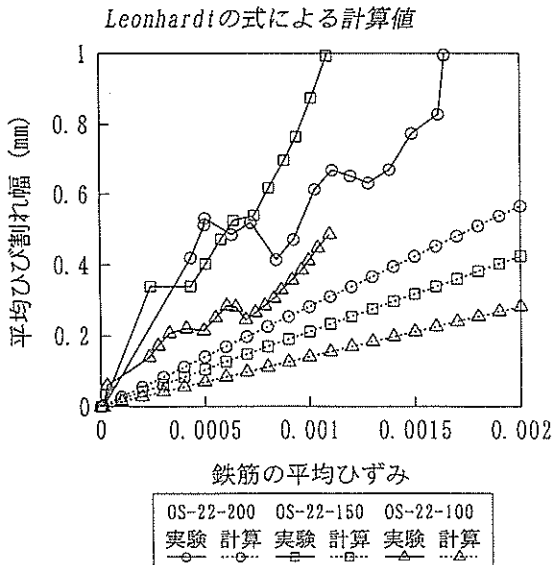


図-5.37 ひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係 (OS-22供試体)

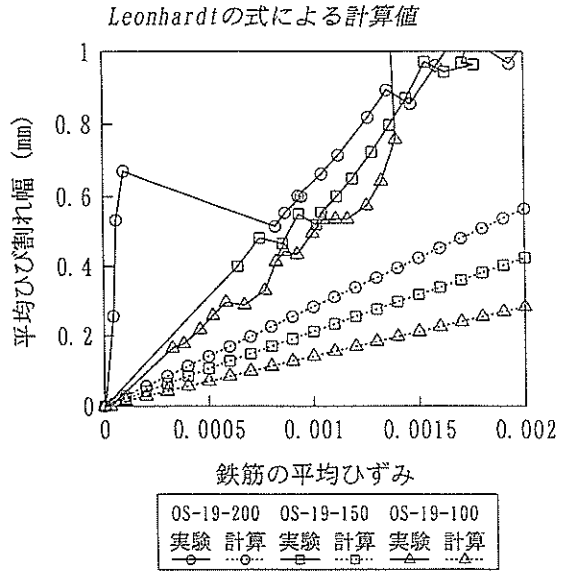


図-5.38 ひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係 (OS-19供試体)
Leonhardtの式による計算値

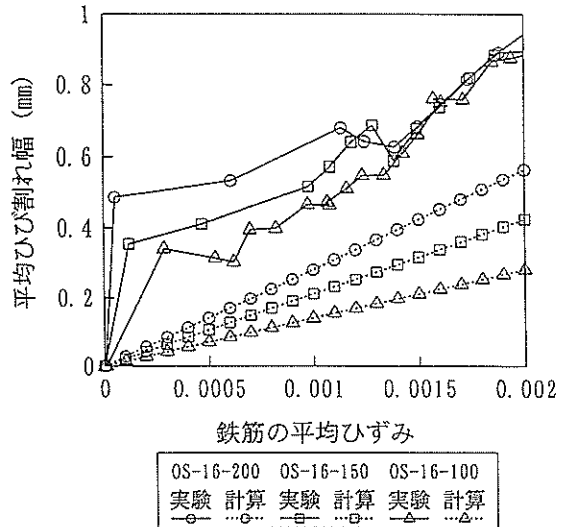


図-5.39 ひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係 (OS-16供試体)
Leonhardtの式による計算値

