

軸力と曲げせん断力を受ける鋼板コンクリート部材に関する研究

木村 耕三 津田 和明 吉岡 研三
長沼 一洋 山口 恒雄 武田 寿一

A Study on Behaviors of Concrete-Filled Steel Structure under Axial Force and Shear Bending

Kozo Kimura Kazuaki Tsuda Kenzo Yoshioka
Kazuhiro Naganuma Tsuneo Yamaguchi Toshikazu Takeda

Abstract

Concrete-filled steel walls (S/C Structure) have good characters and strength similarly to concrete-filled steel pipe. Experiments were performed in order to grasp the characters of S/C members under earthquake and thermal loads. The results of the experiments and FEM analyses are described in this report.

As a result of the experiments, the stiffness and strength of an S/C member under thermal load were found to be lower. The stress-strain relationship of confined concrete was modeled from experiments under axial load. The results of analyses agreed with those of experiments in the analyses of specimens under shear bending with this stress-strain relationship.

概 要

内部にコンクリートを充填した鋼板壁体（鋼板コンクリートと称する）は、鋼管コンクリートと同様、すぐれた変形能と大きな耐力を有する。この報告は、地震荷重と温度荷重を受けた鋼板コンクリート部材の力学的な性状を把握するために行った実験結果について述べたものである。

実験の結果、温度荷重によって、軸方向、せん断剛性の低下が見られ、また、最大耐力も多少低下することが分かった。軸方向加力実験から得られた、鋼板で拘束されたコンクリートの $\sigma\sim\varepsilon$ 関係を用いて、せん断試験体のFEM解析を行った。解析結果は、実験結果と良好な対応を示しており、充填コンクリートの $\sigma\sim\varepsilon$ 関係のモデル化の妥当性が確認できた。

1. 序

鋼板で構成された中空壁体の中にコンクリートを充填した壁体（以下、鋼板コンクリートと称する）は、鋼管コンクリートと同様にすぐれた変形能と、大きな耐力を有する。この特性を利用して、近年、耐震性を必要とする原子炉建屋の主要部分への適用が検討されている。原子炉建屋の設計では、地震荷重と温度荷重の組合せも考えられており、設計に当っては、これらの荷重に対する鋼板コンクリート部材の性状を把握しておく必要がある。この構造が地震荷重（面内せん断力）を受けた時の耐荷機構および終局耐力に関しては、加藤・鈴木の研究¹⁾がある。しかし、温度荷重と地震荷重を受けた時の挙動についての研究はない。

