

論文 面内複合応力を受ける RC 平板のせん断剛性についての 解析的研究

山本善彦^{*1}・栗原和夫^{*2}・永野裕康^{*3}

要旨：面内せん断応力と垂直応力(引張, 圧縮)とを組合せた複合応力を受ける縦横等量配筋の鉄筋コンクリート(RC)平板において, ひび割れたコンクリートのせん断剛性の違いがせん断耐力に及ぼす影響について, せん断剛性をパラメータとした要素解析により検討した。さらに, 既往の複合応力載荷の RC 平板実験結果との比較により, 本検討に用いた解析結果の妥当性を確かめた。

キーワード：面内複合応力, RC 平板, ひび割れたコンクリート, せん断剛性, 構成則

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)耐震壁などの弾塑性解析には, 分布ひび割れモデルを用いた有限要素法(FEM)が有効な手段と考えられる。この FEM に組み込むためのひび割れたコンクリートの構成則については, RC 平板実験などの結果に基づく多くのモデルが既に提案されているが^{1), 2), 3)}, これらの構成則をより精度良く適用性のあるものにするには, ひび割れたコンクリートの弾塑性挙動の残された未解明部分についての実験的・解析的な検討を十分に行い, 解明することが必要である。

一般に, FEMを用いて RCの構成則を検討する場合, FEMでは部材あるいは構造物を解析の対象にしているため, 構成則の違いが解析結果に明確に現われない場合が多々ある。したがって, ひび割れたコンクリートの構成則(引張剛性, 圧縮剛性, せん断剛性)を解析的に検討するには, これらの違いが構造特性に敏感に現れる RC 平板の要素解析が有効と考えられる。

著者らは, RC 平板のせん断剛性モデルについての検討を分布ひび割れモデルを用いた要素解析により行ってきた^{4), 5)}。せん断剛性モデルの違いが構造特性に影響を及ぼす場合としては,

縦横不等量配筋(不等鉄筋比), せん断応力と二軸の垂直応力を組合せた複合応力載荷のうち垂直応力の大きさが異なる不等応力載荷(不等応力比), 正負交番の繰返し応力載荷, および解析時におけるひび割れ方向の取扱い方の違い, つまり固定ひび割れモデル(固定モデル)と回転ひび割れモデル(回転モデル)の違いなどが挙げられる。

前報⁵⁾では, 不等鉄筋比の場合を対象にした純せん断応力下の RC 平板の要素解析を分布ひび割れモデルを用いて行い, 先ず, 回転モデルと固定モデルの違いがせん断耐力に及ぼす影響について検討した。次に, 固定モデルにおけるせん断剛性の違いがせん断耐力に及ぼす影響を検討すると共に, せん断すべりとコンクリートひび割れ界面の骨材の噛み合い, 鉄筋のダボ作用との関係について検討した。

本報では, 固定モデルを用いて不等応力比の場合を対象に, せん断剛性をパラメータにしてひび割れたコンクリートのせん断剛性の違いがせん断耐力に及ぼす影響を検討する。さらに, 既往の複合応力載荷の RC 平板実験結果との比較により, 本検討に用いた解析結果の妥当性を確かめる。

*1 九州テクノロジー(株)鹿屋支社設計二課 工修(正会員)

*2 熊本工業大学助教授 工学部構造工学科 工博(正会員)

*3 熊本工業大学教授 工学部構造工学科 工博(正会員)

2. 解析

2.1 解析方法

RC 平板の要素解析におけるひび割れ取扱いは、離散ひび割れ(discrete crack)と分布ひび割れ(smeared crack)があり、本解析ではコンクリート平板要素内に鉄筋を分布させての力学的性状をひび割れを含んだ平均的な挙動として捉えた分布ひび割れモデルを用いた。

RC 平板要素の構成式は、「ひずみの適合条件」、「力の釣合い条件」および「鉄筋およびコンクリートの応力-ひずみ関係」より3元の非線形連立方程式として表される。なお、ひび割れたコンクリートの応力-ひずみ関係としては、Collinsらの提案した修正圧縮場理論¹⁾の圧縮剛性、文献4)で提案した引張剛性、式(1)に示すせん断剛性を各々採用した。解析モデルの詳細は文献4)を参照されたい。

