

論文

[2009] 3次元剛体バネ要素法によるRC及び合成床版の終局強度解析

正会員 園田恵一郎 (大阪市立大学工学部)

正会員 鬼頭 宏明 (大阪市立大学工学部)

正会員○土生川真二 (三菱重工業(株)横浜製作所)

1. はじめに

本研究は現在その合理的な設計法の確立が課題とされている鋼・コンクリート合成構造物の終局状態に至る挙動を数値解析手法により追跡し、その終局強度特性を把握することを主目的としている。本研究で対象とする合成床版は薄鋼板の上になすれ止めとしてスタッドを溶植したものを型枠として用い、後打ちコンクリートと一体化させた複合構造物¹⁾であり、その終局状態において、鋼とコンクリートと境界面で力を伝達するなすれ止めの力学的特性に関連して、RC構造と同様にコンクリートのひびわれ、圧壊、せん断、鋼の降伏など不連続性の卓越した現象の組合せにより、構造物としての強度を失う。このことより、連続体力学にその基礎をおく有限要素法を用いて、この構造の終局状態での挙動を把握することは非常に複雑であり、経済的にも得策ではないと考えられる。

一方、構造物の終局状態での挙動を巨視的に評価しようと開発された数値解析法に剛体バネ要素法²⁾(以下、RBSMと略称する)がある。この手法は、実験的事実に基づき、構造物を幾つかの剛体要素とそれらを連結するバネによりモデル化し、非線形性の顕著な塑性現象や不連続性を取扱おうとしたものである。著者らはこのようなRBSMの特性に着目し、鋼板・コンクリート合成はりの2次元終局強度解析³⁾に適用した成果を踏まえ、ここでは床版を対象とし、その手法を3次元問題に拡張している。

解析モデルの設定に際しては、解析対象に対してその終局状態に支配的である主な破壊形状のみを考慮した低自由度の剛体バネ要素系に離散化している。ここでは、このようなモデル設定の妥当性を検証するために合成床版の破壊形式に対して多数の共通因子を有するRC床版の終局強度解析を行っている。この数値実験の結果を踏まえ合成床版の終局強度解析を行い、モデル実験との比較を通してその適用性を検討している。

2. 剛体バネ要素法で用いる材料構成関係

図1に示すような重心において6自由度 $u_g : \{u, v, w, \theta, \phi, \chi\}^T$ (後者3成分は回転に対応)を有する3次元剛体バネ要素系を用いる。ここでは要素自体は剛体であると仮定し、要素同志は各要素間に分布した垂直およびせん断バネにより互いに連結され、このバネに表面力によるエネルギーが集中して蓄えられると考える。RBSMの特徴として不連続な挙動を容易に表現できる点が挙げられる。すなわち、ここで取り扱うコンクリート材料のひびわれ、せん断すべり、圧壊および鋼・コンクリート界面での挙動等の不連続な現象を要素境界に存在するバネに直接導入することができる。

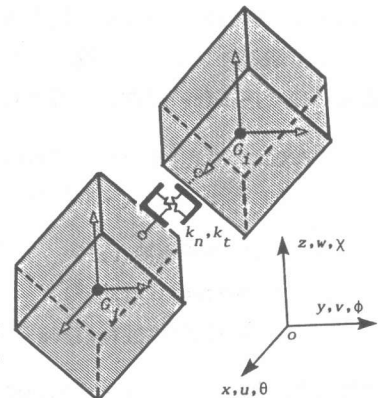


図1 3次元剛体バネ要素系

(1) コンクリートの圧縮特性

圧縮領域でのコンクリートの応力-ひずみ関係を図2に示すような一軸圧縮強度 σ_{co} で規定されるバイリニア関係で表わす。また圧縮限界ひずみ ϵ_{cu} (=0.35%)に達した時、圧壊に至ったと見なし応力を解放する。

(2) コンクリートの引張特性

引張強度 σ_{to} に応力が達した後、若干のひずみ軟化領域を与え引張限界ひずみ ϵ_{tu} (= 20 ϵ_{to})まで応力を低下させ、全応力が解放した時にひび割れが生じたと見なす。(図2参照)

