

[2011] 鉄筋コンクリート部材を対象とした確率有限要素解析

野崎幸男^{*1}・野口 博^{*2}

1. はじめに

従来、構造物の設計では、使用期間中に最悪の状態を引き起こすと思われる荷重によって生じる応力を基本に充分な余裕を持たせて構造物が倒壊しないような安全性と、長期間の使用に耐えられる耐久性を確保することを目標としている。この目標を達成するために従来の許容応力度設計法の欠点を克服すべく、限界状態設計法の開発が進められている。その限界状態設計法では、確率的な考え方に基づいて建物の構造に関する要素に不確定性を定義している。鉄筋コンクリート構造（以下RC造）の確率的な構造性能評価については、荷重と耐力の分布を推定するモデルにより、荒川式や学会指針式のせん断設計式における部材の破壊確率を検討した柴田・高橋等の研究[1]や、実構造物の調査から部材耐力のバラツキを検討した中楚の研究[2]などがある。しかし、有限要素解析（以下FEM）により材料定数などの確率を考慮したRC部材のせん断挙動を検討する研究はまだない。

そこで本研究では、従来の有限要素解析に材料定数のバラツキを考慮することにより、RC部材のせん断挙動に対してどのような影響を与えるかを解析し検討することを目的とする。

2. 解析概要

1. 対象試験体 本解析では、通常一般的な中低層鉄筋コンクリート造建物に用いた寸法の梁を想定し、シアスパン比をパラメータ ($M/Qd = 1.0, 1.5, 2.0, 3.0$) とした4体を対象に解析を行った。表-1に試験体の諸元を、図-1に試験体断面図を示す。試験体はせん断破壊させることを目的とするため、せん断補強筋比はRC規準の最小配筋である0.2%とし、主筋には降伏強度が通常よりもやや高めのものを用いた。なお試験体の詳細は参考文献[3]を参考に記述した。

2. 解析モデル 解析には張[4]により開発されたプログラムに材料定数のバラツキを考慮するサブルーチンを新たに導入したプログラムを用いた。コンクリート要素には要素内剛性を内部積分点で評価する8節点の平面応力要素を用いた。2軸応力の構成法則にはDarwinらの等価1軸ひずみに基づく直交異方性モデル[5]を用い、破壊条件はKupfer等の研究[6]に基づく。圧縮応力-ひずみ関係には、上昇域にはSaenz式を、下降域には修正Kent-Park式[7]を用いた。ひび割れは、正

*1 千葉大学大学院 工学研究科建築工学専攻 工修 (正会員)

*2 千葉大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

表-1 試験体諸元

コンクリート		
圧縮強度	210	kgf/cm ²
ヤング係数	2.1×10^5	kgf/cm ²
鉄筋		
主筋 径	3D22	
筋 ヤング係数	2.1×10^6	kgf/cm ²
降伏強度	5000	kgf/cm ²
せん断 筋 ヤング係数	0.2%	
せん 筋 ヤング係数	2.1×10^6	kgf/cm ²
断筋 降伏強度	2400	kgf/cm ²

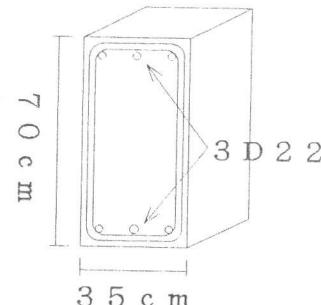


図-1 試験体断面図

交方向の剛性を零とした直交異方性体とする分布ひび割れモデルで表現し、一度発生したひび割れの方向は固定した。また、Al-Mahadiの提案に基づき、ひび割れ直交方向ひずみの増大に伴い減少するせん断剛性を骨材の噛み合い効果として評価した[4]。鉄筋要素としては主筋には応力-ひずみ関係をバイリニア型に近似した2節点線材要素を、せん断補強筋には応力-ひずみ関係をトリリニア型に近似した積層要素をそれぞれ用いた。鉄筋とコンクリートの付着は、鉄筋軸に平行、水平の両方向の2本のバネからなるボンドリンク要素により表現し、復元力特性としては、森田、角のモデル[8]による。テンションスティフニングは考慮しなかった。

