

高強度コンクリートを用いた鋼・コンクリート合成版型部材の静的弾塑性挙動と終局限界性能

ELASTO-PLASTIC BEHAVIORS AND ULTIMATE CAPACITIES OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE
MEMBERS WITH HIGH-STRENGTH CONCRETE UNDER STATIC LOADING

高橋芳彦* 太田俊昭** 日野伸一*** 大野友則****

By Yoshihiko TAKAHASHI, Toshiaki OHTA, Shin-ichi HINO
and Tomonori OHNO

This study is to investigate the elasto-plastic behaviors and such ultimate properties as energy absorption capacity and deformation capacity of steel-concrete composite members. Three types of specimens were tested under both static monotonic loading and repeated loading to examine the effects of the number of loading repetitions and the strength of concrete etc. on their flexural behaviors in elasto-plastic regions. From test results, the excellent properties of composite members were found in comparison with ordinal reinforced concrete members. Also, their specific features of load-deformation relationship and ultimate capacities were discussed analytically.

1. まえがき

鋼とコンクリートによる合成構造は、従来の鉄筋コンクリート（以下、RCと略記する）構造に対して剛性や靱性が大きく、また軽量化による経済性、施工性に優れているなどの特徴を有している¹⁾。合成構造部材がRC部材より優れた力学特性を発揮するためには、鋼材とコンクリートが一体となって挙動することが不可欠である。これまで行われた研究の多くが、鋼材とコンクリートを一体化するすれ止めの効果や問題点に関したものであるのもこの理由による。合成構造のもつ力学的な特徴や施工上の特徴をさらに向上させ、一般構造物に実用化していくためには、鋼とコンクリートそれぞれの特性をいかに発揮させるかが重要な課題であろう。例えば、コンクリートの内外に配置する鋼材の形状や寸法・配置の方法および用いる鋼材やコンクリートの強度の大きさなどが問題となる。合成構造に関する研究は非常に多く、合成構造部材の曲げやせん断挙動あるいは終局強度（耐荷力）に関しては、すでに多くの知見と情報が蓄積されている²⁾⁻¹¹⁾。しかしながら、合成構造部材をRC部材の代替として社会的に重要な種々の施設に適用するためには、耐荷力のみならず終局状態に至るまでの変形性能の定量化の方法を確立するとともに、これらに及ぼす各種の要因とその影響を明らかにする必要がある。土木における合成げたや鉄骨鉄筋コンクリート構造物など種々の構

* 防衛大学校研究員 土木工学教室 (〒239 神奈川県横須賀市走水1丁目10番20号)
 ** 工博 九州大学教授 土木工学科 (〒812 福岡県福岡市東区箱崎6丁目10番1号)
 *** 工博 九州大学助教授 土木工学科 (〒812 福岡県福岡市東区箱崎6丁目10番1号)
 **** 工博 防衛大学校講師 土木工学教室 (〒239 神奈川県横須賀市走水1丁目10番20号)

造形式¹²⁾の中で、RC曲げ部材と同じような役割をもつ合成版型部材の代表的な例として、図-1(b),(c)に示すような断面を有する部材があげられる。図-1(b)は、RC曲げ部材の引張鉄筋を鋼板で置き換えた部材（以下、オープンサンド型部材と呼ぶ）であり、図-1(c)は引張鉄筋と圧縮鉄筋の代わりに上下縁に鋼板を使用する部材（以下、サンドイッチ型部材と呼ぶ）である。オープンサンド型部材は、主として橋梁の分野においてRC床版に代わり広く実用化されつつある。サンドイッチ型部材は、海洋構造物への適用を主な対象として開発研究が進められている^{3)~8)}。

本研究はこれらの合成構造における上述した問題点について検討を行うため、サンドイッチ型部材、オープンサンド型部材および比較のためのRC部材を用いて静的単純および一方繰返し曲げ実験を行い、耐荷力や終局状態までの弾塑性挙動などについて調べたものである。なお、本実験で用いた試験体は力学的にははり部材であるが、断面形状や床版としての用途などを考慮して版型部材と呼んでいる。合成版型部材の鋼板とコンクリートのずれ止めには、著者らがすでに開発研究を進めているせん断補強効果をあわせて期待できる立体トラス型ジベル²⁾を用いている。また、試験体のコンクリートは、耐荷力の向上と軽量化が期待できる部材の開発を目的として、高強度コンクリートを使用した。さらに、合成版型部材の曲げ挙動および終局変位量を推定するために、切断法 (discrete element method)¹³⁾を用いたRC断面の曲げ解析を行い、コンクリートの圧縮強度および圧縮側かぶりコンクリート厚などが弾塑性曲げ挙動と終局限界性能に及ぼす影響について解析的な考察を加えている。

2. 合成版型部材の静的および一方繰返し曲げ実験

(1) 実験概要

a) 試験体

試験体は、サンドイッチ型部材（以下、SW部材と呼ぶ）、オープンサンド型部材（以下、TSC部材と呼ぶ）およびRC部材の3種類である。合成版型部材（SWおよびTSC部材）のずれ止めには、異形鉄筋D10(SD35)を用いて作製した立体トラス型ジベルを用いている。それぞれの種類の形状寸法および諸元等は、図-2に示すとおりである。各種類に対して試験体数は、3体ずつ合計9体である。本研究では合成版型部材とRC部材の弾塑性曲げ挙動および終局変位量等を定量的に比較するために、曲げ耐力および断面形状が等しくなるように断面を決定した。すなわち、表-1に示すように部材幅、引張および圧縮鋼材量の比および鋼材間距離をほぼ等しくしている。立体トラス型ジベルは、ずれ止めとしての機能を有するほかにRC部材の曲げ上げ鉄筋やスターラップに相当するコンクリートのせん断補強効果の役割も有している。ジベルは、部材軸方向に対して45°の角度で鋼板に隅肉

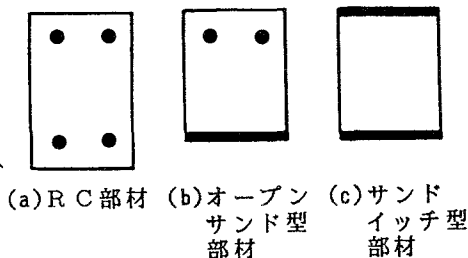


図-1 RCおよび合成版型部材断面模式図

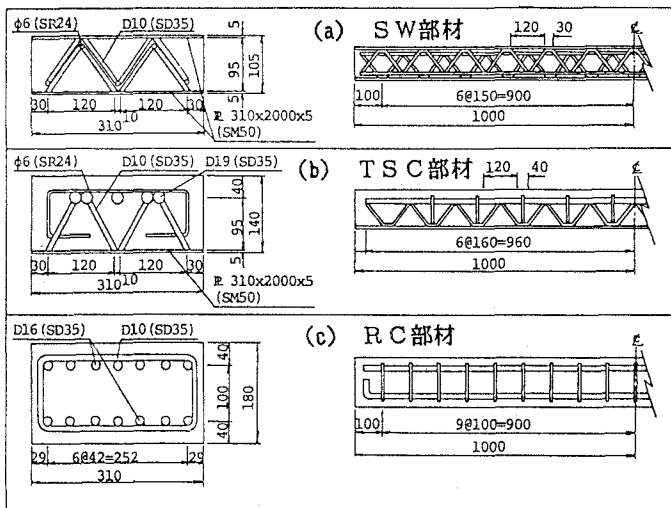


図-2 試験体の形状・寸法

(単位: mm)

