

収縮応力がRC平板のせん断挙動に及ぼす影響

渡部 憲* 大岡 督尚*

要約: 鉄筋コンクリート (RC) 構造物の主材料であるコンクリートは、打設後の硬化過程において発熱や収縮を伴い、温度ひび割れや収縮ひび割れを生じる可能性がある。しかし、ひび割れの発生が問題とならない場合でも、RC 部材形成時の発熱や収縮の影響により内部応力が生じている。外力を受けた RC 部材の変形挙動を正確に把握しようとする場合、RC 部材形成時に発生する内部応力等の初期状態を適切に評価しておく必要があるものと思われる。

本研究では、収縮に起因するコンクリート内部の応力を詳細に検討する方法として Neville 等の提案する逐次積分法を取り上げ、逐次積分法を用いて RC 平板の初期状態を推定し、その結果を導入した RC 平板の FEM 解析を実施することにより、その妥当性について検討を行った。その結果、RC 部材形成時に発生する内部応力を適切に評価することにより、RC 平板のせん断実験で観測されるひび割れ発生時の引張応力がコンクリートの割裂試験から得られる引張強度より低くなることを概ね説明できること等の知見が得られた。

キーワード: 収縮, 内部応力, 逐次積分法, RC 平板, FEM

<p>目次:</p> <p>1. はじめに</p> <p>2. 逐次積分法</p> <p>3. RC 平板試験体の FEM 解析</p>	<p>4. 結果と考察</p> <p>5. まとめ</p>
---	-------------------------------

1. はじめに

鉄筋コンクリート (以下、RC と略記) 構造物の主材料であるコンクリートは、打設後の硬化過程において発熱や収縮を伴い、温度ひび割れや収縮ひび割れを生じる可能性があることは広く知られている。しかし、ひび割れの発生が問題とならない場合でも、RC 部材形成時の発熱や収縮の影響により内部応力が生じている。外力を受けた RC 部材の変形挙動を正確に把握しようとする場合、RC 部材形成時に発生する内部応力等の初期状態を適切に評価しておく必要があるものと思われる。

Collins 等によれば、RC 平板のせん断実験で観測されたひび割れ発生時の引張応力は、コンクリートの割裂試験から得られる引張強度より低く (図 1)¹⁾、コンクリートの圧縮強度(f_c)の関数として RC 梁の斜めひび割れ発生応力を推定する ACI 式²⁾ ($=0.33f_c^{1/2}$) を用いた場合、RC 平板のひび割れ発生時の引張応力と近似することを示している (図 2)¹⁾。割裂試験は直接引張試験ではないため、その影響も考えられる。例えば、CE B-FIP MODEL CODE 1990³⁾では、コンクリートの 1 軸引張強度を割裂引張強度の 0.9 倍としている。しかし、図 1 からわかるように割裂引張強度を 0.9 倍にしても RC 平板のせん断実験を実施した際のひび割れ発生応力の結果を説明することはできない。RC 部材の場合、内部の鉄筋がコンクリートの硬化過程に生じる収縮ひずみを拘束することによって生じる応力の影響も少なくないと思われる。

そのため本研究では、収縮に起因するコンクリート内部の応力を詳細に検討する方法として Neville 等の提案する逐次積分法⁴⁾を取り上げ、逐次積分法を用いて RC 平板の初期状態を推定し、その結果を導入した RC 平板の FEM 解析を実施することにより、その妥当性について検討を行った。