この報告では、地震荷重と温度荷重を受けた鋼板コンクリート部材の力学的な性状を調べるとともに、充填コ

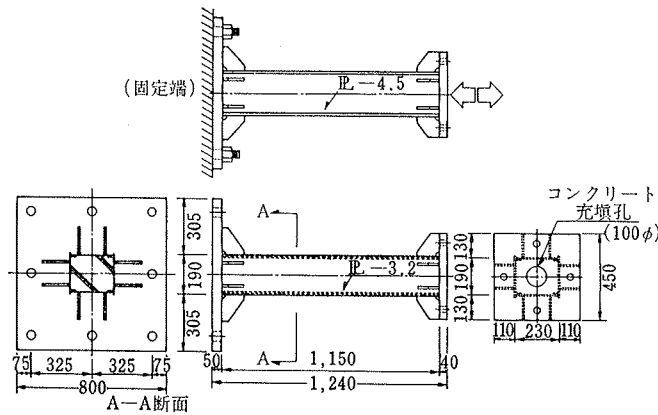
ンクリートの解析用のモデルを得るために、実験的な検討を行なった。

2. 試験体

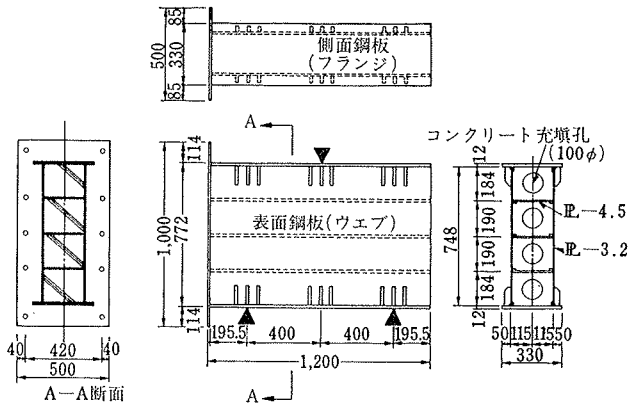
実験は、地震時の構造体に発生する応力状態から、軸方向加力試験（圧縮・引張実験と称する）とせん断実験（曲げせん断実験と称する）の2種類とした。

試験体の形状寸法を図-1、2に、使用材料の機械的性質を表-1に示す。内部のコンクリートは、いずれも試験体を立てた状態で、上部開口（100φ）から打設し、乾燥収縮などによるコンクリートの沈降部分は、無収縮性のグラウト材を注入、表面をビニールでおおい、養生した。

試験体のパラメーターは、温度荷重の経験の有無である。閉鎖された空間に試験体を設置した後、約3.6°C/hの昇温速度で室温を110°Cまで上昇させ、温度を保持し



図一 試験体の形状寸法 (圧縮・引張実験)



図二 試験体の形状寸法 (曲げせん断実験)

たまま試験体を数日間放置することによって温度荷重を与えた。実験は、試験体を室温まで冷却したのち、行なった。

圧縮・引張試験体、曲げせん断試験体とも温度荷重を受けたものを加熱試験体、受けないものを常温試験体と称する。

3. 圧縮・引張実験

3.1. 実験方法

図一に示す試験体の一端を固定、他端に油圧ジャッキで圧縮、引張の繰返し軸力を加えた。载荷は、圧縮からはじめ、圧縮力によって破壊させた。

測定は、鋼板の主要な位置と充填コンクリート中央でのひずみと、軸方向変形について行なった。

3.2. 実験結果と考察

表一に実験結果を、図一三に荷重～軸方向変形曲線を示す。図一四、五は、それぞれ常温試験体、加熱試験体の鋼板と充填コンクリートの荷重～ひずみ曲線である。

3.2.1. 耐力 引張時の耐力には、温度荷重の影響は見られず、両試験体とも鋼板のみを有効と考えた耐力にはほぼ等しい。圧縮時には、加熱試験体の初期剛性は、常温試験体に比べて低下している。この原因は、温度荷重によるコンクリートのひびわれ、および

弾性係数の低下²⁾と考えられる。一方、圧縮耐力には、鋼板とコンクリートの合成効果が発揮されており、常温試験体の最大耐力約 300 t は、鋼板とコンクリートの累加強度にはほぼ一致している。加熱試験体の耐力は、270 t で、常温試験体に比べて多少低下している。なお、表一、図一三～五における計算値はすべて常温での材料特性の値(表一)を用いて求めた。

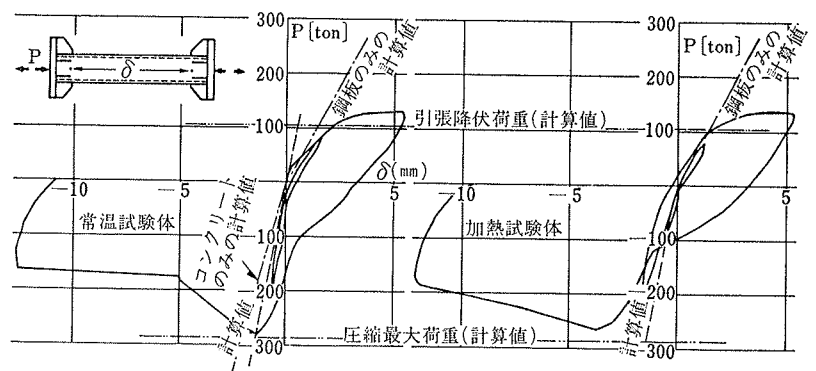
図一三の荷重～変形曲線の特徴は、最大耐力以後に生じる急激な耐力低下である。実験時の観察では、この原因は、鋼板の面外局部座屈によるものと考えられるが、一般的には、試験体に用いた幅厚比50～60の中空箱形断面材でも、降伏ひずみの2倍程度のひずみに達するまで座屈は生じないと考えられ³⁾、コンクリートが充填されるとさらに大きなひずみに達するまで座屈は生じにくい⁴⁾。