溶接で取り付けられている。また、S W部材は部材軸方向の任意の位置においてジベルのせん断補強効果が期待できるように、圧縮鋼板に取り付けたジベルと引張鋼板に取り付けたジベルが交差するように配置した。T S C部材については、ジベルのせん断補強効果が期待できない部分にスターラップを配置している。なお、使用したすべてのコンクリートは表-2に示す示方配合によって作製したが、実験時の材令が異なったため圧縮強度は、No.1およびNo.2試験体が平均579kgf/cm²、No.3試験体は平均821kgf/cm²であった。鋼材の引張試験結果は、表-3に示すとおりである。

b) 実験方法

実験は、両端単純支持の条件を有する支持台に設置した試験体に対して、中央集中荷重とした。No.1およびNo.2試験体のスパン長は180cmとし、スパン長の大きさが弾塑性挙動などに及ぼす影響を調べるために、No.3試験体のスパン長は120cmとした。荷重形式は、破壊に至るまで変位を単調に増加させる漸増荷重

(No.1, No.3試験体)、繰返しによる剛性劣化などの影響を調べるための一方向繰返し荷重 (No.2試験体) の2種類とした。漸増荷重は、大変形域までの挙動を追跡するために変位制御とした。また、一方向繰返し荷重は、スパン長180cmのR C部材の漸増荷重時の荷重点の降伏変位 (実験により得られた値で、10 mm) の整数倍で各1回繰返す方法とした。なお、荷重の制御は変位の増加時は変位制御とし、除荷時は荷重制御とした。荷重速度は0.5~1.0mm/min程度である。本実験では、変位の増大にかかわらず荷重が急激に低下する時点を終局状態と判定し、それ以降の変位の増大

に対しても荷重の上昇が認められない段階で実験を終了した。計測にあたっては、荷重荷重、荷重点の変位およびコンクリートの各部のひずみを測定した。はり各部の変位量において、荷重点の変位は荷重点による試験体の局部的変形 (凹み) は小さいとみなせるので、荷重点の変位量を用いた。また、荷重点以外の変位は、試験体上側の変位を測定した。中央荷重点に対する変形の対称性は、はり左右の変位およびひずみの大きさによっていずれの試験体もほぼ対称に変形していることを確認している。

表-1 試験体諸元

試験体名	S W部材		T S C部材		R C部材	
	No.1 No.2	No.3	No.1 No.2	No.3	No.1 No.2	No.3
部材長 (cm)	200					
スパン長 (cm)	180	120	180	120	180	120
コンクリートの 圧縮強度 (kgf/cm ²)	579	821	579	821	579	821
幅 (cm)	31.0					
高さ (cm)	10.5		14.0		18.0	
有効高さ (cm)	10.0		13.8		14.0	
圧縮鉄筋と 圧縮縁間の距離 (cm)	0.0		4.0		4.0	
引張鋼材量 (cm ²)	15.50		15.50		13.90	
〃 比 (%)	5.00		3.63		3.20	
〃 降伏点 (kgf/cm ²)	4200		4200		4100	
〃 の種類	SM50		SM50		SD35	
圧縮鋼材量 (cm ²)	15.50		14.33		13.90	
〃 比 (%)	5.00		3.35		3.20	
〃 降伏点 (kgf/cm ²)	4200		4000		4100	
〃 の種類	SM50		SD35		SD35	
降伏モーメント (tf・m)	6.15	6.12	7.40	7.66	6.69	6.90
曲げ耐力 (tf・m)	8.56	8.56	7.69	8.18	7.03	7.50
せん断耐力 (tf)	21.2	21.7	17.9	18.6	10.9	11.6

表-2 コンクリートの示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空気量 (%)	水セメン ト比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kgf/m ³)			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
10	8±1	2	34.0	47.3	204	600	700	832

(2) 実験結果および考察

a) 終局破壊状況

図-3に、実験終了時における破壊状況を示す。図中のひびわれ線は、降伏変位以降に生じた幅2mm程度以上のひびわれだけを表している。斜線はコンクリートの欠落部を、試験体下側の矢印(←→)部分はコンクリートと鋼板の間に生じた0.5mm程度以上の分離(浮き上がり)を表している。SW部材のNo.1試験体は、載荷点近傍の圧縮鋼板の局部的座屈により急激に耐力を失ったため、降伏変位に達した以降ひびわれの成長や新たなひびわれの発生はほとんど認められなかった。なお、SW部材の設計諸元はNo.1、2および3試験体ともすべて同一であるが、載荷状態(載荷用パンチの位置や方向など)の微小な違いによってNo.1試験体の圧縮鋼板には局部的座屈が生じたものと考えられる。したがって、載荷状態に関わりなく鋼板の局部的座屈を防止するためには立体トラス型ジベルの取り付け間隔を小さくする、あるいはこのジベル取り付け部の間に座屈防止用の補強ジベルを取り付けるなどの対策が必要であろう。TSC部材では、圧縮側コンクリートの欠落や鋼板とコンクリートの分離が生じたが、ひびわれの生じた範囲や数はSW部材とほぼ同様であった。一方RC部材では、曲げひびわれから成長した曲げせん断ひびわれが広い範囲に生じるとともに、圧縮側コンクリートの欠落もみられた。

SW部材(No.1試験体を除く)、TSC部材およびRC部材の終局破壊状況の比較から、以下のことが考察される。SW部材およびTSC部材のひびわれ本数が、RC部材のひびわれに比べ著しく少ないことが認められる。RC部材のひびわれが多く生じるのは、RC部材の鉄筋がコンクリートとの付着力により両者の一体性が良好に保たれており、その結果ひびわれがはり全体にわたってほぼ均等に分散し、ひびわれ本数は多くなったものと考えられる。これに対し、SW部材およびTSC部材の鋼板とコンクリートの一体性はジベルだけに依存するので、ジベル取り付け部にひびわれが集中するものと考えられる。また、SW部材はTSC部材やRC部材と異なり、圧縮側コンクリートに欠落が生じていない。これは、圧縮鋼板の存在によりコンクリートの圧縮縁側(載荷点側)への変形(浮き上がり)が拘束され

表-3 鋼材の引張試験結果

鋼材の種類	降伏点 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
鋼板 t=5, SM50	4200	5520
鉄筋 D10, SD35	4010	5750
鉄筋 D16, SD35	4100	6280
鉄筋 D19, SD35	4000	5660