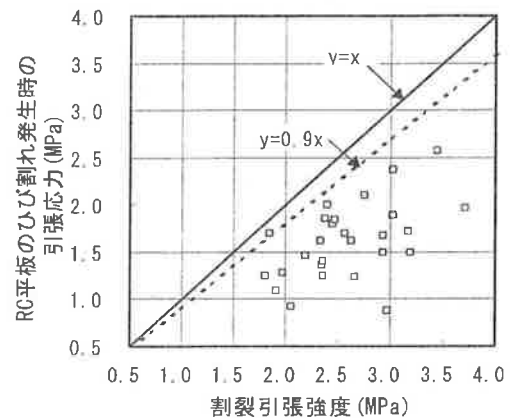


図 1 ひび割れ発生応力と割裂強度の関係¹⁾

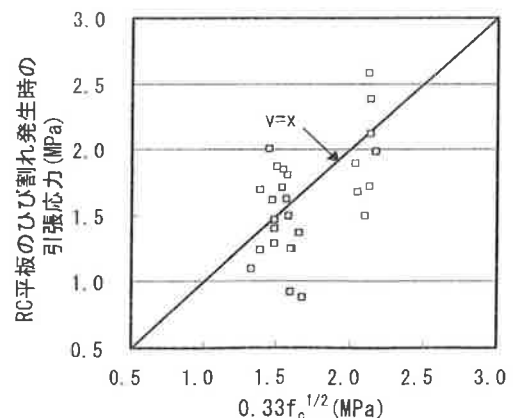


図 2 ひび割れ発生応力と ACI 式の関係¹⁾

2. 逐次積分法⁴⁾

2.1 一般式

図3に示すように、Neville等は、jステップにおける増分応力 $\Delta\sigma_j$ によるクリープひずみと弾性ひずみの和 $\Delta\varepsilon_j$ の関係から、コンクリートの材齢により変化するヤング係数やクリープ係数を考慮し、次式の逐次積分による応力解析法を提案している(ただし、 $i \geq j$)。

$$\sigma_{i+1/2} = \sigma_{i-1/2} + \frac{E_i}{1 + \phi_{ii}} \left\{ \sum_{j=1}^i \Delta\varepsilon_j - \sum_{j=1}^{i-1} (\sigma_{j+1/2} - \sigma_{j-1/2}) \frac{1}{E_j} (1 + \phi_{ij}) \right\} \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_{i+1/2}$ は*i+1/2*ステップの応力、 $\sigma_{i-1/2}$ は*i-1/2*ステップの応力、 E_i は*i*ステップのヤング係数、 ϕ_{ii} は*i*ステップで荷重された*i+1/2*ステップのクリープ係数、 $\Delta\varepsilon_j$ は*j-1/2*から*j+1/2*の増分ひずみであり、増分クリープひずみ $\Delta\varepsilon_j^{cr}$ と増分弾性ひずみ $\Delta\varepsilon_j^{el}$ の和である。また、 $\sigma_{j+1/2}$ は*j+1/2*ステップの応力、 $\sigma_{j-1/2}$ は*j-1/2*ステップの応力、 E_j は*j*ステップのヤング係数、 ϕ_{ij} は*j*ステップで荷重された*i+1/2*ステップのクリープ係数である。

2.2 収縮ひずみが拘束される場合

コンクリートの自由収縮ひずみが拘束体により拘束をされた場合、1軸モデルを考えると、拘束体とコンクリートの変形量が釣合うことから、次式が得られる。

$$\begin{aligned} -\varepsilon^{free} &= -\varepsilon^r + \varepsilon^{cr} + \varepsilon^{el} \\ &= -\varepsilon^r + \varepsilon \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 ε^{free} は自由収縮ひずみ(乾燥収縮ひずみ、温度ひずみ、自己収縮ひずみ)、 ε^r は拘束体ひずみ、 ε^{cr} はクリープひずみ、 ε^{el} は弾性ひずみ、 ε は ε^{cr} と ε^{el} の和である。

式(2)を式(1)に代入することにより、自由収縮ひずみが拘束体により拘束された場合の逐次積分法による応力は次式のように導かれる。

$$\sigma_{i+1/2} = \sigma_{i-1/2} + \frac{E_i}{1 + \phi_{ii}} \left\{ \varepsilon_{i+1/2}^r - \varepsilon_{i+1/2}^{free} - \sum_{j=1}^{i-1} (\sigma_{j+1/2} - \sigma_{j-1/2}) \frac{1}{E_j} (1 + \phi_{ij}) \right\} \quad (3)$$