解析方法としては、RC 平板要素に作用する応力を既知量としてひずみを求める応力増分法を用い、作用させる複合応力は図-1に示すように作用せん断応力 V に対する X 軸、 Y 軸方向の作用垂直応力 f_{nx} , f_{ny} の比を応力比 α_x , α_y と定義してこれらの比で与えた。さらに、応力比 α_x と α_y の差を「応力比差 $\Delta\alpha$ 」、 α_x と α_y の平均を「平均応力比 α_{av} 」と定義し、応力比は垂直応力が引張の場合「+」、圧縮の場合を「-」とし、 $\alpha_x \leq \alpha_y$ なる条件で解析した。

2.2 せん断剛性

本解析に用いたせん断剛性には、分布ひび割れモデルに適用しやすく、取扱いが容易な青柳・山田モデル²⁾を用いた式(1)のような直列バネモデルを採用した。式中の η は、図-2に示すようにせん断剛性の大きさを変えるための係数である。

$$G_c = 1 / (1 / G_0 + 1 / G_1 \cdot \eta) \quad (1)$$

ここで、

G_0 : ひび割れ前コンクリートのせん断剛性

G_1 : ひび割れたコンクリートのせん断剛性

$G_1 = 3.6 / \varepsilon_t$ (青柳・山田モデル)

ε_t : ひび割れと直角方向の引張ひずみ

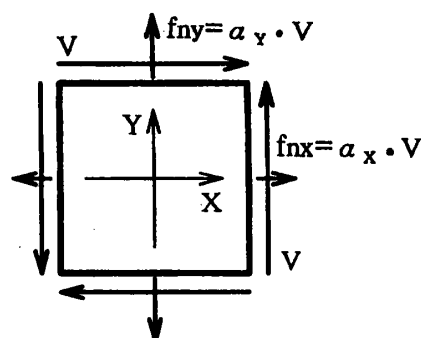


図-1 RC 平板に作用する複合応力

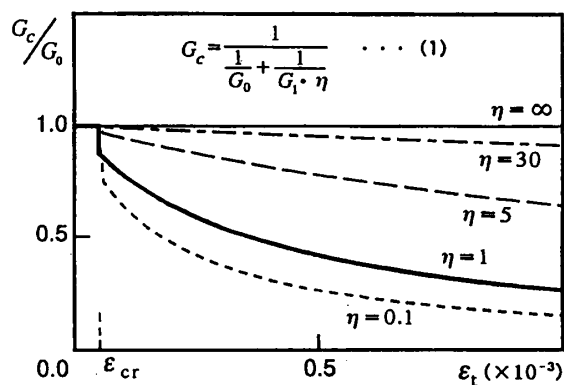


図-2 せん断剛性モデル

3. せん断剛性についての検討

複合応力状態のうち二軸の垂直応力の大きさが異なる不等応力比の場合、初ひび割れ発生後にコンクリートの主応力方向、主ひずみ方向（主方向）は各々変化する。この時のコンクリートのひび割れ方向の取扱い方の一つである固定モデルは、初ひび割れ発生方向を主軸と定義し、その後の载荷により主方向が各々変化しても主軸を変えないので、主方向が変化することによってコンクリートのひび割れ界面にせん断すべりが生じ、これを拘束するコンクリートのせん断剛性の違いがせん断耐力に影響を及ぼすと考えられる。一方、回転モデルでは、初ひび割れ発生後にコンクリートの主応力方向と主ひずみ方向が変化してもそれらの方向は一致し、かつその方向を主軸として取扱うためせん断剛性の違いがせん断耐力に及ぼす影響は殆どないと考えられる⁵⁾。

本報では、固定モデルを用いて不等応力比の場合を対象に、せん断剛性の違いがせん断耐力に及ぼす影響について表-1に示すパラメータ

で検討を行った。図-3はせん断剛性の大きさをパラメータとした解析結果のせん断応力 V とせん断ひずみ γ との関係を、図-4、5はコンクリートの主応力角 θ_σ 、主ひずみ角 θ_ε とせん断ひずみ γ との関係を各々示している。

