

論文

[2006] マイクロプレーンモデルによるひび割れコンクリートの圧縮劣化特性の評価

正会員○白井伸明 (日本大学建築学科)

佐藤稔雄 (日本大学建築学科)

森泉和人 (日本大学大学院)

豊田将文 (東急建設)

1.はじめに

近年、ひび割れコンクリートの圧縮劣化特性を明らかにするため、面内力を受ける鉄筋コンクリート (以下、"RC"と略す) 平板に関する実験的研究が多数行われている。なかでも、山口、長沼の研究[1]は注目に値する。彼等はRC平板に関する実験結果を整理し、圧縮強度低減係数は引張ひずみのみの関数として表現できず、コンクリート強度、鉄筋比、縦横筋比の差、軸圧縮力など多くの因子の影響を受け、大きく変動することを示した。つまり、ひび割れを含むRC要素の挙動は極めて複雑であり、一般性のある構成則を定式化することは難しいことを示唆しているようにも思える。これは圧縮劣化挙動を支配するコンクリート内部の損傷進展過程のメカニズムが十分に理解されていないことによると考えられる。本研究では、面内力を受けるコンクリート及びRC平板に関して、マイクロプレーンモデル[2,3]に基づくFEM解析を行い、実験値と解析値の比較を行う。さらに、本研究で提案する損傷率に基づいて、ひび割れコンクリートの圧縮劣化特性の評価を試みる。

2. マイクロプレーンモデル

本研究では、Bazantらが提案したマイクロプレーンモデル[2,3]を適用する。コンクリートのように硬い骨材と骨材間の軟らかいセメント層より構成される非均質の複合材料では、コンクリート内部の応力は一様でなく、骨材とセメント層の界面に鋭い極値をもち、この骨材表面のセメント層にマイクロクラックが成長する (図-1参照)。このマイクロクラックが主として非弾性ひずみ成分に寄与し、コンクリートの変形特性を支配すると考えられる。マイクロプレーンモデルは骨材を剛球体と仮定し、この球体とセメントの接触面 ("マイクロプレーン"と呼ぶ) に作用する微視応力と微視ひずみの関係より、次の仮説に基づいてコンクリート要素の巨視的な構成則を導くものである。

<仮説> 任意のマイクロプレーン上の垂直微視ひずみ e_n (スカラー) は、同システムに対する巨視ひずみテンソル e_{ij} より式(1)で与えられ、また、 e_n に対応する垂直微視応力 S_n (スカラー) は、 e_n のみの関数として式(2)で与えられる。

$$e_n = n_i \cdot n_j \cdot e_{ij}, \quad e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon^a_{ij} \quad (1)$$

$$S_n = F(e_n) \quad (2)$$

ここに、 n_i, n_j ($i, j = x, y, z$) はマイクロプレーンに

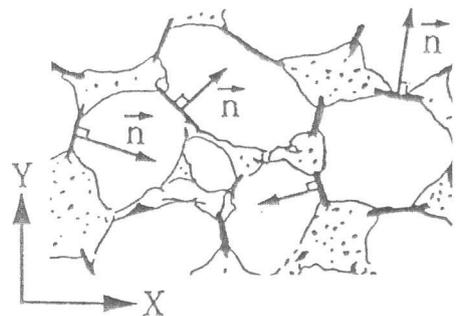


図-1 マイクロプレーンの概念図

対する単位法線 \vec{n} の方向余弦、 ε_{ij} は全巨視ひずみテンソル（例えば、有限要素のひずみテンソル）、 ε^a_{ij} は付加弾性ひずみテンソルである。結局、コンクリートの巨視的な構成則は、 $S_n - e_n$ 関係及び巨視応力(σ_{ij}) - 巨視ひずみ(ε_{ij})関係を用い、仮想仕事の原理を適用することにより導かれる[2,3]。

