

原子炉建屋の非線形解析手法に関する研究

武田 寿一 山口 恒雄 伊藤 雅保
大内 一 長沼 一洋

Study on Non-linear Analytical Method for Nuclear Reactor Building

Toshikazu Takeda Tsuneo Yamaguchi Masayasu Ito
Hajime Ohuchi Kazuhiro Naganuma

Abstract

The "FEMN", non-linear FEM analysis code developed at the company's Technical Research Institute was improved making it possible to analyze the non-linear behaviors of complex concrete structures such as nuclear reactor buildings subjected to seismic loads or combined thermal and seismic loads. Analyses of complex structures had been very difficult to perform because the total number of degrees of freedom had been restricted by the memory capacity of a computer. However, the restriction was dissolved by application of the block divided skyline method for the solution of linear equations. In addition, the analytical results obtained from the former analysis code on the behaviors of cracked structures had not corresponded to the real phenomena. To improve the accuracy of analysis, the shear transfer along crack surfaces was considered. Test specimens were analyzed by the improved analysis code. These results agreed well with the test results, and the applicability of the code was confirmed.

概 要

大林組技術研究所で開発した既存のFEM非線形解析コード「FEMN」を改良し、地震荷重又は温度荷重と地震荷重の組合せ荷重を受ける原子炉建屋のような複雑な断面形状を持つコンクリート構造物の非線形挙動を解析できるようにした。

従来、解析モデルの自由度数は電算機の記憶容量に左右され、複雑な構造物の解析は困難であったが、剛性方程式の解法にブロック分割スカイライン法を導入することにより、この制約が解除された。又、温度荷重によるひびわれが予め生じている構造物の地震荷重に対する挙動の解析は、従来の解析コードでは実現象に対応する結果が得られていない。この点に関しては、ひびわれ面でのせん断伝達効果を解析で考慮することで精度の向上を図った。この改良型解析コードを用いて既往の模型試験体の解析を行ない、実験結果と良好に対応する結果が得られることと適用性もあることを確認した。

1. 序

原子炉建屋のように複雑な形状を有する鉄筋コンクリートあるいは鋼板コンクリートから成る構造物が、地震荷重や温度荷重、およびそれらの組み合わせ荷重を受ける時の挙動をFEM非線形解析により検討するために、既に開発されている解析コード「FEMN」を適用する場合、以下のような問題点がある。

- (1) 使用計算機の記憶容量の制限により解析モデルの総節点数や総要素数が限定されてしまう。
- (2) コンクリートの圧縮強度にテストピースの値をそ

のまま用いると、鋼材量が多く面内せん断で破壊する場合の耐力を過大評価してしまう。

(3) ひびわれ面におけるせん断力の伝達作用が考慮されていないため、高温を受けて熱ひびわれが生じた状態で地震力のような外荷重を受ける場合の解析ができない。

このほかにも様々な問題が残されているが、今回は、最も重要であると考えられる上記の三つの点に関する改善を行なった。

まず(1)に関しては、連立一次方程式の解法に「ブロック分割スカイライン法」を導入することにより、計算機の記憶容量の制限に関係なく大規模な解析が可能となっ

た。これは数値計算法のテクニックであるため、詳細は文献1)を参照されたい。

(2)および(3)については、既往の材料試験や部材実験の結果に基づき、便宜的ながらも適用範囲の広い解析モデルの設定を行ない、その解析結果を実験結果と比較しながら適用性を検討した。

2. コンクリートの応力～ひずみ関係

2.1. コンクリートの面内せん断耐力

1章の(2)で述べたように、鋼材量が多く面内せん断で破壊する場合のコンクリートの最大圧縮応力度は、テストピースの値より低いことが、既往の多くの実験により指摘されている。

図-1は、既往の円筒試験体を中心に、縦軸に作用せん断応力度を、横軸に鋼材拘束力²⁾をそれぞれ $\sqrt{F_c}$ で除して、その関係を示したものである。ここでは水平加力の試験結果は、応力再配分の影響を考え、FEM 非線形解析で得られた作用せん断応力度のピーク値を用いている。また、PC 円筒の場合、プレストレスによる膜圧縮力やワイヤー巻付けによる面外拘束力などの効果で多少耐力は高めとなるものの基本的にはRC 円筒と同じものと考えられる。

