

論文

[2102] 圧縮力を受ける組積プリズムの破壊挙動に関する解析的研究

正会員 ○村上雅英 (近畿大学理工学部建築学科)

正会員 窪田敏行 (近畿大学理工学部建築学科)

1. はじめに

圧縮力を受ける組積プリズムは、充填コンクリートと組積単体の剛性とポアソン比の相違により、複合構造物特有の複雑な力学的挙動を示す。圧縮ひずみの増加に伴い、組積単体が充填コンクリートの横方向の膨張を拘束するため、充填コンクリートは3軸圧縮応力状態となり、その圧縮強度は1軸圧縮強度よりも高くなる。そこで、文献1では、組積造プリズムの圧縮強度を推定する際に用いる充填コンクリートの圧縮強度には、3軸圧縮応力状態における圧縮強度の上昇を考慮する必要があることを実験的に示した。

実験で観察された圧縮力を受けるプリズムの最大強度以後の破壊形式は、充填コンクリートの圧壊による耐力低下ではなく、充填コンクリートの膨張を拘束していた組積単体の破壊により拘束力が急激に低下し、それに伴い充填コンクリートの圧縮強度が急激に低下する脆性的な破壊であった。したがって、充填コンクリートの圧縮強度を正確に推定することが、プリズムの圧縮強度を推定する際に最も重要な問題となる。すなわち、充填コンクリートの圧縮強度を推定するためには、(1)充填コンクリートに作用する拘束力の算定、(2)充填コンクリートに作用する拘束力と圧縮強度の関係、(3)ウェブの存在や、そのために生じる打設直後の沈下により生じる初期ひび割れなどの欠陥が圧縮強度に与える影響、(4)打設直後の組積単体の吸水による充填コンクリートのW/C比の減少などを定量的に評価しなければならない。

そこで本論文では、図-1に示すようにOR3 Jシリーズと図-1のa-a'で切断した半巾の組積単体を用いたHB3 Jシリーズ[2]の実験結果の理論的解釈を行うことを目的として、2次元有限要素法を以下に述べる手法により工夫して、平面圧縮ひずみを受けた場合のポアソン効果による組積プリズムの力学的挙動を解析した。さらに、計算結果と実験結果を比較検討し、解析方法の妥当性を論じた。

2. 本解析の特徴

構造物の応力解析は、その応力状態や形状によって、2次元あるいは3次元で解析が行われる。3次元立体解析は、2次元平面解析に比べて自由度が多く、解析を行う際に膨大な記憶量と計算量を必要とするため、その実行に際しては、大型コンピューターが使用されているのが現状である。そこで、3次元立体問題を解析する場合、対称性や工学的判断に基づき2次元平面問題に近似して解析するケースが多い。本解析では、以下の仮定を用いて3次元立体問題を2次元平面問題に置換した。

図-1に示すように、Z軸方向に一樣圧縮力を受けるプリズムの端部では加力盤とプリズムの間に摩擦が生じるため、ポアソン効果はプリズムの端部よりも中央部でより顕著になる。従って、ポアソン効果による組積単体の破壊はプリズムの中央部分から生じる。プリズムの中央部分ではZ軸方向にほぼ均一に圧縮されていると考えられるので、その部分を単位厚さで切り出して、Z軸方向に一樣ひずみ ε_z が作用する解析モデルを設定した。2次元有限要素法への適用は以下のよ

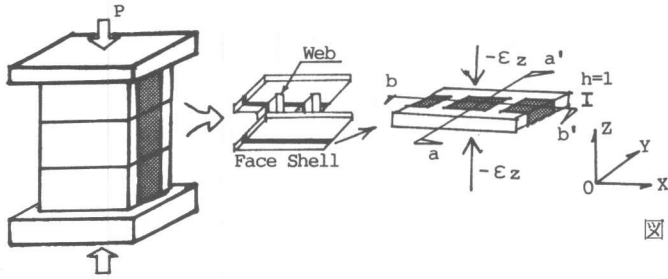


図-1 解析対象部分

うにして行った。

等方性材料の弾性構成方程式は式(1)で表される。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & A & 0 & 0 \\ & & & & A & 0 \\ & & & & & A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (1) \quad A = \frac{1-\nu}{2(1-\nu)}$$

Z軸方向のひずみは均等に生じていると仮定(平面保持の仮定)しているので、 $\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ となり、式(1)は式(2)のように書き換えられる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ & 1-\nu & 0 \\ \text{sym.} & & A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} + \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \epsilon_z \quad (2-a)$$

$$\epsilon_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \{ \nu \epsilon_x + \nu \epsilon_y + (1-\nu) \epsilon_z \} \quad (2-b)$$

