

プレキャスト鉄筋コンクリート構造接合部の 変形を考慮した設計手法

中野 克彦^{*}

(平成17年10月31日受理)

Design method Considering of Shear transfer Elements in Precast Concrete Connections

Katsuhiko NAKANO^{*}

Shear transfer across a definite interface must frequently be considered in the design of precast concrete connections. As the following various resistances in the effecting shear transfer strength are given: (1) dowel action, (2) shear-key, (3) friction with axial force, (4) adherence on the concrete surface. The purpose of this paper is to reveal the compound effects of the various resistance elements. Basic experiments on the interface shear transfer at the precast joint faces were carried out. Ten panel type specimens with the same dimensions were tested. As the conclusion, the relation of the shear transfer mechanism and shear displacement behaviour in the concrete connection is clarified. Also the evaluation equation of the shear transfer strength with consideration to the shear displacement conformity is proposed.

Key words: precast concrete connections, dowel action of joint bars, shear-key resistance, friction with compressive axial force, adherence on the concrete surface, shear displacement

1. はじめに

本論文章では、接合部の変形を考慮した性能設計手法の方向性を提案し、実現する上で
の課題を抽出することを目的としている。

コンクリート系構造物を構築するにあたっては、いわゆる現場打ちが構・工法としては
基本とされてきている。しかし、どのように構築するかは、構造設計技術の裏づけと施工
技術の対応等があれば、基本的には自在であり、プレキャスト鉄筋コンクリート（以下、
「PCa」と略す）部材を組み込んでいく構・工法も当然あるべくしてあるものである。PCa
化を図れば、構築される構造体としての構造性能を把握するにあたって、PCa 部材が組み
込まれたことにより生じた PCa 部材を接合する接合部での応力伝達機構が関与してくるこ
とが想定され、そこに現場打ちだけで構築することとの違いが顕在化するのとは当然のこと
といえる。もちろん現場打ちにおいても、硬化したコンクリート面に新たなコンクリート

*

建築学科 助教授(Department of Architecture and Building Engineering, Associate Professor)

を打設してゆくことが通常の工法であるから、ここにも接合部は存在している。このコンクリートの打ち継ぎ面については、入念な処理を怠れば一体化は期待できないということは古くからの多くの研究成果が示されてきており、実務レベルでは打ち継ぎ面における施工にいろいろな工夫を施した工法が多数提案されている例えば^{[1],[2]}。その意味では、一般的な建築工事における施工条件下では、現場打ちによる構・工法でも PCa 化によって生じるような接合面と類似した打ち継ぎ面が多数存在することになる。

PCa 化された部材を組み込んで構築された構造物についての構造性能の確保については、基本的には、その構造物がすべてを現場打ちにより施工されてできた構造物を想定し、設定された諸外力に対して、その応答が各部の挙動でほとんど同等であることを期待するような観点、すなわち、「一体打ちと同等」という評価基準が示されてきた。つまり、PCa 部材を組み込んで構造物を構築しようとした時には、一般的には、部材接合部の挙動は現場打ちで施工された場合の挙動と同等であることを保証するような設計を求めているというスタンスをとってきている。一方、この条件を確認できれば、構造設計者にとっては、PCa 化にあたって特別の設計式を提案する必要には迫られず、RC 部材関連についての既往の諸設計式を用いて設計するということがいとも当然のごとく行われることになる。同等であることを説明する手法としては、一体打ちと同等と目されるような試験体と PCa 化を組み込んだ試験体とを製作し、両者の実験結果がほぼ同じであることを示すという手法が常套手段として用いられてきたのが現状である。検討の主体は、平均せん断応力度による強度設計法に基づいた結果を示す程度にとどまっているといえる。