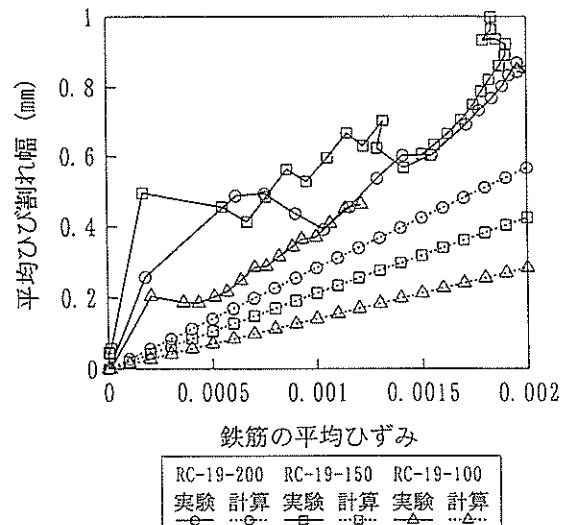
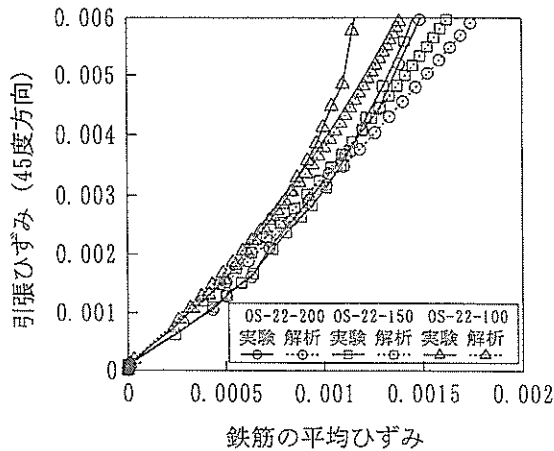
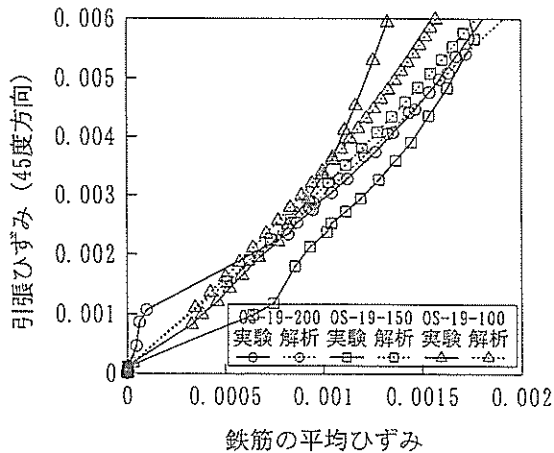


図-5.40 ひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係 (RC供試体)



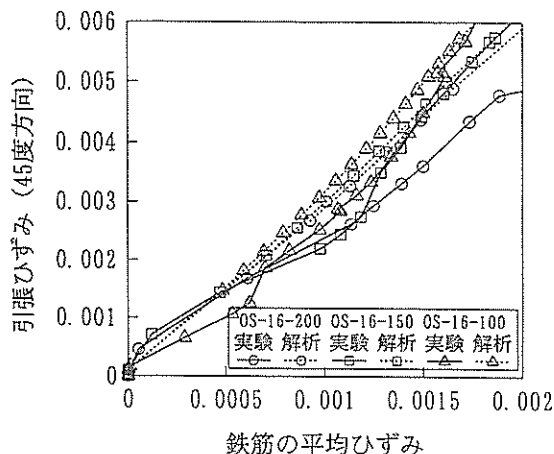
注) 引張ひずみの実験値はπゲージによる値

図-5.41 コンクリートの引張ひずみと鉄筋ひずみの関係 (OS-22供試体)



注) 引張ひずみの実験値はπゲージによる値

図-5.42 コンクリートの引張ひずみと鉄筋ひずみの関係 (OS-19供試体)

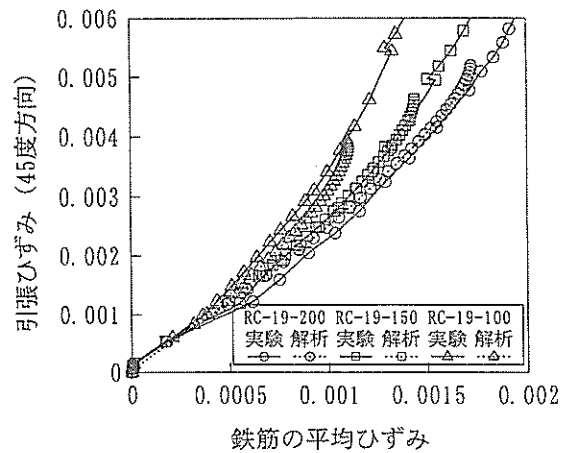


注) 引張ひずみの実験値はπゲージによる値

図-5.43 コンクリートの引張ひずみと鉄筋ひずみの関係 (OS-16供試体)

表-5.6 ひび割れ間隔の値 (式(81)より)

鉄筋径 \ 鉄筋間隔	200mm	150mm	100mm
22mm	15.9cm	13.4cm	10.9cm
19mm	16.0cm	13.6cm	11.1cm
16mm	16.2cm	13.7cm	11.2cm



注) 引張ひずみの実験値はπゲージによる値

図-5.44 コンクリートの引張ひずみと鉄筋ひずみの関係 (RC供試体)