式(2-a)における右辺第1項は平面ひずみ状態での剛性マトリックスであり、第2項は要素の境界を固定した場合に ϵ_z により要素内部に生じるX、Y方向の応力(固定時応力と定義する)である。本解析では、図-2に示すように固定時応力を等価な節点内力に置換して平面ひずみ解析を行い、そこで得られた解放応力を固定時応力に累加することによって、ポアソン効果によって生じる全応力を算出する。固定時応力に等価な節点内力は、次のようにして得られる。

固定時応力と釣合う節点外力 f を考え、それらに仮想節点変位 \bar{u} を与える。そのときに生じるポテンシャルエネルギー Π は式(3-a)で表される。ここで、Bマトリックスは変位関数から導かれる変位-ひずみ変換マトリックスである。ポテンシャルエネルギーの停留条件より、等価節点外力 f が式(4)のように算出される。さらに、等価節点内力 f' は内力と外力の釣合式(5)より式(6)のように表される。

$$\pi = -Sh\{\bar{\epsilon}\}^T\{\sigma'\} - \{\bar{u}\}^T\{f\} = Sh\{\bar{u}\}^T[B]^T\{\sigma'\} - \{\bar{u}\}^T\{f\} \quad (3-a)$$

$$\{\bar{\epsilon}\}^T = ([B]\{\bar{u}\})^T = \{\bar{U}\}^T[B]^T \quad \begin{matrix} \bar{\epsilon} = \text{Virtual Strain} & h = \text{Thickness of Element} \\ \bar{u} = \text{Virtual Displacement} & A = \text{Area of Element} \end{matrix} \quad (3-b)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial \bar{u}} = 0; \quad \{f\} = Sh[B]^T\{\sigma'\} \quad (4) \quad \{f\} + \{f'\} = 0 \quad (5) \quad \{f'\} = -Sh[B]^T\{\sigma'\} \quad (6)$$

3. 解析仮定

解析対象部分は、図-1に示すようにウェブの中心付近の単位厚さの断面であり、対称性を考慮して1/4の部分について図-3に示すように三角形要素分割とした。そのため、組積単体中のウェブの偏在によるZ軸方向の曲げ変形の影響(τ_{xz} , τ_{yz})は考慮していない。

実験では最大荷重時付近に達するとひび割れの進展によりポアソン比が0.5以上になること

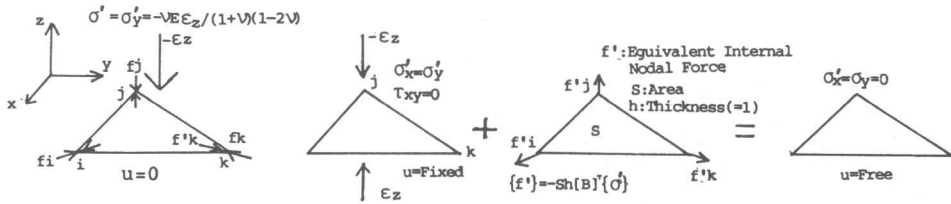


図-2 等価節点内力の算出方法

表-1 仮定した剛性とポアソン比

(a) Full Size Prism					(b) Half Size Prism						
Stage	Ez	Concrete		Block		Stage	Ez	Concrete		Block	
		Ec	Vc	Eb	Vb			Ec	Vc	Eb	Vb
1	-0.00080	262	0.25			1	-0.00035	286	0.25		
2	-0.00090	216	0.25	294	0.20	2	-0.00103	172	0.25	294	0.20
3	-0.00100	56	0.45			3	-0.00113	80	0.45		

Ez: Axial Strain, Ec: Tangent Modulus of Grouted Concrete (t/cm²)
 Vc: Poisson's Ratio of Grouted Concrete, Eb: Tangent Modulus of Masonry Unit
 Vb: Poisson's Ratio of Masonry Unit