3.1 平均応力比による検討

図-3の(a),(b)より、応力比差 $\Delta\alpha$ が一定(1.0)で、平均応力比 α_{AV} が0.5と-0.5の場合を比較する。破壊形式が鉄筋降伏型を示す解析Iでは、ひび割れ発生後から鉄筋降伏までの V

表-1 解析条件一覧

解析 ケース	応 力 比				共 通 項 目	
	X軸方向 α_X	Y軸方向 α_Y	応力比差 $\Delta\alpha$	平均応力比 α_{AV}	鉄 筋	コンクリート
I	0.0	1.0	1.0	0.5	弾性係数 $E_s = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ 降伏応力 $f_s = 400 \text{ MPa}$ 鉄筋比 $\rho_X = \rho_Y = 2.0 \%$	弾性係数 $E_c = 2.0 \times 10^4 \text{ MPa}$ 圧縮強度 $f_c = 20 \text{ MPa}$ f_c 時のひずみ $\varepsilon_c = 0.002$
II	-1.0	0.0	1.0	-0.5		
III	-2.0	1.0	3.0	-0.5		

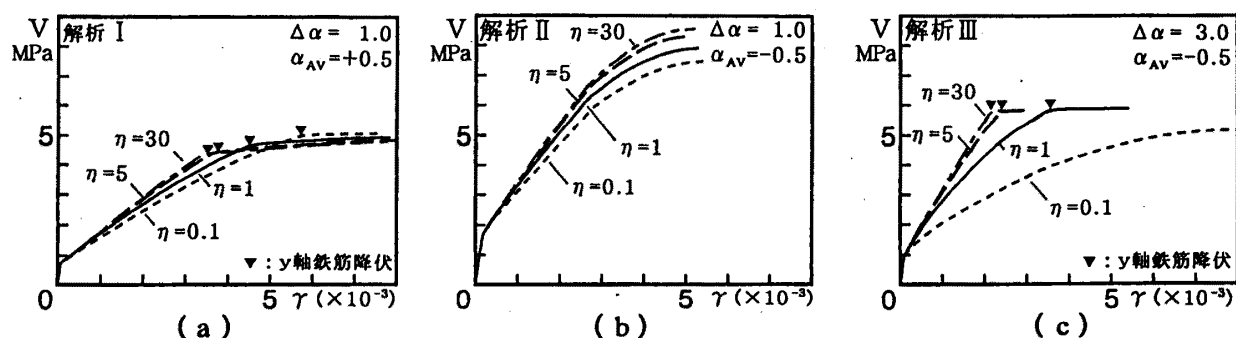


図-3 $V-\gamma$ 関係

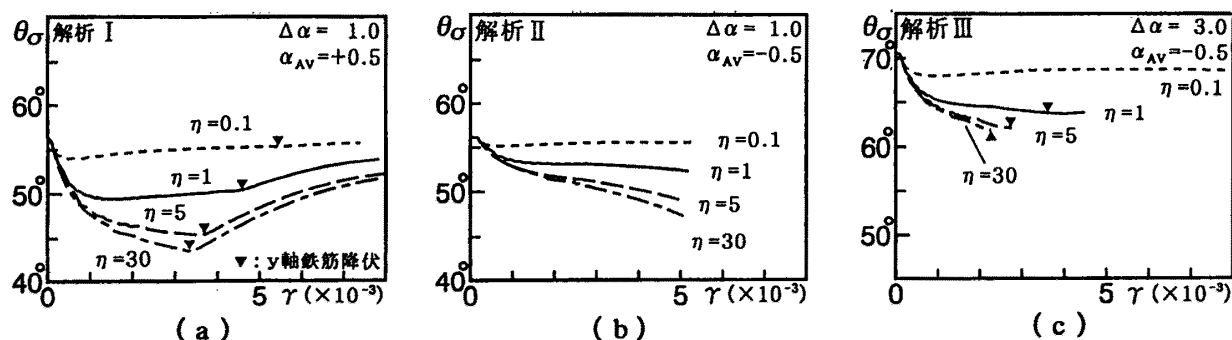


図-4 $\theta_\sigma-\gamma$ 関係

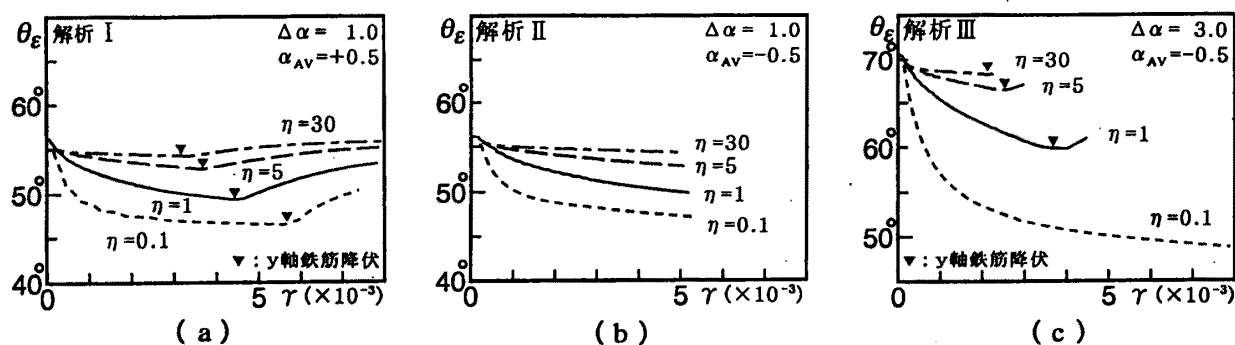


図-5 $\theta_\varepsilon-\gamma$ 関係

— γ 関係において、せん断剛性の違いによる差が徐々に生じるが、Y 軸方向鉄筋の降伏以降ではその差は小さくなる。一方、コンクリート圧壊型を示す解析 II では、せん断剛性が大きい程せん断耐力は大きくなることが分かる。