(3) コンクリートのせん断特性

コンクリートのせん断すべり開始条件として、図3に示すせん断応力と直応力の相関関係によって与えられるモール・クーロン型の降伏曲面を採用した。降伏後、せん断ひずみが限界ひずみ γ_u (= 1.5 ϵ_{cu})に達した時、せん断破壊に至ったとし、応力を解放する。なお、ひびわれ面でのせん断伝達特性はひびわれ幅に依存するせん断剛性低下率により導入した。

(4) 鋼材の応力-ひずみ関係

鋼材の応力-ひずみ関係は垂直成分、せん断成分ともに、その降伏点により規定されるバイリニア関係で表わし、両者間での相関作用は無視できるものとする。

尚、RBSMにおける上述の材料特性のモデル化はRC構造の解析手法を示したUeda et al⁴⁾の研究に詳しい。

(5) スタッドの力学的特性

鋼・コンクリート合成構造物はその界面に配置されるずれ止め(スタッド)により鋼とコンクリート間でせん断力を伝達され、両者が一体となって外力に抵抗する。スタッドの力学的特性は既往の研究成果[J.W. Fisher⁵⁾]によれば、その強度: Q_u (kgf)、それに作用する力に対する鋼とコンクリート間のずれの関係: Q (kgf)- δ (cm)は次式で表される。

$$Q / Q_u = 31.5 \delta / (1 + 31.5 \delta)$$

$$Q_u = 0.5 A_s (f_c \cdot E_c)^{1/2}$$

A_s : スタッドの断面積(cm^2)
 f_c : コンクリート強度(kgf/cm^2)
 E_c : コンクリート弾性係数(kgf/cm^2)

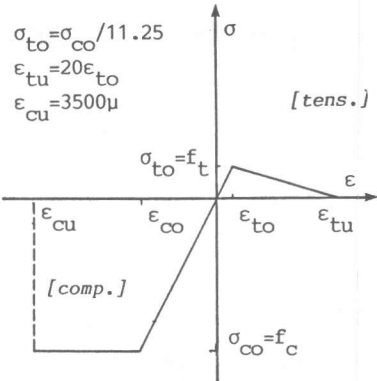
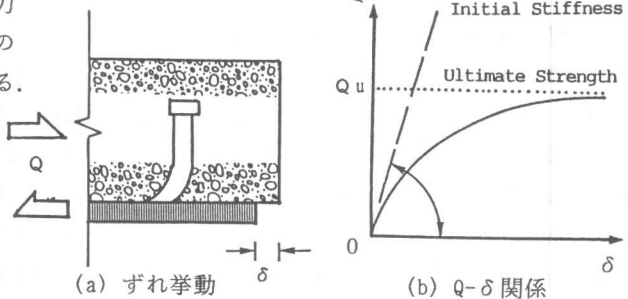


