

論文 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

山本善彦*¹・栗原和夫*²・永野裕康*³

要旨：面内せん断力を受ける縦横不等量配筋の鉄筋コンクリート平板の要素解析により、先ずひび割れたコンクリートの主軸の取扱い方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、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にして検討した。最後に、既往の RC 平板実験結果との比較により本検討に用いた解析の妥当性を確かめた。

キーワード：面内せん断力, RC 平板, 不等量配筋, せん断剛性

1. はじめに

有限要素法による鉄筋コンクリート (RC) 耐震壁の弾塑性解析に用いるひび割れたコンクリートのせん断剛性については、既に多くの実験的・解析的研究が行われてきた [1, 2, 3]。

しかしながら、RC 壁板の縦横の鉄筋比が異なる直交不等量配筋 (不等鉄筋比)、せん断応力と二軸の直応力を組合せた応力状態のうち、二軸の直応力の大きさが異なる複合応力載荷 (不等応力比) などのようにコンクリートの主応力・主ひずみ方向 (主方向) がひび割れ発生後に変化する場合、また地震時などの繰返し載荷の度にコンクリートの主方向が入替り、さらに不等鉄筋比、不等応力比などの条件下でひび割れが発生し、主方向の変化が複雑化する場合でのせん断剛性モデルの違いが構造特性に及ぼす影響についての検討は十分に行われていないようである。

また、せん断剛性が構造特性に及ぼす影響には、解析時におけるコンクリートのひび割れ方向の取扱い方が関与してくると考えられる。分布ひび割れ (Smearred Cracked) モデルにおいて、ひび割れ方向の取扱い方には、初ひび割れ発生方向を主軸と定義し、その後の載荷により主方向が変化しても主軸は変わらないとする固定ひび割れモデル (固定モデル) があり、従来より RC 構造の弾塑性解析に多く用いられている。一方、ひび割れ発生後においても主軸は主方向と一致するとし、主方向の変化と共に変わっていく回転ひび割れモデル (回転モデル) がある。このようなモデルの違いが構造特性に及ぼす影響についての検討は行われていないようである。

本研究は、純せん断力が作用する不等鉄筋比の場合を対象にした RC 平板の要素解析により、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する。次に、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、せん断剛性の大きさをパラメータにして検討する。最後に、既往の RC 平板実験結果との比較により本検討に用いた解析の妥当性を確かめる。なお、不等応力比、せん断剛性モデルについての検討は別途報告の予定である。

*1 熊本工業大学大学院生 工学研究科構造工学専攻 (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の構成則は、「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」より次式のように表される。

$$\{f_{RC}\} = \{ [Tc]^T [Dc] [Tc] + [Ts]^T [Ds] [Ts] \} \cdot \{ \varepsilon \} \quad (1)$$

ここで、 $\{f_{RC}\}$: RC要素の平均応力 $[Ds]$: 鉄筋の配筋方向剛性マトリックス
 $\{ \varepsilon \}$: RC要素の平均ひずみ $[Dc]$: コンクリートの主方向剛性マトリックス
 $[Ts]^T$: 鉄筋の座標変換マトリックス $[Tc]^T$: コンクリートの座標変換マトリックス

式(1)のようにRC要素の構成式は、3元の非線型連立方程式となる。この解析方法としては、RC要素に作用する応力を既知量として応力増分法でひずみを求めた。なお、解析モデルについての詳細は文献[4]を参照されたい。

2. 2 せん断剛性

本解析に用いたせん断剛性は、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[1]を用いた式(2)のような直列バネモデルを採用した。式中の η は図-1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。

$$G_c = 1 / (1 / G_0 + 1 / G_1 \cdot \eta) \quad (2)$$

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[1])
 ε_t : ひび割れと直角方向の引張ひずみ

3. ひび割れ方向(主軸)の取扱い方の影響

純せん断力が作用する不等鉄筋比を対象に、主軸の取扱い方の違いがせん断耐力に及ぼす影響を固定モデルと回転モデルを用いて検討する。なお、本論ではX軸(横)方向とY軸(縦)方向の鉄筋比 ρ_x と ρ_y の平均を「平均鉄筋比 ρ_{AV} 」、鉄筋比 ρ_x と ρ_y の差を「鉄筋比差 $\Delta\rho$ 」と各々定義する。