マイクロプレーンは球表面上に無限個存在しうが、数値計算上の単純さを考慮し、図-2に示すように、球に内接する正20面体を考え、この20面体の頂点及び辺上に計42個の積分点を設け、これらの積分点がマイクロプレーンを代表するものと仮定した。さらに、各マイクロプレーン上の $S_n - e_n$ 関係としては次式のように仮定した（図-3参照）。つまり、 S_n は引張負荷に対して式(3)、圧縮負荷及び引張負荷に対して式(4)で定義される。

$$S_n = E_n \cdot e_n \cdot \exp(-e_n/e_o) \quad (\text{MPa単位}) \quad (3)$$

$$S_n = -a + \beta \cdot \arctan \{ E_n(e_n - b) / \beta \} \quad (4)$$

ただし、 $E_n = 2E^c$ 、 $e_o = 0.23 \times 10^{-3}$ 、 $a = -(\sigma_{\infty} - \pi \cdot \beta / 2)$
 $b = \varepsilon^* - (\beta / E_n) \cdot \tan \{ (a + \sigma^*) / \beta \}$
 $\beta = \text{Min.} [0.334 \{1 + 1.38 \cdot \exp(-400 \varepsilon^*)\} \cdot \sigma, 2\sigma / \pi]$
 $\sigma = \text{Min.} [\{1.45 + 0.0089(f'_c - 18.8)\} \cdot f'_c, 0.59 \{1 + 2.06 \cdot \exp(-200 \varepsilon^*)\}]$

ここに、 f'_c はコンクリートの圧縮強度、 ε^* 及び σ^* は引張側除荷点の微視ひずみ及び応力である。

3. コンクリート及びRC平板の解析モデル

本研究では、筆者らが実験を行ったコンクリート及びRC平板（“日大シリーズ”と呼ぶ）[4]とCollinsらが実験を行ったRC平板（“トロント大シリーズと呼ぶ）[5]を解析の対象とする。表-1に両シリーズの試験体の加力形式、鉄筋比、材料特性を示す。日大シリーズは初期欠陥を有するコンクリート平板（PM-40-0）とRC平板（RM-40-1.2）の2体であり、前者は一軸圧縮、後者は引張・圧縮の下で載荷実験

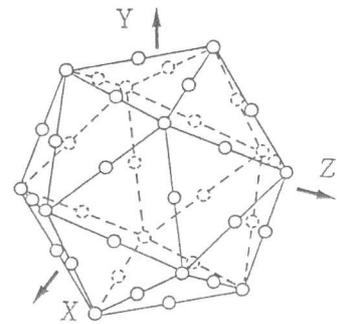


図-2 正20面体

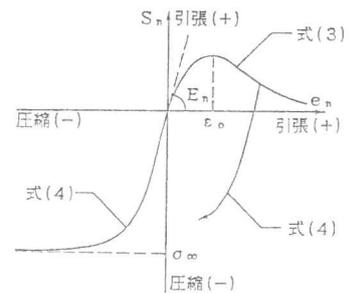


図-3 $S_n - e_n$ 関係

表-1 各試験体の加力形式・鉄筋比・材料特性

試験体	加力形式	コンクリート			鉄筋			
		圧縮強度 (kg/cm ²)	耐力時歪 (-)	ヤング係数 (kg/cm ²)	鉄筋比	降伏強度 (kg/cm ²)	ヤング係数 (kg/cm ²)	
日大シリーズ	PM-40-0	C	275	0.00189	3.89×10^5	—	—	
	RM-40-1.2	C+T	275	0.00189	3.89×10^5	0.01270	3231	1.84×10^6
トロント大シリーズ	PV 9	S	118	0.00280	1.16×10^5	0.01785	4640	2.10×10^6
	PV22	S	200	0.00200	2.74×10^5	0.01785 (ココ) 0.01524 (ケ)	4670 (ココ) 4283 (ケ)	2.10×10^6
	PV25	S+C	196	0.00180	2.99×10^5	0.01785	4752	2.10×10^6
	PV27	S	209	0.00190	3.21×10^5	0.01785	4507	2.10×10^6