図から、鋼材量がある程度以上になると、鋼材に余力が残された状態でコンクリートの破壊で耐力が決定され、トラス式では耐力を過大評価するものも現われ、水平加力、ねじり加力の結果を合せた終局時せん断応力度の上限は $5.6\sqrt{F_c}$ 程度となることが認められる。

2.2. コンクリートの応力～ひずみ関係のモデル化

前述の結果に基づき、コンクリートの応力～ひずみ関係のモデル化に際して、面内せん断が卓越する領域と、それ以外の領域の二つに分けて、前者をウェブゾーン、後者をフランジゾーンとして図-2に示すようなモデル

を設定した。

斜めひび割れが生じた状態のせん断応力度が $5.6\sqrt{F_c}$ とすると、その時のコンクリートの圧縮ストラットの応力は $2 \times 5.6\sqrt{F_c}$ となることから、それをウェブゾーンの上限值とした。

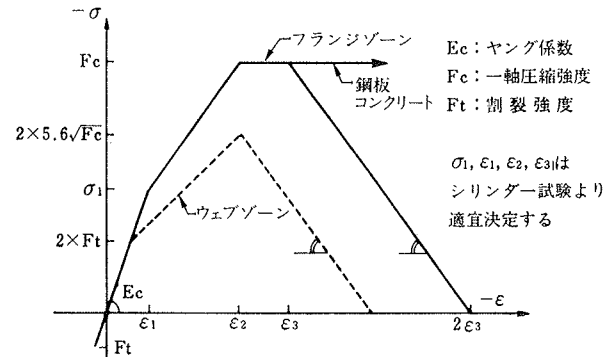


図-2 コンクリートの応力～ひずみ関係のモデル

この二つのモデルにより円筒のねじり加力試験体の解析を行なった結果を図-3に示す。解析には積層四辺形板要素を用い、鉄筋は軸方向剛性のみを有する等価な層に置換した。解析手法の詳細は文献11)で既に報告している。試験体は外径 240 cm、肉厚 20 cm でダブルの縦横配筋、鉄筋比各 2.07% である。実験との比較からウェブゾーンとした解析が良い結果となっていることが分かる。

このようなねじり加力では筒体部全域がほぼ純せん断に近い状態となるため、図-1に基づいて決定した最大せん断応力度 $5.6\sqrt{F_c}$ を用いることで良い結果が得られたものと考えられる。実際にはこの最大せん断応力度も曲げによる膜力や幅止め筋などによる面外拘束の影響を強く受けるものと考えられるが、それらを含めた平均的な評価として便宜的に $5.6\sqrt{F_c}$ の値を用いることにする。