図-2は、固定モデルと回転モデルのせん断応力 V とせん断ひずみ γ の関係を、図-3はその時のせん断ひずみ γ とコンクリートの主応力角 θ_o の関係を各々表わしている。なお、本検討に用いた解析条件を一覧にして表-1に示す。

図-2より、同じ鉄筋比差 $\Delta\rho(0.5\%)$ の場合は平均鉄筋比 ρ_{AV} が小さい方が固定モデルと回転モデルのせん断耐力に差が生じ、同じ $\rho_{AV}(1.0\%)$ の場合は $\Delta\rho$ が大きい方がせん断耐力に差が生じることが分かる。また、図-3より、ひび割れ発生前では主応力角 θ_o は 45° であるが、ひび割れが発生すると θ_o に変化が生じ、同じ $\Delta\rho(0.5\%)$ の場合は ρ_{AV} の小さい方が θ_o の変化は大きく、同じ $\rho_{AV}(1.0\%)$ の場合は $\Delta\rho$ の大きい方が θ_o の変化は大きくなること分かる。また、これらの傾向は固定モデル、回転モデル共に同じである。

以上より、 $\Delta\rho$ が同じ場合は ρ_{AV} が小さい程、 ρ_{AV} が同じ場合は $\Delta\rho$ が大きい程、固定モデル

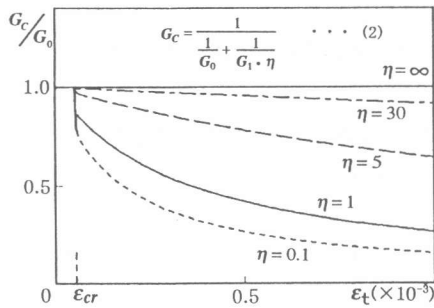
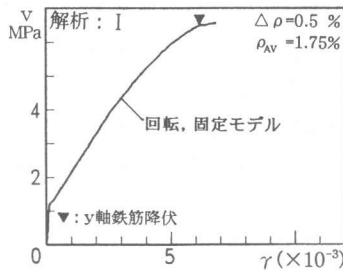


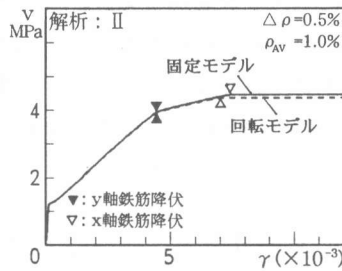
図-1 せん断剛性モデル

表-1 不等鉄筋比の解析条件

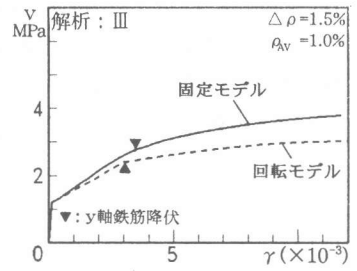
解析ケース	鉄筋				コンクリート	
	横方向鉄筋比 ρ_x (%)	縦方向鉄筋比 ρ_y (%)	鉄筋比差 $\Delta\rho$ (%)	平均鉄筋比 ρ_{AV} (%)	共通項目	共通項目
I	2.00	1.50	0.50	1.75	弾性係数 2.1×10^5 MPa	圧縮強度 20 MPa
II	1.25	0.75	0.50	1.00		
III	1.75	0.25	1.50	1.00	降伏強度 400 MPa	



(a)

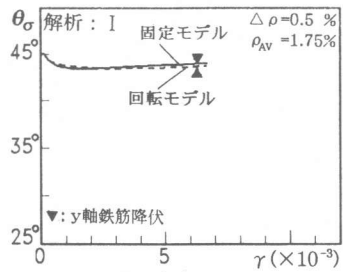


(b)

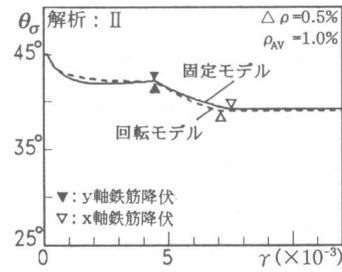


(c)

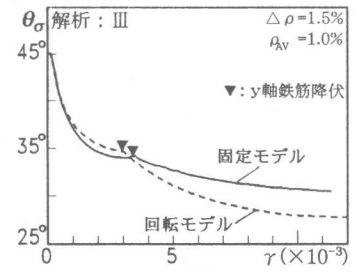
図-2 回転モデルと固定モデルの比較 (V- γ 関係)



