

論 文

[2065] 剛体バネ要素法による RC はり及び合成はりの終局強度解析

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○奥谷 知明（大阪市立大学大学院）

1. はじめに

本研究は鋼板・コンクリート合成構造物の終局状態に至る挙動を解析的な手法により追跡し、その終局強度を定量的に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はりは薄鋼板の上にず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ず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繁雑であり、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¹⁾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。本研究はこのような剛体バネ要素法の特性に着目し、この手法を鋼板・コンクリート合成はりの終局強度解析に適用することを試みた。

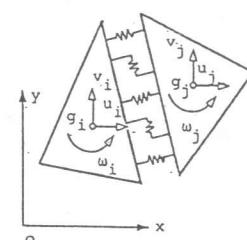
解析モデルの設定に際しては、解析対象に対してその終局状態に支配的である主な破壊形状のみを考慮した低自由度の剛体バネ要素系に離散化している。ここでは、このようなモデル設定の妥当性を検証するために合成はりの破壊形式に対して多数の共通因子を有するRCはりの終局強度解析を行っている。この数値実験の結果を踏まえ合成はりの終局強度解析を行い、モデル実験との比較を通してその適用性を検討している。

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3自由度 $\mathbf{u}_g : \{u, v, w\}^\top$ を有する2次元要素を用いる。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。剛体バネ要素法の特徴として不連続境界での挙動を容易に表現できる点があげられる。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、圧壊等の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。

(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一ひずみ関係を図2に示すよう一軸圧縮強度 σ_{c0} で規定されるバイリニア関係で表わす。また図1 2次元剛体バネモデルの圧縮限界ひずみ ε_{cu} ($=0.35\%$) に達した時、圧壊に至ったとみなしありを解放する。



(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} ($= 20 \varepsilon_{to}$) 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その後、せん断ひずみがせん断限界ひずみ γ_u ($= 1.5 \varepsilon_{cu}$) に達した時、せん断破壊が生じたとし、応力を解放する。なお、ひびわれ面でのせん断伝達特性は図4に示す Cedlin²⁾ のせん断剛性低下率により評価した。

(4) 鋼材の応力一ひずみ関係

鋼材の応力一ひずみ関係は垂直成分、せん断成分とともに、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。

3. スタッドのモデル化

鋼・コンクリート合成構造物はその境界面に配置されるずれ止めにより鋼とコンクリートが結合され、両者が一体となって外力に抵抗する。ここで取扱うスタッドは典型的なずれ止めの一種であり、本研究の対象とする合成はりにおいて重要な構造部材である。スタッドの力学的特性を論じた既往の研究にJ.W.Fisher³⁾ らによるものがあり、実験的手法によりその強度： 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)が次式のように定量的に評価されている。

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

$$Q_u = 0.5 As (F_c \cdot E_c)^{1/2}$$

As : スタッドの断面積(cm²)

F_c : コンクリートの圧縮強度(kgf/cm²)

E_c : コンクリートの初期弾性係数(kgf/cm²)