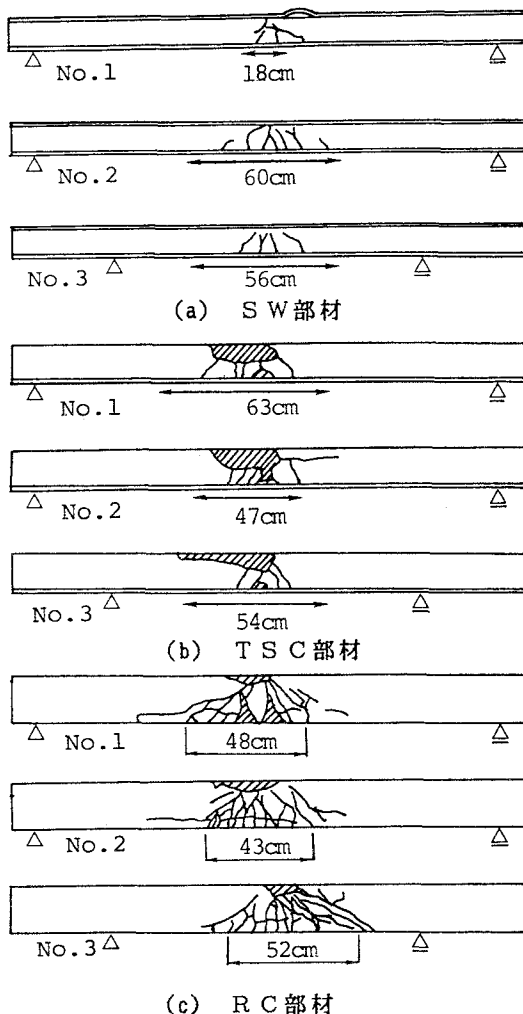


図-3 終局破壊状況

ためであり、SW部材の大きな特徴といえる。さらに、SW部材とTSC部材においては、曲げひびわれから成長した曲げせん断ひびわれがわずかに生じているものの曲げひびわれがほとんどを占めている。つまり、立体トラス型ジベルが、版型部材の終局状態に至るまでせん断補強の機能を十分に果たした結果であると考えられる。

なお、同一形式の試験体における破壊状況は、繰り返し載荷やスパン長およびコンクリートの圧縮強度の変化によらずほぼ同様であった。

ｂ) 弾塑性挙動

図-4に、各形式のNo.1およびNo.2試験体に対して得られた載荷点における荷重～変位関係を示す。図-5は、図-4に示した荷重～変位関係に基づいて、曲げモーメント～回転角関係に変換して表したものである。なお、各形式のNo.2試験体に対しては一方方向繰り返し載荷を行っているが、No.1およびNo.3試験体との比較のため、図にはその包絡線を示した。図中の縦軸の曲げモーメントは、式(1)を用いて算定した。また本研究では、便宜的に載荷点の変位が載荷点のみの回転変形により生じると仮定して、回転角を式(2)で求めている。

$$M = P \ell / 4 \quad \text{-----} \quad (1)$$

$$\theta = 4 \cdot \delta / \ell \quad \text{-----} \quad (2)$$

ここで、M：曲げモーメント (tonf・cm)、P：荷重 (tonf)、 ℓ ：スパン長 (cm)、 θ ：回転角 (rad)、 δ ：載荷点変位 (cm) である。

図-4および図-5から、各形式の荷重～変位曲線および曲げモーメント～回転角曲線の形状はきわめて類似しており、一方方向繰り返し載荷による曲げ剛性の劣化や終局変位量（終局回転角）の減少は生じていないことがわかる。また、スパン長の変化が曲げ挙動に及ぼす影響も、ほとんどないものとみなすことができる。

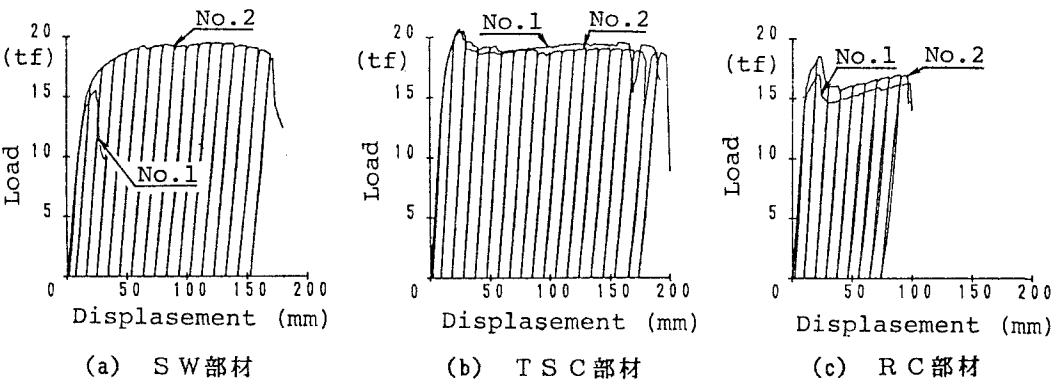


図 - 4 載荷点の荷重～変位関係

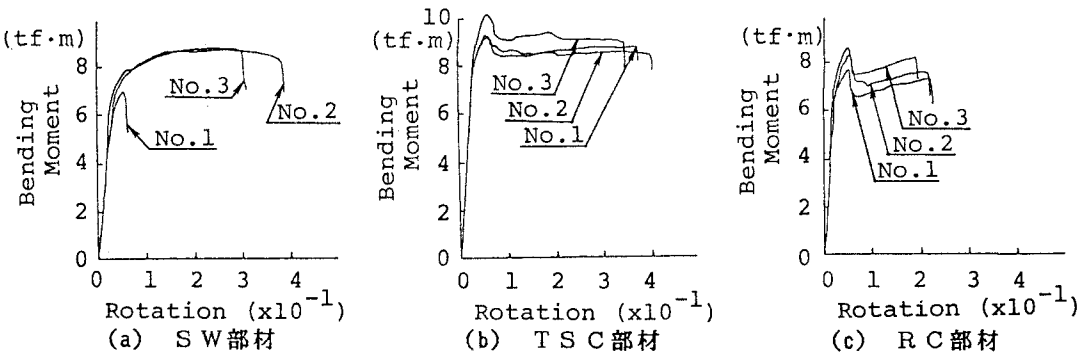


図 - 5 曲げモーメント～回転角関係

図-5に示した各形式の試験体の曲げモーメント～回転角曲線の形状をみると、TSC部材とRC部材の形状が非常に類似していることが認められる。TSC部材およびRC部材における破壊までの曲げモーメント～回転角関係は、図-6に示す4つの段階に区分して評価できる。すなわち、

① Step 1（弾性段階）： 引張鋼材が降伏するまで、試験体が弾性的挙動を示す段階。

② Step 2（引張鋼材降伏段階）： 引張鋼材の降伏以降、はりの曲げ剛性がStep 1より小さくなり最大曲げモーメント（曲げ耐力）に達するまでの段階。

③ Step 3（曲げモーメント減少段階）： 最大曲げモーメントに達した時点以降、曲げモーメントが最大曲げモーメントの約90%の大きさに低下するまでの段階。Step 2およびStep 3では極値