た、今回の解析は、この両者の関係については実験結果と比較的良好一致していた。そこで、今回の解析で得られる表面での引張ひずみ ϵ_{1s} の値に、ひび割れ間隔 s_{cr} を掛ける次式によってひび割れ幅を計算することを考える。

$$w_{cr} = s_{cr} \epsilon_{1s} \quad (80)$$

ひび割れ間隔 s_{cr} として表-5.5の値を用いた場合の解析値と実験値を図-5.45~5.48に示す。図-5.37~5.40よりは実験値と解析値が近いが、依然としてひび割れ幅の実験値の方が解析値よりも大きい。

次に、コンクリート標準示方書の曲げひび割れ間隔の算定式(72)による s_{cr} を $\sqrt{2}$ で除す次式で s_{cr} を求める。

$$s_{cr} = \{4c + 0.7(s - d_s)\} / \sqrt{2} \quad (81)$$

求めた s_{cr} を表-5.6に示す。式(81)の $\sqrt{2}$ という値は、軸方向引張力とせん断力を受けるRCはりの解析でBhide & Collins¹⁷⁾が用いている次式で $\alpha = 45$ 度、 $s_{xcr} = s_{ycr}$ とおくことにより得られる。

鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性

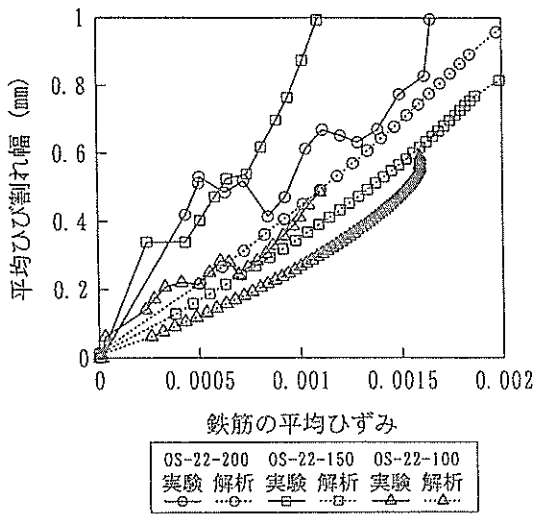


図-5.45 ひび割れ間隔として表-5.5の値を用いた解析値と実験値 (OS-22供試体)

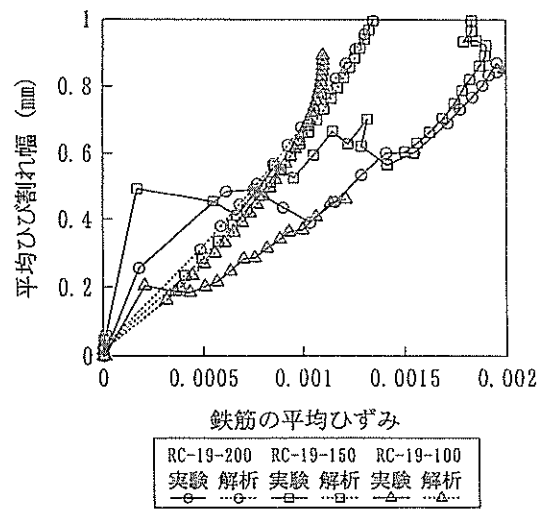


図-5.48 ひび割れ間隔として表-5.5の値を用いた解析値と実験値 (RC供試体)

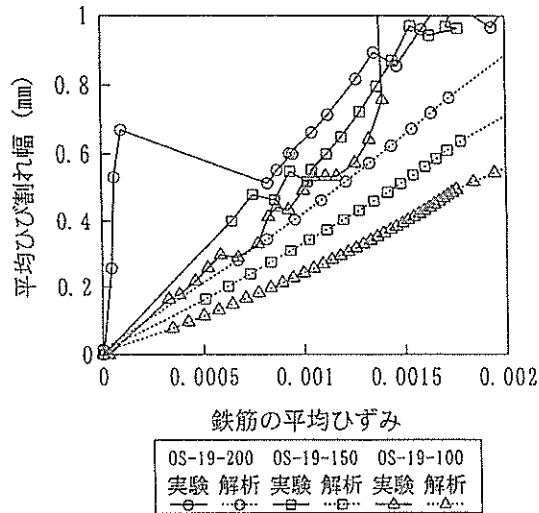


図-5.46 ひび割れ間隔として表-5.5の値を用いた解析値と実験値 (OS-19供試体)