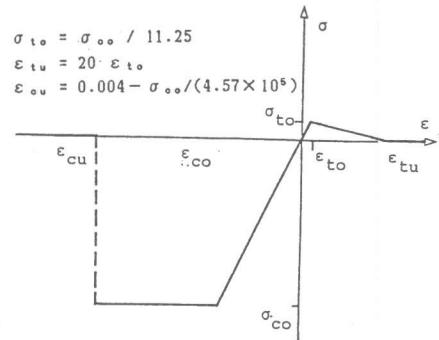


図2 コンクリートの直応力一ひずみ関係

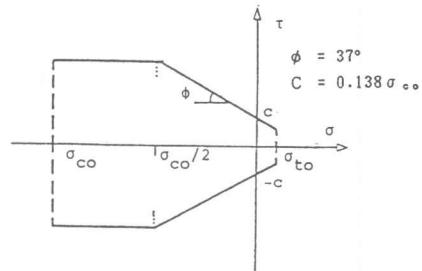


図3 コンクリートの降伏曲面

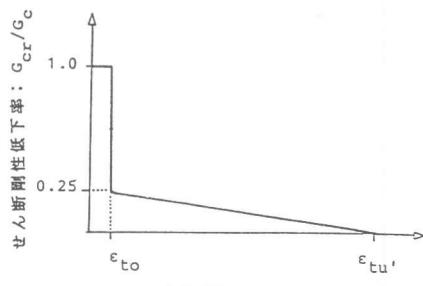


図4 ひびわれ面でのせん断剛性

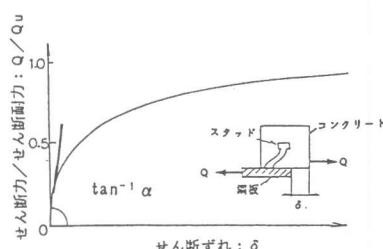


図5 スタッドの力学的特性

スタッドの力学的特性は、図5に示す初期ずれ係数 α で一定値に漸近する非線形性を有する接線方向バネに

モデル化され剛体バネ要素法に導入される。なお、鋼板とコンクリートの境界面は垂直方向に連続しているものと仮定している。

4. RCはりの終局強度解析

(1) 解析モデル

解析対象は図6に示す2点荷重を受けるスターラップを有さない単鉄筋RCはりである。RCはりの終局強度特性に関する要因としては、せん断高さスパン比(a/d)、主鉄筋比($p=A_s/bd$)、コンクリートの圧縮強度(σ_{co})等があり、これらの組合せにより異なる破壊形式を呈する。すなわち、 a/d が大きく、 p が小さければ、最大曲げモーメントを受ける断面下端より発生する曲げひびわれに起因した主鉄筋の降伏、その上部のコンクリートの圧壊により強度を失う曲げ破壊形式(図6 a))を呈する。また、 a/d が小さく、 p が大きければ、せん断スパン内に発生する斜ひびわれに誘発されるせん断ひびわれ、鉄筋の付着破壊により強度を失うせん断破壊形式(図6 b))を呈する。

周知のように剛体バネ要素法は要素数はもとより要素分割の方向によっても解が大きく支配される。本研究では、自由度はできる限り少なくし、複雑な非線形特性をバネ特性によって表現することを目指しているので、既往の実験で知られている破壊モードを含む最小限の要素分割数とし図6 c)を選んだ。なお、対称性を考慮して半スパンを対象領域とする。このモデルはコンクリート部2層、鉄筋部1層から成り、曲げ破壊形式に対応して、スパン中央部、載荷点部での鉛直方向ひびわれと、せん断破壊形式に対応して、載荷点部から45°方向、支点方向への斜めひびわれを表現できるようにした。主鉄筋比($p=A_s/bd$)は図6 c)にて $A_s=t_{sb}$, $d=t_c+t_s/2$ として表わされる。

(2) 数値解析結果

解析に用いた諸定数を表1、2に示す。RCはりの終局強度に影響を及ぼすパラメータとしてはせん断スパン高さ比(a/d)、主鉄筋比(p)、コンクリートの圧縮強度(σ_{co})、有効高さ(d)、鉄筋の降伏点(σ_y)を取り上げ、表中[]で示した値を基準値としてパラメトリック解析を行った。

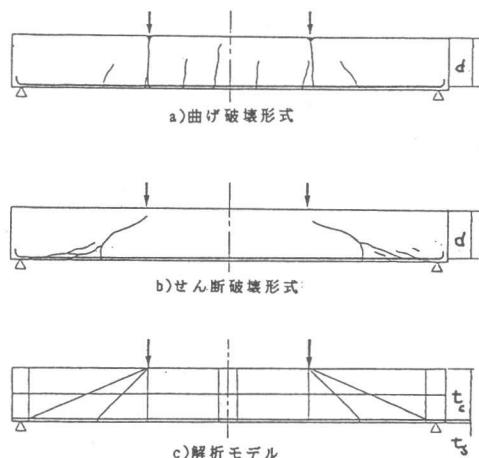


図6 RCはりの解析モデル

表1 解析用いた材料定数

コンクリート	初期ヤング係数	E_c	2.40×10^5
	ポアソン比	ν_c	1/6
	圧縮強度	σ_{co}	[300]
鋼材	初期ヤング係数	E_s	2.10×10^6
	ポアソン比	ν_s	0.3
	降伏点	σ_y	[5000]

注) 応力の単位はkgf/cm², []は基準値

表2 RCはりの諸定数

スパン	l	150
幅	b	1
有効高さ	d	[18]
せん断スパン	a/d	[2.5]
高さ比	t_c/t_s	[2.0]
主鉄筋比	p	[2.0]