接合部には「変形」が生じない、あるいは、「変形」による構造性能への影響はほとんどないという構造実験を示し、ここで提案した構・工法に対する設計手法の妥当性をバックアップすることも常套手段である。このような状況が、接合部の挙動を念頭においた設計法の整備を緊急に必要とするといった要望のやや低調さを示している所以かもしれない。さらに、接合部に設けられる各抵抗要素の復元力特性についての関心は極めて薄い。現状で多用しているシャキー、接合筋、摩擦抵抗といった要素の剛性・諸強度・変形履歴が決められなければ、基本的には、接合部の応力を算出することができないのであり、応力算定ができていないのであれば、接合部の設計もできていないことになる。現状では、まだ各抵抗要素について、個々の破壊モードに対応した構造特性の把握は十分にはなされていない。各抵抗要素の復元力特性が定式化できれば、部材の目標性能、いわゆる接合部での許容変形に応じた剛性、強度および靱性を確保できるように抵抗要素を配置し、許容応力度設計、限界状態設計、一体打ち RC 造と同等に扱う一体打ち同等型構造の設計、接合部で地震入力エネルギー消費を期待するエネルギー吸収型構造の設計等を自由に選択できる。

2. 接合部の変形を考慮した設計方法

2.1 接合部の変形

接合部とは、PCa 部材内、Pca 部材間、もしくは Pca 部材と現場打ちコンクリート部材間に生じる接合面とする。接合部には図 1 に示すように、せん断力、軸力および曲げモーメントが作用する。これらの応力の内、曲げモーメントによる応力は接合面において引張

軸力と圧縮軸力に分けられる。したがって、接合部に生じる応力は、接合面に平行なせん断力、および、接合面に垂直な引張軸力と圧縮軸力である。したがって、ここで、接合部の变形とは以下の 2 種類の变形と考えられる。

せん断变形：接合面に平行なせん断力によって生じるせん断ズレ变形

軸方向变形：接合面に垂直な引張軸力または圧縮軸力によって生じる变形（鋼材の伸び、コンクリートと鋼材の付着劣化による抜け出し、支圧による縮み 等が含まれる。）

ここでの課題として、せん断变形および軸变形のみを考慮することで、回転变形およびロッキング等による变形がモデル化できるかということが挙げられる。

2.2 接合部の变形を考慮する目的

接合部に变形を許容することにより、構造物全体の挙動は接合部の挙動に支配され、構造設計者が構造物全体の挙動を接合部の变形により制御できる。接合部の設計方法としては、接合部に存在するせん断抵抗要素の分類と個々の抵抗要素の復元力特性を確立し、理論的モデルによって接合部の構造性能評価法を体系化することである。具体的には、以下に示す設計法が考えられる。

变形を集中させることによる損傷制御設計

接合部に入力エネルギーを集中させ、ひび割れ等の損傷部位を限定することで修復を容易にすることができる。さらには、接合部に取替え可能な部材を挿入したり、高性能材料を接合部に組み込むことにより新たな構造形式の広がりを持つことが予想される。特に、今後の設計法として残留变形を制御することが重要であると考えられる。

しかしながら、このような構造物の設計には、部材の耐力・靱性能を含めて従来の設計法を適用できないので、その設計法を確立する必要がある。

許容变形に变形制御する強度型設計

接合部で許容できる变形量を設定して、この变形量に対する各せん断抵抗要素の強度算定および变形適合による強度累加法により接合部の強度を算定する。この接合部の許容变形を決めることにより、一体打ち RC 造と同等に扱う一体打ち同等型の設計が適用でき、許容応力度設計、限界状態設計（使用限界状態、修復限界状態、終局限界状態）等の設計を自由に選択できる。

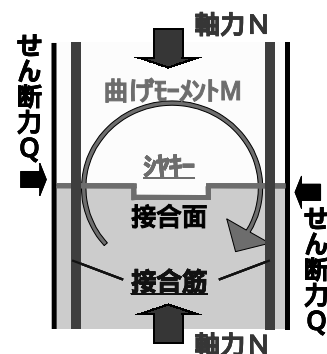


図 1 接合部に生じる応力

3. 性能設計手法の方向

3.1 基本方針

- (1) 目標性能は建物の耐震性能（感覚障害、機能障害を含む）であり、接合部を含んだ部材の性能（損傷度）は構造設計者の意図による。
- (2) 建物の耐震性能の評価は、建物の代表的な応答値である層間变形角と層の塑性率