図-4, 5 の(a), (b)より、平均応力比が引張応力として大きい解析 I は、圧縮応力として大きい解析 II に比べて鉄筋降伏近傍までは主応力角 θ_σ 、主ひずみ角 θ_ε 共にその変化量が大きくなっていくことが分かる。さらに、 θ_σ と θ_ε を比較すると、せん断剛性が小さい程 θ_ε の変化量は大きくなり、 θ_σ の変化量は小さくなることが分かる。これはせん断剛性が小さいとひび割れ界面のせん断すべりが大きくなるため θ_ε の変化が大きくなるが、 θ_σ の変化はコンクリートによるせん断すべりの拘束の分担が少なくなるため小さくなったと考えられる。

また、図-3(a)のV— γ 関係において、せん断剛性が大きくなる程Y軸方向鉄筋の降伏点は僅かながら低くなっているが、これは図-5(a)より分かるように、せん断剛性の大きい程 θ_ε の変化が小さくなるためと考えられる。つまり、主引張ひずみ方向とY軸とのなす角の変化が少なくなるためであり、図-3(a)のV=4.0 MPa時のRC平板のひずみ状態をモールのひずみ円で表した図-6の(a)と(d)の比較により分かる。せん断応力Vの大きさが同じ場合、せん断剛性が大きい(d)は小さい(a)に比べひずみ円は小さく、主引張ひずみ ε_1 、せん断ひずみ γ も小さくなっているが、Y 軸方向のひずみ ε_y は主引張ひずみ方向がY軸に近い場合のみであるが大

きくなっている。これより、せん断剛性が大きい(d)のY軸方向鉄筋は、小さい(a)より低いせん断応力で先に降伏ひずみに達したと言える。

3.2 応力比差による検討

図-3の(b), (c)より、平均応力比 α_{AV} が一定(-0.5)で、応力比差 $\Delta\alpha$ が1.0と3.0の場合を比較する。コンクリート圧壊型を示す解析 II は、せん断剛性が大きくなる程同じせん断ひずみに対しせん断応力は大きくなり、せん断耐力も大きくなる。一方、応力比差が大きく鉄筋降伏型を示す解析 III では、鉄筋降伏まではコンクリート圧壊型と同様にせん断剛性が大きくなる程同じせん断ひずみに対しせん断応力は大きくなるが、鉄筋降伏に達するとせん断耐力には殆ど差が生じないことが分かる。