注) 長さの単位はcm, []は基準値

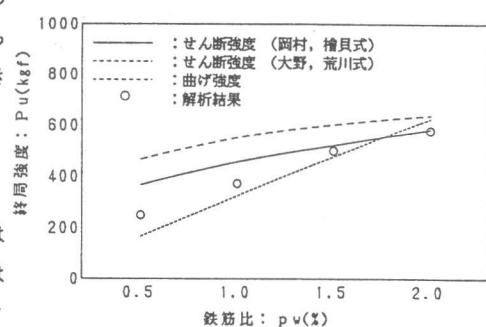


図7 RCはりの終局強度($\sigma_y=2400\text{kgf/cm}^2$)

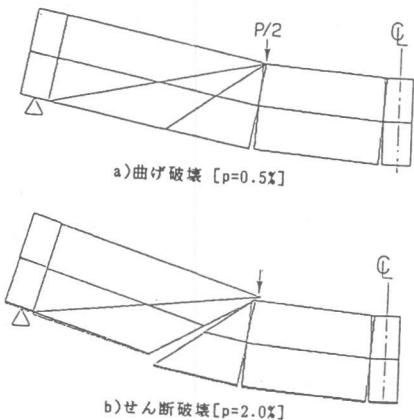


図8 R C はりの破壊性状

変化させたパラメータを横軸にとり、解析より得られた終局強度と既存の実験公式とを比較したものが図7である。比較に用いたのは、R C はりのせん断強度として、土木学会コンクリート標準示方書の基礎資料となった岡村・檜貝式⁴⁾と建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準の大野・荒川式⁵⁾による値である。曲げ破壊に関しては等価ブロック法⁶⁾により算出した。

まず、鉄筋の降伏点(σ_y)を 2400kgf/cm^2 として、鉄筋比(p)を変化させたものが図7である。この領域では $p=2.0\%$ を除いては曲げ破壊が支配的になるが、構成関係にてコンクリートのひずみ軟化域を設けているためにその強度を若干高めに評価している。解析より得られた典型的な破壊時の変形図を図8に示す。曲げ破壊形式に対応する図8 a)では、載荷点直下で著しい曲げ変形を生じて鉄筋層の降伏とコンクリートの圧壊を伴って破壊に至っている。一方、せん断破壊形式に対応する図8 b)では、前述の変形は4倍の断面を有する鉄筋層により抑制され、 45° 方向のせん断ひびわれ面での変形が卓越しており、実験で観察される変形性状をよく表現できている。