について限界値を示すことにより評価する（限界変形時の接合部および部材の損傷度を評価する）。

- (3) 対象とする PCa 造建築物の接合部に、要求する剛性、強度および靱性能を有する抵抗要素を配置し、個々の抵抗要素の復元力特性を取り込むことにより、PCa 造における接合部のせん断変形特性および軸方向変形特性を考慮した構造設計を行う。
- (4) ハーフ PCa 部材のような構造断面内に接合部を有する場合には、接合部の変形を生じた後に一体打ち部材とは異なる構造特性を示すことになる。したがって、接合部変形を生じた後の部材としての抵抗機構を考慮した構造設計を行うか、または、一体性を確保する処置が必要である。
- (5) 接合部の構造性能に一体打ちの RC 造と同等の構造性能を確保することにより、一体打ちの RC 造と同じ設計用外力を用い、一体打ちの RC 造に適用される方法で応力解析や断面設計を行い、この応力解析で得られた部材に対して接合部を構造設計することが可能である。

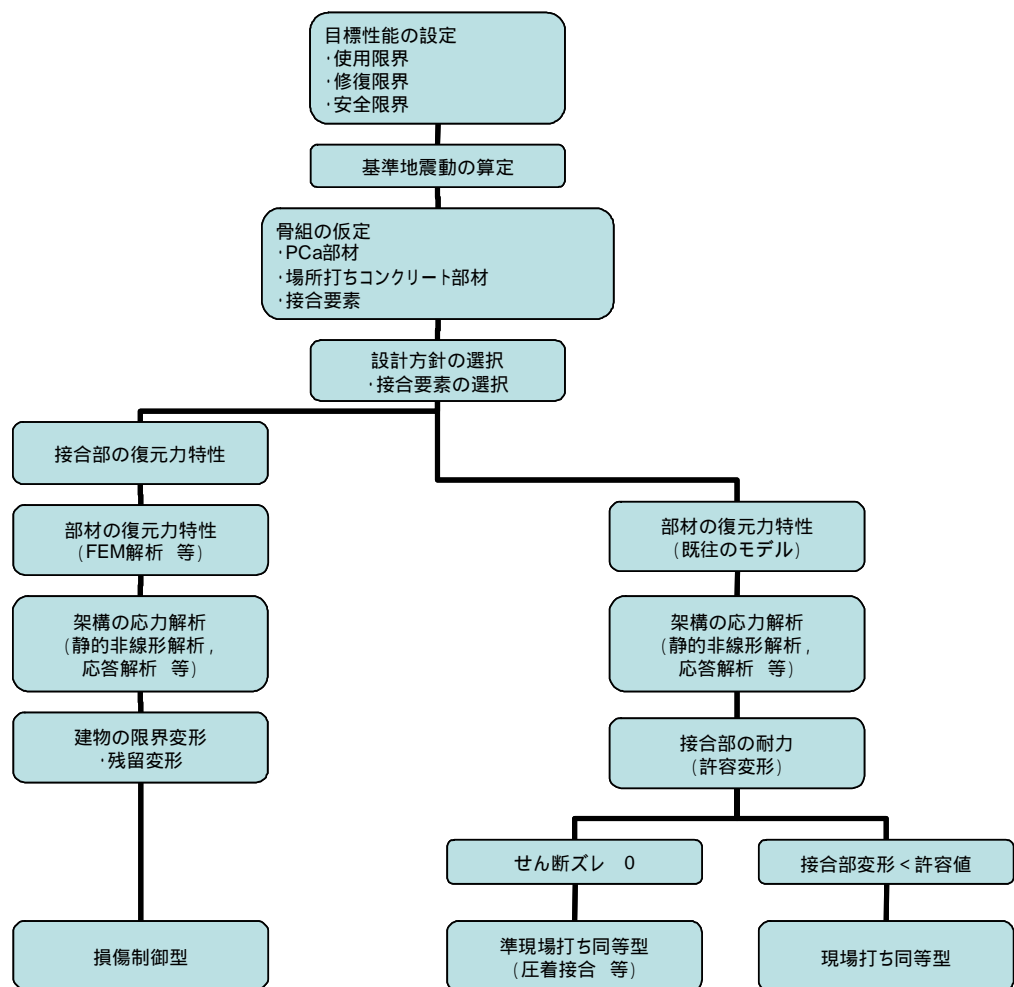


図 2 性能評価フロー

以下に「RC 造建物の耐震性能評価指針（案）」^[3]を参考とした性能評価フロー（図 2 参照）を示す。

目標性能の設定（使用限界，修復限界，安全限界）

基準地震動の算定

骨組の仮定（PCa 部材，現場打ちコンクリート部材，接合要素の配置）

設計方針の選択

a) 接合部変形を考慮した設計法

- ・ 目標性能に応じ，部材の損傷度および接合要素の損傷度を自由に設定

b) 従来の設計法

- ・ 現場打ち同等型（接合部変形を許容値内に制御）
- ・ 圧着接合部（せん断変形 0）

接合部の復元力特性の決定

a) 接合部変形を考慮した設計法

- ・ 接合要素の復元力特性の選択
- ・ 接合部としての復元力特性の決定（接合要素の変形適合を考慮した累加）

b) 従来の設計法

- ・ 接合要素の復元力特性の選択
- ・ 接合部許容変形時の接合部耐力の決定

* 従来の設計法の一例として「現場打ち同等型」が考えられるが，接合部の変形が影響しない範囲として，例えばせん断ズレ変形量で 2mm^[4]程度と考えられる．
[現場打ち同等型]