ここに、 $\varepsilon_{i+1/2}^r$ は*i+1/2*ステップの拘束体ひずみ、 $\varepsilon_{i+1/2}^{free}$ は*i+1/2*ステップの自由収縮ひずみである。

3. RC平板試験体のFEM解析

3.1 検討の対象とした実験⁵⁾

検討の対象とした実験は、山口等が実施したRC平板試験体のせん断実験⁵⁾のうち3体である。せん断加力システムおよび試験体の詳細を図4および図5に示す。試験体は正方形であり、

平面寸法は1200×1200mm、厚さ200mmである。

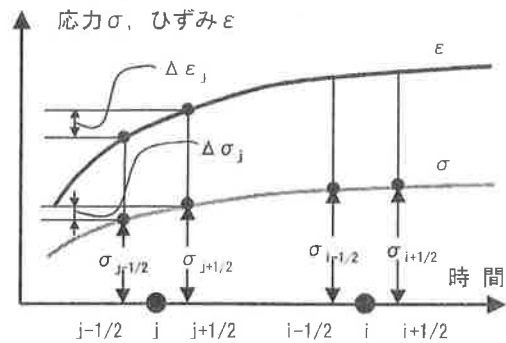


図3 逐次積分法

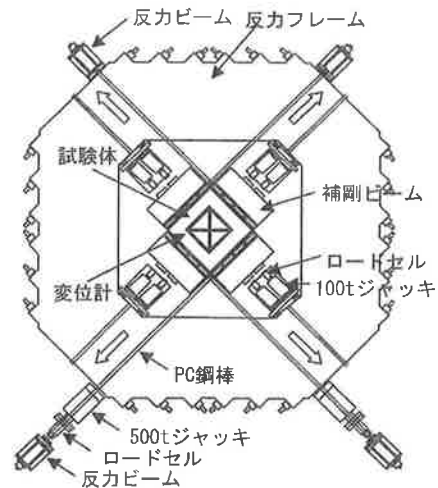


図4 せん断加力システム⁵⁾

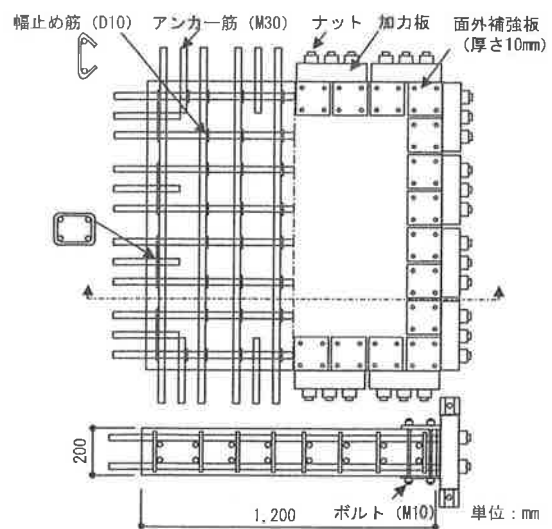


図5 試験体の詳細⁵⁾

コンクリートおよび鉄筋の強度試験結果をそれぞれ表1および表2に示す。縦・横筋の鉄筋比 P_s は、それぞれ PS-1 試験体に対して $P_{sx}=1.91\%$ 、 $P_{sy}=1.91\%$ 、PS-6 試験体に対して $P_{sx}=0.85\%$ 、 $P_{sy}=1.91\%$ および PS-8 試験体に対して $P_{sx}=0.85\%$ 、 $P_{sy}=3.38\%$ である。

3.2 逐次積分法の計算条件

内部鉄筋は拘束部材として機能するが、本手法では縦・横方向の鉄筋比の違いを考慮できないことから、応力解析では鉄筋比の大きい方向を検討の対象とする。また、対象とする RC 平板は2軸応力状態を仮定する必要があるが、単純に1軸方向の応力のみ考慮する。コンクリートの強度発現、収縮およびクリープモデルとして CEB-FIP MODEL CODE 1978⁶⁾を適用し、条件として養生時温度を 20°C、養生時湿度を 60%、乾燥開始材齢を 2 日、計算時間間隔を 1 日に設定した。