図2 コンクリートの直応力-直ひずみ関係

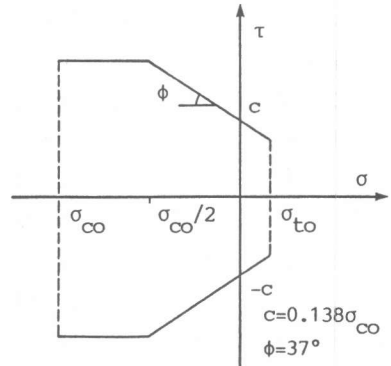


図3 コンクリートのせん断すべり条件

すなわち、鋼・コンクリート界面にてスタッドの特性は、図4に示す非線形性を有する接線方向バネとして導入している。なお、対応する鉛直バネにて接触条件を考慮している。

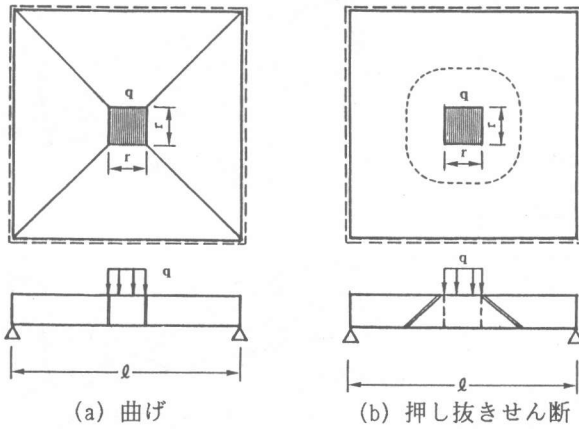


図5 RC床版の破壊形式

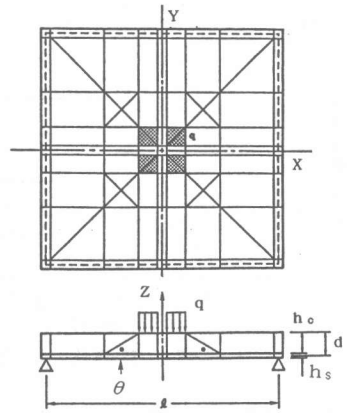


図6 離散化解析モデル

以上の非線形材料構成関係に基づく状態判定を要素境界面に設けた積分標本点で行い、反復収束計算(割線係数法)により終局強度解析を行う。

3. 解析モデルの設定

一般に、RBSM解析では実験的事実に即した要素分割が望ましいといわれる。そこで本研究ではRC床版の破壊形式に基づき、可能な限り低自由度の要素分割を試みた。ここではRC床版の破壊形式として、鉄筋の降伏、コンクリートの圧壊に支配される曲げ破壊(図5(a))と荷重位置近傍での局所的な押抜きせん断破壊(図5(b))を参照し、図6に示す要素分割を施した。解析は周辺単純支持された等方配筋正方形床版を対象とし、1/4領域(全自由度数396)を抽出した。鉄筋は鉄筋比に準じ等価な鋼板要素に置換している。単純支持条件は、支承線上に存在する要素の重心において、支承線に沿った回転、支承線に直行する並進以外の自由度を拘束するものとした。

表1 基本となるRC床版の諸元

	名称	単位	基本値
寸法	スパン長	l (cm)	100
	有効高さ	d (cm)	10
	鉄筋比	p_w (%)	2.0
	荷重辺長	r (cm)	10
	斜めひび割れ角度	θ ($^\circ$)	30
材料特性	鉄筋の弾性係数	E_s (kgf/cm ²)	2.1×10^6
	鉄筋のポアソン比	ν_s	0.3
	鉄筋の降伏強度	σ_y (kgf/cm ²)	4000
	コンクリートの弾性係数	E_c (kgf/cm ²)	2.4×10^5
	コンクリートの圧縮強度	f_c (kgf/cm ²)	300
	コンクリートの引張強度	$f_t/11.25$	26.67
	コンクリートのポアソン比	ν_c	1/6

4. RC床版の終局強度解析

本章の目的は合成床版に対する予備解析として、RC床版を対象として広範なパラメトリック解析を実行し、得られた終局強度と破壊形式から解析手法の適用性を検証することにある。曲げに対し降伏線理論を、押抜きせん断に対し角田ら³⁾の算定式を参照した。解析に際し、基準値とした諸元を表1に示す。