板厚(mm)	降伏点 σ_y (t/cm ²)	引張強さ σ_b (t/cm ²)	弾性係数 E_s (t/cm ²)	伸び (%)	コンクリート		
					圧縮強さ F_c (kg/cm ²)	引張強さ F_t (kg/cm ²)	弾性係数 E_c (t/cm ²)
3.2	3.14	4.39	1,980	28.1			
4.5	3.02	4.68	1,990	27.7			
12.0	2.98	4.60	2,050	29.6	456	36.9	320

表一 使用材料の機械的性質

	常温試験体		加熱試験体		(1)/(3)	(1)/(4)	
	実験値(1)	計算値(2)	実験値(3)	計算値(4)			
初期剛性(t/mm)	244	211	1.16	170	211	0.81	1.44
引張降伏荷重(t)	100	103	0.97	110	103	1.07	0.91
圧縮最大荷重(t)	298	288	1.03	265	288	0.92	1.12

表二 初期剛性と諸荷重一覧表



図一三 荷重～変形曲線

この実験では、圧縮加力前に生じていた鋼板の引張残留変形（約 2 mm）の影響で、最大耐力後、面外の変形が著しく増大し、鋼板が軸力を保持できなくなったと推定される。これは、最大耐力後の低下した荷重約 100t が鋼板の耐力に相当することで説明できる。なお、 $\delta=20$ mm での耐力 200 t は、コンクリートの圧縮強度 F_c に匹敵している。

3.2.2. 充填コンクリートの応力～ひずみ関係 最終サイクルでの圧縮時の荷重～変形曲線を見ると、荷重 -100 t 近くまでは、鋼板のみの、-100～-200 t は、コンクリートのみの剛性と一致している。これは、図-4, 5 の荷重～ひずみ関係から、引張加力時の残留変形の影響で、鋼板が圧縮耐力 100 t まで負担し、鋼板の降伏後は、充填コンクリートが荷重を負担しているためと考えられる。この結果から、荷重 -100 t 以降について、鋼板の負担分 100 t を差し引いた荷重を充填コンクリートの断面積で除した平均圧縮応力度と、モールドゲージの測定ひずみの関係をプロットしたものが図-6

である。図には、テストピースによる圧縮試験結果も併せて示した。実験での最大荷重時のコンクリートのひずみを▼印で図中に示す。実験では、鋼板の座屈後も充填コンクリートは、圧縮強度 F_c を保持し、終局ひずみは、測定された最大ひずみよりも増大していると考えられる。

充填コンクリートとテストピースの $\sigma\sim\varepsilon$ 関係を比べると、圧縮強度に達するまでの性状はほぼ一致している。しかし、テストピースでは圧縮強度に達した後、強度が急激に低下するのに対し、充填コンクリートでは、強度低下はなく、ひずみが増大する。一方、温度荷重を受けた場合には、弾性係数の低下が見られるほか、圧縮強度に達するひずみが常温に比べてかなり大きくなっており、これは、高温を受けたアンシール状態でのコンクリートの圧縮試験と同様の結果となっている⁵⁾。

4. 曲げせん断実験

4.1. 実験方法

実験は、図-2 に示すように、スパン 80 cm の単純ばり形式で、中央集中荷重により破壊までの単調載荷を行なった。測定は、鋼板とコンクリートの主要位置での三方向ひずみと、壁体のせん断変形について行なった。