3.3 FEM 解析の概要

図6に RC 平板試験体の FEM メッシュ分割、荷重および境界条件を示す。コンクリートは4節点アイソパラメトリック要素とし平面応力状態を仮定した。鉄筋は埋込鉄筋要素とし、鉄筋とコンクリートは完全付着とした。なお、解析には汎用コード DIANA-7.2⁷⁾を用いた。

コンクリートは弾塑性体とし、圧縮側は降伏条件として Von Mises の基準を適用し、引張側はひび割れ発生条件としてテンションカットオフ基準を適用した。また、鉄筋の降伏条件として Von Mises の基準を適用した。

3.3.1 コンクリートの構成則

圧縮側の1軸応力-ひずみ関係として、上昇域は圧縮強度の1/3まで弾性とした2直線でモデル化した。圧縮強度以降の下降域は図7に示すように2直線でモデル化した⁸⁾。なお、圧縮破壊エネルギー(G_F^c)は式(4)により評価した。

$$G_F^c = 0.5(1 + \alpha_c \cdot \beta_c) f_c \cdot d_1 \quad (4)$$

ここに、 f_c は圧縮強度、 α_c は折曲げ点の f_c に関する係数、 d_1 は折曲げ点の塑性変形、 β_c は最終変形量に関する係数であり、ここでは、 $\alpha_c=0.128$ 、 $\beta_c=2.393$ 、 $d_1=0.848$ とした。

なお、塑性ひずみ (ϵ_{pc}) は、要素代表長さを $L_c = \sqrt{2A}$ (A : 要素面積) と仮定し、塑性変形 (δ_c) を L_c で除すことにより評価している。

引張側の1軸応力-ひずみ関係として、上昇域は引張強度まで線形弾性とした。ひび割れ発生以降の下降域は、鉄筋とコンクリート間の付着作用によるテンションスティフニング効果を考慮するため、式(5)のモデル⁹⁾を図8に示すように4直線で近似して使用した。

$$\sigma_t = f_t \cdot (\epsilon_m / \epsilon_t)^{0.4} \quad (5)$$

ここに、 σ_t は引張応力、 f_t は引張強度、 ϵ_m は引張強度時のひずみ、 ϵ_t は引張ひずみであり、第1、2および第3折曲げ点の ϵ_t は、それぞれ ϵ_{tu} の 3、9 および 18 倍とした。

ひび割れコンクリートのせん断剛性低下率(β)は式(6)により定義した。

$$\beta = G_{cr} / G_0 = 1 / (1 + \alpha \cdot \epsilon_{cr}) \quad (6)$$

ここに、 G_{cr} はひび割れ発生後のせん断剛性、 G_0 はひび割れ発生前のせん断剛性、 α は定数(=4447)、 ϵ_{cr} はクラックひずみである。

表1 コンクリートの強度試験結果

ヤング係数 E_c (GPa)	圧縮強度 f_c (MPa)	割裂引張強度 (MPa)	ポアソン比 ν
25.5	31.2	2.88	0.17

表2 鉄筋の強度試験結果

試験体	ヤング係数 (GPa)		鉄筋比 (%)		降伏強度 (MPa)	
	E_{sx}	E_{sy}	P_{sx}	P_{sy}	σ_{sx}	σ_{sy}
PS-1	198	198	1.91	1.91	428	428
PS-6	183	198	0.85	1.91	364	428
PS-8	183	196	0.85	3.38	364	423