次に、せん断問題に対する本手法の適用性を検討するために鉄筋の降伏点(σ_y)を 5000kgf/cm^2 として、せん断破壊が支配的となる領域で、各パラ

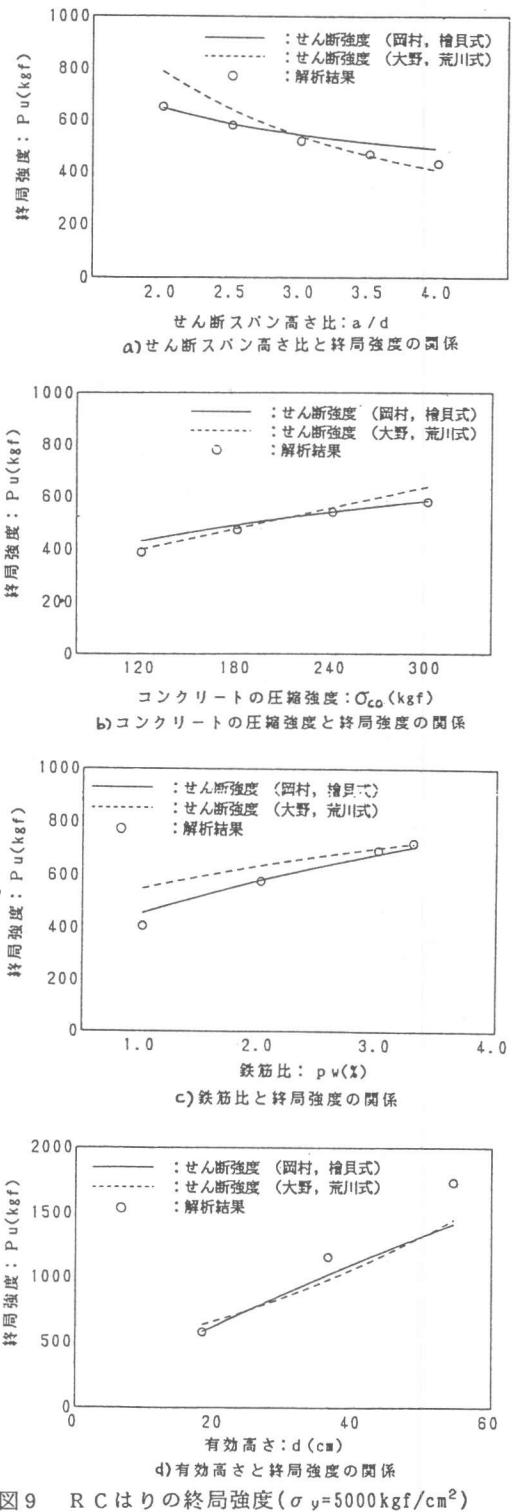


図9 R C はりの終局強度 ($\sigma_y=5000\text{kgf/cm}^2$)

メータを変化させたものが図9である。寸法効果に関連する有効高さに対するものを除いて広範なパラメータに渡ってその終局強度を定量的に評価できているといえる。

5. 合成はりの終局強度解析

(1) 解析モデル

モデル実験に用いた合成はり供試体の概要を図10に、その諸元を表3に示す。各供試体は合成はりの終局強度に及ぼす因子として、スタッドの強度、すなわち径(D)と高さ(H)、並びにその配置間隔(λ)を取り上げ、その値を変化させている。なお、スタッドの径と高さに比例して鋼板厚(t_s)も変化させている。載荷条件として、その終局状態においてせん断破壊形式が支配的になるようにせん断スパン高さ比(a/d)を2.5に設定した。これにより、その状態にて鋼とコンクリート間のせん断力伝達特性が重要となり、各供試体のスタッドの差異による終局強度の違いが明確になるようにした。

合成はりに対する要素分割はRCはりに対するそれと同一なものを用いている。コンクリートと鋼板の境界面では、3.で示した手法によりスタッドをモデル化したバネにより、せん断力を伝達させている。

(2) 数値解析結果

図11は数値解析とモデル実験より得られた終局強度の比較を行ったものである。図中 α はスタッドの初期ずれ係数を示しているが、Fisher³⁾の提案した $\alpha = 31.5$ を直接採用したものは終局強度を低く評価し、モデル実験において観察されなかった過大なずれ変形を伴って破壊に至っていた。この理由としては、用いた提案式は押抜き実験による単独もしくは数本のスタッドに対する純せん断載荷での挙動を表したものであり、ここで対象とする合成はりでの載荷状態ならびにスタッドの配置とは異なることが考えられる。この様な考察に基づき初期ずれ係数を大きく、すなわちスタッドの剛性を高くし解析した例を図中に併記した。合成はりにおけるスタッドの初期ずれ係数を大きく評価することにより破壊形式はモデル実験にて観

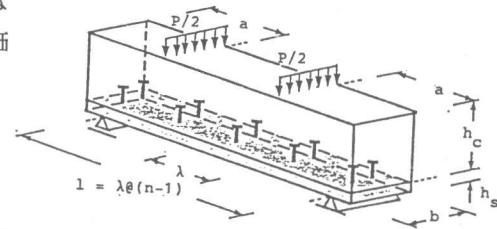


図10 鋼板・コンクリート合成はり

表3 合成はりの諸定数

スパン	l	150
幅	b	30
コンクリート厚	t_c	18
コンクリート強度	σ_{co}	280
鋼板厚	t_s	0.6, 0.9
有効高さ	d	18.3, 18.5
せん断スパン	a/d	2.5
高さ比		
スタッド径	D	1.3, 1.9
高さ	H	10, 13
配置	λ	10, 15,
間隔		21.4, 30