2.3. 鋼板コンクリートの応力～ひずみ関係のモデル化

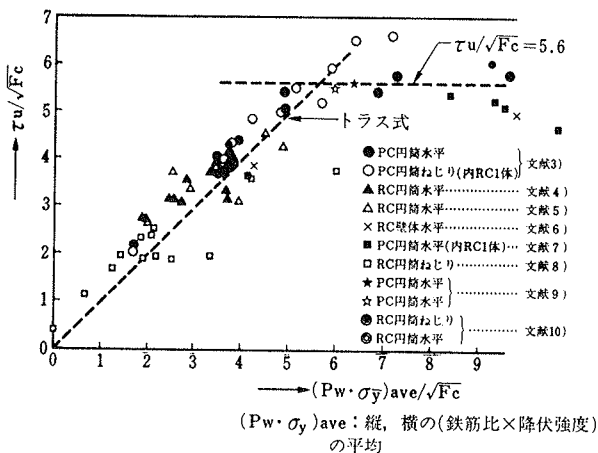


図-1 終局せん断応力度と鋼材拘束力の関係

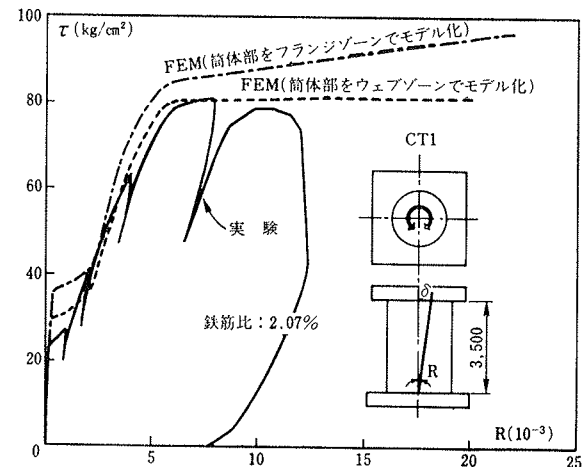


図-3 荷重～変形関係の比較¹⁰⁾

原子炉建屋では部分的に鋼板コンクリート構造とする場合があるが、この場合のコンクリートの挙動は鋼板による拘束効果によって、通常のものとは異なるが、便宜的に、ウェブゾーン、フランジゾーンの区別をせず、図-2に示すように、圧縮強度 F_c に到達後もその強度を保持し続けるモデルを設定することで、ほぼ実験と対応する結果が得られることを文献12) で報告した。

3. ひびわれ面におけるせん断伝達のモデル化

3.1. せん断伝達係数 β を用いたモデル

この解析では、コンクリートは積層要素で表現しており各層では一様ひずみで、ひびわれが生じるまでは等方性材料として扱っている。この時のコンクリートの応力～ひずみマトリックスは次式で表わされる。

$$[D_0] = \frac{1}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} E & \nu E & 0 \\ \nu E & E & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu^2)G \end{bmatrix} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、E: ヤング係数

ν : ポアソン比

G: せん断弾性係数

ひびわれ面のせん断伝達を考慮しない場合、ひびわれ発生後の応力～ひずみマトリックスは、ひびわれと直交方向の剛性が零となり、さらに、1本目のひびわれに直交して2本目のひびわれが生じると、あらゆる方向の剛性を失う。この時の応力～ひずみマトリックスは、次式で表わされる。

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1 \text{ 方向ひびわれ}) \dots\dots(2)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2 \text{ 方向ひびわれ}) \dots\dots(3)$$

式(2)ではひびわれ面に平行又は直交方向のせん断剛性は零となり、式(3)ではあらゆる方向のせん断伝達が不可能である。しかし、実際には、ひびわれ面においてせん断力の伝達が行なわれることが、既往の実験結果から明らかである。図-4は円筒に内圧を作用させて、ひびわれが生じた状態で、内圧を保持したままねじり加力を行った実験⁸⁾ に関して、縦軸に内圧がない場合に対する初期剛性の比を、横軸にひびわれと直交方向の鉄筋のひずみをとったものである。ひびわれの存在はねじり剛性を低下させているが、剛性が零にはならないことから、ひびわれ面でせん断力の伝達が行なわれていることは明らかである。

そこで、ひびわれ発生後も、ひびわれ面に沿った方向のせん断剛性を応力～ひずみマトリックスに残すため、ひびわれが生じていない状態のせん断剛性Gと、ひびわ

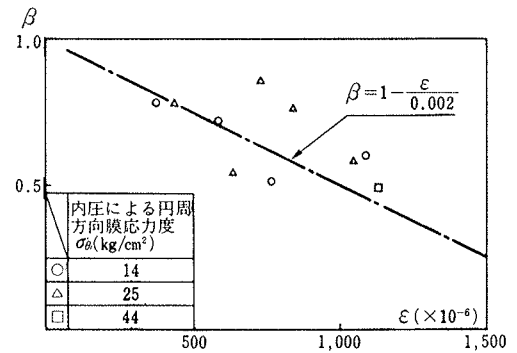


図-4 ねじり剛性低下率～鉄筋ひずみ関係

れ発生後のせん断剛性の低減係数(せん断伝達係数) β を用いて次式のように表現する。

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} \quad (1 \text{ 方向ひびわれ}) \dots\dots(4)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} \quad (2 \text{ 方向ひびわれ}) \dots\dots(5)$$

実現象に近い形でひびわれ面の骨材のかみ合いをモデル化するのは非常に困難であるが、この方法では簡単な形で表現できるため、FEM解析に取り込みやすい手法と言える。しかしあくまでも便宜的な手法であり、解析対象によっては適用限界があることに注意が必要である。

3.2. せん断伝達係数 β の評価方法

β の定量的評価に関しては、現時点では実験データが不足しており、既往の研究においても、暫定的あるいは試行錯誤的に決定している例が多い。Darwin, Pecknold¹³⁾ は $\beta G = 0.25 E$ とし、Suiolan, Schnobrich¹⁴⁾ は、 $\beta = 0.5$ とするなど各研究者により種々仮定されている。