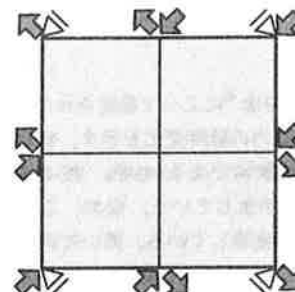


図6 試験体のモデル化

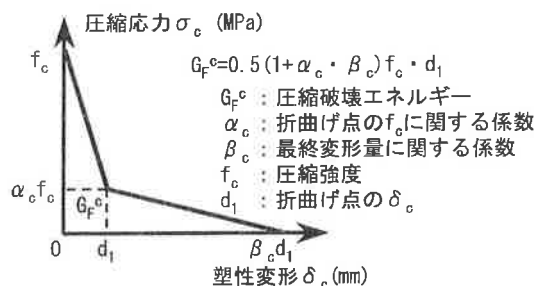


図7 圧縮軟化挙動

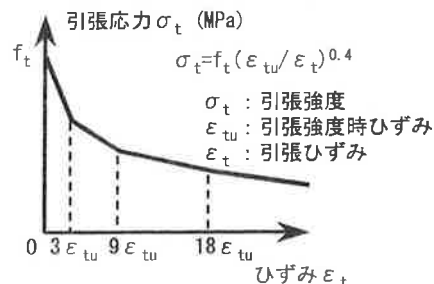


図8 テンションスティフニング

3.3.2 鉄筋

鉄筋の応力-ひずみ関係は bi-linear モデルとし、降伏後の剛性はヤング係数の 1/100 とした。

3.3.3 解析要因

解析要因の一覧を表 3 に示す。解析では、パラメータとして引張強度を選び、引張強度に割裂強度を用いた解析を Case-1、ACI 式²⁾による推定値を用いた解析を Case-2 とした。また、引張強度に CEB 式³⁾ ($=1.4(f_c/10)^{2/3}$) を使用し、逐次積分法により推定された初期応力を FEM 解析に導入した場合を Case-3 とした。さらに、ACI 式による引張強度を用い、図 9 に示すようなひび割れコンクリートの圧縮劣化を考慮した場合を Case-4 として検討した。なお、圧縮強度低減係数(λ)の計算は長沼の式¹⁰⁾を使用し、全試験体に対して λ を 0.60 に設定した。解析は、加力位置に荷重を漸増的に与えて行った。Case-3 では所定の内部応力を導入した後、荷重を作用させた。非線形反復解析法としては Newton-Raphson 法を採用し、不釣合力は当該ステップで解放した。

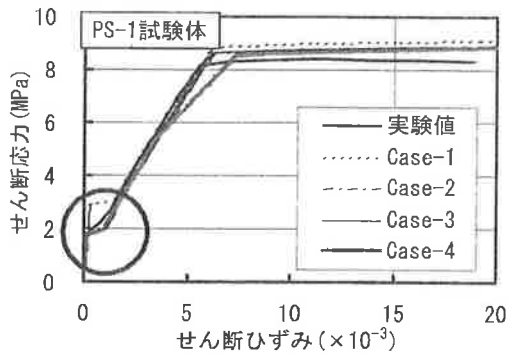
4. 結果と考察

4.1 内部応力

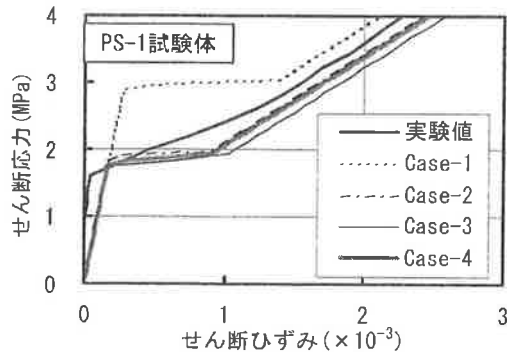
図 10 に、逐次積分法⁴⁾によって推定された RC 平板試験体形成時に生じる内部応力の経時変化を示す。材齢 28 日において、PS-1 および PS-6 試験体では 0.34MPa、PS-8 試験体では 0.57MPa の内部引張応力が生じている。なお、これらの内部応力予測結果を Case-3 で使用している。用いた内部応力予測結果の妥当性については、一例として文献[11]等が挙げられるが、今後、実験により確認しておく必要がある。