使用限界：せん断ズレ量 0.2mm 程度，抜け出し量は検討課題

修復限界：せん断ズレ量 2mm 程度（接合要素が降伏以前）

抜け出し量は検討課題

安全限界：損傷限界と同じ

部材の復元力特性の決定

a) 接合部変形を考慮した設計法

- ・ FEM 解析等により，部材としての復元力特性を決定（実験により決定しても良い）
- ・ 接合部を含んだ部材の復元力特性
- ・ 残留変形の制御

b) 従来の設計法

- ・ 部材の復元力特性の選択（既往のモデル）

構造物の静的非線形解析

建物の限界変形（限界層間変形角）時における部材および接合要素の損傷度評価

a) 接合部変形を考慮した設計法

- ・ 部材の損傷度評価（要求性能）

* 部材の損傷レベルが意図通りであることの検証

（例えば、接合要素に損傷を集中させ部材は弾性範囲内 等）

- ・ 接合要素の損傷度評価（使用限界，修復限界，安全限界）

b) 従来の設計法

- ・ 部材の損傷度評価（使用限界，修復限界，安全限界）

応答解析

保有耐震性能指標の算出

3.2 目標性能

(1) 建物の耐震性能

使用性，修復性，安全性に対する限界状態（使用限界状態，修復限界状態，安全限界状態）を設定して，それぞれの評価項目について独立に評価する．

- ・ 使用性： 継続使用に支障をきさないための性能評価（感覚障害，機能障害）．
応答をおおむね弾性限度内とする．
併用期間に1度以上遭遇する可能性が高い中小地震動．
- ・ 修復性： 損傷レベルを制御するための性能評価．
変形レベルは，補修が必要ではあるが，継続使用も可能な範囲に抑える．
- ・ 安全性： 人命保護のための性能評価．
倒壊せずに鉛直荷重が保持されていること．
部材ではヒンジ部材の変形限界，柱の脆性破壊等が生じる限界．

建物の耐震性能は，主要な構造部材の残留する損傷状態に応じて算定される最大変形で評価することになる．例えば，動的外乱に対して建物に求められる性能を動的応答解析により諸応答値を直接評価することが考えられるが，建物の代表的な応答値である層間変形角と層の塑性率について限界値を示すことにより評価する方法がある．他の応答値については必要に応じて限界値を定めるか，結果の応答値を評価すればよいことになる．