まず、要素分割方式の妥当性を調べるため

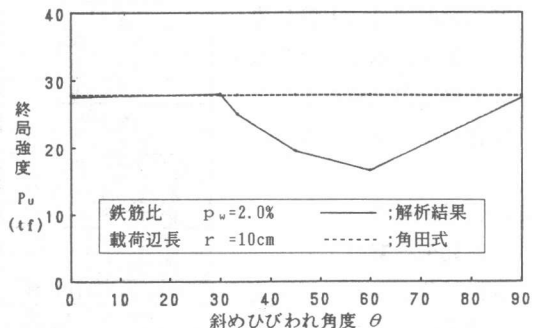


図7 斜めひびわれ角度の影響

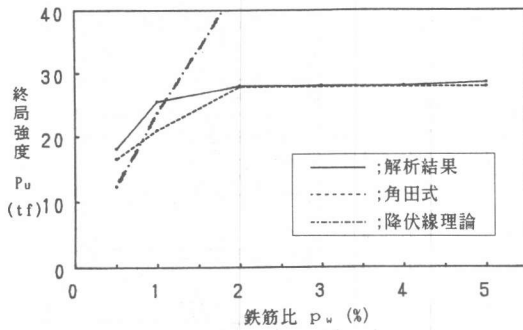


図8 鉄筋比: p_w の影響

に斜めひびわれ角度: θ に着眼した。図7は、その一例であるが、 $\theta = 30^\circ$ 程度を上限として良好な解が得られている。なお、これは鉄筋比を2%(せん断支配領域)に設定した例で、曲げ破壊に関する参照値は省略している。 θ を小さく(コーン面積を大きく)すると、斜めひびわれ面が支承線を跨ぐ恐れがあるので、以下の解析では θ を 30° に固定した。鉄筋比を因子とした解析例(図8)を示す。低鉄筋比領域にて曲げ耐力との関係により終局強度が降下傾向を呈する点と鉄筋比が3%程度を越えると終局強度に対する寄与がなくなる点など実験的事実に対する良好な追従性が確認できる。得られた破壊形式を図9に示す。延性的な曲げ破壊:(a)、脆性的な押抜きせん断破壊:(b)の性状が粗な要素分割にも係わらず、よく表現できている。図10は、得られた解析結果(終局強度: P_u)を対象としたパラメータごとに整理したものである。参照した算定値: P_y は曲げまたはせん断破壊荷重の小さいを採った。解析値は参照値に比し、0.75~1.30の範囲で1.0近傍に集まっており、本手法はRC床版の終局強度解析手法として有用であるといえる。

5. 合成床版の 終局強度解析

解析対象としたモデル実験供試体の諸元を表2に示す。すなわち、スタッド配

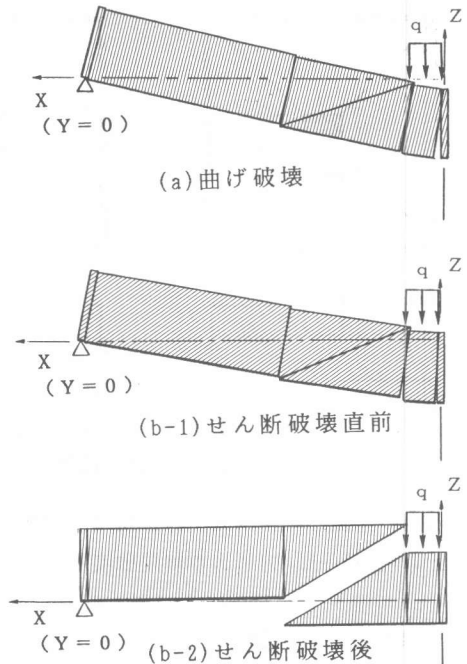


図9 RC床版の破壊状況(1/2スパン)

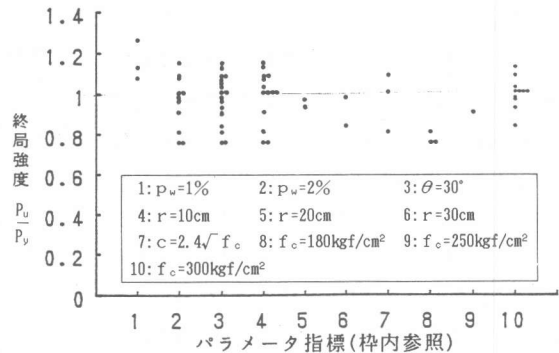


図10 RC床版の解析結果一覧

表2 合成床版(モデル実験)の諸元

名称	単位	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5
スタッドの配置		端粗	端密	端2	全粗	全密
スパン長	l (cm)	137.5				
コンクリート厚	h_c (cm)	12.0				
鋼板厚	h_s (cm)	0.6				
スタッドの高さ	h_{stud} (cm)	8.0				
スタッドのせん断耐力	Q_u (kgf)	6862				
スタッドの限界ずれ	δ_{limit} (mm)	1.2				
鋼材の弾性係数	E_s (kgf/cm ²)	2.11334×10^6				
鋼材の降伏応力	σ_y (kgf/cm ²)	3573.8				
鋼材の ν アソシ	ν_s	0.2806				
コンクリートの弾性係数	E_c (kgf/cm ²)	2.70071×10^6				
コンクリートの ν アソシ	ν_c	0.212				
コンクリートの圧縮強度	f_c (kgf/cm ²)	395.5				
コンクリートの引張強度	f_{ot} (kgf/cm ²)	27.97				