以上はひびわれ面のせん断剛性を一定値とする方法であるが、 β の値をひびわれ幅、コンクリート強度、ひびわれ間隔の関数として定義する方法が Shirai, Sato¹⁵⁾ によって提案されている。また、これをやや簡略化して β をひびわれと直交方向のひずみ、あるいは、ひびわれ幅によって定義する方法が一般に多く用いられているが β の値については各研究者の間でかなりの差が見られ、今後の実験データの蓄積と解析的検証が必要である。

今回の解析では、前述の内圧を作用させた円筒のねじり加力の結果(図-4)に基づき、実験値を平均的に評価する簡潔な式として次式を用いた。

$$\beta = 1 - \frac{\epsilon}{0.002} \quad \dots\dots(6)$$

ここで、 ϵ はひびわれに直交する方向の鉄筋のひずみであるが、解析では要素内において一様分布ひびわれを仮定しており、付着すべりは生じないものとしているため、 ϵ は要素のひびわれ直交方向ひずみと等価になる。

ひびわれ発生後は式(6)より β を求め、式(4)又は式(5)で要素の剛性マトリックスを評価する。

ひびわれ面でのせん断伝達を考慮することによって、要素にせん断応力が生じ、新たなひびわれ(せん断ひびわれ)が発生する。このひびわれは主応力方向に直交して生じるものとして、主応力がコンクリートの引張強度を超えた時に、発生させる。

4. 解析例

4.1. 水平力を受けるPWR型原子炉建屋の内部コンクリート構造全体模型試験体の解析

対象試験体¹⁶⁾は図-5に示すような鉄筋コンクリート壁体で複雑な形状を有している。モデル化に際しては対称性を利用して全体の1/2を解析の対象とした。ウェブゾーンとフランジゾーンの区分を図-6に示す。区分の基準は、便宜的に加力方向に直交する壁をフランジゾーン、その他の壁をウェブゾーンとした。