ここでの課題として，各限界状態における層間変形角と層の塑性率の限界値の決定，および，それらの限界値における残留変形レベルの把握が必要である．

(2) 部材の性能

構造部材の復元力特性および履歴エネルギー吸収性能を，使用限界状態，修復限界状態，安全限界状態と対応させながら，材料の非線形性を考慮して十分な精度で算出する方法により，鉄筋の応力度およびコンクリートの損傷度，残留ひび割れ幅，残留変形などに基づいて評価する．

部材の性能は構造設計者が決めるものであり，建物の耐震性が確保されていれば，部材の損傷状態は自由である．例えば，残留変形を生じさせない接合要素を挿入することにより，残留変形を制御することが可能である．

(3) 接合部の性能

接合部については，構造物に先立って終局限界状態に達することがないように設計許容値を定めて評価する．ここでの課題は，接合面におけるせん断変形および軸方向変形に許容値を定めることである．

4. 性能設計手法の例

4.1 接合部の復元力特性

接合部の復元力特性を確定する手法の一例として，各せん断抵抗要素（圧縮軸力下の摩擦抵抗，接合筋のダボ抵抗，および，コンクリートシャキーの直接せん断抵抗）のせん断ズレ変形を適合させて耐力を累加する方法を示す．

圧縮軸力下の摩擦抵抗

図 3 に圧縮軸力下における摩擦抵抗機構の概念，図 4 に文献[5]，[6]の実験結果から得られた圧縮軸力下における摩擦抵抗の典型的な復元力特性を示す．

コンクリート面とコンクリート面の摩擦力によりせん断力に抵抗するものであり，接合面の状態により抵抗力の大きさが異なる．接合部に生じる曲げおよび軸力により生じた圧縮面に摩擦係数を乗じた値が摩擦抵抗力であり，摩擦係数は接合面の仕上げ状態に依存したものとなる．したがって，摩擦抵抗力（ Q_{frc} ）とせん断ズレ変形（ δ_{sd} ）の関係は，図 4 に示すように，接合部に生じるせん断力が摩擦抵抗力以下の場合にはせん断ズレ変形を生じず，摩擦抵抗力を超えた場合には摩擦抵抗力を維持しながらせん断ズレ変形を生じることになる．

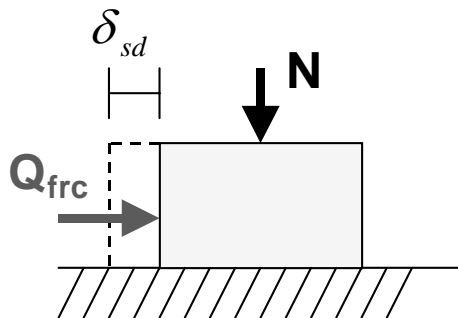


図 3 圧縮軸力下における
摩擦抵抗機構概念図

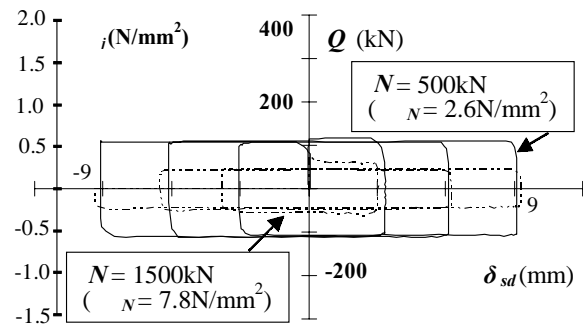


図 4 圧縮軸力下における摩擦抵抗の
復元力特性の実験例

圧縮軸力下における摩擦抵抗力（ Q_{frc} ）は（1）式で与えられる．

$$Q_{frc} = \mu \cdot N = \mu \cdot A_j \cdot \sigma_N \quad (1)$$

ここで，

N : 軸方向圧縮力(N)， A_j : 接合面の全面積(mm²)， σ_N : 軸方向圧縮応力度(N/mm²)， μ は摩擦係数であり，接合面の状態により異なるが，実験では表 1 に示す値が得られている．