(a)



(b)



(c)

図-3 回転モデルと固定モデルの比較 (θ_σ - γ 関係)

と回転モデルのせん断耐力に差が生じると言える。この原因の一つとして次のことが考えられる。回転モデルではコンクリートの主方向を主軸とする局所座標を定義して、これにコンクリートの主応力-主ひずみの関係式を用いて解析している。一方、固定モデルでは、初ひび割れ方向を主軸として固定し局所座標を定義している。この主軸は主方向が変化すると一致しなくなるにも拘わらず、局所座標の応力-ひずみ関係に主応力-主ひずみの関係式を適用している。このように固定モデルに局所座標の応力-ひずみ関係として主応力-主ひずみ関係式を用いたことが、主方向の変化が大きくなる程二つのモデルのせん断耐力に差を生じさせたと考えられる。なお、既往のRC平板実験のひび割れ進展状況を観察すると、一般的にひび割れ方向は初ひび割れ方向だけでなく新たな载荷によるコンクリートの主方向の変化と共にその方向にひび割れが生じるが、ある段階からは新たなひび割れ発生よりも既存ひび割れの幅が大きく広がり破壊に至る傾向が見受けられる。従って、回転モデルと固定モデルにより得られるせん断耐力の間に妥当なせん断耐力が存在すると考えることができる。

4. ひび割れたコンクリートのせん断剛性について

不等鉄筋比を対象にせん断剛性 G_0 の違いがせん断耐力に及ぼす影響を、図-1に示す η によりせん断剛性の大きさを変えて検討する。

図-4は、せん断剛性の大きさの違いによるせん断応力 V とせん断ひずみ γ の関係を各々示したものである。図-5および図-6は、その時のせん断ひずみ γ とコンクリートの主応力角 θ_σ および主ひずみ角 θ_ϵ の関係を各々示している。

図-4より、同じ鉄筋比差 $\Delta\rho(0.5\%)$ の場合、鉄筋降伏型の平均鉄筋比 $\rho_{AV}=1.0\%$ はせん断剛性が小さい程せん断耐力が小さくなるが、Y軸方向の鉄筋降伏後にコンクリート圧壊型を示す $\rho_{AV}=1.75\%$ はせん断耐力の差が殆ど生じないことが分かる。これは ρ_{AV} が大きくなるとコンクリートひび割れ発生によるせん断すべりを鉄筋が拘束し、その後Y軸方向の鉄筋が降伏すると拘束応力に不釣り合いが生じせん断すべりが起こり始めるが、直にコンクリートが圧縮破壊をしたためと考えられる。このように、鉄筋比が大きくコンクリート圧壊型の場合、せん断剛性の影響は小さいと言える。次に、同じ $\rho_{AV}(1.0\%)$ の場合、一般的にせん断剛性が大きくなる程せん断耐力は大きくなり、各々のせん断耐力の差は $\Delta\rho$ が大きい程大きくなるが、 $\eta=30$ になるとせん断

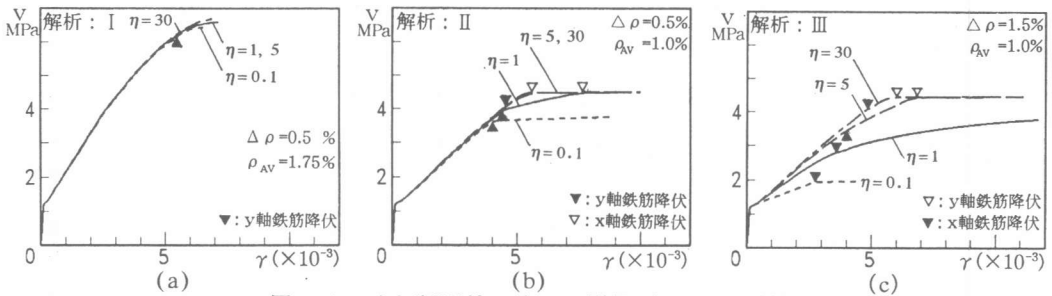


図-4 せん断剛性の違いの影響 (V- γ 関係)