が観察されているが、解析ではポアソン比が0.5以上になると計算が不可能となるため、解析対象範囲はプリズム試験体に重大なひび割れが生じるまでとし、計算誤差が生じないようにポアソン比の上限を0.45とした。そのため、充填コンクリートの力学的挙動は等方性モデルで近似できるものと仮定する。本解析では、プリズム圧縮試験結果を解析で再現することを目的としており、また、充填されたコンクリートとコンクリートシリンダーの力学的性質が大きく異なっていたため[2]、解析結果がプリズム試験結果と一致するように、解析で用いる材料の力学的性質を以下のようにして設定した。充填コンクリートの剛性及びポアソン比の設定に関しては、横拘束力が軸圧縮力と比べて非常に小さい(0.1Fc以下)ため、1軸の剛性及びポアソン比の関係式($E = f(\epsilon_z)$ 、 $\nu = f(\epsilon_z)$)を用いることとし、3軸応力状態による影響については、実験結果が計算結果に反映されるように、以下の方法で考慮した。実験から得られたプリズム全体の荷重-ひずみ関係を図-4及び表-1に示すように3段階に分割して、各段階のひずみ増分に対応する荷重が得られるような剛性を試行錯誤で見つけ出した。また、ポアソン比はプリズム試験で実測されたy方向の埋め込みゲージの値に基づいて決定した。一方、組積単体に関しては、その剛性及びポアソン比は材料試験結果より最大強度に至るまでほぼ一定であったため、完全弾性体と仮定した。各要素のZ軸方向の剛性は、X-Y平面内で生じている応力の影響を受けるため、要素間で若干異なるが、その影響は小さいものと考えて、組積単体または充填コンクリート内部ではそれらの剛性とポアソン比は一樣であると仮定した。

境界条件については、OR3Jシリーズの解析を行う場合には図-3に示すようにX、Y両方向の切断面上の各節点をローラー支持とし、また、HB3Jシリーズの場合には、X方向の切断面上の各節点のみをローラー支持とした。ブロックと充填コンクリートの付着面での付着バネ要素は設けなかった。

4. OR3Jシリーズの解析結果及び検討

本試験体では2段階ブロックの図-3の位置にひずみゲージを貼り、また、充填コンクリートの中央部分のY、Z方向にひずみゲージを埋め込み、各点のひずみを計測した。図-5に示すよ

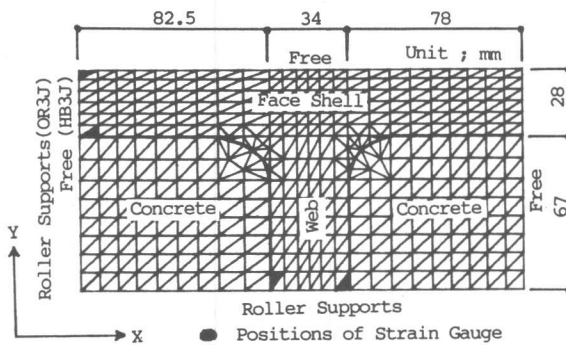


図-3 解析モデル

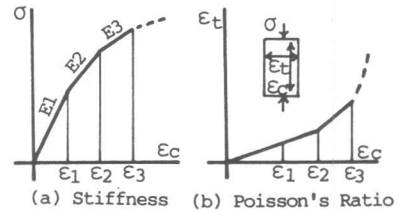


図-4 充填コンクリートの剛性とポアソン比の仮定

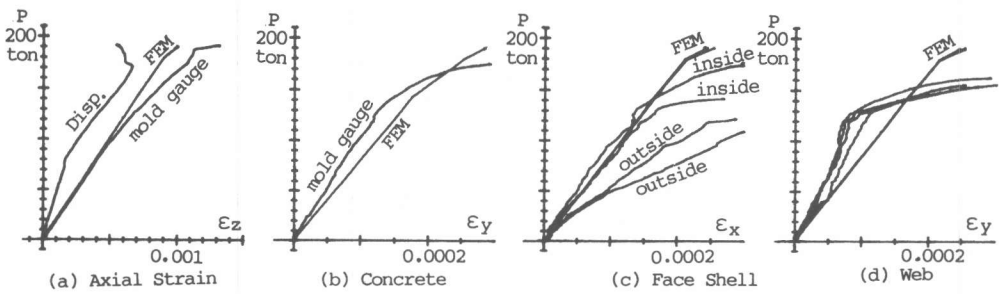


図-5 荷重-ひずみ関係の比較 (OR3Jシリーズ)

うにフェイスシェルのひずみの挙動に関しては、解析では外側と内側のひずみがほぼ一致したが、実験では、外側の方が大きく、充填コンクリートの膨張により面外に曲げ生じていた点が異なった。それは、充填コンクリートが解析で仮定したポアソン比以上に膨張したためである。しかしながら、解析から得られた各点のひずみの挙動は実験結果とほぼ一致しており、解析結果が実験結果をほぼ再現していることが確認された。図-6 (a)に計算終了時のブロック部分の変形図を、また、図-7 (a)に応力分布図を示す。両図より、フェイスシェルとウェブに生じている変形は曲げ変形よりもむしろ純引張変形の方が卓越していることが認められた。また、充填コンクリートに作用する圧縮拘束力は、フェイスシェルとウェブで囲まれた閉鎖型空洞部で大きく、その分布は、フェイスシェルとウェブに生じている引張力と釣り合うために、圧縮ブレース状に分布していることが認められた。圧縮ブレース内部で生じている圧縮拘束力の値は、計算終了時で7~8 kgf/cm²であった。