4.2 せん断応力-せん断ひずみ関係

図 11~13 は実験と FEM 解析のせん断応力-せん断ひずみ関係を比較したものである。なお、図 (b) はひび割れ発生時近傍の結果 (図 (a) 中の○囲い部分) を拡大表示したものである。Case-1~3 に注目すると、すべての試験体において、Case-1 はひび割れ発生応力を過大評価している。一方、Case-2 および Case-3 は実験結果を比較的良好に再現している。



(a) 全体



(b) ひび割れ発生時拡大

図 11 PS-1 試験体のせん断応力-せん断ひずみ関係

このことから、RC 部材形成時に発生する内部応力を適切に評価することにより、RC 平板のせん断実験で観測される、ひび割れ発生応力がコンクリートの割裂試験から得られる引張強度より低くなる現象を概ね説明できる。

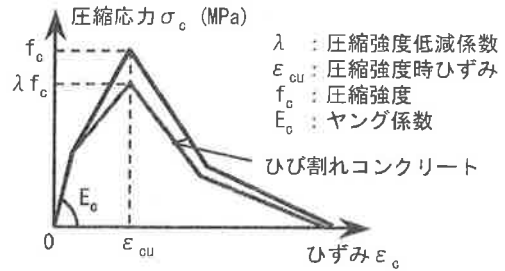


図 9 ひび割れコンクリートの圧縮劣化

表 3 解析要因一覧

解析ケース	解析対象試験体	引張強度	初期応力の考慮	圧縮劣化の考慮
Case-1	PS-1	割裂引張強度	×	×
Case-2	PS-6	ACI式	×	×
Case-3	および	CEB式	○	×
Case-4	PS-8	ACI式	×	○