3. 解析でのバラツキの考慮

実構造物ではその強度に影響する様々な要因が存在する。コンクリート打設時の打設方向や打設深さ、鉄筋の配筋精度、型枠精度が挙げられる[9]。実験時においては加力方法によるバラツキが考えられる。しかし、最も部材性能に影響を与えると思われるのが材料そのものの性質のバラツキである。そこで本解析ではこの材料特性に着目し、バラツキを考慮することにした。まずコンクリートのバラツキを考慮するため図-2に示すコンクリート強度のバラツキを用いた。本解析では梁の仮想試験体ではあるが現場水中養生型のバラツキ（強度平均100%、標準偏差4.56%）[10]を採用した。文献[11]を参考にコンクリート圧縮強度の変動に伴いコンクリート引張強度、ヤング係数も変動させている。鉄筋については図-3に示す断面積、降伏強度の分布図のバラツキを採用した[12]。解析では降伏強度が 5000kgf/cm^2 のフープ要素を用いているが、これに対応する資料がなかったため、同じD22での実降伏強度と規格降伏強度の関係が約1.23:1であることを参考に解析での鉄筋の平均値を 6151.3kgf/cm^2 とした。周長については鉄筋断面を真円とし断面積から逆算する方法を取った。ヤング係数に関しては一定値を用いた。

4. モンテカルロ法[13]

本解析で用いたモンテカルロ法とは、ある標本を母集団から無作為に抽出した上で構造解析を実行し出力を得、その結果を統計的にとらえる方法である。本解析ではコンクリート要素、鉄筋線材要素それぞれが個々の材料定数を持つとして解析を行った。各要素に材料のバラツキを考慮した材料定数を持たせるために、まず各材料のバラツキに則した標準正規乱数をボックスマラー法[13]によって20

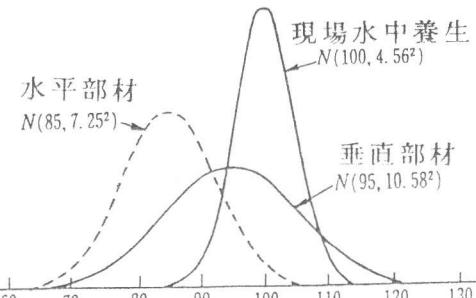


図-2 現場水中養生強度に対する強度比

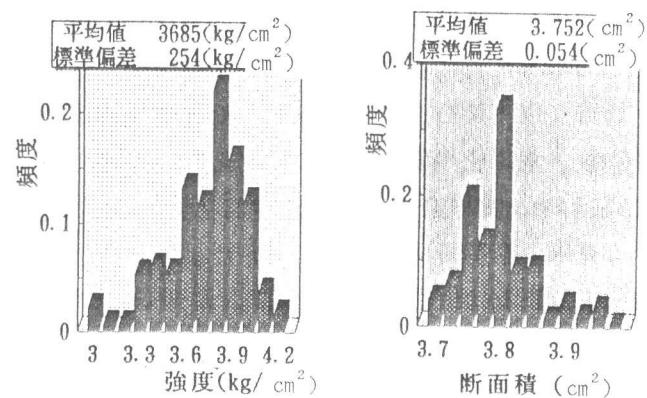


図-3 鉄筋の断面積、降伏強度分布

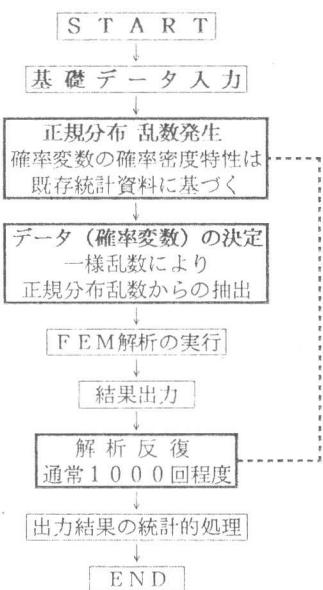


図-4 モンテカルロ法概念図

00個を発生させ、別の乱数により1個を抽出し材料定数として採用した。2000個を発生させる目的は設定した平均値、標準偏差の乱数群をほぼ安定して供給できることと、既往の研究[14]によった。モンテカルロ法の概念図を図-4に示す。本解析での試行数は解析時間の関係上1000回とした。