が生ずるが、これは高強度コンクリートを用いたことによる。つまり、コンクリートの圧縮強度と引張鋼材の降伏点の比が、通常のコンクリート（圧縮強度300kgf/cm²程度）を用いた場合の2～3倍におよんでいるためと考えられる。後述する解析の結果から、極値の大きさはコンクリートの圧縮強度に依存することがわかる。

④ Step 4（曲げ耐力保持段階）： Step 3以降回転角の増大にともなって、最大曲げモーメントの約90%の曲げ耐力を保持しながら最終的に曲げモーメントが急激に減少し終局状態に至るまでの段階。この段階では、TSC部材の曲げモーメントはほとんど増加しないが、RC部材のそれはわずかに増加する傾向が認められる。この段階における曲げモーメントの増加は引張鋼材の降伏後のひずみ硬化域の挙動に左右されるものと考えられる。

一方、No.1試験体を除くSW部材の曲げモーメント～回転角関係はTSC部材やRC部材のそれと大きく異なり、破壊に至るまでに明瞭な最大耐力点が生じない。これは、圧縮側かぶり部分にコンクリートが存在しないためであり、後述する解析においても同様の傾向が認められた。なお、この挙動は、SW部材の大きな特徴といえる。

c) 耐荷力

表-4に、各形式の試験体に対して得られた降伏モーメントと最大曲げモーメントの値を示す。また表中には、比較のため計算によって求めた曲げモーメントの値も示している。表中、下線を付した数値は計算結果を、括弧内の数値は実験結果と計算結果の比（実験値/計算値）を表す。

計算による降伏モーメントおよび最大曲げモーメントは、RC断面の曲げ解析を行って求めた値である。計算にあたっては、合成版型部材（SWおよびTSC部材）の引張鋼板はRC部材の引張鉄筋、圧縮鋼板はRC部材の圧縮鉄筋と等価であると仮定している。また降伏モーメントの実験値は、図-5に示す曲げモーメント～回転角関係において、両者の関係が線形でなくなる時点の曲げモーメントを求めている。表をみると、TSC部材の場合に実験値の方が計算値に比べ約10%程度小さな値を示す場合があるが、各形式のはりの降伏モーメントはRC断面の曲げ解析で概ね推定できるといえる。

また、最大曲げモーメントについてみると、TSC部材とRC部材に対しては計算値の方が実験値より10～20%小さい値を示している。SW部材に対しては、No.1試験体を除き計算値は実験値ときわめて良い一致を示している。なお、SW部材の曲げモーメントは、後述する解析結果（図-9(b)）からも明らかなように終局状態で最大曲げモーメントとなる。この状態において部材断面の中立軸は圧縮鋼板下縁近傍に位置し、圧縮合力の作用位置と引張合力の作用位置との距離が最大になっている。また、引張鋼板は引張強度に達している。つまり、SW部材の最大曲げモーメントは次の式で与えられる。

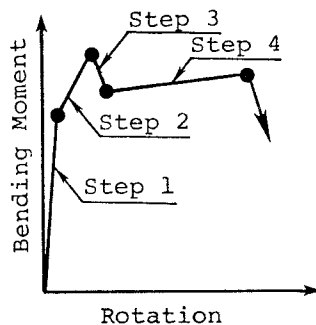


図-6 TSCおよびRC部材の曲げモーメント～回転角関係の模式図

表-4 実験結果の一覧

試験体名	S W 部 材			T S C 部 材			R C 部 材		
	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
载荷形式	漸増	繰返	漸増	漸増	繰返	漸増	漸増	繰返	漸増
スパン長 (cm)	180		120	180		120	180		120
コンクリート強度 (kgf/cm ²)	579		821	579		821	579		821
破壊形態	局部的 座屈	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ せん断	曲げ せん断	曲げ せん断
降伏モーメント (tf・m)	6.44 (1.05)	6.39 (1.04)	6.84 (1.12)	6.62 (0.90)	6.93 (0.94)	7.53 (0.98)	6.57 (0.98)	7.07 (1.06)	7.08 (1.03)
最大曲げ モーメント(tf・m)	6.15		6.12	7.40		7.66	6.69		6.90
終局 モーメント(tf・m)	6.98 (0.82)	8.78 (1.03)	8.85 (1.03)	9.32 (1.21)	9.18 (1.19)	10.1 (1.23)	7.65 (1.09)	8.37 (1.19)	8.58 (1.14)
終局回転角 (rad)	0.056	0.378	0.300	0.371	0.396	0.340	0.218	0.213	0.190
エネルギー 吸収容量 (無次元量)	0.041	0.496	0.388	0.406	0.433	0.386	0.211	0.216	0.201

$$M_{\max} = f_{su} \cdot A_s \cdot d \quad \text{----- (3)}$$

ここで、 $M_{\max}$: 最大曲げモーメント (tonf・cm)、 f_{su} : 引張鋼板の引張強度 (kgf/cm²)、 A_s : 引張鋼板の断面積 (cm²)、 d : 引張鋼板から圧縮鋼板までの距離 (cm) である。

式(3)により求まる最大曲げモーメントの値は、RC断面の曲げ解析による結果に一致する。したがって、SW部材の最大曲げモーメントの推定には式(3)を用いることができるが、このためには鋼板とコンクリートの一体化が終局状態に至るまで保持されなければならない。つまり、せん断補強としての機能を発揮するための立体トラス型ジベルとコンクリートとの付着および圧縮鋼板に局部的座屈が生じない対策がその要件である。なお式(3)では、SW部材の最大曲げモーメントの大きさはコンクリート強度に無関係であることを表している。しかしながら、本実験では高強度コンクリートだけを使用しているので、コンクリート強度が付着および最大曲げモーメントに及ぼす影響についてさらに検討を行なう必要がある。

d) エネルギー吸収容量

構造部材が終局に至るまでに吸収できるエネルギー量 (エネルギー吸収容量) は、部材の限界性能の大きさを評価する一つの有効な指標と考える。本研究では、エネルギー吸収容量を図-5に示した曲げモーメント～回転角関係において、終局状態に至るまでの面積を算定して求めている。ただし、曲げモーメントの値は、各試験体の降伏モーメントで除した無次元値を用いているので、得られるエネルギー量は無次元量となる。これにより、コンクリートおよび鋼材の強度や形状・寸法の差異に起因する各試験体の曲げ耐力の差の影響を取り除いて、エネルギー吸収容量の大きさを適切に比較することができる。

本実験の範囲で終局回転角の大きさを比較すると、表-4から明らかなようにTSC部材 (RC部材の約1.8倍)、SW部材 (RC部材の約1.6倍)、RC部材の順である。またエネルギー吸収容量は、SW部材 (RC部材の約2.1倍)、TSC部材 (RC部材の約2.0倍)、RC部材の順である。