図-7に荷重～変形関係を実験結果と解析結果で比較

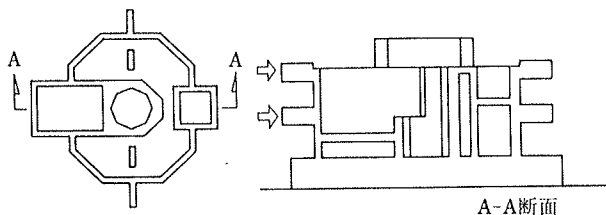


図-5 試験体の形状¹⁶⁾

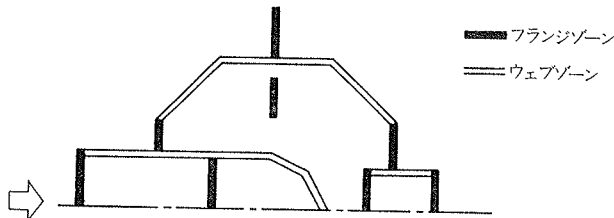


図-6 ウェブゾーンとフランジゾーンの区分

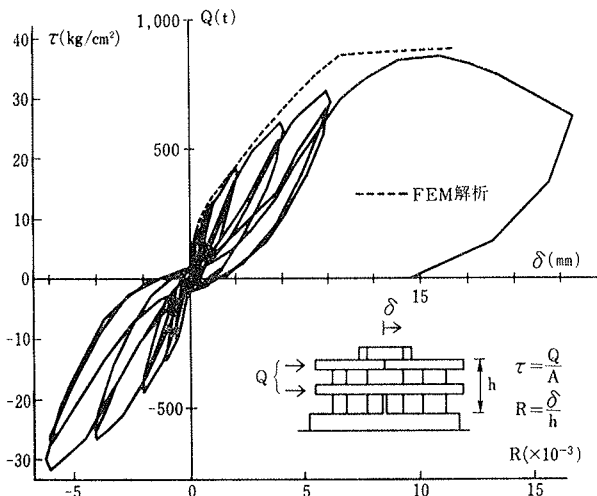


図-7 荷重～変形関係の比較¹⁶⁾

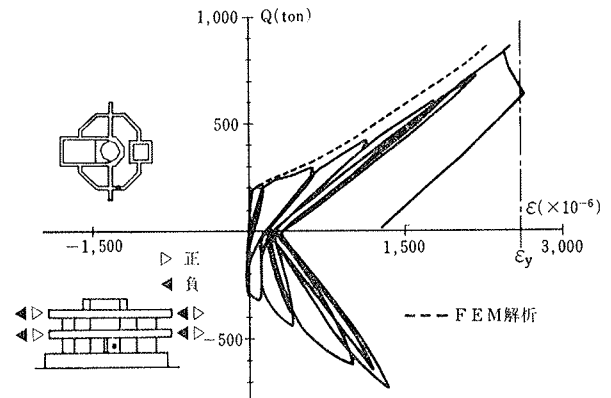


図-8 荷重～横筋ひずみ関係の比較¹⁶⁾

したものを示す。高荷重域で、解析では多少変形を小さめに評価しているが、剛性、耐力など実験との対応性は良好である。図-8には横筋の荷重～ひずみ関係を比較したものを示す。ひびわれ発生時期およびその後のひずみの増大傾向共に、解析結果は良好に実験結果をシミュレートしている。

4.2. 高温と水平力を受ける内部コンクリート構造全体縮尺模型試験体

対象試験体¹⁷⁾は図-9に示すような形状で、中央部の六角形部分は鋼板コンクリート、他は鉄筋コンクリートの壁で構成されている。ハッチで示した領域は約 110°C に加熱され、その状態で水平加力を行なっている。

解析は対称性を利用して全体の1/2をモデル化し、ウェブゾーンとフランジゾーンの区分は図-10に示すように仮定した。

図-11に加熱+水平加力時の荷重～変形関係を実験結果と解析結果で比較したものを示す。実験では加熱により、水平ひびわれを中心に広範囲にひびわれが生じており、解析のひびわれ発生状況もほぼ同様であった。この状態で水平力を載荷しているが、解析ではひびわれ面の

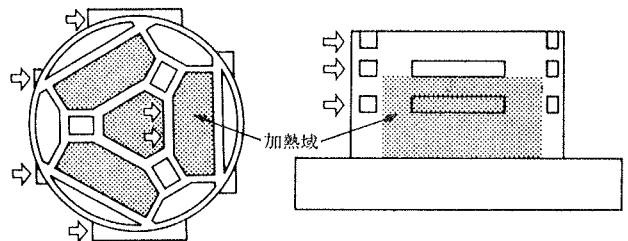


図-9 試験体の形状¹⁷⁾

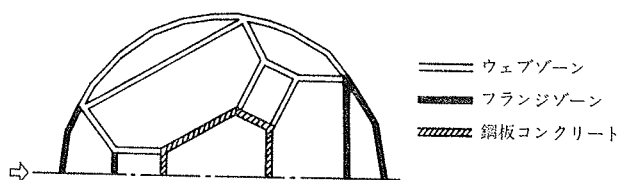
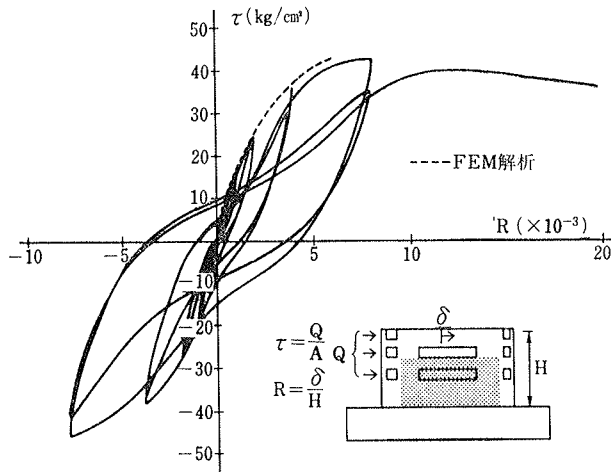