表3 合成床版の終局強度と破壊形式

供試体名	終局強度 t_f		鉄板の応力 (kgf/cm^2)	破壊形式	
	収束	発散			
CASE 1 [STUD 離散化]	S 1	10	12	99.5	付着
	S 2	35	40	2683.0	付着
	S 3	45	50	3510.0	曲げ
	S 4	32.5	35	3573.8	曲げ
	S 5	60	65	3573.8	押抜
CASE 1' [STUD 離散化]	S 1	17.5	20	805.0	付着
	S 2	40	45	1842.4	付着
	S 3	55	-	1269.2	付着
	S 4	40	45	1559.9	付着
	S 5	70	80	998.3	抜落
CASE 2 [STUD 分散化]	S 1	30	35	1066.2	付着
	S 2	45	50	1807.7	付着
	S 3	45	50	1649.7	押抜
	S 4	47	50	1539.3	押抜
	S 5	46	47	1690.8	押抜
実験 結果	S 1	27.00	省略		付着
	S 2	27.88	"		押抜
	S 3	30.40	"		押抜
	S 4	31.90	"		押抜
	S 5	41.85	"		押抜

置方式を因子とした5体の供試体について解析を実行した。設定した因子は表2に略称で示す通り、S1：端粗(図11(a)参照:端部1列に粗な配置(250mm間隔))、S2：端密(端部1列に密な配置(125mm間隔))、S3：端2(端部2列に密な配置)、S4：全粗(全体均一に粗な配置)、S5：全密(図11(b)参照:全体均一に密な配置)である。図11は、解析対象としたモデル実験供試体の破壊(ひびわれ)状況を、コンクリート上面(載荷面)にて描いたものであり、供試体は端部張り出し形式で全辺単純支持(図中...が支承線)とし、スパン中央に等分布部分荷重(載荷面積：125mm×125mm)を載荷した。最も粗な配置のS1は曲げひびわれの形成が観察されているが、鋼板の降伏を伴わないずれ変形に起因する付着せん断破壊形式:(a)を、一方、最も密な配置のS5は載荷部にて局所的な押抜きせん断破壊形式:(b)を呈した。

このような相異なる破壊形式を表現するために、前章にて妥当性を確認した要素分割方式を基に図12の方式を用いた。スタッドのモデル化においては、2(5)節の力学的特性を用い、2種のモデルを設定した。すなわち、①供試体のスタッド配置位置に一組のバネにより表現し離散的に配置したモデル(CASE1.)；点でせん断接合(図12参照)、と②そのせん断強度： Q_u をスタッド配置間隔： l_s により平均化し見かけの粘着項； $c' =$

