

# 剛体-ばねモデルによるコンクリート構造の非線形解析に関する研究

著者	富田 充宏
著者別名	Tomita, Mitsuhiro
雑誌名	博士学位論文要旨 論文内容の要旨および論文審査結果の要旨 / 金沢大学大学院自然科学研究科
巻	平成10年6月
ページ	334-338
発行年	1998-06-01
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/16166">http://hdl.handle.net/2297/16166</a>

氏名	富田 充宏
生年月日	
本籍	石川県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第160号
学位授与の日付	平成10年3月25日
学位授与の要件	論文博士(学位規則第4条第2項)
学位授与の題目	剛体-ばねモデルによるコンクリート構造の非線形解析に関する研究
論文審査委員	(主査) 梶川 康男 (副査) 尾田 十八, 前川 幸次, 榎谷 浩, 竹内 則雄

## 学位論文要旨

**Abstract:** Rigid-Bodies-Spring-Model (RBSM), which was proposed by KAWAI in 1977, is a numerical analysis method developed as a limit analysis of structures, in which the total structure is idealized as the assemblage of rigid body elements connected by two kinds of distributed springs. This idealization can read the comprehensive expression of discontinuous behavior due to cracking and slippage that affect a failure of concrete structures.

The purpose of this study is to apply the method of RBSM, which we have proposed the modeling of concrete structures, in order to explain analytically the ultimate resistance and the mechanical behavior of the following precast concrete members (1),(2) and reinforced concrete members (3),(4):

- (1) Integrated beams made of two precast concrete members longitudinally tightened by prestressing
- (2) Jointed corner of rigid frame made of two precast concrete members tightened at right angles by prestressing bars
- (3) Reinforced concrete beams damaged by corrosion of reinforcement and subjected to cyclic loading
- (4) Reinforced concrete members subjected to combined axial compressive force and reversed cyclic bending moment

As a result, it was confirmed that the analytical method of RBSM was effective for analyzing the ultimate resistance and the mechanical behavior of the above-mentioned concrete structures.

コンクリート構造物の終局状態での耐力ならびに変形性状を解明する一手法として、数値解析法が考えられる。代表的な数値解析手法として有限要素法が考えられるが、連続体を基礎とする理論のため、コンクリート構造物のように任意の方向のひび割れ、破壊荷重時近傍の圧壊の発生等複雑な破壊現象を呈する場合はその表現が難しく、不連続な部分に特殊な取り扱いを行わなければならない。一方、強い非線形領域を対象とした解析法として剛体-ばねモデルと称する新しい離散化モデルが、KAWAI (1977) により提案された。この解析法は要素自体を剛体と仮定し、要素同士を各要素面上に分布するばねにより連結し、このばねにエネルギーが集中して蓄えられると評価したモデルであり、要素境界面を巨視的および微視的に取り扱えば、構造物の不連続部および鉄筋とコンクリートの付着性状等異種な材料の接触界面やコンクリートのひび割れ面等の不連続面を容易に表現できる。このことから、不連続面を有するプレキャスト部材の耐力ならびに変形の評価、劣化してひび割れを有するコンクリート部材や繰り返し荷重によりひび割れ面の開閉を伴うコンクリート部材の変形性状などの非線形解析に適した解析法と考えられる。以上の観点から、本論文はプレキャスト部材や繰り返し荷重を受けるコンクリート部材の耐力および変形性状を解明する解析法として剛体-ばねモデルを適用するため、上記の解析対象への適用手法の開発を行い、本研究の手法を適用した剛体-ばねモデルの解析法の有効性を明らかにしたものである。以下に、本研究で得られた結果を章別に述べる。

### 「第2章 剛体-ばねモデルの概要」

本研究で用いた剛体-ばねモデル(図-1)の2次元平面応力問題に対する定式化と鉄筋コンクリート材料の構成則および非線形計算法の概要について述べた。また、構造的に最も簡単な単鉄筋RCばりの数値解析例を示し、この解析結果より剛体-ばねモデルの鉄筋コンクリート部材の非線形解析に対する有効性および本研究で用いている材料特性の妥当性を示した。