図-10 ウェブゾーンとフランジゾーンの区分



図一11 荷重～変形関係の比較¹⁷⁾

せん断伝達を考慮しているため、初期剛性は実験値に対して0.98と良好に対応している。その後の剛性も最大耐力に至るまで良く一致していることが分かる。

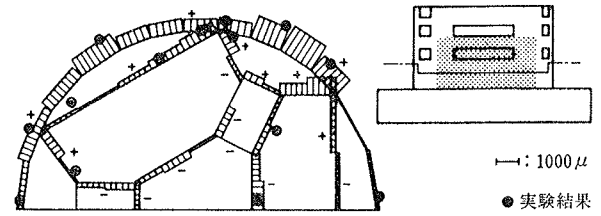
図一12は $R = 2/1000$ における水平断面の横筋のひずみ分布を比較したものである。解析結果と実験結果の対応は良好である。

5. まとめ

便宜的な仮定を導入して、様々な試験体の解析を行なったが、実験結果と解析結果は比較的良好に一致し、いずれも巨視的には非線形域の挙動を評価できそうである。今後はさらに基礎実験を行ない、解析精度の向上を図る予定である。

参考文献

- 1) E. L. Wilson, H. H. Dovey: Solution or reduction of equilibrium equations for large complex structural systems, *Advances in Engineering Software*, Vol. 1, No. 1, (1978), pp. 19~25
- 2) 武田, 山口, 山口, 古屋, 多田, 小池, 大内: プレストレスコンクリート格納容器 (PCCV) のせん断耐力に関する試験, *大林組技術研究所報*, No. 20, (1980)
- 3) 小垣, 小林, 上田, 菅野, 吉崎, 武田, 山口, 他: プレストレストコンクリート円筒壁体のせん断耐力に関する研究(その1)~(その5), *日本建築学会大会梗概集*, (昭和54.9), pp. 1393~1402
- 4) 瀬戸川, 長島: 円筒型 RC 耐震壁に関する水平加力実験報告(その3), *日本建築学会大会梗概集*, (昭和54.9), pp. 1387~1388
- 5) 内田, 大森, 青柳, 渡辺, 森川, 高橋, 他: 原子力発電用鉄筋コンクリート造格納容器の事故時内圧・水



図一12 横筋のひずみ分布の比較¹⁷⁾

- 平力同時加力模型実験(その1)~(その4), *日本建築学会大会梗概集*, (昭和53.9), pp. 1827~1834
- 6) 梅村, 青山, 他: 鉄筋コンクリート耐震壁の耐力と復元力特性に関する実験的研究, *日本建築学会関東支部研究報告集*, (昭和51)
- 7) 岡村, 岡嶋, 福士, 三瓶, 鈴木: コンクリート製原子炉格納容器モデルの水平加力実験(その1)及び(その2), *日本建築学会大会梗概集*, (昭和54.9)
- 8) 中山: 内圧を受ける鉄筋コンクリート円筒の振り試験(II), *日本建築学会大会梗概集*, (昭和54.9)
- 9) 小垣, 加藤, 武田: プレストレスコンクリート格納容器の1/8模型および1/30模型による構造耐力実験, *プレストレストコンクリート*, Vol. 23, No. 1, (1981.1)
- 10) 松井, 大池, 瀬谷, 大松沢, 武田, 山口, 中山, 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7)及び(その8), *日本建築学会大会梗概集*, (昭和60.10), pp. 881~884
- 11) 斎藤, 武田, 伊藤, 小池, 大内: 大型冷却塔の弾塑性解析, *大林組技術研究所報*, No. 15, (1977)
- 12) 武田, 山口, 吉岡, 木村, 津田, 長沼: 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, *大林組技術研究所報*, No. 34, (1987), pp. 99~103
- 13) Darwin, D. and Pecknold, D. A.: Analysis of RC Shear Panels under Cyclic Loading, *J. of the Structural Division, ASCE*, Vol. 102, No. ST2, (1976)
- 14) Suiolan, M. and Schnobrich, W. C.: Finite Element Analysis of Reinforced Concrete, *J. of the Structural Division, ASCE*, Vol. 99, No. ST10, (1973)
- 15) Shirai, N. and Sato, T.: Inelastic Analysis of Reinforced Concrete Shear Wall Structures, *IABSE Colloquium*, (June, 1981), pp. 197~210
- 16) 岡田, 秋野, 伊藤: 原子炉建屋の復元力特性試験(全体模型)(その4), *日本建築学会大会梗概集*, (昭和61.8), pp. 1085~1086
- 17) 大池, 平野, 瀬谷, 大松沢, 内田, 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11)~(その14), *日本建築学会大会梗概集*, (昭和61.8), pp. 1041~1048