4.2. 実験結果

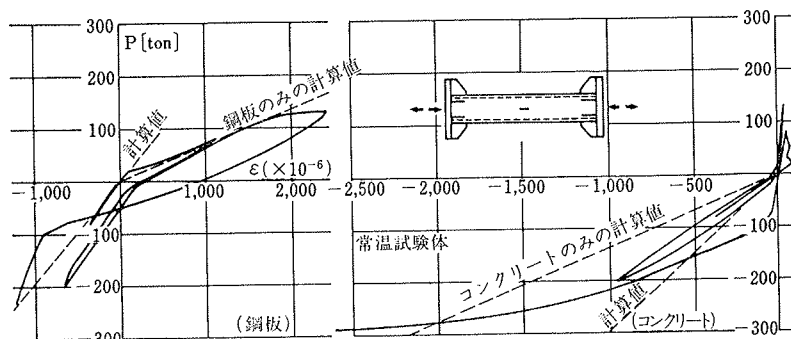


図-4 荷重～ひずみ曲線（常温試験体）

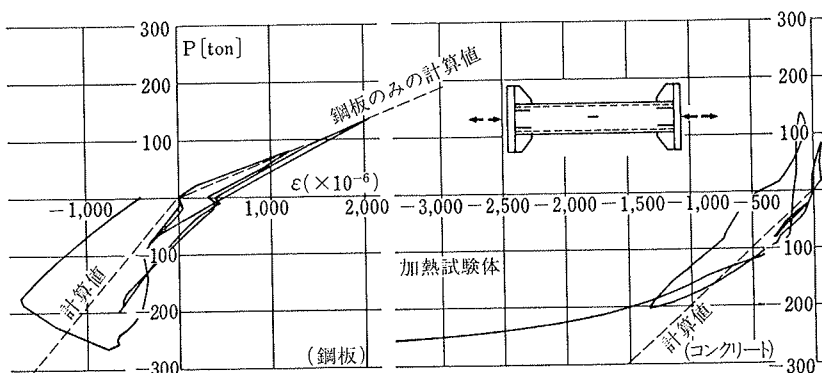


図-5 荷重～ひずみ曲線（加熱試験体）

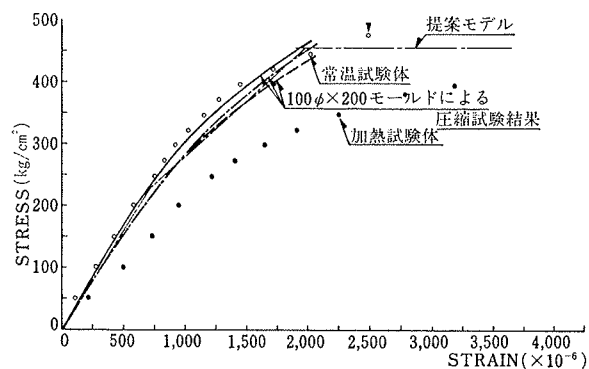


図-6 充填コンクリートの $\sigma\sim\varepsilon$ 関係

表-3 に実験結果を、図-7 に荷重～変形曲線、図-8～10 に鋼板および充填コンクリートの荷重～ひずみ曲線を示す。図-11 は、実験後のコンクリートの破壊状況である。

4.3. 解析目的と解析方法

せん断変形の卓越する鉄筋コンクリート造壁体では、コンクリートの応力が圧縮強度 F_c に達する前に破壊することがほぼ明らかとなっている。一方、鋼板コンクリート構造では、鋼板の拘束によって充填コンクリートの靱性がよくなることを前章で実験的に確認しており、せん断変形の卓越する部材の解析においても、圧縮実験で得られた応力～ひずみ関係が適用できると考えられる。