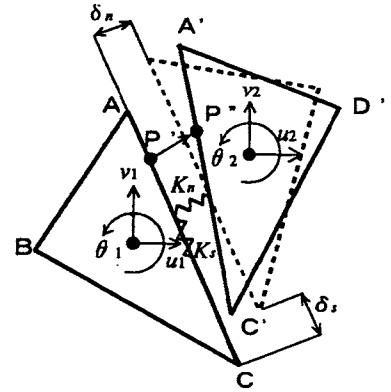


図-1 剛体-ばねモデルの平面要素

### 「第3章 プレキャストPC部材接合部の曲げ挙動に関する解析」

プレキャストプレストレスト部材接合面の曲げ挙動の解析に剛体-ばねモデルの適用を試み、解析において課題となる接合面のばね定数の同定およびプレキャストPC部材のモデル化(図-2)に対する妥当性について曲げ実験結果と比較、検討を行った。部材接合面のばね定数については、引張に対しては剛性を持たず、圧縮に対しては接合面の凹凸の影響および回転変形の大きさを考慮したばね特性とし、部材接合面のばね定数を変化させて解析を行い、実験結果と比較し圧縮に対してのばね定数の同定を試みた。また、PC部材のモデル化は、材料非線形性を考慮した要素としてPC鋼棒を表現し、PC鋼棒要素とコンクリート要素を表-1に示すように付着特性を持つばねのみで結合させ、グラウト処理および無処理の構造の違いを評価した。得られた結論を以下にまとめる。

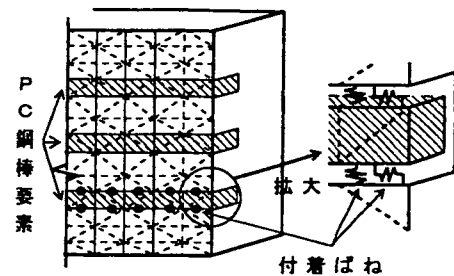


図-2 PC部材のモデル化

表-1 付着ばね定数

	無処理	グラウト処理
垂直方向ばね	コンクリートの剛性 $E=36.7\text{kN/mm}^2$	コンクリートの剛性 $E=36.7\text{kN/mm}^2$
せん断方向ばね	$K_s=0.0\text{N/mm}^3$	$\tau$ -S曲線の傾き 初期 $K_s=62.5\text{N/mm}^3$ すべり後 $K_s=8.0\text{N/mm}^3$

(1) 剛体-ばねモデルの適用により、プレキャストPC部材の一体化した状態から、部材接合面下縁の開口にともなう非線形曲げ挙動を解析的にかなりの精度で推定できることが明らかになり、この解析法の妥当性が認められた。本解析法は、この種の構造の有効な一解析法であると考えられる。

(2) 接合面にモルタル処理を施さない場合には、接合面の凹凸の影響および回転変形があるために、接合面のばね定数の算定にはコンクリートのヤング係数の1/10以下を用いることが望ましい。また、付着試験から得られた付着特性をせん断ばね定数として取り入れる簡単な付着のモデル化によりPC鋼棒のひずみ量を定量的に解析できる。

#### 「第4章 プレキャストPC製ラーメン隅角部の挙動に関する解析」

曲げ、せん断および軸力が作用した場合のプレキャストPC製ラーメン隅角部（図-3）の変形特性を、実験および剛体-ばねモデルの非線形解析により明らかにした。また、接合部に関する設計上の仮定である剛結合の妥当性についても検討を行った。得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 剛体-ばねモデルの適用により、プレキャストPC部材の隅角部の変形特性およびアンボンドPC鋼棒のひずみの変化を解析的にかなりの精度で推定できることが明らかになった。
- (2) プレキャストPC部材の隅角部を剛結合と仮定しても設計の荷重の範囲では、差し支えないと考えられる。
- (3) プレキャストPC部材の隅角部の終局時までの挙動は、PC鋼棒の緊張位置に大きく影響される。また、最大耐力は通常の破壊抵抗モーメントの算定法により求められるが、本研究ではアンボンドに対する低減係数が1.0の場合に実験結果と一致した。