表 1 圧縮軸力下の圧縮抵抗における摩擦係数

接合面の状態	摩擦係数 μ
平滑面でグリース塗布	0.08
平滑面	0.66 (静摩擦) 0.55 (動摩擦)

* 接合面はコンクリート打設時の型枠面であり，鋼製型枠を用いている．

図 5 に摩擦抵抗の包絡線モデルおよび繰り返しモデルを示す．せん断力 (Q) が式 (1) に示した摩擦抵抗 (Q_{frc}) 以下の場合にはせん断ズレ変形 (sd) が生じず， Q_{frc} を超える場合には Q_{frc} を維持しながらせん断ズレ変形が生じるものとする．

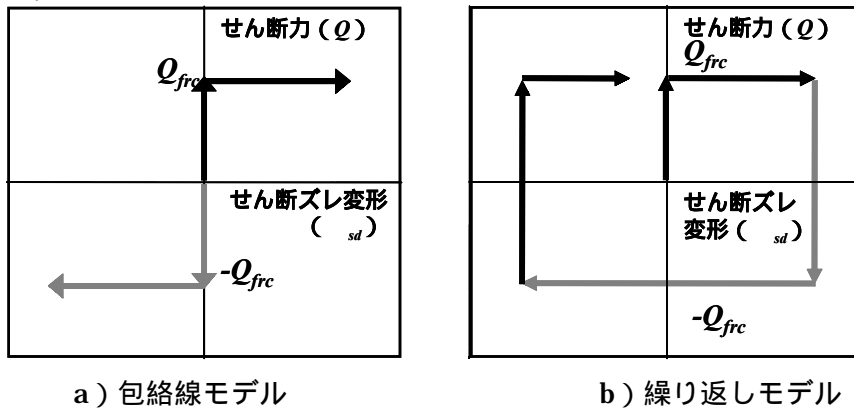


図 5 圧縮軸力下における摩擦抵抗の復元力特性

接合筋のダボ抵抗

接合筋のダボ抵抗までの包絡線モデル (せん断力 - せん断ズレ変形関係) は，(2)，(3)，(4) 式より求められる．また，ダボ抵抗 (Q_{dwl}) 以降の包絡線モデル (Q - sd 関係) は，実験結果^{[5], [6]}における強度上昇の割合が $\sqrt{\delta_{sd}}$ に対して 0.2 であったことから

(5) 式のように定めた．

$$Q_{dwl} = \frac{Z_p \cdot \sigma_y \cdot (1 - \alpha^2)_i \beta}{0.322} \quad \dots (2)$$

ここに，

$$_i \beta = \sqrt[4]{\frac{{}_i k_c \cdot d_s}{4E_s \cdot I_s}} \quad \dots (3)$$

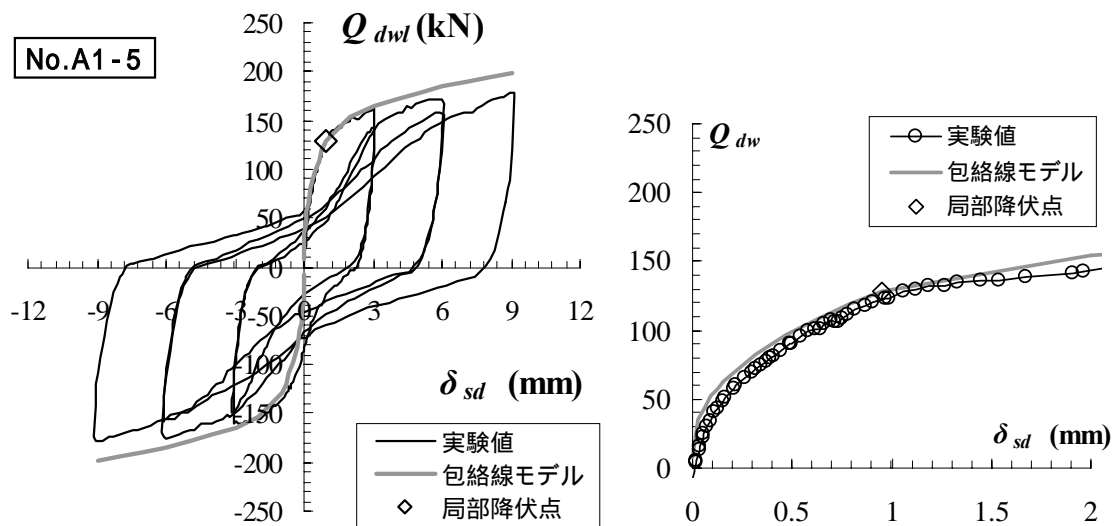
$$_i k_c = 55 \left(\frac{{}_i E_c \cdot {}_i \sigma_B}{E_s} \right)^{\frac{3}{4}} \quad \dots (4)$$