5. 確定値解析結果

材料定数を確定値として解析したせん断力-変位曲線を図-5に示す。モンテカルロ法では多数の試験体を解析するため、膨大な解析時間を必要とする。解析時間は要素節点数および節点相互関係に大きく依存するため、一般的に考えられるメッシュ分割の他に、解析時間の省略を目的として、節点数を減らしたメッシュ分割での解析も試みた。また本解析では点対称条件問題として、全体の1/2の解析とした。図-6に仮想試験体のメッシュ分割図を示す。その結果通常の分割と粗目の分割とではほぼ同じ結果が得られた。本研究ではせん断挙動の大まかな傾向を把握することを目的としているので、モンテカルロ法用のデータには粗目の分割図でも支障がないと判断しこの分割図を採用した。なお、計算にワークステーション（メモリー32MB）を使用した場合の解析時間を表-2に示す。

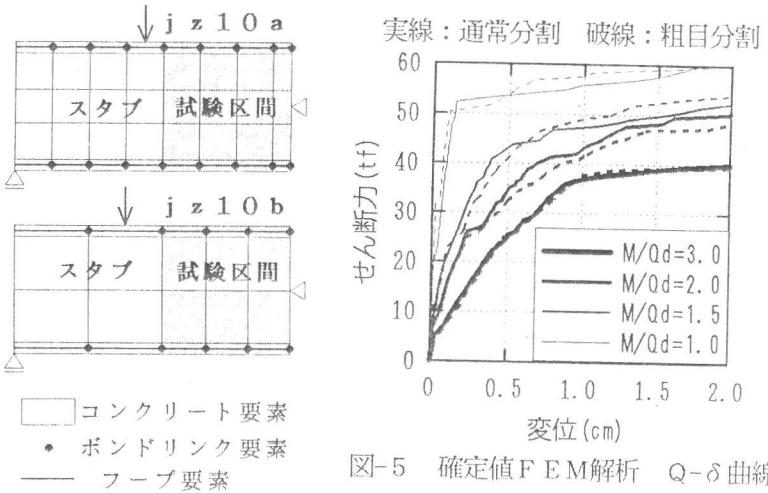


図-6 要素分割図

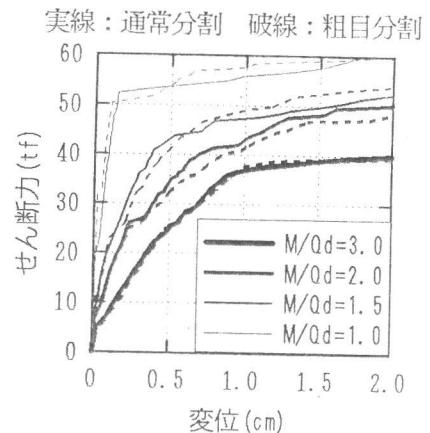


図-5 確定値FEM解析 Q-δ曲線

表-2 要素分割別解析時間

	総節点数	解析時間
通常分割	163	約5分
粗目分割	89	約1分

6. モンテカルロ法による解析結果

1. 材料定数のバラツキ

表-3にコンクリートおよび鉄筋の解析時の材料定数特性を示す。コンクリートでは標準偏差が目標値よりもやや大きくなつた。

2. 初期剛性

表-4に各試験体のモンテカルロ法および確定値解析の初期剛性を示す。シアスパン比にほぼ比例してバラツキが小さくなる結果を得た。

3. せん断力-変位関係

図-7にシアスパン比1.0, 1.5, 2.0, 3.0の梁試験体のせん断力-変位分布をそれぞれ示す。弾性範囲では前述のように試験体ごとに差はあるものの大きなバラツキにはなっていない。しかし塑性域に入ってからのバラツキは各試験体とも弾性域に比べかなり大きくなる。またシアスパン比の値にはほぼ比例して塑性域でのバ

表-3 解析時材料定数特性

	目標値		解析値	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
f _c	210.00 ¹⁾	4.56 ¹⁾	220.00 ¹⁾	12.96 ¹⁾
σ _y	6141.8 ¹⁾	254.0 ¹⁾	6153.1 ¹⁾	281.9 ¹⁾
a _t	3.275 ²⁾	0.054 ²⁾	3.302 ²⁾	0.031 ²⁾