注) 長さの単位はcm、応力の単位はkgf/cm²

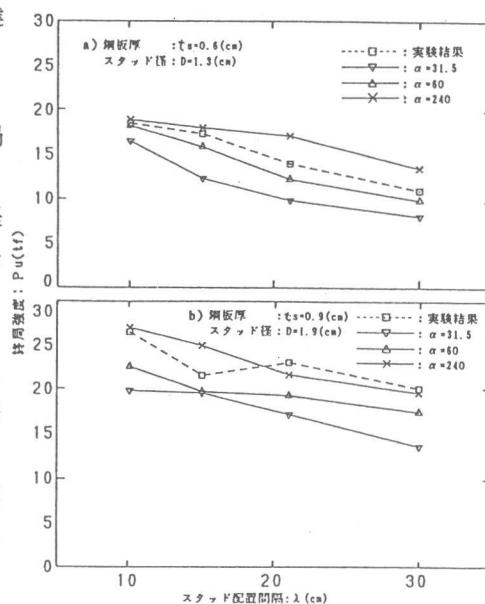


図11 合成はりの終局強度

察されたせん断破壊形式を示し、その終局強度を定量的に把握できる結果を得た。

解析から得られた破壊進行状況とモデル実験で観察されたものを対比したのが図12である。実験結果は供試体側面にて観察されたひびわれを描いたものである。

1) $P=12\text{tf}$ にて、解析では載荷点直下ならびにスパン中央に変形が集中し、直応力の解放、すなわちひびわれを生じている。この現象は、実験で同位置に発生した曲げひびわれに対応している。2) $P=20.0\text{tf}$ にて、解析では、前段階の変形に加え、載荷点から 45° 方向にて同等な変形が生じており、いずれもはりの中央軸まで進展している。3) $P=26.5\text{tf}$ ：破壊時にて、解析では載荷点から 45° 方向での変形が卓越し、載荷点近傍まで進展おり、それを境にしたせん断変形も認められる。実験においても斜めひびわれの発生を伴うせん断破壊形式を呈し、解析結果はその破壊性状をよく表現できているといえる。

以上定性的ではあるが、本手法により、合成はりの破壊進行状況を説明できる結果が得られた。

6. 結び

2次元剛体バネ要素法を用いてRCはりならびに合成はりの終局強度解析を行いその適用性を検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 破壊時に観察される主なひびわれのみを考慮した粗い要素分割を用いることの妥当性を、合成はりとその破壊形式において複数の共通点を有するRCはりの終局強度解析を行うことにより検討した。得られた終局強度、破壊形式は広範なパラメータにわたり良好な値を与えることを既往の実験結果との比較を通して検証できた。
- (2) 鋼・コンクリート合成はりに対して、初期ずれ係数に対する検討項目を有するが、鋼とコンクリートのずれ止めとして用いられるスタッドをバネに置換することにより剛体バネ要素法の定式化に容易に組み込めることを示した。またこの手法による解析結果は、モデル実験結果に対し良好な一致を示し、本手法の鋼・コンクリート構造物に対する有用性を確認した。

[参考文献]

- 1) Kawai, T.: 造船学会論文集, No. 141, 1977.
- 2) Cedolin, L. et al: Proc. ASCE, No. EM3, 1977.
- 3) Fisher, J. W. et al: AISC Engineering Jour., April, 1971.
- 4) Okamura, H. et al: Proc. of JSCE, No. 300, 1980.
- 5) 大野他: 建築学会論文集 No. 66, 1960.
- 6) 岡田: "鉄筋コンクリート工学", 朝倉書店, 1972.

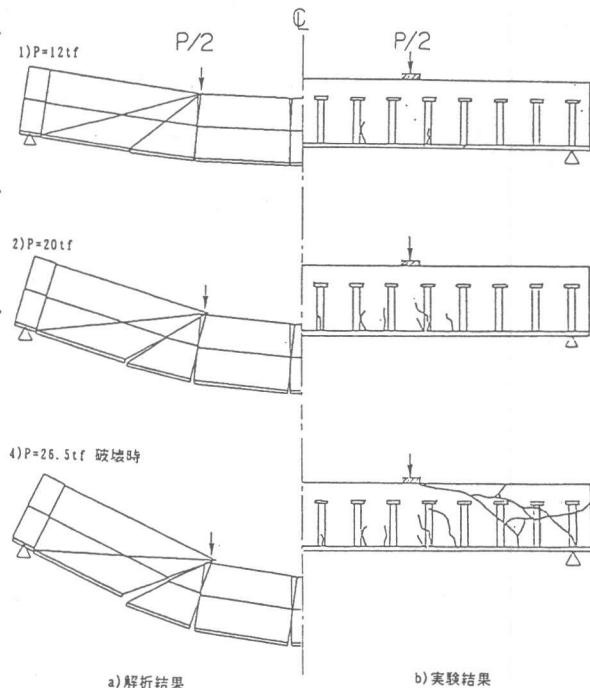


図12 合成はりの破壊進行状況 ($D=1.9\text{cm}$, $\alpha=240$)