ここで、 Z_p : 接合筋の全塑性モーメント時の断面係数、 i_B, i_{Ec} : 接合面を挟んだ両側のコンクリートまたはモルタルの各圧縮強度 (N/mm²) および各ヤング係数 (N/mm²)、 E_s, I_s : 接合筋のヤング係数 (N/mm²) および断面 2 次モーメント (mm⁴)、 d_s : 接合筋径 (mm)、 i_{kc} : 接合面を挟んだ両側のコンクリートまたはモルタルの各水平反力係数 (N/mm³)、 σ_y : 接合筋の降伏強度 (N/mm²)、 δ_{sd} : 接合筋に生じている引張応力度の降伏強度に対する比 (1.0)

$$Q = Q_{dwl} + 0.2 \cdot Q_{dwl} \cdot \sqrt{\frac{\delta_{sd}}{\delta_{sdp}} - 1} \quad \dots (5)$$

ここで、 Q_{dwl} : ダボ抵抗力、 δ_{sdp} : ダボ抵抗力時のせん断ズレ変形

図 6 に実験結果^[5]から得られた接合筋のダボ抵抗における典型的な $Q - \delta_{sd}$ 関係と包絡線モデルを示す。



a) 全体の $Q - \delta_{sd}$ 関係

b) $\delta_{sd}=2$ mm までの $Q - \delta_{sd}$ 関係

図 6 実験結果による接合筋のダボ抵抗における復元力特性

ダボ抵抗の繰返しモデルは、エネルギー吸収量に着目し、武田らによるスリップ型モデルの復元力特性^[7]を用いた。このモデルは曲げ挙動にスリップ挙動を取り入れたものである。

繰返しモデルは、包絡線上を移行し、除荷剛性 K_r にしたがって耐力を低下させ、除荷後にスリップ剛性 K_s に従う。その後、原点と加力方向最大変位を結ぶ線上との交点から、最大変位を目指して変形を進展させる。なお、接合筋曲げ降伏時変位 (δ_y) よりも小さい変位においては、弾性挙動により原点を目指すものとし、接合筋曲げ降伏時変位から全

塑性時変位（ δ_{sdp} ）までは，除荷剛性後に最大点変位指向型のモデルとする．

ここで，接合筋の曲げ降伏時のせん断力（ Q_y ）は，最大曲げモーメント（ M_{max} ）が生じる接合筋の断面が降伏モーメント（ M_y ）に達した時の接合筋に生じるせん断力とし，（６）式で与えられるものとし， Q_y は包絡線モデルにより求められる．

$$Q_y = \frac{2}{3} Q_{dwl} \quad \dots (6)$$

また，除荷時剛性（ K_r ）およびスリップ時剛性（ K_s ）は（７）式および（８）式でそれぞれ表される．

$$K_r = K_y \left| \delta_m / \delta_{sdp} \right|^{-\alpha} \quad \dots (7)$$

$$K_s = Q_m' / (\delta_m' - \delta_0) \cdot \left| \delta_m / \delta_{sdp} \right|^{-\lambda} \quad \dots (8)$$