*¹⁾ kgf/cm² *²⁾ cm² a_t:鉄筋断面積(1本分)

表-4 初期剛性一覧

M Q d	モンテカルロ法				初期剛性
	初期剛性平均	標準偏差	最大値	最小値	
1.0	1650.97	9.42	1679.31	1618.45	1679.30
1.5	842.19	4.66	857.08	825.84	856.24
2.0	539.42	2.41	546.55	530.55	543.18
3.0	127.12	0.86	129.87	124.63	126.86

*単位は総てtf/cm

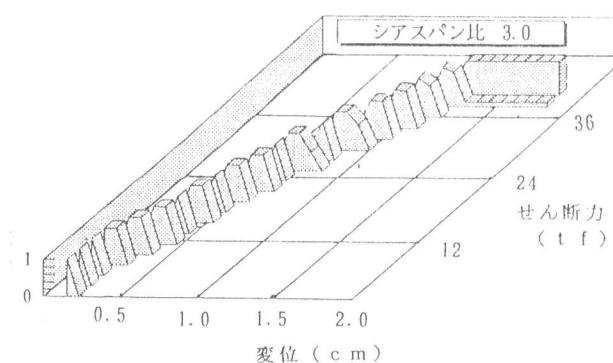
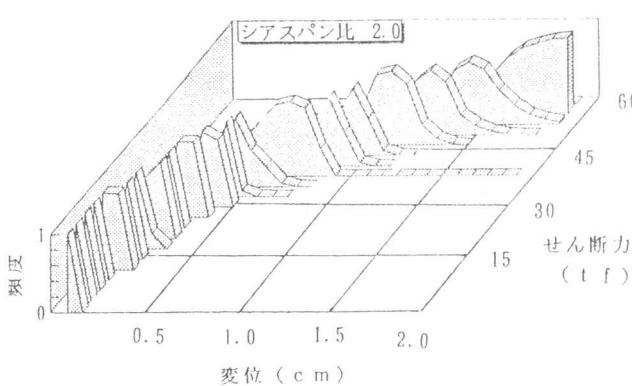
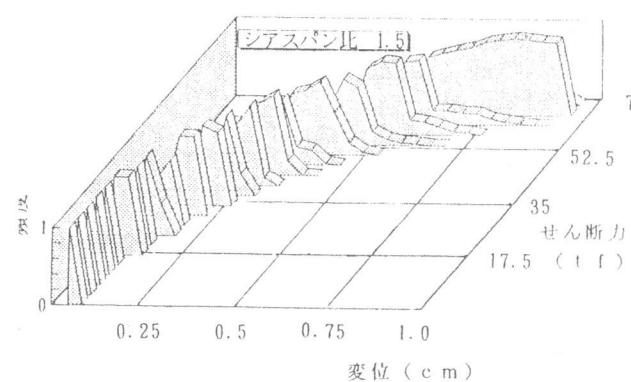
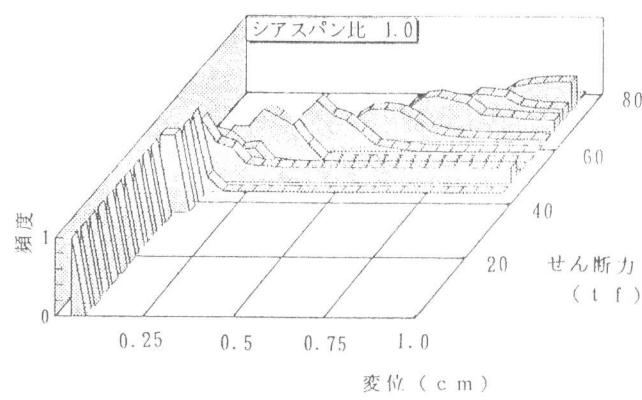