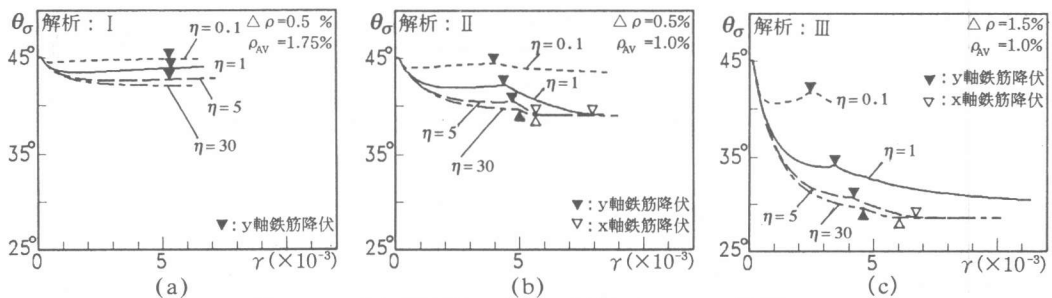


図-5 せん断剛性の違いの影響 (θ_σ - γ 関係)

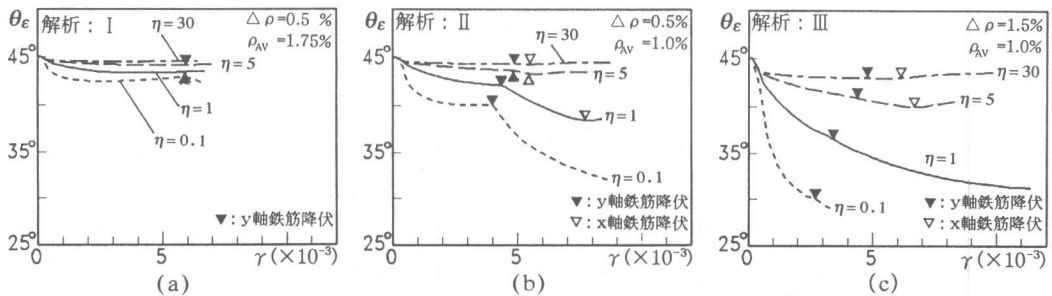


図-6 せん断剛性の違いの影響 (θ_ϵ - γ 関係)

耐力はほぼ同じとなる。これはせん断剛性が大きくなるとせん断すべりの拘束をコンクリートが負担したため、鉄筋が $\rho_{AV}=1.0\%$ として有効に働き等鉄筋比 (1.0%) と同じせん断耐力となったと考えられる。

図-5、図-6より分かるように、同じ $\Delta\rho$ (0.5%) の場合、 ρ_{AV} が大きいと θ_o 、 θ_e の変化が小さくなる。さらに、 θ_o と θ_e とを比較すると、せん断剛性が大きい程 θ_o の変化が大きくなり、 θ_e の変化が小さくなる。これはせん断剛性が小さいとせん断すべりが大きくなるため θ_e の変化が大きくなるが、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 θ_o の変化は小さくなったと考えられる。また、鉄筋比が大きくなると鉄筋がせん断すべりの拘束を多く分担するのでコンクリートの分担が少なくなり θ_o の変化が小さくなったと考えられる。これより、せん断すべりは鉄筋比が影響を及ぼす鉄筋のダボ作用 (Dowel Action) とコンクリートのせん断剛性が影響を及ぼす骨材の噛み合い (Aggregate Interlock) により拘束されていることが理解できる。次に、同じ ρ_{AV} (1.0%) の場合、 θ_o 、 θ_e の変化は $\Delta\rho$ が小さい方が小さくなり、またせん断剛性が大きいと θ_e の変化は殆どなく、等鉄筋比の場合の 45° に近づく傾向にあることが分かる。

5. 既往実験結果との比較

不等鉄筋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、直交不等量配筋のRC平板の既往実験結果[5]と本解析結果との比較により確かめる。

図-7は、既往平板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 関係であり、図-8はその時のせん断応力Vとコンクリートの主応力角 θ_o 、主ひずみ角 θ_e との関係を示したものである。なお、固定モデルの解析では、 $\eta=0.1, 0.5$ を用いた。

図-7より、固定モデルの $\eta=0.1$ のせん断耐力は、PV20, PV10では実験値より小さいがPV21では近い値となることが分かる。また、 $\eta=0.5$ では全ての試験体は実験値に概ね一致している。一方、回転モデルによるせん断耐力は、PV20, PV10では実験値に近い値となるが、PV21で