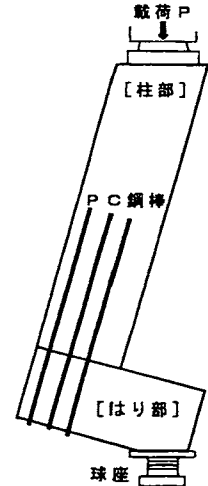


図-3 ラーメン隅角部

#### 「第5章 鉄筋腐食により劣化したRC部材の曲げ挙動に関する解析」

鉄筋腐食によって損傷を受けたRC部材の耐力低下、破壊形状および変形挙動を解析的に明らかにするため、腐食による劣化要因である鉄筋軸方向に発生する縦びわれやコンクリートと鉄筋の付着破壊などを解析に反映するためのモデル化を行い、本モデル化の妥当性および剛体-ばねモデルの有効性について検討を行った。腐食による劣化要因のモデル化は、図-4に示すように鉄筋とコンクリートの付着を森田・角の構成則に準拠した履歴特性で考慮し、腐食ばりに対応する引き抜きによる付着強度試験より剛性および付着応力を決定した。また、主鉄筋間の底面かぶり部のコンクリートは、載荷荷重に抵抗しないものと考え、その部分を断面の欠損として扱った。得られた結論を以下にまとめる。

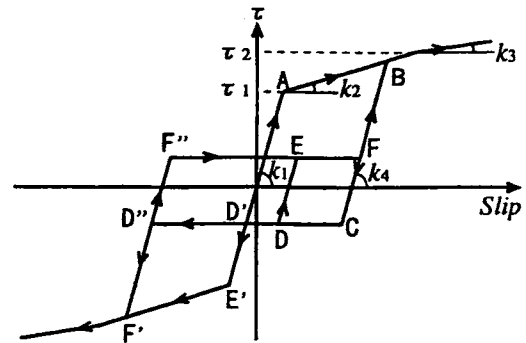


図-4 付着特性

- (1) 剛体-ばねモデルの適用により、繰り返し荷重下の腐食ばりの変形挙動、耐力低下および破壊状況を解析的にかなりの精度で推定できることが明らかになり、本解析の有効性が認められた。本解析法は、劣化状況の異なるRC部材の耐力の推定や補修方法を検する上で、有効な一解析手法であると考えられる。（図-5）