図-7 せん断力-変位分布図

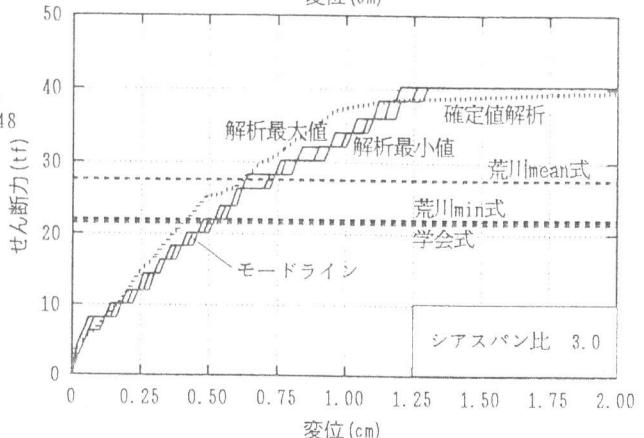
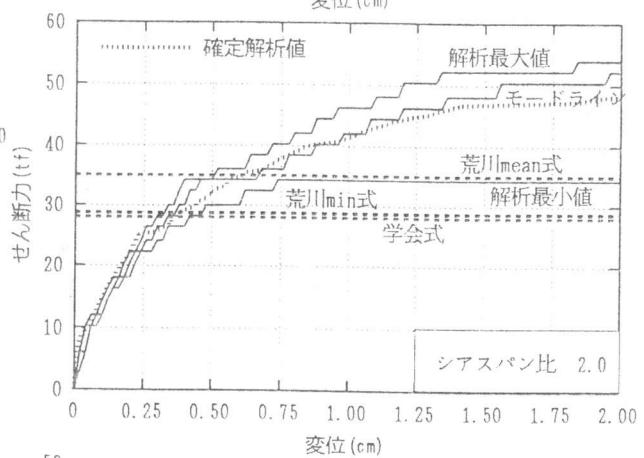
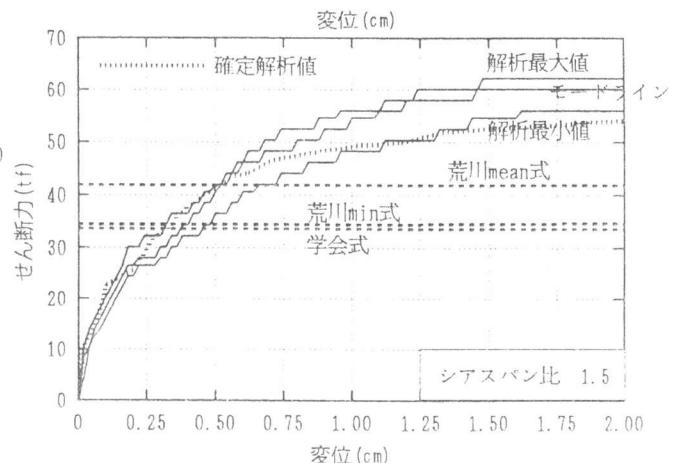
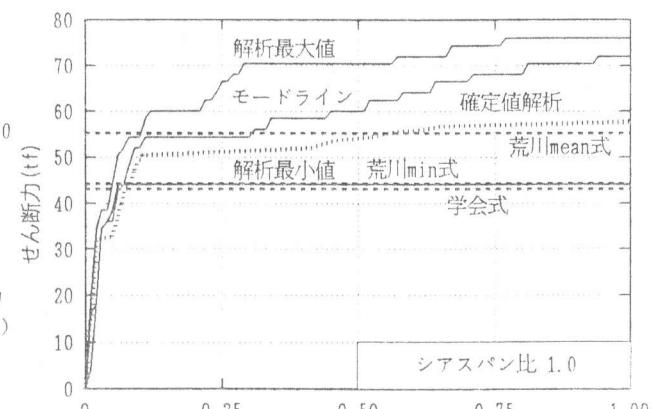


図-8 せん断力-変位曲線

ラツキが小さくなる結果を得た。これはせん断力を負担するコンクリートがバラツキを持つためであるが、特に典型的なせん断破壊型の設計であるシアスパン比1.0の試験体のバラツキは大きい結果を得た。コンクリートのバラツキを比較的直接的に反映している結果といえる。シアスパン比の最も大きい3.0の試験体では、引張鉄筋の応力が他の試験体よりも高くなっている、破壊モードも曲げ圧壊型を含んでいた。この試験体では引張鉄筋のバラツキを反映しやすいといえる。荒川の研究[15]ではシアスパン比が小さいほど耐力にバラツキがあるとなっているが、本解析でもその傾向が見られた。図-8にはモンテカルロ法での最小、最大、最大頻度せん断力-変位曲線を確定値解析結果とともに示す。確定値解析はモンテカルロ法での結果のほぼ中央を通っている。シアスパン比3.0の試験体では確定値解析はモンテカルロ法の範囲よりもやや外側で曲線を描いているが、これは解析の試行数がやや少ない回数であるからではないかと推測する。