降伏曲げ耐力がほぼ等しい3種類の部材におけるエネルギー吸収容量の大きさの差異は、ジベルやせん断

補強筋によるコンクリートの横拘束効果の相違に起因するものと考えられる。したがって、合成版型部材に用いている立体トラス型ジベルとRC部材のせん断補強筋によるコンクリートの拘束効果について、さらに定量的な比較・検討が必要である。

3. 合成版構造部材断面の曲げ解析

前章で述べたように、静的単純および一方向繰返し曲げ実験において、SW部材はTSC部材やRC部材と著しく異なる挙動を示した。そこで、その理由を明らかにするために、RC断面の曲げ解析を行なった。解析にあたっては、コンクリートの圧縮強度(f_c')、圧縮側かぶりコンクリート厚(d')およびRC部材の複鉄筋比に相当する引張鋼材量と圧縮鋼材量の比(以下、複鋼材比と呼ぶ： A_s'/A_s)などが、最大曲げモーメントや終局曲率に及ぼす影響について調べている。

(1) 解析方法

本解析では、RC断面の曲げ解析手法のなかで一般によく用いられている切断法を用いている。計算手順を、図-7のフローチャートに示す。この解析法の概要は、以下のとおりである。

- ① 与えられた断面に対し、曲率を設定する。
- ② 中立軸を仮定する。
- ③ 圧縮合力と引張合力を求める。ただし、応力～ひずみ関係が非線形となるコンクリートの圧縮合力は、中立軸から上側(圧縮域)の断面をいくつかの要素に等分割してそれぞれの要素の応力を求め、それを積分して求める。本解析では、要素の分割数を30とした。
- ④ 圧縮合力および引張合力が等しくなるまで、②～③を繰り返す。
- ⑤ 合力が等しくなった時点で、曲げモーメントを求める。
- ⑥ 終局状態(終局曲率)に至るまで曲率を増大させ、②～⑤を繰り返す。

なお終局状態の判定は、引張鋼材の破断ひずみあるいは変位(曲率)の増加につれて増加していた引張鋼材のひずみが減少に転ずるときのひずみのいずれか小さい方に達した時点とした。すなわち、コンクリートの圧縮合力が曲率の増大とは無関係に減少すると、中立軸は圧縮縁からはり内部へ進展し下方に移動し始める。この時点において、引張鋼材が降伏を生じている場合には鋼材に対して除荷が生じ降伏が終了する。この点は、降伏終了点と名付けられている¹⁴⁾。

(2) 解析例および考察

a) 入力データ

解析例で用いた断面寸法は実験で用いた試験体の断面に準じて、幅、有効高さおよび引張鋼材量をそれぞれ31cm、14cmおよび15.5cm²とした。解析におけるパラメータには、コンクリートの圧縮強度(f_c')、圧縮側かぶりコンクリ

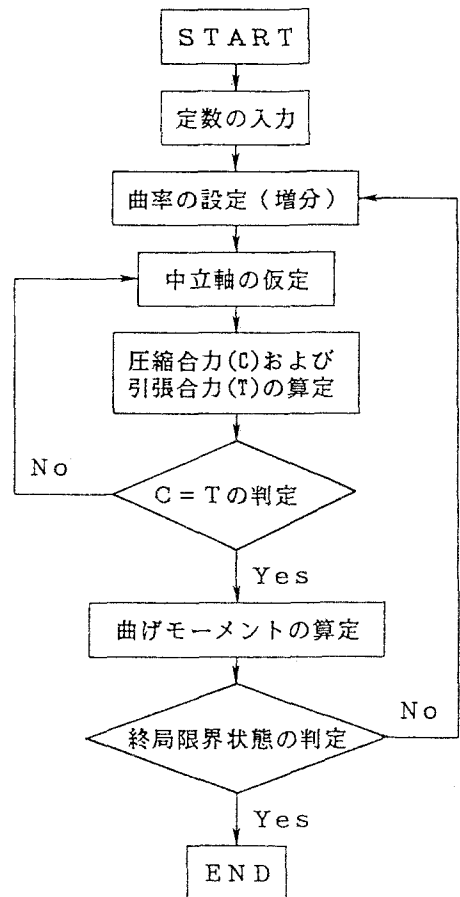


図-7 フローチャート

ート厚 (d') および複鋼材比 (A_s' / A_s) を用いた。コンクリートの応力～ひずみ関係は、式(4)に示す梅村の e 関数¹⁵⁾ を用いた。なお、式(4)中の材料定数は、コンクリート強度にかかわらず一定とした ($K = 6.75$ 、 $\alpha = 0.812$ 、 $\beta = 1.218$ 、 $\varepsilon_{co} = 0.002$)。

$$\sigma = f_{co}' \cdot K \left\{ \exp(-\alpha (\varepsilon / \varepsilon_{co})) - \exp(-\beta (\varepsilon / \varepsilon_{co})) \right\} \quad \text{----- (4)}$$

また、鋼材については図-8に示す完全弾塑性型モデルおよびひずみ硬化型モデルの2種類を用いて検討した。鋼材の破断ひずみは、0.2とした。

b) 引張鋼材の応力～ひずみ関係およびコンクリートの圧縮強度の影響

図-9に、解析で求めた曲げモーメント～曲率関係の一例を示す。図に示した解析例は、圧縮鋼材量と引張鋼材量が等しい ($A_s' / A_s = 1.0$) 場合

である。図-9(a)および(b)は圧縮側コンクリートのかぶり d' が $d' = 4\text{cm}$ で、断面の寸法は実験に用いた T S C 部材または R C 部材の断面寸法にほぼ等しい。これに対し、図-9(c)および(d)は圧縮側にかぶりコンクリートがない ($d' = 0\text{cm}$) 場合であり、S W 部材の断面寸法とほぼ同一である。また、図-9(a)および(c)は、引張鋼材の応力～ひずみ関係を完全弾塑性と仮定した場合の結果で、いずれも引張鋼材が破断ひずみに達することにより終局曲率に至っている。図-9(b)および(d)は、塑性域で引張鋼材のひずみ硬化を考慮した場合であり、いずれも降伏終了点に達した時点で終局曲率に至っている。なお、図中に示した●、○および■印は各コンクリート強度の大きさにおける終局点(終局曲率を与える点)を表している。