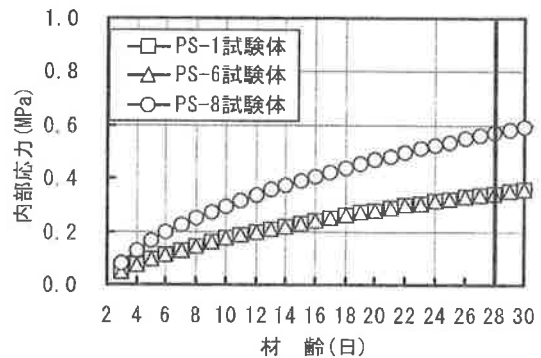


図 10 内部応力の経時変化

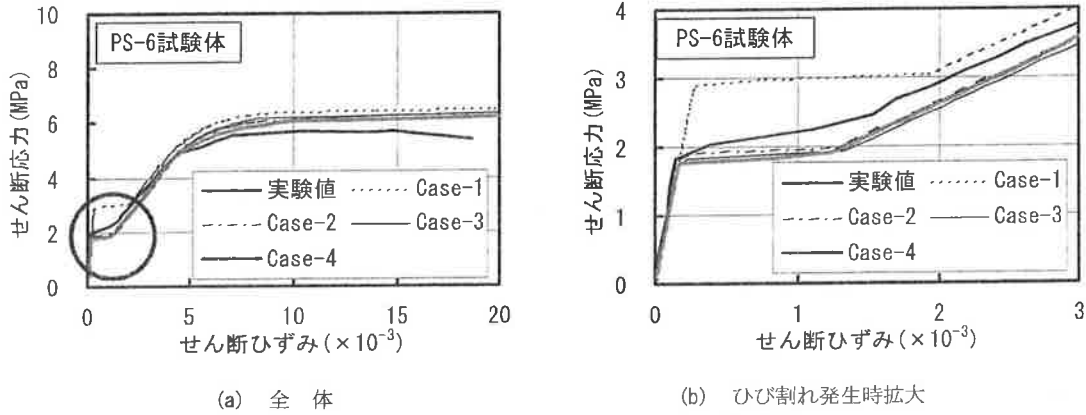


図 12 PS-6 試験体のせん断応力-せん断ひずみ関係

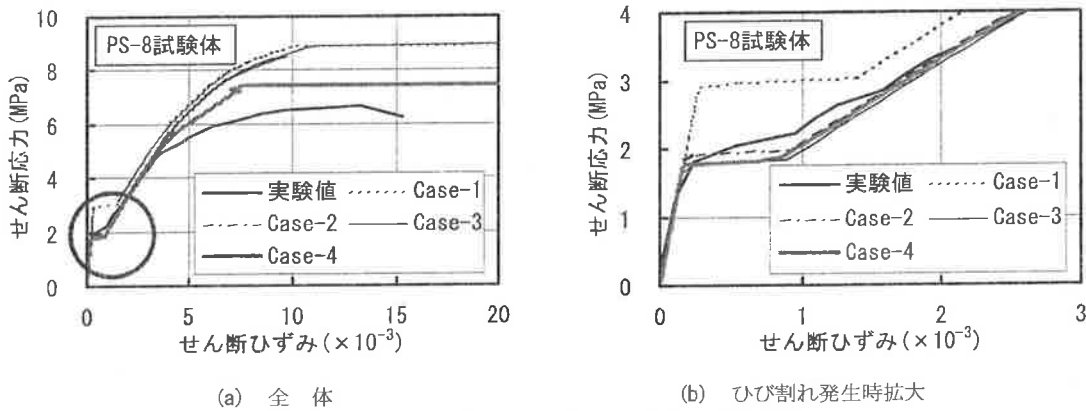


図 13 PS-8 試験体のせん断応力-せん断ひずみ関係

Case-1~3 について、せん断応力-せん断ひずみ関係に関する解析結果は、実験結果と比較して縦横筋比の差が大きくなるにつれ、また、せん断ひずみが増大するにつれて同一ひずみレベルにおけるせん断応力を過大評価していることがわかる。一方、Case-4 のようにひび割れコンクリートの圧縮劣化を考慮することにより、このような傾向がある程度改善される。

なお、本解析の範囲において、ひび割れ発生応力の相違が RC 平板せん断強度解析結果に及ぼす影響は小さいことがわかる。

4.3 引張強度

山口等の実験結果⁹⁾に加え、角¹²⁾および大森等¹³⁾が実施した RC 平板のせん断実験結果を対象として、ひび割れ発生応力が一致するようにコンクリートの引張強度を変化させる FEM 逆解析を行った。図 14 は引張強度算定式による推定値と FEM 逆解析で得られた引張強度を比較したものである。図によれば、ACI 式²⁾による引張強度推定値は、強度レベルに係らず FEM 逆解析による引張強度推定値に近似している。この結果から、ACI 式²⁾を用いることでひび割れ発生応力を比較的良好に予測できることが確認できた。

5. まとめ

本研究では、収縮に起因するコンクリート内部の応力を詳

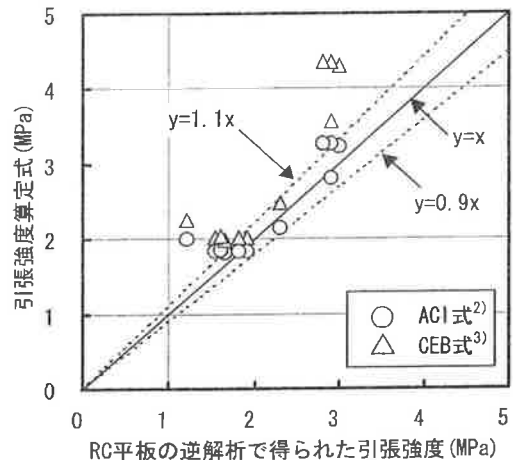


図 14 引張強度算定式による推定値と FEM 逆解析で得られた引張強度の関係

細に検討する方法として Neville 等の提案する逐次積分法を取り上げ、逐次積分法を用いて RC 平板の初期状態を推定し、その結果を導入した RC 平板の FEM 解析を実施することにより、その妥当性について検討を行った。