プリズムの最大荷重の低下の直接の原因は充填コンクリートの膨張を拘束している組積単体の破壊であり、そのため、その後の耐力低下は極めて脆性的であることが実験で確認されている。そこで、計算終了時の組積単体に生じている応力状態に、破壊条件を適応して破壊開始箇所を調べる。ここでは、破壊条件として、Rankineの最大引張応力基準 (式(7)) と Trescaのせん断応力基準 (式(8)) を用いる [3]。

$$\sigma_i = f' \quad (i=1, 2, 3, \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3) \quad (7)$$

$$\max(0.5 |\sigma_i - \sigma_j|) = k \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (8)$$

本解析では $\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$ と仮定しているため、 $\sigma_3 = \sigma_z$ となり組積単体中ではほぼ一定値となり、式(7)により引張応力度が最大となる部分と、式(8)により最大せん断応力度の最も大きくなる部分は一致する。従って、X-Y平面上で引張応力が最大となる部分が破壊開始箇所に対

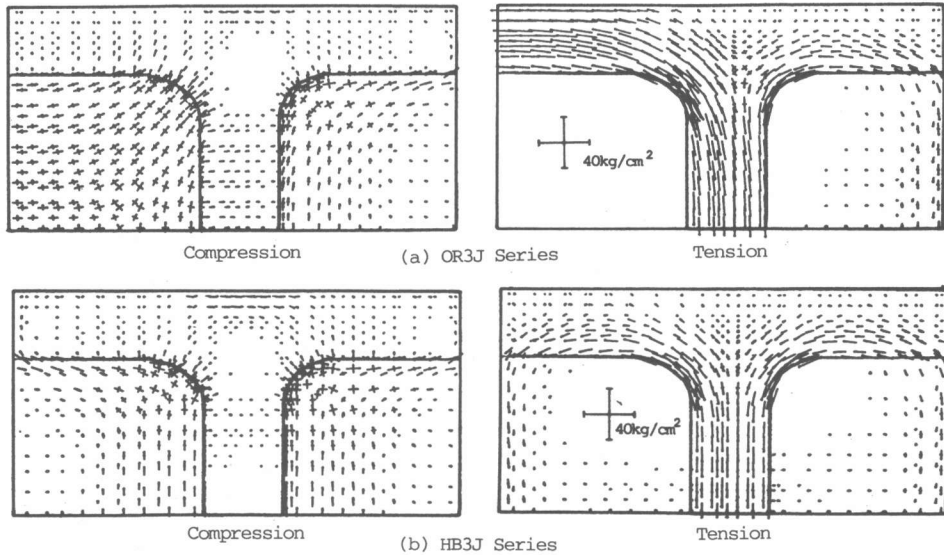


図-7 応力分布図

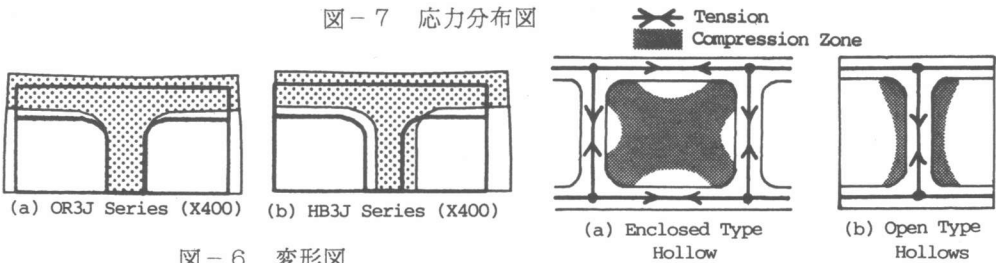


図-6 変形図

図-8 空洞部の形状と圧縮拘束力の関係

応しており、図-7(a)より、解析ではフェイスシェルとウェブの接合部の隅角部付近から引張破壊が生じることになる。実験終了後に試験体を解体し、ひび割れ観察を行った結果、解析結果とほぼ同じ場所で引張りひび割れが認められ、解析結果が実験結果を良く反映していることが確認された。なお、破壊開始箇所における計算終了時の引張応力度は $\sigma_1 = 23 \text{ kgf/cm}^2$ であり、フェイスシェルを用いた曲げ試験結果である曲げ引張強度 $\sigma_b = 41 \text{ kgf/cm}^2$ より小さい。しかし、解析では0.5以上のポアソン比で計算ができないのに対して、実験ではそれ以上のポアソン比が計測されていることを考慮すると、この計算結果は妥当的な値と思われる。