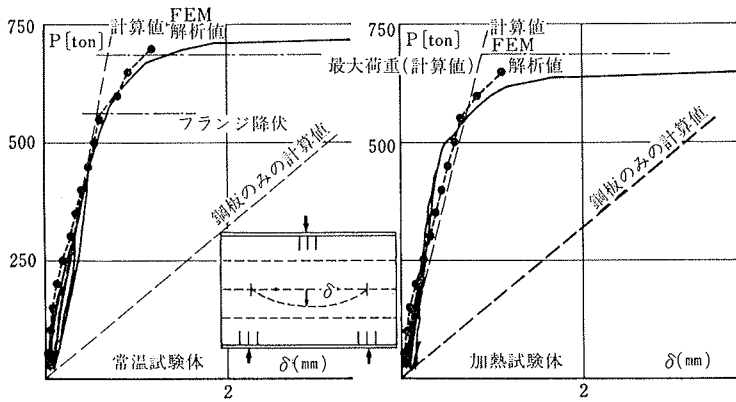


図-7 荷重～変形曲線

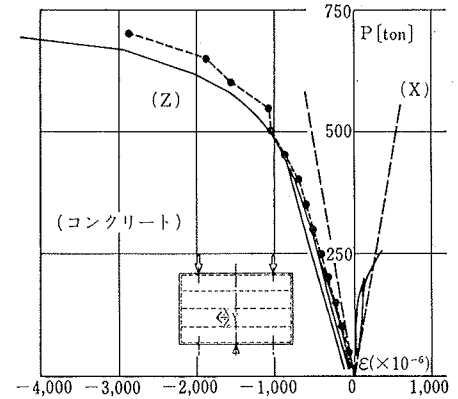


図-9 コンクリートの荷重～ひずみ関係

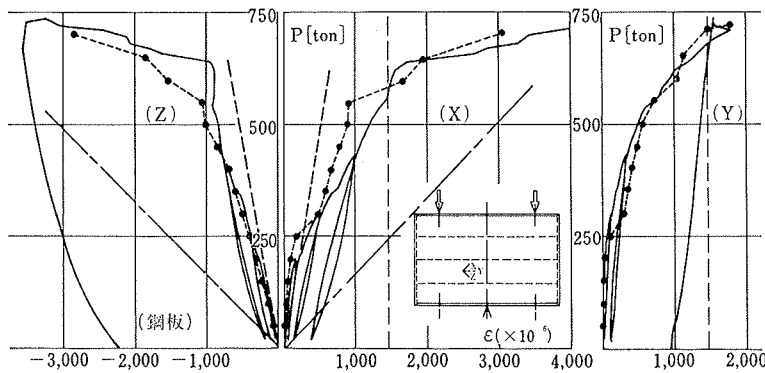


図-8 鋼板の荷重～ひずみ関係 (常温試験体)

	常温試験体			加熱試験体			(1)/(2)	(3)/(4)	(1)/(3)
	実験値 (1)	計算値 (2)	FEM 解析値	実験値 (3)	計算値 (4)	FEM 解析値			
弾性剛性 (t/mm)	1,164	982	953	1,030	768	760	1.19	1.34	1.13
最大耐力 Pu(t)	735.5	686.3	720	694.5	686.3	700	1.07	1.01	1.06

*加藤・鈴木式による値

表-3 剛性および最大耐力一覧表

ここでは、提案モデルを用いて、曲げせん断試験体を対象に FEM 非線形解析を行ない、実験結果との比較検討を試みた。

試験体は、加力方向に対して対称であるため、全体の 1/2 をモデル化 (232要素, 126節点) した。ウェブプレートとコンクリートは、同一位置に配し、節点を共有させている。スティフナーは、ウェブプレートと直交する板要素として考慮している。解析に用いた要素分割図を図-12に、充填コンクリートおよび鋼板の応力～ひずみ関係を図-13に示す。なお、加熱試験体では、温度荷重による影響を考慮して、コンクリートの弾性係数のみを便宜上、常温の75%²⁾に低下させて解析した。解析結果は、表-3 および図-7～9に示した。図-14は、解析に