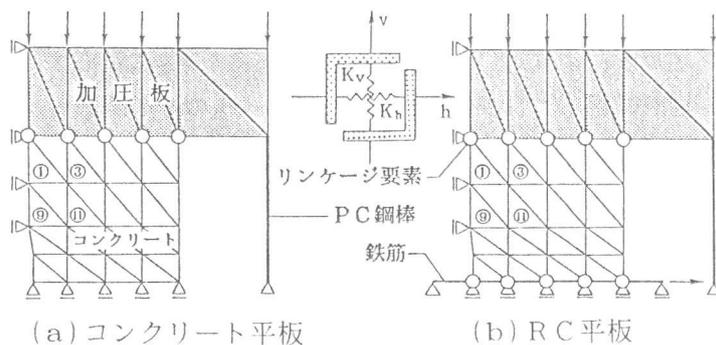


図-4 試験体の有限要素分割(日大シリーズ)

を行ったものである。一方、トロント大シリーズは荷重方法、コンクリート強度等を変動因子としたRC平板4体である。4体のうち、PV25のみがせん断と圧縮の組み合わせ応力の下で実験が行われ、その他の試験体は純せん断の下で実験が行われた。

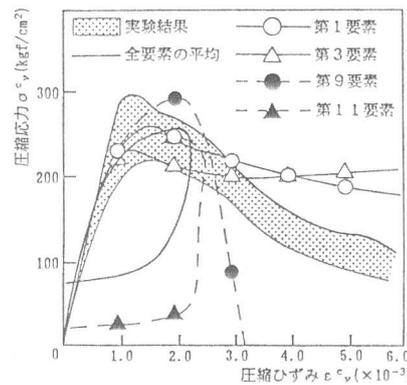
日大シリーズ試験体の有限要素分割を図-4に示す。コンクリート及び加圧板は三角形要素、鉄筋及びPC鋼棒はトラス要素でモデル化した。なお、実験では、加圧板と試験体面との間に減摩材としてテフロンシートを挿入した。そこで、加圧板と試験体面間の摩擦すべり及び鉄筋とコンクリート間の付着すべりはリンケージ要素でモデル化した。摩擦せん断応力(τ_f)—すべり(δ_s)関係及び付着応力(τ_b)—すべり(δ_s)関係は、それぞれ、図-5及び6に示すようにバイリニア型とした。なお、 τ_f - δ_s 関係の特性値は、文献[6]で行ったパラメトリックスタディーの結果を、 τ_b - δ_s 関係の特性値は文献[7]を参考にして仮定した。

次に、トロント大シリーズ試験体の有限要素分割を図-7に示す。コンクリートは三角形要素、鉄筋はトラス要素でモデル化した。単純化のため、本シリーズでは鉄筋とコンクリート間の付着すべりは無視した。なお、両シリーズとも、鉄筋の応力—ひずみ関係はバイリニア型を仮定した。

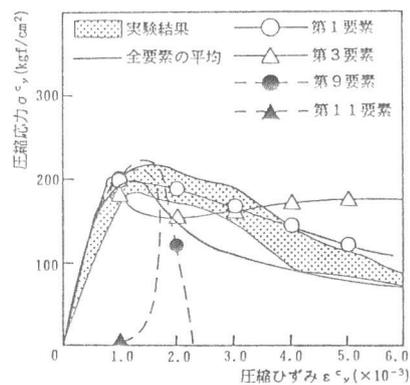
4. 実験値と計算値の比較

図-8(a)及び(b)は、それぞれ、日大シリーズのPM-40-0とRM-40-1.2の圧縮応力(σ_c)—圧縮ひずみ(ϵ_c)関係の実験値と計算値を比較したものである。両試験体とも、ピークに至るまでの実験値と計算値は比較的良好に一致している。

しかし、ピーク後の実験値と計算値には差異が認められる。特に、PM-40-0の計算値はスナップバック現象を示しており、実験値とは性状が異なる。また、ピーク後の計算値は要素によってその応答が大幅に異なっている。つまり、破壊の