図-4, 5 の(b), (c)より、解析 II, III共にせん断剛性が大きくなる程、主応力角 θ_σ の変化量が大きくなり、主ひずみ角 θ_ε の変化量が小さくなることが分かる。しかしながら、応力比差の大きい解析 III の θ_ε の変化量は解析 II に比べかなり大きくなる。これより、応力比差はせん断すべりに大きく影響を及ぼし、応力比差が大きい程せん断すべりは大きくなると言える。

4. 既往実験結果との比較

不等応力比を対象としたひび割れたコンクリートのせん断剛性の検討に用いた本解析モデルの妥当性を、表-2に示す複合応力を受けるRC平板の既往実験結果⁴⁾との比較により確かめる。

図-7は、不等応力比の既往実験結果と本解析結果のせん断応力Vとせん断ひずみ γ との関

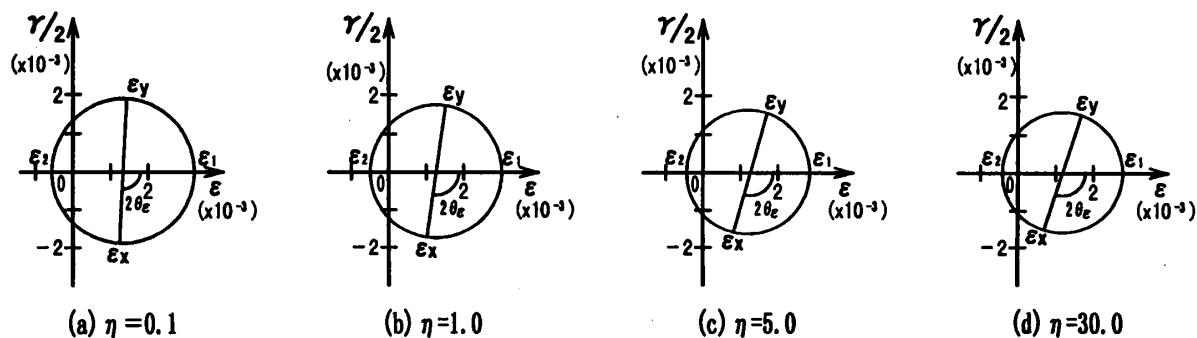


図-6 モールのひずみ円 (解析 I : V=4.0MPa)

係を、図-8, 9 はコンクリートの主応力角 θ_σ , 主ひずみ角 θ_ε とせん断応力 V との関係を示している。なお、これらの図の (a), (b), (c) は、試験体 CR1, TR2, TR4 を各々示している。また、固定モデルでは式 (1) の η の

値を 0.1, 1.0 とするせん断剛性を用いた。

図-7, 8, 9の(a),(b)より、応力比差 $\Delta\alpha$ が一定で平均応力比 α_{AV} が異なる CR1 と TR2 とを比較する。図-7 の $V-\gamma$ 関係では、CR1, TR2 共に解析結果は実験結果より若干大きく

表-2 既往平板実験のパラメータ

試験体名	応力比				コンクリート		鉄筋
	X軸方向 α_x	Y軸方向 α_y	応力比差 $\Delta\alpha$	平均応力比 α_{AV}	圧縮強度 f_c MPa	f_c 時の ひずみ ε_c	
CR1	-0.5	0.0	0.5	-0.25	26.5	0.00249	弾性係数 $E_s = 2.1 \times 10^5$ MPa 降伏強度 $yfs = 381$ MPa 鉄筋比 $\rho_x = \rho_y = 1.02\%$
TR2	0.0	0.5	0.5	0.25	22.8	0.00268	
TR4	-1.0	0.5	1.5	-0.25	27.2	0.00257	