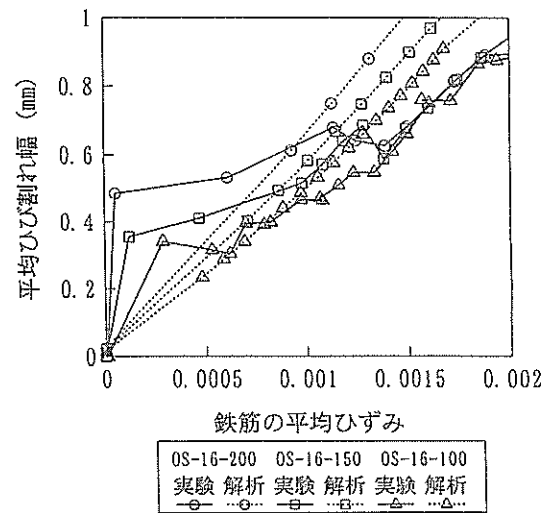


図-5.49 ひび割れ間隔として表-5.6の値を用いた解析値と実験値 (OS-22供試体)

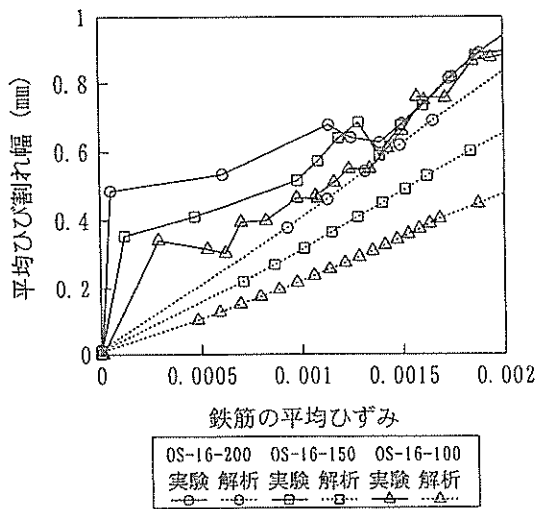


図-5.47 ひび割れ間隔として表-5.5の値を用いた解析値と実験値 (OS-16供試体)

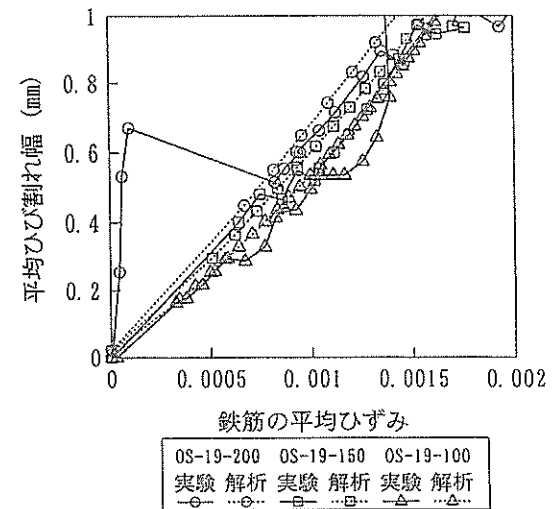


図-5.50 ひび割れ間隔として表-5.6の値を用いた解析値と実験値 (OS-19供試体)

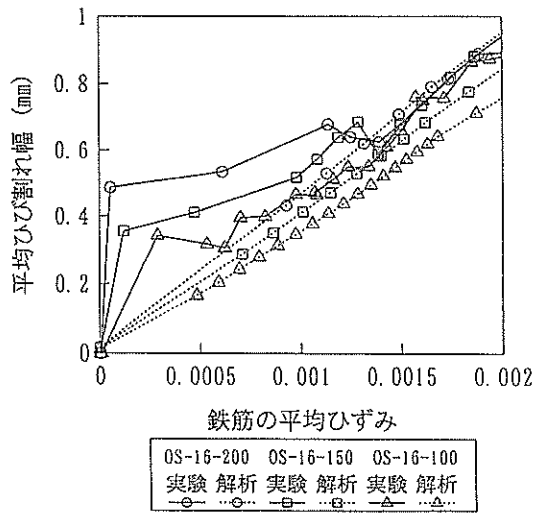


図-5.51 ひび割れ間隔として表-5.6の値を用いた解析値と実験値 (OS-16供試体)

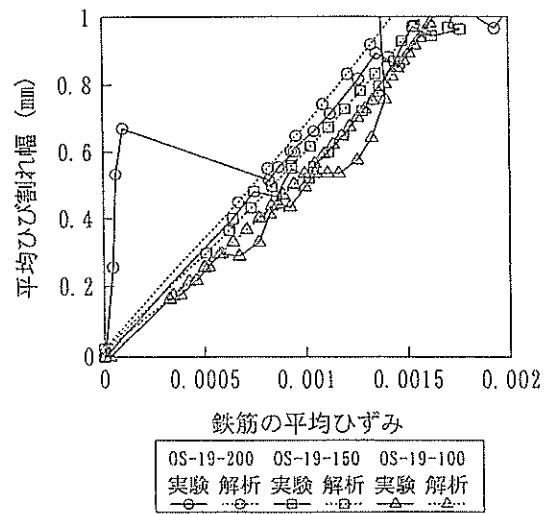


図-5.54 ひび割れ間隔として表-5.4の値を用いた解析値と実験値 (OS-19供試体)