(a) コンクリート平板



(b) RC平板

図-8 σ_c - ϵ_c 関係(日大シリーズ)

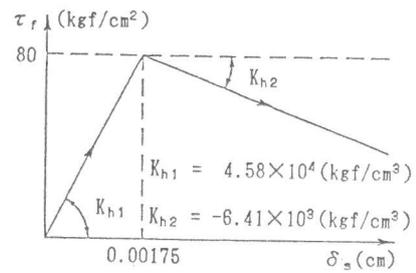


図-5 τ_f - δ_s 関係

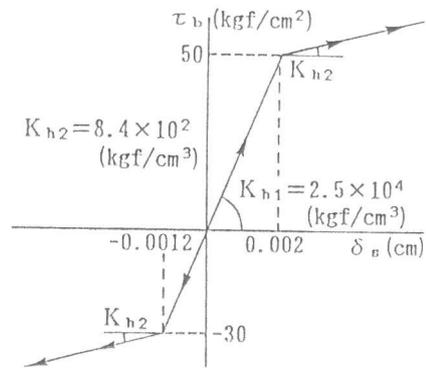


図-6 τ_b - δ_s 関係

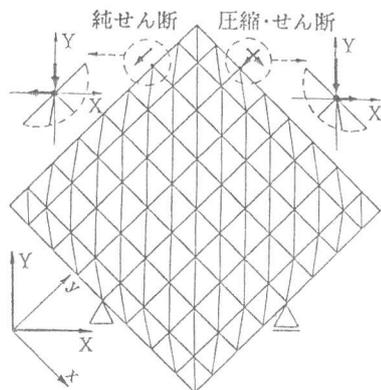


図-7 試験体の有限要素分割 (トロント大シリーズ)

進行は一様でなく、局所化する傾向にあるのが分かる。

次に、図-9はトロント大シリーズのせん断応力(τ_{xy})-せん断ひずみ(γ_{xy})応答の実験値と計算値を比較したものである。いずれの試験体とも、計算値は実験値を比較的良好的にシミュレートしており、特に、PV9とPV25の適合性はよい。しかし、PV22とPV27に関しては、ひび割れの進展過程においてやや差異が認められる。これは付着すべりを無視したことが一因と考えられる。図-10はPV25のコンクリートの平均主応力-主ひずみ関係の計算値を圧縮場理論により評価した実験値[5]と比較したものである。主圧縮応力-ひずみ関係の計算値は実験値とよく一致している。一方、主引張応力-ひずみ関係については、計算値の応力が実験値より早期に減少し、途中から圧縮に転じている。これは付着すべりを無視したことが一因と考えられる。

5. 圧縮劣化特性の評価

前節では、日大シリーズの試験体のうち、鉄筋を介して引張力を作用させたRC平板の方がコンクリート平板より圧縮耐力が低下することを解析的にも検証した。この原因について検討を試みる。

図-11(a)及び(b)は、それぞれ、日大シリーズ両試験体の1番目と9番目のコンクリート要素のX-Y平面上の各積分点の $S_n - e_n$ 関係を比較したものである。両要素とも、RC平板の方が引張微視ひずみが大きく成長している。一方、圧縮微視ひずみについては逆の傾向がみられる。このことはマイクロプレーン上の引張微視ひずみが、コンクリートの損傷に大きく関与してい

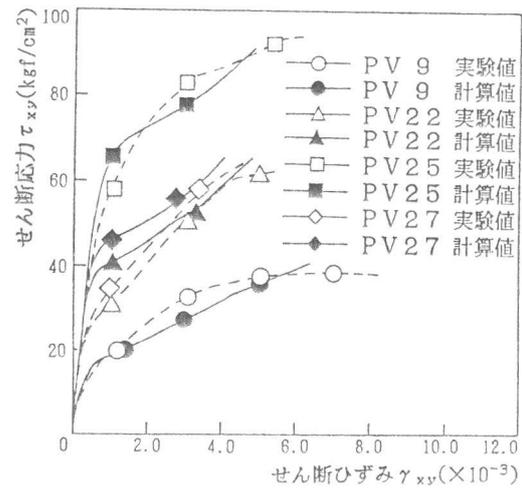


図-9 $\tau_{xy} - \gamma_{xy}$ 関係
(トロント大シリーズ)