図-9(a)および(b)から明

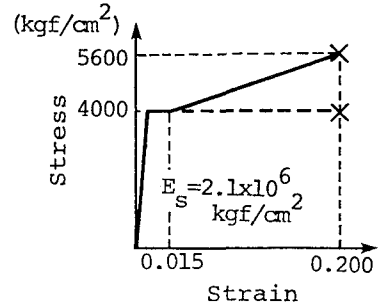


図-8 鋼材の応力～ひずみ関係のモデル化

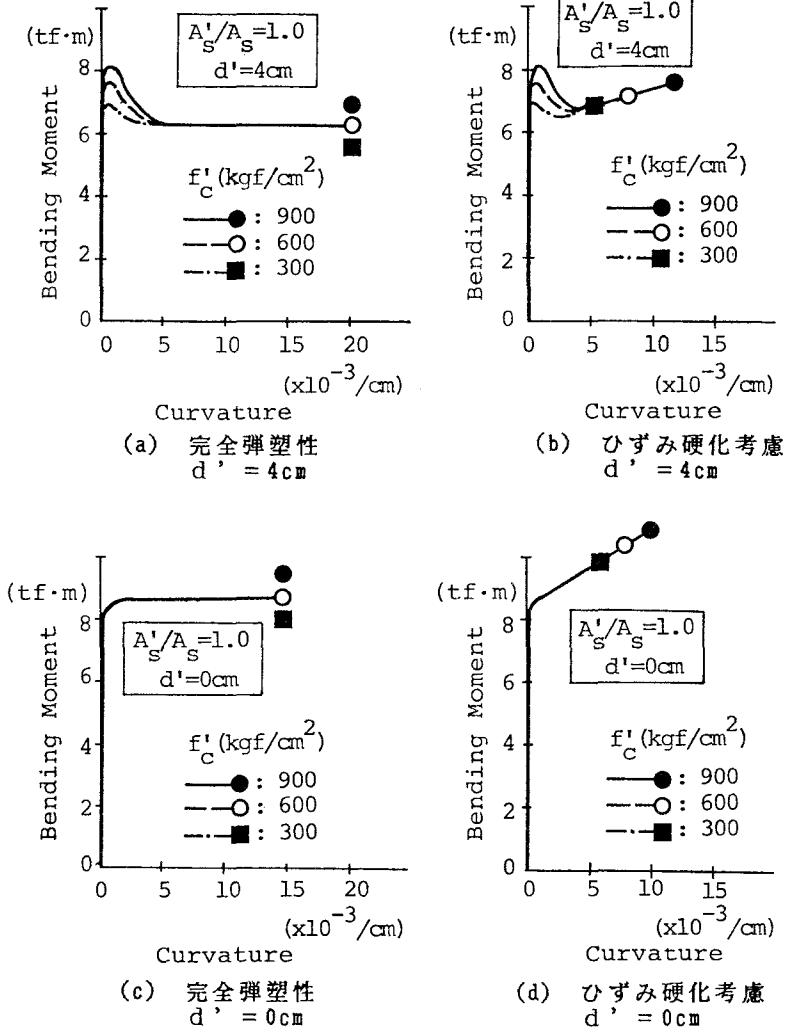


図-9 曲げモーメント～曲率関係 (パラメータ: f'_c)

らかなように、圧縮側かぶりコンクリートが存在する場合には、降伏以降最大曲げモーメントを生じる明確な極値が認められ、その値はコンクリートの圧縮強度が高いほど大きい。これに対し、圧縮側かぶりコンクリートが存在しないと、降伏以降の曲げモーメント～曲率関係には曲げモーメントの極値が現われない(図-9(c)、(d))。また弾塑性曲げ挙動は、鋼材のひずみ硬化を考慮したときの終局曲率の違いのみを除き、コンクリートの圧縮強度にかかわらず等しいことがわかる。図-9(a)、(b)でみられる挙動は、圧縮側かぶりコンクリートが存在するTSC部材およびRC部材の弾塑性挙動(図-5(b)、(c))と一致し、図-9(c)、(d)はかぶりコンクリートがないSW部材の挙動に対応している。

図-10は、最大曲げモーメントとコンクリートの圧縮強度の関係を示している。図から、最大曲げモーメントはコンクリート圧縮強度の増大にともない線形的に増大することがわかる。しかし、その増加率はかぶりコンクリート厚(d')が小さくなるにしたがって減少する。一方、サンドイッチ型部材(SW部材)のように圧縮側にかぶりコンクリートが存在しない場合($d'=0\text{cm}$)は、コンクリートの圧縮強度にかかわらず最大曲げモーメントは一定値を示す。なお、コンクリートの圧縮強度が大きい場合、 $d'=4\text{cm}$ の方が $d'=2\text{cm}$ よりも大きな最大曲げモーメントを示す。これは、 $d'=4\text{cm}$ の場合、コンクリートの圧縮合力が大きいいため最大曲げモーメント時に中立軸が圧縮鉄筋よりも上方に位置し、圧縮鉄筋に引張応力が作用するためと考えられる。

c) 圧縮側かぶりコンクリート厚の影響

図-11は、かぶりコンクリート厚の差異による曲げモーメント～曲率関係の一例を示したものである。なお、図中の●、○および■印は終局点を表している。図-11(a)は、 $A'_s/A_s=1.0$ 、図-11(b)は $A'_s/A_s=0.5$ の場合である。コンクリートの圧縮強度は、いずれも 600kgf/cm^2 である。図-12および図-13は図-11の結果に基づいて、最大曲げモーメント $M_{\max}$ および終局曲率 ϕ_u と d' との関係を(A'_s/A_s)をパラメータとして示したものである。なお、 $A'_s/A_s=1.0$ の場合は引張鋼材の破断で終局に至り、そのほかの複鋼材比の場合は降伏終了時点で終局に至っている。

図-11から、 $d'=4\text{cm}$ の場合は最大曲げモーメントとなる曲率が明確に生じるのに対し、 $d'=0\text{cm}$ の場合は生じないことがわかる。これは、前章で述べたSW部材とTSC部材(またはRC部材)の弾塑性曲げ挙動の相違を説明するものである。

図-11および図-12から、 d' が小さくなるにつれて最大曲げモーメントは増大するが終局変形量は減少することがわかる。これは、最大曲げモーメントの大きさが断面の有効高さ(d)ではなく、引張鋼材と圧縮鋼材との間隔($d-d'$)に依存することを

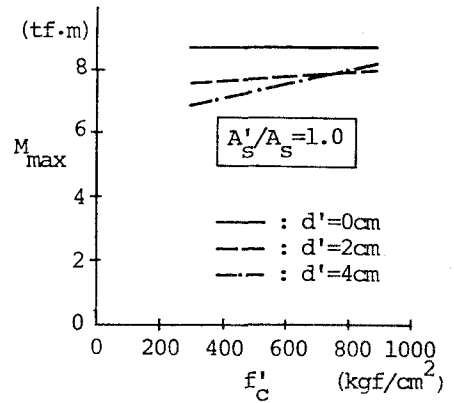
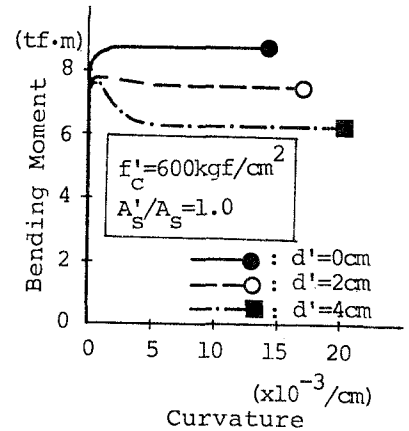
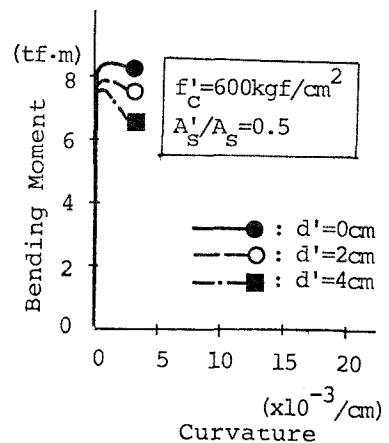