7. 既往の研究[15]との比較

シアスパン比1.0の試験体で解析結果で耐力上昇が頭打ちになっている変位でのせん断力-頻度分布図をせん断力区間幅を図-7よりもやや細かくしたもの図-9に示す。図中の破線はそれぞれ荒川min式、荒川mean式を用いて求めた試験体のせん断耐力である。荒川の研究[15]によれば約5%の試験体が荒川min式のせん断耐力を下回るはずだが、シアスパン比1.0の試験体ではその耐力を下回った試験体が全体の約1%であった。また荒川mean式のせん断耐力で比較した場合、そのせん断耐力を下回る試行数は全体の4.0%に上った。図-8からもわかるように、他の試験体で荒川min式によるせん断耐力を下回った試行はなかった。また荒川mean式によるせん断耐力を下回ったものはシアスパン比2.0の試行でわずかに0.5%だけであり、シアスパン比1.5、3.0の試行では下回らなかった。荒川の研究と比較すると、本解析はややバラツキの小さい評価をしている。本解析では材料特性そのもののバラツキのみに着目した解析であるため、考慮すべきバラツキの項目が不充分であることが原因であると思われる。

次に荒川の研究[15]に習い横軸にシアスパン比、縦軸に次式で表す τ_u' を取った分布図を図-10に示す。

$$\tau_u' = \frac{\tau_u - 2.7\sqrt{P_w \sigma_{wy}}}{k_u \cdot k_p \cdot (180 + P_c)}$$

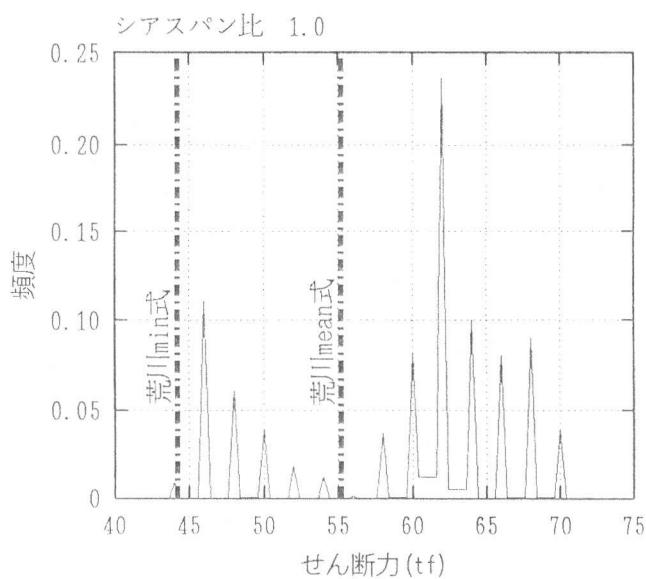


図-9 せん断力分布図

また高橋の研究[1]に用いられた同様のグラフを図-11に示す。図-11中の曲線は実験値をシアスパン比別に対数正規分布で近似した曲線である。本解析のシアスパン比別の分布は図-11と比較したときに、全体的に τ_u' を高めに評価している。この原因もバラツキの考慮する項目が不充分だっ