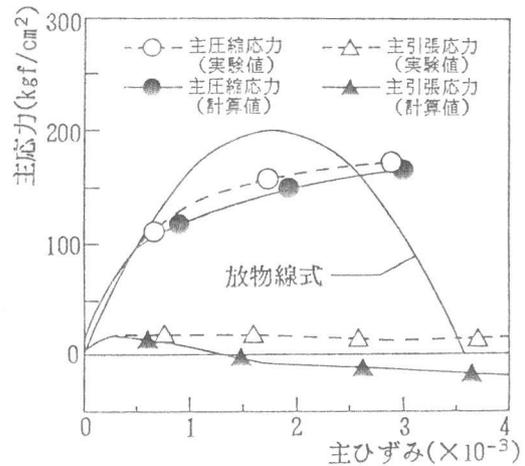


図-10 主応力-主ひずみ関係
(トロント大シリーズ)

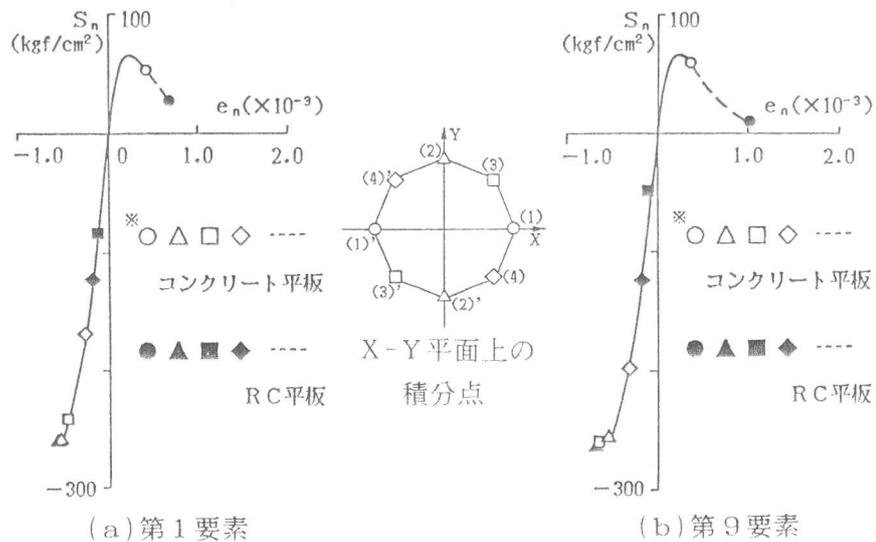


図-11 $S_n - e_n$ 関係

るものと解釈できる。本研究では、 $S_n - e_n$ 関係の引張側にのみ注目し、ひずみエネルギーに基づいて損傷量を以下のように定義する。

任意のマイクロプレーンに関するひずみエネルギー U_{pi} は、式(3)より次式となる。

$$U_{pi} = \int_0^{e_n} E_n \cdot e_n \cdot \exp(-e_n/e_o) de_n \\ = E_n \cdot e_o^2 \cdot \{1 - (-e_n/e_o + 1) / \exp(-e_n/e_o)\} \quad (5)$$

今、式(5)において、 $e_n \rightarrow \infty$ のときのひずみエネルギーを \bar{U}_{pi} ($= E_n \cdot e_o^2$) とし、これを”保有ひずみエネルギー”と呼ぶ。結局、 j 番目のコンクリート要素に対するひずみエネルギー U_{ej} 及び保有ひずみエネルギー \bar{U}_e は、1要素内の積分点の数を n とすれば、

$$U_{ej} = \sum_{i=1}^n U_{pi}, \quad \bar{U}_e = \sum_{i=1}^n \bar{U}_{pi} = n \cdot E_n \cdot e_o^2 \quad (6)$$