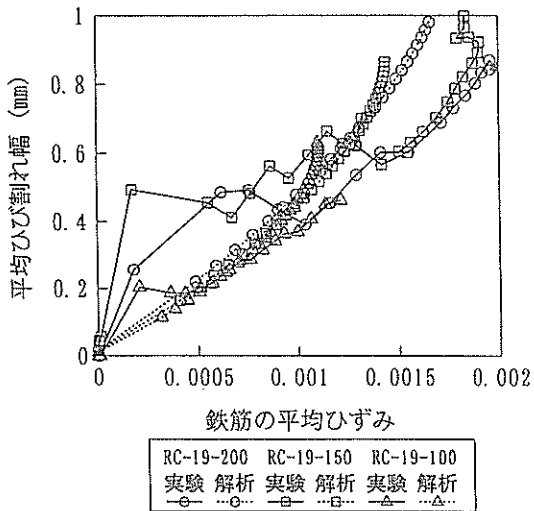


図-5.52 ひび割れ間隔として表-5.6の値を用いた解析値と実験値 (RC供試体)

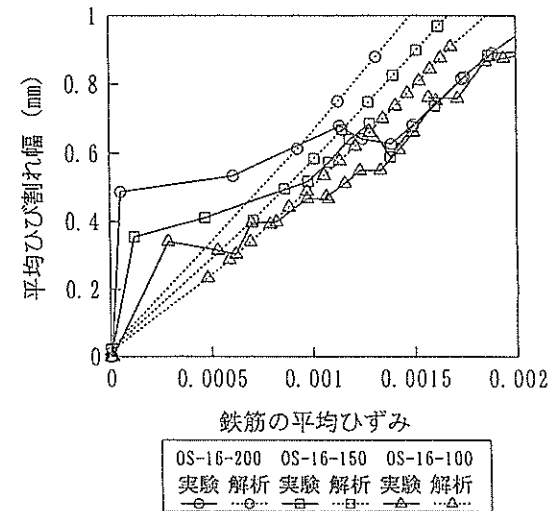


図-5.55 ひび割れ間隔として表-5.4の値を用いた解析値と実験値 (OS-16供試体)

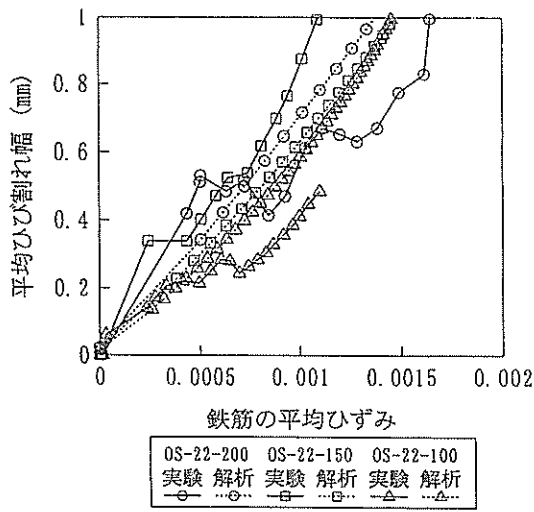


図-5.53 ひび割れ間隔として表-5.4の値を用いた解析値と実験値 (OS-22供試体)

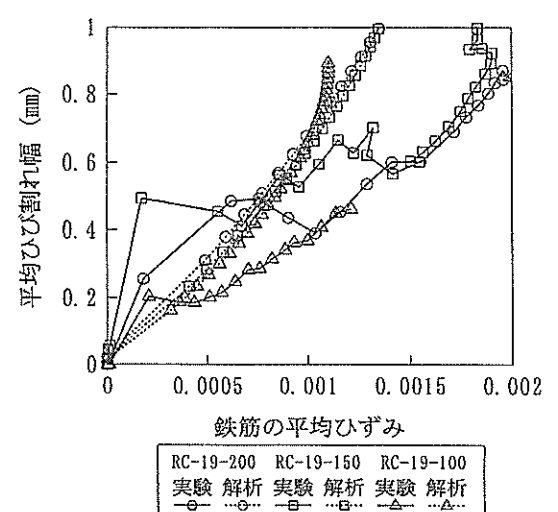


図-5.56 ひび割れ間隔として表-5.4の値を用いた解析値と実験値 (RC供試体)

$$s_{cr} = 1 / (\sin \alpha / s_{xcr} + \cos \alpha / s_{ycr}) \quad (82)$$

ただし、 α : 最大主ひずみと x 軸のなす角

s_{xcr} : x 方向の曲げひび割れ間隔

s_{ycr} : y 方向の曲げひび割れ間隔

表-5.6の s_{cr} を用いたときの解析値と実験値を図-5.49~5.52に示す。供試体OS-22-100とRC-19-100では解析値と実験値の曲線の勾配が良く合っているが、その他の供試体では実験値の方が依然として大きい。