本研究で得られた知見を、以下にまとめる。

- (1) RC 部材形成時に発生する内部応力を適切に評価することにより、RC 平板のせん断実験で観測されるひび割れ発生応力が、コンクリートの割裂試験から得られる引張強度より低くなる現象を概ね説明できる。
- (2) 本解析の範囲において、ひび割れ発生応力の相違が RC 平

板せん断強度解析結果に及ぼす影響は小さい。

- (3) ひび割れ発生応力が一致するようにコンクリートの引張強度を変化させる FEM 逆解析から、RC 平板のせん断実験で観測されるひび割れ発生応力は、ACI 式を用いることにより比較的良好に予測できることが確認できた。

謝 辞

FEM 解析に際し有益なるご助言を頂いた、日本大学 理工学部 建築学科の白井伸明教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) Collins, M. P., Bhide, S. B.: Reinforced Concrete Elements in Shear and Tension, University of Toronto Department of Civil Engineering, 147pp., Jan. 1987
- 2) ACI committee 318: Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318M-83), American Concrete Institute, Detroit, 1983
- 3) CEB: CEB-FIP MODEL CODE 1990 DESIGN CODE, Tomas Telford Service Ltd., 1993
- 4) A. M. Neville, W. H. Dilger, J. J. Brooks: Creep of plain and structural concrete, Construction Press, pp. 246-263, 1983
- 5) 山口恒夫, 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的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
- 6) CEB: CEB-FIP MODEL CODE 1978 DESIGN CODE, Tomas Telford Service Ltd., 1978
- 7) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics: DIANA Finite Element Analysis User's Manual, TNO Building and Construction Research., 1999
- 8) 渡部憲, 白井伸明, 他 2 名: 各種コンクリートの圧縮軟化挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 22, No. 2, pp. 493-498, 2000
- 9) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, pp. 36-37, 1991
- 10) 長沼一洋: 平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル 鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究 (その 1), 日本建築学会構造系論文集, 第421号, pp. 39-105, 1991.3
- 11) 自己収縮研究委員会: 自己収縮研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 218pp., 1996.11
- 12) 角一行: 面内せん断力を受ける鉄筋コンクリート平板の構成則に関する基礎的研究, 機関組特定研究報告, 第14号, 1993.12
- 13) 大森信次, 高橋敏夫, 他 3 名: 繰返し面内せん断力を受ける鉄筋コンクリート平板の弾塑性挙動に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第403号, pp. 105-117, 1989.9

EFFECT OF INITIAL STRESS IN CONCRETE UNDER DRY CONDITION ON SHEAR BEHAVIORS OF REINFORCED CONCRETE PANELS SUBJECTED TO IN-PLANE SHEAR STRESSES

K. Watanabe and T. Oh-oka

It is well known that thermal or shrinkage crack may occur in reinforced concrete structures, because heat or shrinkage is generated in concrete during the hardening process after casting. There is initial stress in concrete due to the dry shrinkage or temperature rise even if visible crack is not observed in reinforced concrete structures. For improving a reliability of nonlinear analysis of reinforced concrete structures, it is needed to estimate an effect of the initial stress in concrete on overall structural behaviors. Objective of the present study is to investigate the effect of the initial stress caused by the shrinkage of concrete on shear behaviors of the reinforced concrete panels.

The following conclusions were obtained through this investigation:

- 1) The proposed finite element procedure can explain the fact that the tensile stress at diagonal cracking observed in the test is smaller than the splitting tensile strength of concrete.
- 2) The analyses indicated that the influence of the initial stresses on the cracking strengths of the reinforced concrete panels is significant, but the capacities of the reinforced concrete panels are little affected by the initial stresses caused by the shrinkage of concrete in the reinforced concrete panels.