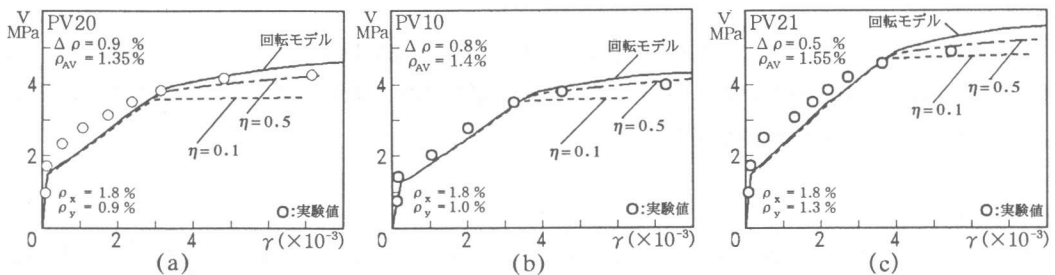


図-7 既往RC平板実験結果との比較 (V- γ 関係)

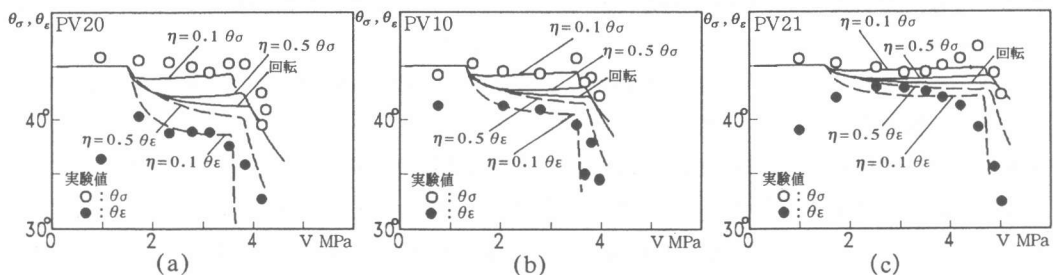


図-8 既往RC平板実験結果との比較 (V- θ_o, θ_e 関係)

は大きい値となった。このように試験体により差があるが全体的に見て実験結果をよく追従していると言える。次に、図-8より、固定モデルの $\eta=0.1$ は主応力角 θ_o 、主ひずみ角 θ_e 共に実験結果をよく追従しており、回転モデルは実験値の θ_o と θ_e の間にあることが分かる。

6. まとめ

本報では、ひび割れたコンクリートの主軸の取扱い方およびせん断剛性について、限られた範囲であるがRC平板の要素解析により不等鉄筋比を対象に検討を行った。本解析により得られた結果をまとめて以下に示す。

- (1)固定モデルと回転モデルのせん断耐力を比較すると、鉄筋比差が同じ場合は平均鉄筋比が小さい程、平均鉄筋比が同じ場合は鉄筋比差が大きい程、その差が大きくなることが分かった。
- (2)鉄筋比差が同じでせん断剛性が異なる場合、鉄筋降伏型のような平均鉄筋比が小さい時はせん断剛性が小さい程せん断耐力は小さくなるが、コンクリートが圧縮破壊をするような平均鉄筋比の大きい時は差が殆ど生じないことが分かった。
- (3)平均鉄筋比が同じでせん断剛性が異なる場合、鉄筋比差が大きいとせん断剛性の違いによるせん断耐力の差が大きくなるが、せん断剛性が大きくなりひび割れ前の剛性に近づくと鉄筋比差に関係なくせん断耐力は同じになることが分かった。
- (4)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ひずみ角の変化が大きくなる。また、鉄筋比が大きい程せん断すべりを拘束することが分かった。
- (5)既往の平板実験結果との比較により、固定モデルによる解析結果は η の値を適切に選ぶことにより実験結果のせん断耐力および主応力角、主ひずみ角の変化を精度良く追従することが分かった。また、回転モデルによる解析結果も実験結果を良く追従していると言える。

謝辞

本報をまとめるにあたり、鹿島建設(株) 宮下 丘博士、飯塚真臣氏、九州芸術工科大学 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 金沢康次博士にご協力頂いた。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1]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
- [2]李 宝祿、前川宏一：接触密度関数に基づくコンクリートひび割れ面の応力伝達構成式、コンクリート工学、Vol.26、No.1、pp.123~137、1988.1
- [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]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