図-10 $M_{\max} \sim f'_c$ 関係



(a) $A'_s/A_s = 1.0$



(b) $A'_s/A_s = 0.5$

図-11 曲げモーメント～曲率関係 (パラメータ: d')

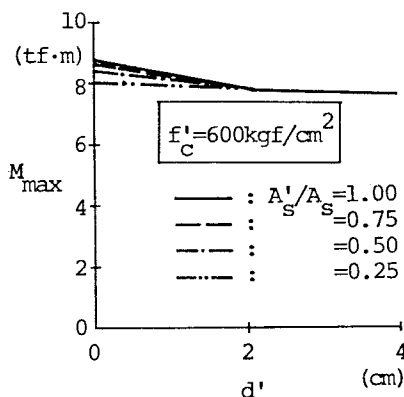


図-12 $M_{\max} \sim d'$ 関係

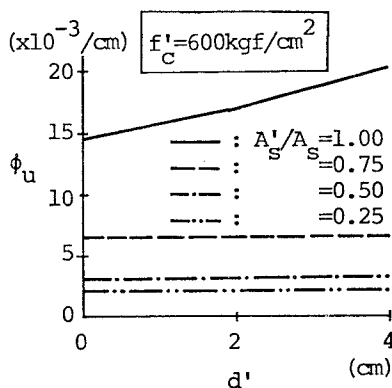
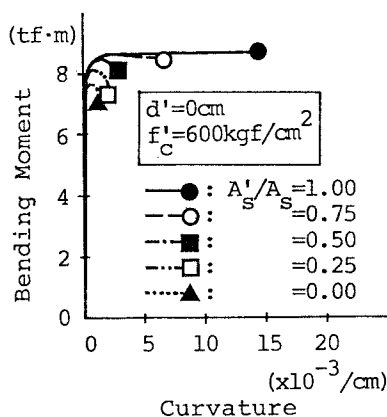
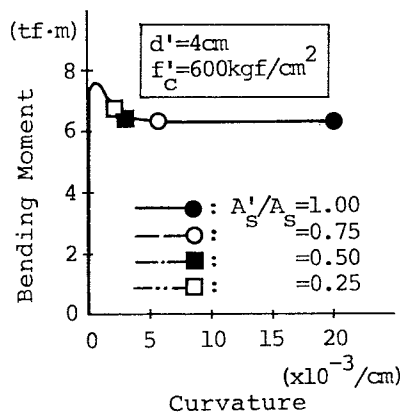


図-13 $\phi_u \sim d'$ 関係



(a) $d' = 0 \text{ cm}$



(b) $d' = 4 \text{ cm}$

図-14 曲げモーメント～曲率関係 (パラメータ: A'_s / A_s)

示すものである。図-11(b)をみると、複鋼材比が小さい場合でも d' の大小は最大曲げモーメントの大小に影響を及ぼすことがわかる。しかしながら、複鋼材比が1.0の場合に比べると終局曲率は極めて小さくなる。また図-13から明らかなように、複鋼材比が1.0より小さいと、降伏終了点で終局曲率に達するので曲率の大きさは複鋼材比の値によって異なるが、 d' の大きさには無関係となる。一方、複鋼材比が1.0の場合には、終局曲率が引張鋼材の破断ひずみで決定するので、 d' の増加にともない終局曲率も増大する。これは、終局状態において中立軸が圧縮鋼材位置にあるため、圧縮鋼材と引張鋼材の間隔 ($d - d'$) が小さいほど同一の曲率に対して引張鋼材のひずみが小さくなることによる。

d) 複鋼材比の影響

図-14に、異なる複鋼材比に対する曲げモーメント～曲率関係の一例を示す。図中の●、○、■、□および▲印はそれぞれ終局点を表す。図-14(a)は $d' = 0 \text{ cm}$ の場合を表し、図-14(b)は $d' = 4 \text{ cm}$ の場合を表している。図-15および図-16は、図-14の結果に基づいてそれぞれ最大曲げモーメントおよび終局曲率と複鋼材比の関係に対して d' をパラメータとして表したものである。

図-14から、 $d' = 0 \text{ cm}$ の場合には最大曲げモーメントおよび終局曲率は複鋼材比の増加にともなって増大することが認められる。また、 $d' = 4 \text{ cm}$ の場合は複鋼材比が小さくなると終局曲率は減少するが、終局に至る

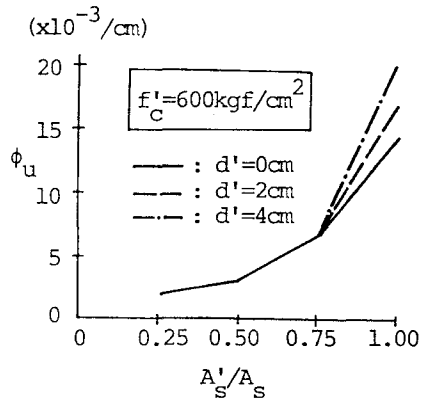
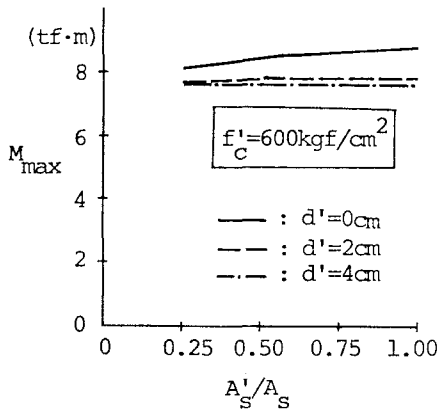


図-15 $M_{\max} \sim A'_s / A_s$ 関係 図-16 $\phi_u \sim A'_s / A_s$ 関係

までの曲げモーメント～曲率関係は複鋼材比の値によらずほとんど同様である。図-15をみると、かぶりコンクリート厚の増加にともなって最大曲げモーメントが増大することがわかる。ところが、かぶりコンクリート厚が小さい(2cm以下)の場合には、最大曲げモーメントの値は複鋼材比の大きさは無関係になる。一方、終局曲率の大きさは、図-14および図-16からわかるように、かぶりコンクリート厚によらず複鋼材比の増加にともなって増大する。また複鋼材比が0.75以上では、かぶりコンクリート厚が大きいほど終局曲率の増加の割合が大きくなる。複鋼材比(A'_s / A_s)が1.0の場合は、引張鋼材の破断によって終局に至るので、引張鋼材および圧縮鋼材の引張合力および圧縮合力が全く等しい場合には降伏終了点が存在しないことがわかる。すなわち、終局状態に至るまでコンクリートと鋼材の付着が良好でその一体性が保持されれば、 $A'_s / A_s = 1.0$ とすることによりきわめて大きな靱性が期待できることになる。また、圧縮側のかぶりコンクリートの存在は耐力の上昇に影響を及ぼすので、その効果も無視できない。