本研究では、損傷の割合を示す指標として、次式の損傷率 γ_d を定義する。

$$\gamma_d = \frac{\sum_{j=1}^m U_{ej}}{m \cdot \bar{U}_e} \quad (7)$$

ただし、 m は全要素数を示す。

図-12は日大シリーズの試験体に対するコンクリートの損傷率 γ_d を平均圧縮応力 σ_{cy} に対してプロットしたものである。また、図-13はトロント大シリーズの試験体に対する損傷率 γ_d を平均せん断応力 τ_{xy} に対してプロットしたものである。いずれの試験体とも、損傷率は圧縮応力あるいはせん断応力の上昇に伴って徐々に増大し、ピーク応力近傍で急激に増大する傾向がある。特に、強度及び剛性低下の顕著な試験体ほど損傷率が早期に成長している。

ひび割れコンクリートの圧縮劣化特性は荷重方法によって異なり、強度低下は引張・圧縮型よりせん断型荷重の方が大きいことが知られている[6]。コンクリートの挙動は、巨視的には、体積応答と偏差応答の和として表現される。例えば、引張・圧縮型の荷重方法の場合、ひび割れ発生後は体積応答が支配的と考えられる。一方、せん断型の荷重方法の場合、初期の段階においては体積応答と偏差応答が混在し、その後徐々に偏差応答が支配的になると考えられる。そこで、以下ではトロント大シリーズの試験体の偏差応答について検討し、ひび割れコンクリートのせん断剛性の低下について評価する。図-14はマイクロプレーンモデルによる解析結果より評価したコンクリートの平均八面体せん断応力(τ_{oct})—せん断ひずみ(γ_{oct})関係を示す。 $\tau_{oct} - \gamma_{oct}$ 曲線の傾きが接線せん断剛性に相当する。今、

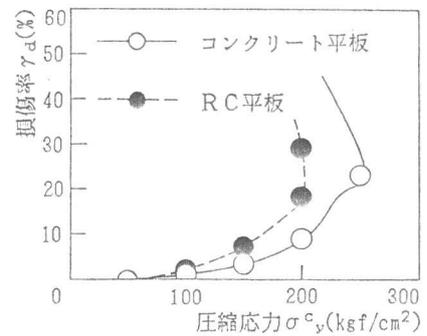


図-12 $\gamma_d - \sigma_{cy}$ 関係
(日大シリーズ)

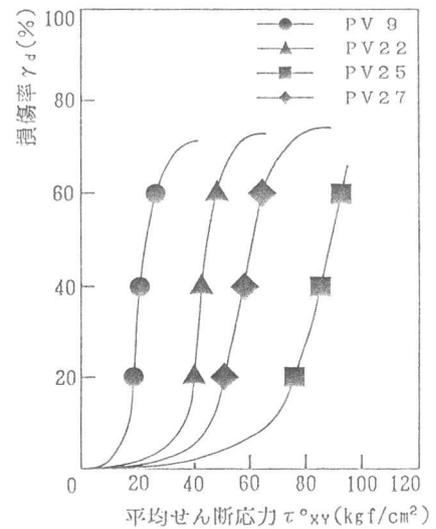


図-13 $\gamma_d - \tau_{xy}$ 関係
(トロント大シリーズ)

Gの初期せん断剛性 $G_0 (=E_0/2(1+\nu))$ に対する比 G/G_0 を”せん断剛性低下率”と呼ぶ。図-14より、 $\tau_{oct}-\gamma_{oct}$ 応答は試験体によって異なっており G/G_0 を γ_{oct} の関数として一義的に表現できないことが分かる。そこで、 G/G_0 を図-15に示すように、損傷率 γ_d に対してプロットする。せん断剛性低下率は試験体によらず、損傷率 γ_d の関数としてほぼ一義的に表現できることが判った。