5. HB3Jシリーズの解析結果及び検討

実験ではHB3Jシリーズの最大耐力は、OR3Jシリーズの最大耐力の $1/2$ よりも低くなった。HB3Jシリーズでは組積単体から受ける拘束力が小さいため、充填コンクリートの最大強度がOR3Jシリーズほど上昇しなかったためであることを、文献2で実験式を用いて明らかにした。そこで、本解析を用いてHB3JシリーズとOR3Jシリーズの充填コンクリートに生じる圧縮拘束力の相違を調べる。図-7(b)にHB3Jシリーズの応力分布図を示す。充填コンクリート内で生じているフェイスシェルに平行な圧縮力は付着面を剛接合と仮定したためであり、実際には付着面にひび割れが生じたためフェイスシェルに平行な圧縮力はほとんど生じなかったものと考えられる。同図(a)と比較すると明らかにOR3Jシリーズの方が拘束力が大きいことが

解析結果から認められる。従って、HB3Jシリーズのように組積単体の空洞部分が解放型である場合のプリズムの圧縮強度の推定に際しては、組積単体の拘束による充填コンクリートの強度の上昇を考慮してはならないことが本解析からも明らかになった。

6. 空洞部の形状と圧縮拘束力の分布の関係

組積単体の空洞部の形状は大別してOR3Jの中央部のような閉鎖型空洞部と、両端部のような開放型空洞部がある。そこで、空洞部の形状と圧縮拘束力の分布の関係をOR3JとHB3Jの解析結果より検討する。閉鎖型空洞部では、図-8(a)に示すように、充填コンクリートはウェブとフェイスシエルの両方から拘束を受けるため、圧縮応力は対角方向に分布する。一方、開放型空洞部では、図-8(b)に示すように、フェイスシエルの面外曲げ剛性が低く、充填コンクリートを十分に拘束できないため、ウェブ付近の狭い範囲で圧縮応力は分布する。したがって、閉鎖型空洞部の方が開放型空洞部よりも、3軸圧縮状態により充填コンクリートの圧縮強度が高くなっている部分が多いことが解析結果より推察できた。

7. まとめ

圧縮力を受ける組積プリズムの力学的挙動を、以下の方法で3次元立体問題から2次元平面ひずみ問題に近似した有限要素法を用いて解析した。本解析で得られた知見を以下に示す。

- (1) 圧縮力を受ける組積プリズムの力学的挙動は、図-2に示す方法でZ軸方向のひずみを平面保持と仮定し、ポアソン効果により生じるX-Y平面内の応力を2次元平面ひずみ問題に近似した有限要素法を用いて解析的にほぼ表現可能である。
- (2) X-Y平面内でフェイスシエルとウェブに生じる変形に関しては、純引張変形成分の方が曲げ変形成分よりもかなり卓越している。一方、閉鎖型空洞部に充填されたコンクリートは圧縮ブレースとして組積単体より圧縮拘束力を受けており、その値はブレース内で7~8 kgf/cm²である。
- (3) 充填コンクリートの引張破壊はフェイスシエルとウェブの接合部の隅角から生じることが解析的に明らかとなり、実験結果と一致した。
- (4) HB3Jシリーズのように解放型の空洞部分のみからなる組積単体を用いたプリズムの圧縮強度の推定に際しては、組積単体の拘束による充填コンクリートの強度の上昇を考慮してはならないことが本解析からも明らかになった。
- (5) 閉鎖型空洞部と開放型空洞部では、圧縮拘束力の分布は図-8のように異なる。

以上、本論文では解析方法の妥当性と解析結果を用いて実験結果の解釈を行ったが、今後は、文献1で提案した推定式の理論的裏付けを本解析を用いて行う必要がある。

謝辞 本解析を行うに当たり、近畿大学理工学部建築学科昭和63年度卒業論民生 長浜幸司君の御協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 村上雅英、窪田敏行：れんがプリズムの圧縮強度に関する実験的研究、第10回コンクリート工学年次論文報告集、1988年、第10巻、第2号、pp601-606
- [2] 窪田敏行、村上雅英：圧縮力を受けるコンクリートブロックからなる組積プリズムの破壊挙動に関する実験的研究、第11回コンクリート工学年次論文報告集、1989年
- [3] W.F.Chen(安達、河角、色部監訳)：コンクリート構造物の塑性解析、丸善、1985年