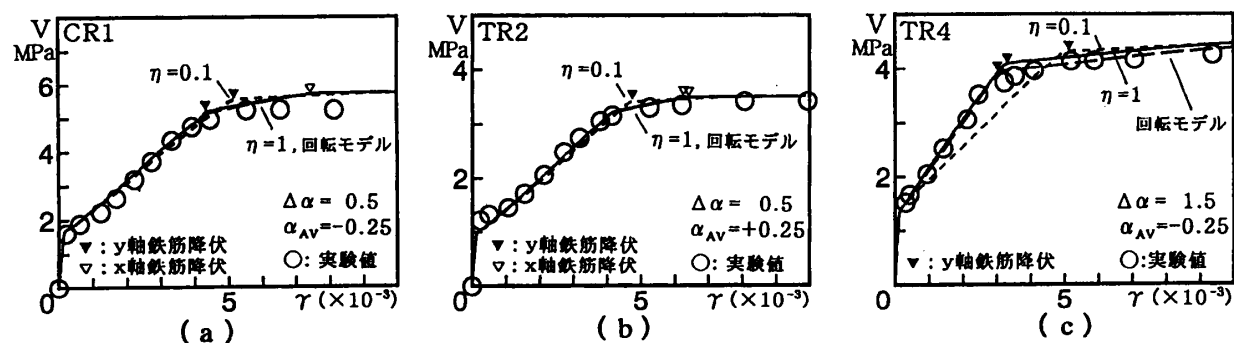


図-7 $V-\gamma$ 関係

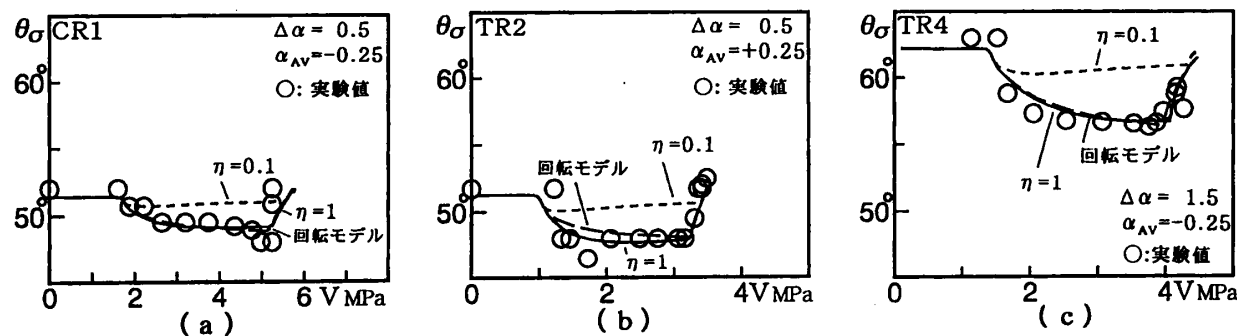


図-8 $\theta_\sigma-\gamma$ 関係

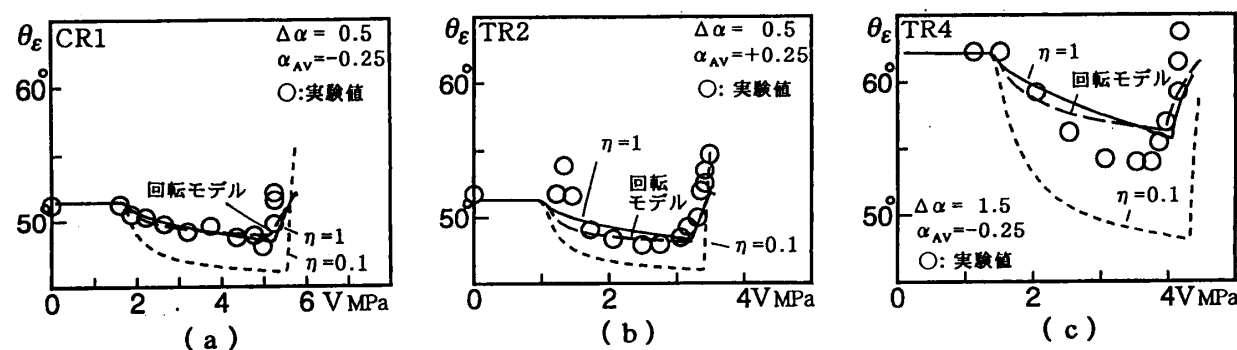


図-9 $\theta_\varepsilon-\gamma$ 関係

なっているが、実験結果をよく追従していると言える。また、図-8, 9の θ_σ , θ_ε -V関係でCR1, TR2共に固定モデルの $\eta = 1.0$ および回転モデルは実験結果をよく追従しているが、固定モデルの $\eta = 0.1$ は実験結果と比較的大きな差が生じた。