6. 結び

面内力を受けるコンクリート及びRC平板に関して、マイクロプレーンモデルに基づくFEM解析の結果、次のことが判った。

- ①実験値と計算値の適合性は比較的良好であった。しかし、マイクロプレーンモデルについては S_n-e_n 関係の妥当性も含め、さらに検討する必要がある。
- ②マイクロプレーンモデルはコンクリート内部の損傷を評価するうえで有効である。
- ③本研究で提案した損傷率により、ひび割れコンクリートの圧縮劣化特性を説明できる。

【参考文献】

- 1) 山口恒雄・長沼一洋：面内せん断力を受ける鉄筋コンクリート平板の力学特性に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文報告集，第419号，PP.77-86，1991.1
- 2) Bazant, Z.P. and Oh, B.H.: Microplane Model for Progressive Fracture of Concrete and Rock, Proc. of the ASCE, Journal of Engineering Mechanics, Vol.111, No.EM4, April 1985
- 3) Gambarova, P.G. and Floris, C.: Microplane Model for Concrete Subject to Plane Stresses, Trans. of the 8th International Conference on SMIRT, vol.H, PP.87-94, 1985
- 4) 白井伸明ほか：ひび割れを含むコンクリート及び鉄筋コンクリート要素の応力-ひずみ関係(その1, 3)，日本建築学会大会学術講演梗概集, PP.369-370, 1987.10, PP.395-396, 1988.10
- 5) Vecchio, F. and Collins, M.P.: The Response of Reinforced Concrete to Inplane Shear and Normal Stresses, ISBN Pub. No.82-03, Univ. of Toronto, April 1982
- 6) 白井伸明ほか：面内力を受けるひび割れコンクリート及び鉄筋コンクリート平板の圧縮劣化特性に関する研究，JCI-C18, JCIコロキウム「RC構造のせん断設計法に関する解析的研究」論文集, PP.9-16, 1989.10
- 7) 森田司郎・角徹三：繰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，日本建築学会論文報告集，第229号，PP.15-24，1975.3

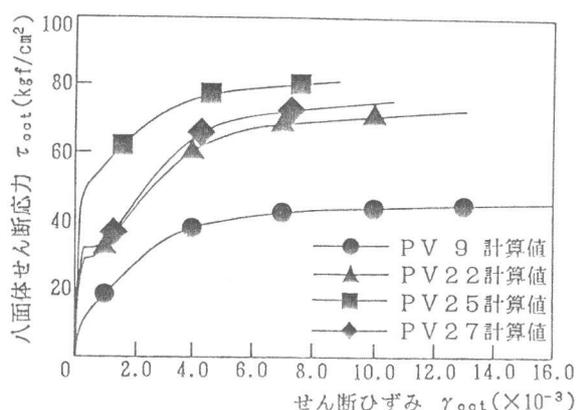


図-14 $\tau_{oct}-\gamma_{oct}$ 関係
(トロント大シリーズ)

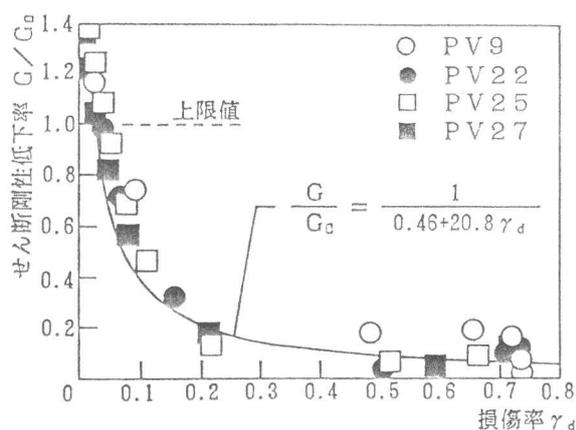


図-15 $G/G_0-\gamma_d$ 関係
(トロント大シリーズ)