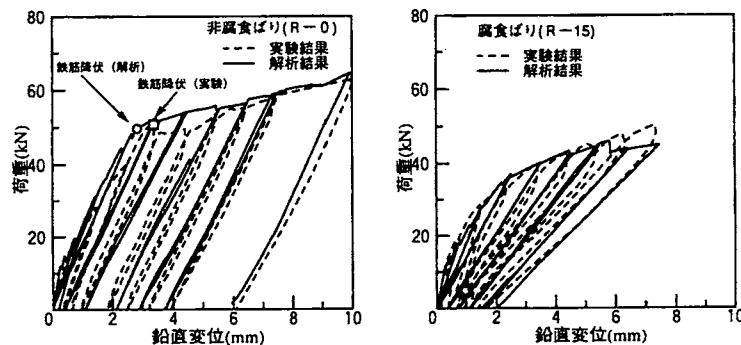


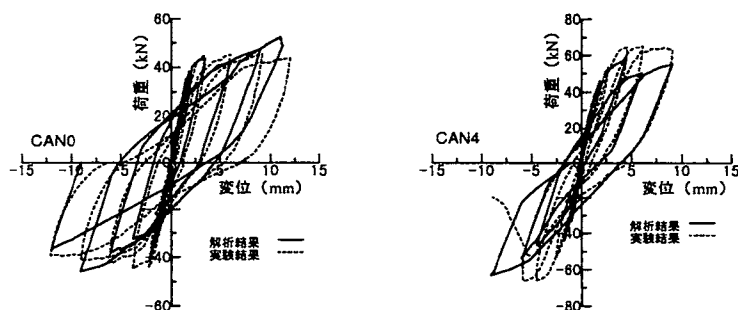
図-5 荷重-鉛直変位関係

- (2) 鉄筋とコンクリートの付着の履歴特性を考慮した付着ばねの導入と鉄筋位置のコンクリート厚の低減等を解析法に取り入れることにより、腐食ばりの劣化要因を容易に表現することができた。
- (3) 繰り返し荷重下の腐食ばりでは、残留変位が非腐食ばりと比較して非常に小さい。このことは、除荷－再載荷の履歴曲線が鉄筋の降伏による変形でなく、鉄筋とコンクリートとの付着挙動に大きく影響するためであると考えられる。また、腐食ばりの最大耐力は非腐食ばりと比較して、繰り返し載荷で20%程度低下し、単調載荷よりその低下の割合が顕著であった。

### 「第6章 軸力と繰り返し曲げを受けるRC部材の履歴挙動に関する解析」

中間はりを有する高架橋の脚柱を対象に考え、スラブ等の自重による軸圧縮力を受ける高架橋の脚柱と中間はりの接合部に地震時の外力が作用した時を想定したRC部材の履歴挙動について、剛体－ばねモデルによるシミュレート解析を行い、繰り返し荷重下の本解析法の有効性について検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 剛体－ばねモデルの適用により、繰り返し荷重を受けるRC部材の変形挙動や軸力による塑性変形能の低下を解析的に推定できることが明らかになった。(図－6) なお、解析精度を向上させるために、ひび割れ面の再接触判定やコンクリートの圧縮履歴の修正に関する検討や軸力の作用軸



図－6 荷重－鉛直変位関係

の変化に伴うモーメントの影響についても考慮する必要がある。

- (2) 軸力ありの供試体の最大耐力は軸力なしの供試体の30%程高くなるが、圧縮側コンクリートの圧壊により塑性変形能は著しく低下する。以上より、軸力を受けるRC部材は、コンクリートの圧壊による脆性的な破壊を起こす可能性が高いと考えられる。

## 学位論文審査結果の要旨

平成9年12月1日、第1回学位論文審査委員会を開催、平成10年2月5日に口頭発表と最終審査委員会を開催し、以下の通り判定した。

研究歴と学力：平成元年3月に金沢大学大学院工学研究科土木工学専攻を修了し、同年4月より石川工業高等専門学校助手として研究に従事し、9年4月より同学講師となり、現在に至っている。この間、鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート部材の非線形解析について研究を行い、数々の論文を国の内外で発表してきている。提出された関係資料および口頭試問により、博士課程修了者と同等の学力を有するものと判断した。

論文：本論文は、プレキャスト部材や繰り返し荷重を受けるコンクリート部材の耐力および変形特性を解明する解析法として剛体-ばねモデルの有効性を検討した一連の研究をまとめたものであり、以下のような成果を得ている。

- 1) 剛体-ばねモデルは、ひび割れなどの不連続部や鉄筋とコンクリートの付着性状など異種な材料の接触面などを容易に表現でき、非常に有効なモデルである。
- 2) 不連続面を有するプレキャスト部材の耐力ならびに変形の評価、劣化してひび割れを有するコンクリート部材や繰り返し荷重によりひび割れ面の開閉を伴うコンクリート部材の変形性状などの非線形性を取り入れることも可能であり、実用的な方法である。

以上のように、本研究はコンクリート構造の非線形挙動の解析方法について重要な知見を得ており、提出された論文は博士（工学）に値する内容であると判定した。