最後に表-5.4の値を s_{cr} として用いたときの解析値と実験値を図-5.53~5.56に示す。ひび割れ幅の値は解析値と実験値で同程度か、やや解析値の方が大きい、という結果となった。すなわち今回の実験値に対しては、式(72)と式(80)によって求めた解析値が最も適合性が良かった。ただし、図-5.53~5.56で、多くの供試体について、ひび割れ発生直後のひび割れ幅の実験値は解析値よりも大きかった。これは、図-3.50~5.54に示されるように、ひび割れ発生直後はひび割れ間隔が広く、ねじりモーメントの増加とともに徐々に狭くなるためと考えられる。

6. 結論

本研究では、RC部材、オープンサンドイッチ部材、ならびにサンドイッチ部材の純ねじり特性を検討して、以下の結論を得た。

- (1) 鉄筋比をパラメータとしたRC供試体とオープンサンドイッチ供試体の純ねじり載荷実験の結果から、ひび割れ発生ねじりモーメントについては、供試体ごとの有意な差は認められなかった。オープンサンドイッチ供試体の鋼板は降伏せず、RC供試体と同様に鉄筋の降伏とコンクリートの圧壊が生じた。オープンサンドイッチ供試体の降伏ねじりモーメントは、同一鉄筋比のRC供試体の降伏ねじりモーメントと同程度であった。
- (2) RCはりについてのHsuの軟化トラス理論を用いてRC供試体の解析を行った結果、ひび割れ発生ねじりモーメント、ひび割れ発生直後のねじれ率の増加、コンクリートの圧縮ひずみについては実験結果と比較的良く一致した。しかしひび割れ発生後のねじれ率、引張ひずみ、鉄筋の平均ひずみ、およびねじり耐力については解析値の方が小さかった。今回実験した3供試体と、Marti & Kongによる2供試体のねじり耐力について、解析値と実験値の比は、0.80~1.25であった。RC板部材のねじり耐力を本解析の方法で求める場合

には、解析の精度を考慮して安全係数を1.3程度に設定する必要がある。

- (3) サンドイッチ供試体では、鋼板降伏まで剛性の顕著な低下は見られず、また鋼板降伏開始後もねじりモーメントが増加した。サンドイッチ部材にHsuの解析方法を拡張して解析した結果、鋼板が降伏するまでのねじり剛性は、解析値の方がやや小さかったが、概ね一致した。降伏ねじりモーメントは、実験値の61.3tfmに対して、解析値は55.6tfmであった。鋼板のひずみの計測結果から、鋼板が負担したねじりモーメント T_s とコンクリートが負担したねじりモーメント T_c を分離して、解析値と比較したところ、 T_s については解析値の方がやや大きく、 T_c については実験値の方が大きかった。 T_c を無視する計算方法よりも実際のねじり挙動に近い解析値が得られた。
- (4) オープンサンドイッチ部材にHsuの解析方法を拡張して解析した結果、ねじり耐力の解析値と実験値の比は、0.82~1.47であった。ひずみの解析値は、実験値と概ね一致した。ただし鉄筋比が多い場合にRC側のひずみを過小に算定し、ねじり剛性と耐力を過大に算定する傾向があった。今回の解析方法でオープンサンドイッチ部材のねじり耐力を算定する場合には、安全係数を1.5程度とする必要がある。
- (5) RC供試体とオープンサンドイッチ供試体の実験結果では、ひび割れ発生直後に平均ひび割れ幅が約0.2~約0.4mmに達し、コンクリート標準示方書による許容ひび割れ幅の値を超えた。ねじりひび割れ幅の実験値は、曲げひび割れ幅の算定式を用いた計算値よりも2倍以上大きかった。ひび割れ幅の算定方法として、今回の解析方法で得られる表面での引張ひずみの値に、示方書の式による曲げひび割れ間隔を掛けて求める方法により、実験値と最も良く適合する計算値が得られた。ただし、ひび割れ発生直後のひび割れ幅の実験値は、計算値よりも大きかった。