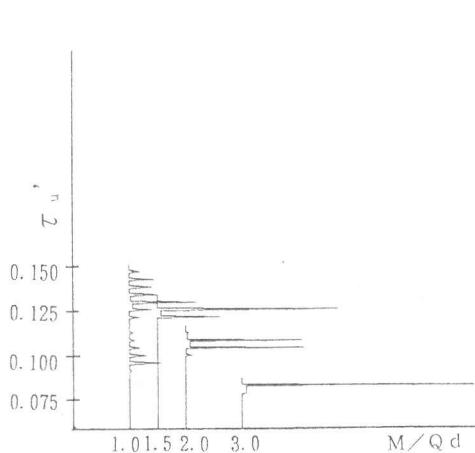


図-10 τ_u - シアスパン比関係
たためと思われる。

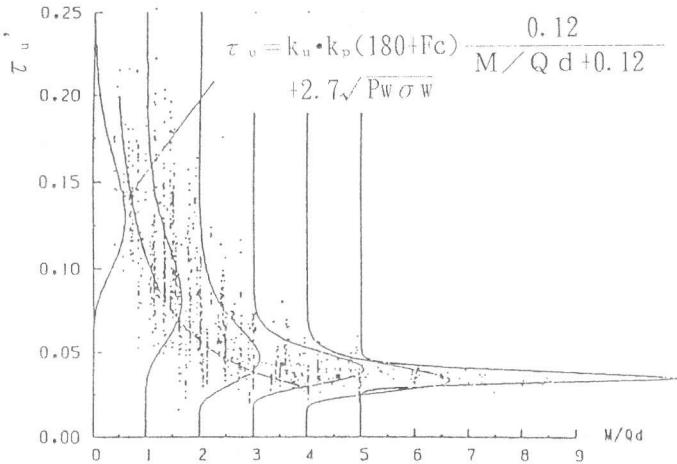


図-11 荒川による τ_u - シアスパン比関係

8.まとめ

本解析の結果を以下のようにまとめる。

- ・有限要素法を用いて解析する際、ある程度の節点数の削減は、解析結果に大きな影響は与えなかった。
- ・材料定数のバラツキを考慮した解析では塑性域でのせん断力-変位曲線のバラツキにシアスパン比が影響している。
- ・初期剛性についてもシアスパン比との関係が大きい。特にシアスパン比が小さいほどバラツキが大きくなる傾向が見られる。
- ・シアスパン比1.0の時に荒川min式のせん断耐力を下回る試験体の数は約1%であった。バラツキを考慮する項目が本解析では不充分であったと思われ、今後の検討課題である。

謝辞：本研究は、文部省科研費補助金（総合研究(A)：課題番号0430249、研究代表者 野口 博）による分担研究である。

【参考文献】

- [1]高橋 良江「信頼性理論に基づく鉄筋コンクリート構造部材のせん断設計法に関する研究」東北大学卒業論文 平成3年
- [2]中埜 良昭「信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の耐震安全性に関する研究」東京大学博士論文 1988年12月
- [3]佐藤 稔夫編著「建築構造設計」理工図書 昭和50年10月1日
- [4]張 愛暉「鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に関する非線形解析」千葉大学学位論文 1991年1月
- [5]Darwin, D. and Pecknold, D. A., "Inelastic Model for Cyclic Biaxial Loading of Reinforced Concrete," University of Illinois, UILU-ENG-74-2018. 1974
- [6]Kupfer, H. and Gerstle, K. "Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses," Journal of the Engineering, Vol. 99, No. cc4, August, 1973, pp. 852-866
- [7]Park, R. R., Priestley, M. J. N., and W. D. Gill, "Ductility of Square Confined Concrete Columns," Proceedings ASCE, Vol. 108, ST4, April 1982, pp. 929-950
- [8]森田, 角「繰り返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究」建築学会論報, 第229号, 1975.3
- [9]日本建築学会「構造体コンクリート強度に関する研究の動向と問題点」1987年11月5日
- [10]青山 博之編「鉄筋コンクリート建物の終局強度型耐震設計法」技報堂出版 1990年8月6日
- [11]日本建築学会「鉄筋コンクリート構造設計基準・同解説」丸善株式会社 1991年4月5日
- [12]青木 義次「鉄筋の強度と断面のはらつき」セメント・コンクリート No. 384, Feb. 1979
- [13]Mirza, S. A. "Application of Monte Carlo simulation to structural engineering problems," Proc. 2nd Int. Conf. on Comput. in Civ., Science Press
- [14]小出 英夫、尾坂 芳夫「曲げを受けるRC部材の各種安全係数の決定」コンクリート工学論文集 第4巻第2号 1993年7月
- [15]荒川 卓「鉄筋コンクリート梁の許容せん断耐力度とせん断補強について」コンクリートジャーナル Vol. 8, No. 7, July 1970
- [16]中桐 澄、久田 俊明「確率有限要素法入門」倍風館 昭和60年5月30日