4. まとめ

本研究は、高強度コンクリートを用いた合成版型部材およびRC部材が終局状態に至までの弾塑性挙動と限界性能などを調べることを目的とした。この目的から、異なる3種類の版型試験体を用いて静的単純および一方繰返し曲げ実験を行ない破壊に至るまでの荷重～変位関係、終局時の破壊状況および終局限界性能(終局回転角、エネルギー吸収容量)などの相異について比較・検討を行った。さらに、RC断面の曲げ解析を行って、コンクリートの圧縮強度、圧縮側かぶりコンクリート厚および引張圧縮鋼材の比が曲げモーメントや曲率の大きさに及ぼす影響について調べた。また、これらの要因が、曲げを受ける合成版型部材の限界性能に及ぼす影響についても考察した。本研究の成果を要約すると以下のとおりとなる。

(1) 曲げ実験

a) 曲げを受けるTSC部材およびRC部材の弾塑性挙動では、最大曲げモーメントが明確に生ずる回転角が存在する。一方、SW部材は圧縮側にかぶりコンクリートが存在しないので、最大曲げモーメントが明確に生ずる回転角は存在しない。この傾向は、解析においても認められた。

b) SW部材およびTSC部材の降伏モーメントおよび最大曲げモーメントは、一般によく用いられるRC断面の曲げ解析を用いることにより比較的精度良く推定できる。また、SW部材の最大曲げモーメントは、圧縮鋼板に局部的座屈が生じなければ終局状態のみに着目した式(3)を用いて推定できる。

c) 本実験の範囲では、合成版型部材のエネルギー吸収容量は、RC部材の約2倍の値を示した。また、終局回転角もRC部材より6~7割程度大きい。なお、エネルギー吸収容量の定量的評価のためには、さらに立体トラス型ジベルやせん断補強筋によるコンクリートの横拘束効果について検討する必要がある。

(2) 曲げ解析

a) 最大曲げモーメントは、コンクリートの圧縮強度の増大にともなって上昇する。しかし、圧縮側のかぶりコンクリート厚が小さくなるにつれて、モーメントの上昇率は減少する。とくに、かぶりコンクリートが存在しない場合は、コンクリートの圧縮強度の大きさによらず同じ値となる。また、コンクリートの圧縮強度は終局曲率の大きさには影響しない。

b) 圧縮側のかぶりコンクリート厚が大きくなると、最大曲げモーメント点が明確に現れる。その値は、コンクリートの圧縮強度が大きいほど大きい。

c) 圧縮側にかぶりコンクリートが存在しない場合、複鋼材比が増大するにつれて最大曲げモーメントは増大する。一方、圧縮側にかぶりコンクリートが存在する場合は、その厚さが増加するにしたがって複鋼材比の影響は小さくなる。

d) 複鋼材比が1.0、すなわち引張鋼材量と圧縮鋼材量が等しい場合には引張鋼材の破断によって終局に至る。言い換えれば、引張鋼材と圧縮鋼材の引張合力および圧縮合力が等しいときには降伏終了点が存在しない。つまり、複鋼材比を1.0とすることにより極めて大きな靱性が期待できる。また、最大曲げ耐力の向上を図るためには圧縮側のかぶりコンクリートの効果も無視できない。

謝辞 本研究を実施するにあたり、ご指導をいただきました防衛大学校土木工学教室教授 内田孝先生ならびに石川信隆先生に深甚なる謝意を表します。また実験を行うにあたり、試験体の作製については石川島建材工業(株)および曲げ実験の実施においては防衛大学校理工学研究科学生 丸山貴司君の御協力を得ました。ここに付記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 前田幸雄：土木における合成構造，コンクリート工学，Vol.21，No.12，pp.13-22，1983.12
- 2) 太田俊昭，日野伸一，興石正巳，日向泰山：立体トラス型ジベルを有する合成版構造の力学特性と設計法に関する研究，構造工学論文集，Vol.34A，pp.297-305，1988.3
- 3) 栖原寿郎，西牧興，松石正克，竹下治之，岩田節雄：鋼板とコンクリートから構成されるサンドイッチ式複合構造物の強度に関する研究（第1報：静的強度の模型実験及び終局強度解析），日本造船学会論文集第141号，pp.205-216，昭52.6
- 4) 栖原寿郎，西牧興，松石正克，竹下治之，岩田節雄：鋼板とコンクリートから構成されるサンドイッチ式複合構造物の強度に関する研究（第2報），日本造船学会論文集第142号，昭52.12
- 5) 栖原寿郎，西牧興，松石正克，竹下治之，岩田節雄：鋼板とコンクリートから構成されるサンドイッチ式複合構造物の強度に関する研究（第3報），日本造船学会論文集第145号，pp.164-175，昭54.6
- 6) 服部陽一，松石正克，石浜高明，山本隆夫，岩田節雄，北園真澄：鋼板とコンクリートから成るサンドイッチ式コンポジット構造の最終強度，日本造船学会論文集第157号，pp.369-382，昭60.6
- 7) 秋山曜，小関喜久夫，平和男，佐々木正廣：鋼コンクリート合成サンドイッチ構造部材の強度特性，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.605-608，1986

- 8) 秋山暉, 小関喜久夫, 平和男, 佐々木正廣: 鋼コンクリート合成サンドイッチ構造部材の終局耐力, 合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.69-74, 1986.9
- 9) 横田弘, 清宮理: 鋼-コンクリート合成はりのせん断補強鉄筋が終局耐力に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集9-2, pp.531-536, 1987,
- 10) 田中祐人, 佐藤政勝: 突起付T形鋼を用いた斜合成床版橋の構造特性と設計法, 合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.63-68, 1986.9
- 11) 浅沼素, 佐野信一郎, 赤尾宏: トラス型ジベルを用いた合成床版及び合成鋼床版桁の実験研究, 合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.231-238, 1986.9
- 12) 土木学会: 鋼構造物設計指針 PART B 特定構造物, 1987.11
- 13) Park R., Kent D.C. and Sampson R.A.: Reinforced Concrete Members with Cyclic Loading, Proc. of ASCE, ST7, July 1972.
- 14) 小柳治, 六郷恵哲, 岩瀬裕之: RCはりの曲げ破壊過程と曲げじん性に及ぼす材料特性の影響, 土木学会論文集, 第348号/V-1, pp.153-162, 1984.8
- 15) 小阪義夫, 森田司郎: 鉄筋コンクリート構造, 丸善株式会社, p.21, 1975.12

(1988年10月12日受付)