充填コンクリートの破壊状況である。

4.4. 考察

4.4.1. 耐力 加熱試験体の最大耐力は、常温試験体に比べて多少低下している。最大耐力は、コンクリートを圧縮強度 F_c を保持する圧縮斜材、鋼板を引張斜材と考えたトラス機構を想定した加藤、鈴木式¹⁾で求めた値とほぼ一致している。また、鋼板コンクリート壁体は、面内せん断力に対して、最大耐力後、急激な耐力低下がなく、変形能に優れた性状を示している。一方、

FEM 解析では、図-14より、荷重 450 t で支点近傍のコンクリートが圧縮強度に達し、以降、その領域は支点、加力点近傍に広がっている。荷重 720 t で加力点、支点を結ぶ圧縮ストラットの圧縮応力が広範囲にわたり F_c に達し、変形が急激に増大、解析上、不安定となっている。この荷重が解析上の最大荷重で、実験値とよく一致している。また、4.3. で述べたように、せん断が卓越する鋼板コンクリート部材のコンクリートの圧縮強度を鉄筋コンクリートと同様にその上限を $2 \times 5.6 \sqrt{F_c}$ とすると解析上の最大荷重は、実験値よりかなり低くなる。

4.4.2. コンクリートと鋼板の一体性 図-8, 9の荷重～ひずみ曲線から、同じ位置での鋼板とコンクリートのひずみを比べると常温試験体では、両者がほぼ一致している。また、FEM 解析値と実験値がよく対応している。これから、鋼板とコンクリートの一体性があると考えられる。一方、加熱試験体では、図-10の荷重～ひずみ曲線で、コンクリートと鋼板のひずみが一致しないこと、図-7の荷重～変形曲線で初期剛性 (荷重 40 t 以下) が小さく、その値は、鋼板のみの剛性に一致していることから、加力初期の段階で、温度荷重によって鋼板とコンクリートの一体性が失われ、それが以降の挙動にも影響していると考えられる。

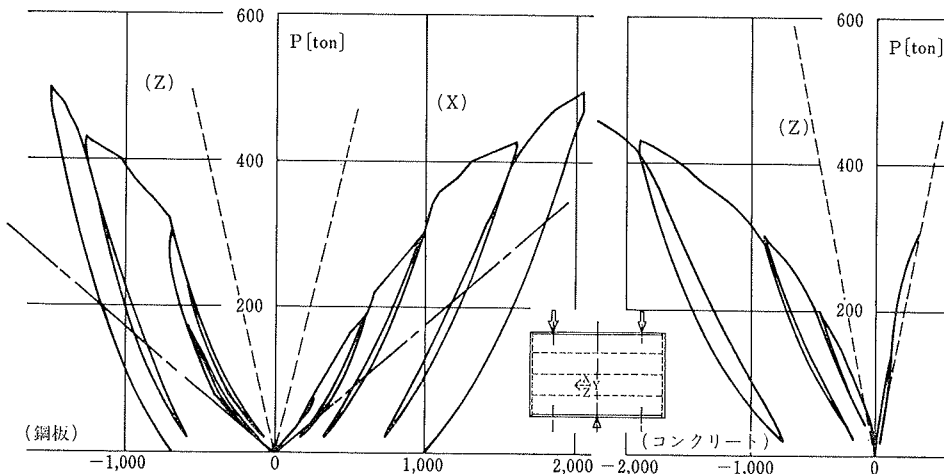


図-10 荷重～ひずみ関係 (加熱試験体)