7. あとがき

本研究の解析方法により、純ねじりを受ける鋼板・コンクリート合成部材の変形、ひずみ、ひび割れ幅等の性状を、解析的に予測できる。ただし、解析の精度を増すために、以下のような課題がある。

- (1) 供試体の形状、鋼材比等を変化させて、さらに多くの種類の供試体について実験を行い、解析方法を修正すること。
- (2) サンドイッチ部材において、鋼板が降伏したあとの

挙動についても解析すること。

- (3) オープンサンドイッチ部材のスタッドやサンドイッチ部材の隔壁に生じるひずみについても解析すること。
- (4) ひび割れ幅の算定において、ひび割れ間隔の変化を解析に取り入れること。
また、解析の適用範囲を広げるために、以下のような課題がある。
- (1) 一般の板部材にはねじりだけでなく、曲げ、せん断、軸力とねじりが同時に作用する。これらの断面力の組み合わせに対する挙動を解明すること。
- (2) 等方配筋以外の場合、すなわち2方向の鉄筋比が異なる場合について検討すること。

謝 辞

実験供試体の製作と載荷・計測に関して、三菱重工業株式会社横浜製作所の松田成広氏、同横浜研究所の中村仁氏、福住信廣氏らにご協力頂いた。また、研究のとりまとめに際して、稲富隆昌構造部長から懇切なご指導を頂いた。ここに感謝の意を表します。

(1997年3月31日受付)

参考文献

- 1) 沿岸開発技術研究センター：合成版式ケーソン設計マニュアル，1991年
- 2) 田中征登ほか：ハイブリッドケーソンの設計・施工，日本鋼管技報，No.122，1988年，pp.119-126
- 3) 小泉哲也ほか：日本初の道路・鉄道併用沈埋トンネル—臨港交通施設 大阪南港トンネルの設計・施工—，コンクリート工学，Vol.31，No.6，1993年6月，pp.22-32
- 4) 小島朗史，中島由貴：サンドイッチ構造の沈埋函への適用，土木学会誌，1996年8月，pp.14-17
- 5) 横田弘，清宮理：鋼・コンクリートハイブリッドはりの力学特性に関する研究，土木学会論文集 No.451/V-17，1992年8月，pp.149-158
- 6) 清宮理，山田昌郎：上部開放断面を有する長大ケーソンのねじれ特性，土木学会論文集，No.466/V-19，1993年5月，pp.41-50
- 7) 西野文雄，長谷川彰夫：構造物の弾性解析，技報堂出版，1983年
- 8) Hsu, T.T.C. and Mo, Y.L.: Softening of Concrete in torsional Members - Theory and Tests, ACI Journal, May-June 1985, pp.290-303

- 9) ACI 318-83: Building code requirements for reinforced concrete, American Concrete Institute, 1983
- 10) 土木学会：平成8年版コンクリート標準示方書 [設計編]，1996年3月
- 11) Hsu, T.T.C. : Softened Truss Model Theory for Shear and Torsion, ACI Structural Journal, Nov.-Dec.1988, pp.624-635
- 12) 土木学会：構造力学公式集，1986年6月，p.46
- 13) 伊藤學：鋼構造学，コロナ社，1985年11月，p.35
- 14) Marti P., Leesti P. and Khalifa W. U. : Torsion Tests on Reinforced Concrete Slab Elements, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.113, No.5, May 1987, pp.994-1010
- 15) Vecchio, F.J. and Collins, M.P. : The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, March-April 1986, pp.219-231
- 16) Leonhardt, F. 著 横道英雄監訳，成井信・上阪康雄・石原重孝訳：レオンハルトのコンクリート講座 4，コンクリート構造の限界状態と変形，鹿島出版会，1984年，pp.60~61
- 17) Bhide, S.B. and Collins, M.P. : Influence of Axial Tension on the Shear Capacity of Reinforced Concrete Members, ACI Structural Journal, Sep.-Oct.1989, pp.570-581

記号表

A_c	: コンクリートの断面積
A_s	: せん断応力の経路が囲む面積
$A_{s,b}$: 鉄筋1本の断面積
b	: 断面のコンクリートの幅
b_{eq}	: 換算部材幅
c	: かぶり
c_{e1}	: RC側の有効厚の中心での最大主ひずみ
c_{e1s}	: RC側の表面での最大主ひずみ
c_{e2}	: RC側の有効厚の中心での最小主ひずみ
c_{e2s}	: RC側の表面での最小主ひずみ
$c_{f_{c2}}$: RC側のコンクリートの最小主応力
$c_{t,c}$: RC側の有効厚
$d_{s,b}$: 鉄筋径
e_1	: 有効厚の中心での最大主ひずみ
e_{1s}	: 表面での最大主ひずみ (主引張ひずみ)
e_2	: 有効厚の中心での最小主ひずみ

鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性

e_{2s}	: 表面での最小主ひずみ (主圧縮ひずみ)	s_x	: x 方向の鉄筋の間隔
$e_{ds,p}$: 鋼板の d 方向のひずみ	s_{xcr}	: x 方向の曲げひび割れ間隔
e_o	: 圧縮応力ピーク時のひずみで-0.002とする.	s_y	: y 方向の鉄筋の間隔
e_{xsb}	: x 方向の鉄筋のひずみ	s_{yrc}	: y 方向の曲げひび割れ間隔
e_{xsp}	: 鋼板の x 方向のひずみ	t	: 断面のコンクリートの厚さ
e_{xy}	: 有効厚の中心での面内せん断ひずみ	t_e	: 有効厚
e_{xyc}	: R C 側の有効厚中心での面内せん断ひずみ	t_{eq}	: 換算部材厚
e_{xys}	: 表面での面内せん断ひずみ	t_{sp}	: 鋼板の厚さ
e_{xysp}	: 鋼板の面内せん断ひずみ	T	: ねじりモーメント
e_{ysb}	: y 方向の鉄筋のひずみ	T_c	: コンクリートが負担するねじりモーメント
e_{ysp}	: 鋼板の y 方向のひずみ	T_s	: 鋼板が負担するねじりモーメント
E_c	: コンクリートの弾性係数	w_a	: 許容ひび割れ幅
E_{sb}	: 鉄筋の弾性係数	W_{cr}	: 平均ひび割れ幅
E_{sp}	: 鋼板の弾性係数	W_{crt}	: 合計ひび割れ幅
f_c'	: コンクリートの圧縮強度	x	: 板部材面内にとった座標
f_{c2}	: コンクリートの最小主応力 (主圧縮応力)	y	: 板部材面内に x 軸と直交する方向にとった座標
f_{sb}	: 鉄筋の応力	z	: 板厚方向にとった座標上の位置
f_t	: コンクリートの引張強度	α	: 最大主ひずみと x 軸のなす角
f_v	: 換算応力 (等価応力)	γ_{xy}	: 工学的せん断ひずみ (角ひずみ)
f_{xsb}	: 鋼板の x 方向の応力	ϵ'_{csd}	: コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値
f_{ysb}	: 鉄筋の降伏強度	ζ	: 軟化係数
f_{ysp}	: 鋼板の降伏強度	κ	: 曲率
G_c	: コンクリートのせん断弾性係数	ν_c	: コンクリートのポアソン比
G_{sp}	: 鋼板のせん断弾性係数	ν_{sp}	: 鋼板のポアソン比
k	: 鉄筋の付着性状の影響を表す定数	ρ	: 有効厚中の鋼材比
k_1	: 長方形断面の最大せん断応力を求める係数	ρ_{rc}	: R C 側の有効厚中の鋼材比
k_2	: 長方形断面のねじり剛性を求める係数	ρ_s	: 鋼板側の有効厚の鋼材比
L_{pt}	: π ゲージの標点距離の合計	σ_{sb}	: 鉄筋の引張応力
N_{cr}	: ひび割れ本数	τ_{xyc}	: 鋼板側のコンクリートのせん断応力
p_c	: コンクリートの周囲の長さ	τ_{xycr}	: R C 側の有効厚部分のせん断応力
p_o	: せん断応力の経路の長さ	τ_{xys}	: 表面での面内せん断応力
p_{orc}	: R C 側のせん断応力の経路の長さ	τ_{xysp}	: 鋼板の面内せん断応力
p_{os}	: 鋼板側のせん断応力の経路の長さ	ϕ'	: ねじれ率
q_c	: 鋼板側のコンクリートに流れるせん断流		
q_{rc}	: R C 側のせん断流		
q_{sp}	: 鋼板に流れるせん断流		
s	: 鉄筋間隔		
s_{cr}	: 平均ひび割れ間隔		
s_{e1}	: 鋼板側の有効厚の中心での最大主ひずみ		
s_{e1s}	: 鋼板の最大主ひずみ		
s_{e2}	: 鋼板側の有効厚中心での最小主ひずみ		
s_{e2s}	: 鋼板の最小主ひずみ		
s_{e_xsp}	: 鋼板の x 方向ひずみ		
$s_{f_{c2}}$: 鋼板側のコンクリートの最小主応力		
s_{t_e}	: 鋼板側の有効厚		