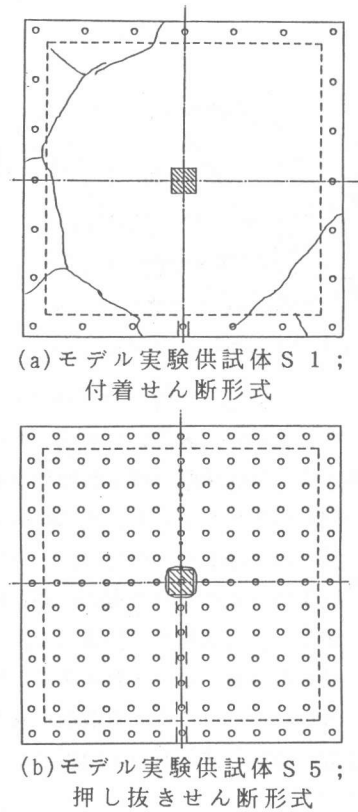


図11 合成床版の破壊状況

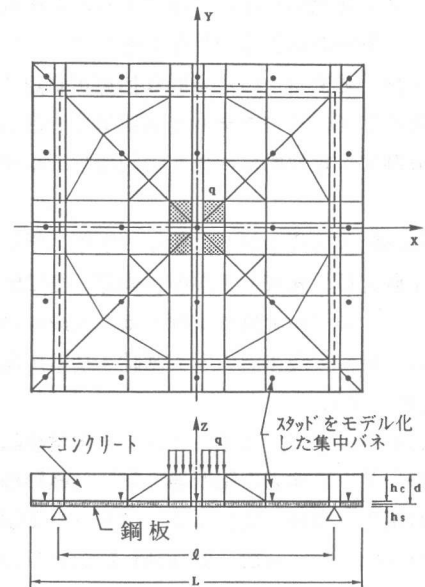


図12 鋼板・コンクリート合成床版の離散化解析モデルの一例

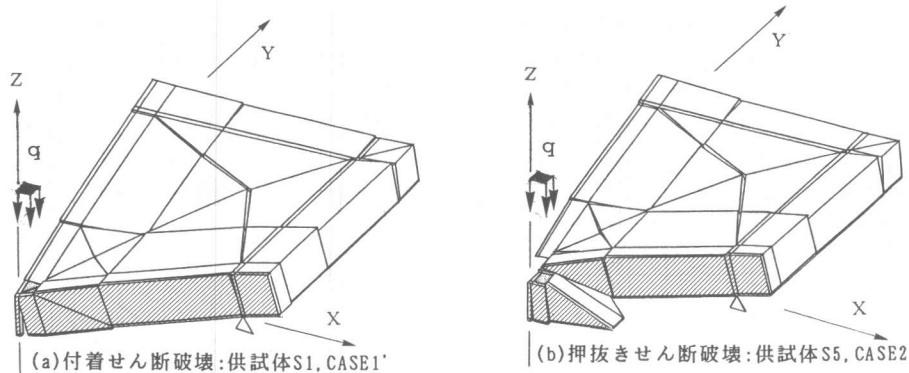


図13 合成床版の破壊状況(解析結果): x 軸断面

$Q_u/1s^2$ と見なして、界面に分散化したモデル(CASE2.) ; 面でせん断接合を設定した。また実験時の観察から、合成床版ではずれ変形が顕著であり、そのため支承線上の鋼板は並進せず支承線に沿った回転のみ生じており、先に解析を実行したRC床版とは若干の差異がみられた。この挙動を境界条件に加味したものをCASE1'.2'としたが、CASE2'は解の性状に対し影響が殆どなかった。

解析結果の一覧をモデル実験結果と併せて表3に示す。解析結果の概略を記述すれば、スタッド配置が密で、局所的な押抜きせん断破壊に支配されるものには、スタッドの伝達力特性を分散的に評価したCASE2.が、またスタッド配置が粗で、ずれ変形を伴う付着せん断破壊を起こすものには、スタッド位置のみで離散的にせん断力を伝達させ、そのずれ特性に考慮を加えたCASE1'が終局強度、破壊形式(図13)の両観点から良好な結果を与えるといえる。

6. まとめ

3次元剛体バネ要素法によりRC床版および鋼板・コンクリート合成床版の終局強度解析を行い、実験的事実との比較を通して、その適用性を検討した。その結果、RC床版では本手法による終局強度特性の定量的な把握が確認でき、加えて合成床版に対しても、スタッドの配置方式に対応して、そのモデル; 離散型と分散型を使い分ければ、主な破壊形式のみ考慮した低自由度な分割でも定性的な評価が可能な解析手法であるといえる。

[謝辞]本研究に対し、明星大学理工学部・竹内則雄講師、(株)竹中工務店技術研究所・上田眞稔主席研究員、(株)安部工業所技術部・樋口晴紀課長には解析モデルの設定に関し貴重な助言を頂いた。また、モデル実験の実施では、大成建設(株)・井櫻潤示氏(当時大阪市大工学部学生)に、図面作成では、大阪市立大学大学院・長谷川明生君のご協力を頂いた。ここに謝意を表する次第です。

[参考文献]

- 1)園田, 堀川, 鬼頭, 木曾: 土木学会論文集, No. 404/1-11, 1989.
- 2)川井: 固体力学諸問題の離散化極限解析, 生研セミナーテキスト(コース76), 1982.
- 3)園田, 鬼頭, 奥谷: コンクリート工学年次論文報告集, vol. 11-2, 1989.
- 4)Ueda, Takeuchi, Higuchi & Kawai: Int. Conf. on Comp. Aided Anal. & Design of Concrete Struc., Yugoslavia, 1984.
- 5)Ollgaard, Slutter & Fisher: Engineering Journal of AISC, vol. 5, 1971.
- 6)角田, 井藤, 藤田: 土木学会論文報告集, No. 229, 1974.