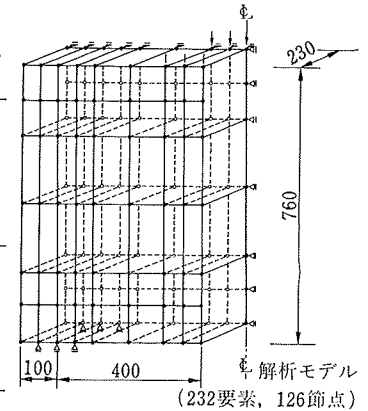


図-12 要素分割図

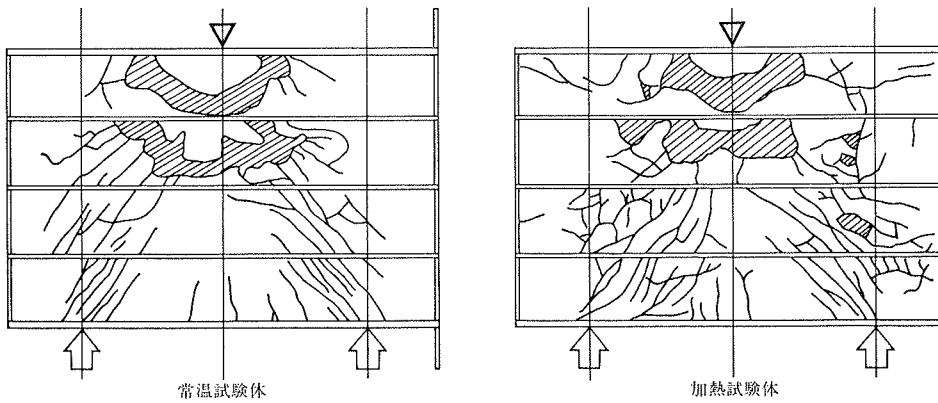


図-11 破壊状況 (常温, 加熱試験体)

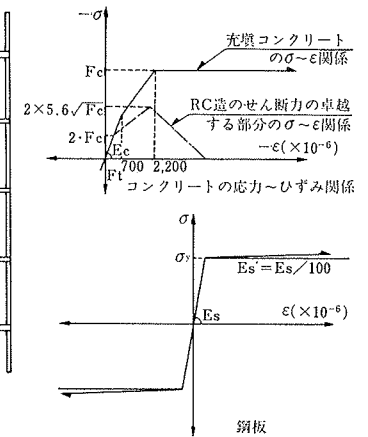
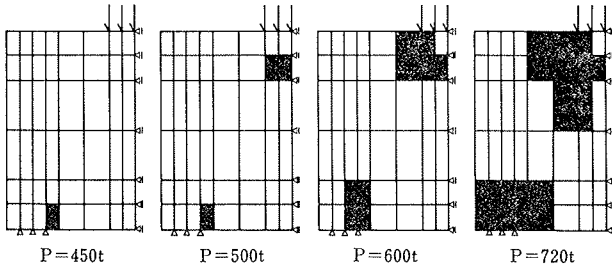


図-13 材料のσ～ε関係モデル



■: コンクリートが F_c に達した要素
図-14 破壊経過

5. まとめ

(1) 軸力を受ける鋼板コンクリート部材の充填コンクリートの応力～ひずみ関係は、テストピースの圧縮試験結果と比較すると、圧縮強度に達するまではほぼ同じ性状を示すが、それ以降は急激な耐力低下がなく、両者で差が現われる。

(2) 温度荷重を受けた鋼板コンクリート部材の軸力およびせん断力に対する初期剛性, 最大耐力は, 温度荷重を受けない場合よりも多少低下している。しかし, せん断力に対する靱性は, 両者で差が見られない。

(3) 温度荷重を受けると, 鋼板とコンクリートとの一

体性は失われる。

(4) 鋼板コンクリート壁体のせん断挙動は, 今回提案した充填コンクリートの $\sigma \sim \epsilon$ 関係 (図-13) を用いた FEM 解析によって把握することができる。

6. 参考文献

- 1) 加藤, 鈴木: コンクリート充填構造要素のせん断耐力, 日本建築学会論文報告集, 第341号 (昭和59.7), pp. 27~36
- 2) 松井, 大池, 他: 高温と外荷重とを受けるコンクリート構造物に関する実験的研究 (その1~その10), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B (昭和60.10), pp. 869~888
- 3) 日本建築学会: 鋼構造塑性設計指針
- 4) 松井, 津田: コンクリート充填角形鋼管柱の幅厚比制限値について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C, (昭和61.8), pp. 1411~1412
- 5) 川口, 高橋: 高温を受けたコンクリートの強度性状, 大林組技術研究所報, No. 28, (1984), pp. 118~122