図-7, 8, 9の(a), (c)より、平均応力比 α_{AV} が一定で応力比差 $\Delta\alpha$ が異なるCR1とTR4を比較する。図-7のV- γ 関係において、 $\Delta\alpha$ の小さいCR1の解析結果ではせん断剛性モデルの違いの影響は小さく実験結果を追従しているが、 $\Delta\alpha$ が大きいTR4ではせん断剛性モデルの違いによる差が生じ、固定モデルの $\eta = 0.1$ では実験結果と鉄筋降伏以前の関係に差が生じた。また、図-8, 9の θ_σ , θ_ε -V関係では、固定モデルの $\eta = 1.0$ および回転モデルはCR1, TR4共に実験結果を追従しているが、固定モデルの $\eta = 0.1$ では実験結果と大きな差が生じた。

以上より、固定モデルの $\eta = 1.0$ (青柳・山田モデル) および回転モデルは、既往実験結果を追従していることが確かめられた。

5. まとめ

本報では、RC平板の要素解析により不等応力比を対象に、ひび割れたコンクリートのせん断剛性をパラメータにしてせん断剛性の違いがせん断耐力に及ぼす影響を検討した。さらに、既往のRC平板実験結果との比較により本解析の妥当性を確かめた。限られた範囲であるが得られた結果をまとめて以下に示す。

- (1) 破壊形式が鉄筋降伏型の場合はせん断剛性の違いがせん断耐力に及ぼす影響は殆どなく、コンクリート圧壊型の場合はせん断剛性が違いがせん断耐力に影響を及ぼすことが分かった。
- (2) 平均応力比が一定で応力比差が異なる場合、応力比差が大きい程せん断すべりが大きくなり、せん断耐力は小さくなることが分かった。
- (3) 主応力角と主ひずみ角の関係は、せん断剛

性が大きいとコンクリートがせん断すべりを主に拘束し、主ひずみ角に比べて主応力角の変化が大きくなる。一方、せん断剛性が小さいとせん断すべりが大きくなり、主応力角に比べて主ひずみ角の変化が大きくなることが分かった。

- (4) 既往実験結果との比較より、固定モデルの $\eta = 1.0$ (青柳・山田モデル) および回転モデルは、実験結果のせん断耐力ならびに主応力角、主ひずみ角の変化をよく追従しており、本解析の妥当性が確かめられた。

謝辞

本報をまとめるにあたり、鹿島建設(株)宮下丘博士、飯塚 真巨氏、琉球大学 張 愛輝博士に貴重な助言を頂いた。また、プログラム作成にあたり熊本工業大学金沢康次博士に御協力頂いた。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Vecchio F.J., Collins M.P. : Response of Reinforced Concrete to In-plane Shear and Normal Stresses, Dep. of Civil Engineering Publication 83-03, Toronto University, 1982
- 2) 青柳征夫, 山田一字 : 面内力を受ける鉄筋コンクリートシェル要素の耐力変形特性, 土木学会論文報告集, 第331号, pp.167-180, 1983.3
- 3) 長沼一洋 : 鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法(その1), 日本建築学会構造系論文報告集, 第421号, pp.39-48, 1991.3
- 4) 栗原和夫, 坪田張二 : 繰返し面内複合応力を受ける鉄筋コンクリート平板要素の解析モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第469号, pp.105-115, 1995.3
- 5) 山本善彦, 栗原和夫, 永野裕康 : 面内せん断力を受ける不等量配筋RC平板のせん断剛性についての解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.747-752, 1997