ここで，

K_y : 弾性剛性（ Q_y / δ_y ）

Q_m' : 加力方向の最大折り返し点のせん断力

δ_m : 折り返し点のせん断ズレ変形

δ_m' : 加力方向最大折り返し点のせん断ズレ変形

δ_{sdp} : ダボ抵抗時時のせん断ズレ変形

α : 復元力が 0 となる点のせん断ズレ変形

λ : 剛性低下のパラメータ

δ_0 : スリップ剛性低下指数

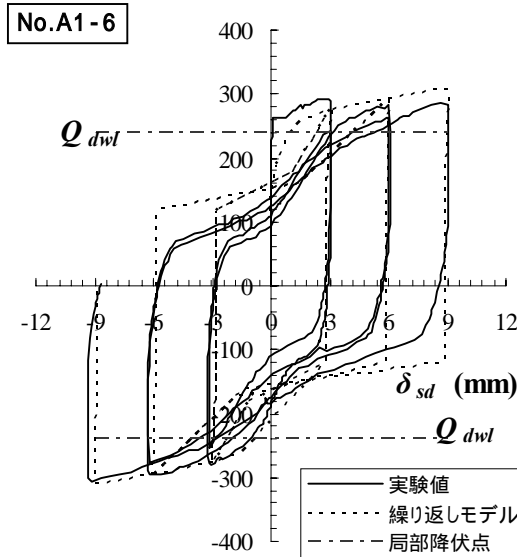


図 7 繰返しモデルと実験結果の比較
(実験シリーズ A ,No.A1-6 ,N= 1500kN)

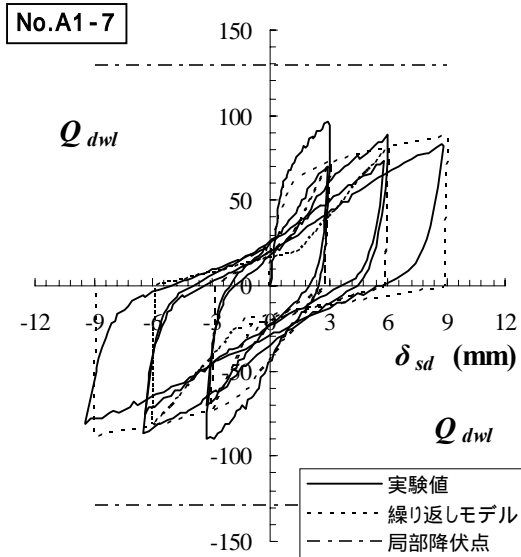


図 8 繰返しモデルと実験結果の比較
(実験シリーズ A ,No.A1-7 ,N= -220kN)

なお、繰返しモデルの係数 および β については、繰返し载荷における各サイクルのエネルギー消費量に着目し、 $\beta = -0.9$ 、 $\gamma = 0.5$ が最も適応していた。図 7, 8 に繰返しモデルと実験結果^[5]の比較を示す。繰返しモデルは、 δ_{sd} が 5mm を超える大変形後の繰返しにおいては、接合筋の抜け出しに伴う戻り勾配の増大を表現できていない部分もあるが、概ね実験結果を評価していると考えられる。

コンクリートシャキーの直接せん断強度

図 9 にコンクリートシャキーの直接せん断抵抗の概念、図 10 に実験結果^[5]から得られたシャキー抵抗の典型的な復元力特性を示す。コンクリート接合面に凹凸を設けてせん断力に抵抗するものであり、シャキー支圧面のコンクリートの圧縮破壊（支圧破壊）で決まる抵抗力、またはシャキーせん断面のせん断破壊（シャオフ破壊）で決まる抵抗力のうち、小さい値である。本項では、シャキーが最大強度に達した後も、ある程度までは強度を維持する支圧破壊型のシャキーを対象とするものである。図 11 は、実験結果におけるシャキー抵抗力 (Q_{sky}) と圧縮軸力との関係である。図 11 より、 Q_{sky} は圧縮軸力が上昇するにつれて大きくなっている。また、 Q_{sky} は (N/B) [N : 接合面に生じる圧縮軸力応力度、 B : シャキーのコンクリート圧縮強度] と比例関係にあることがわかる。

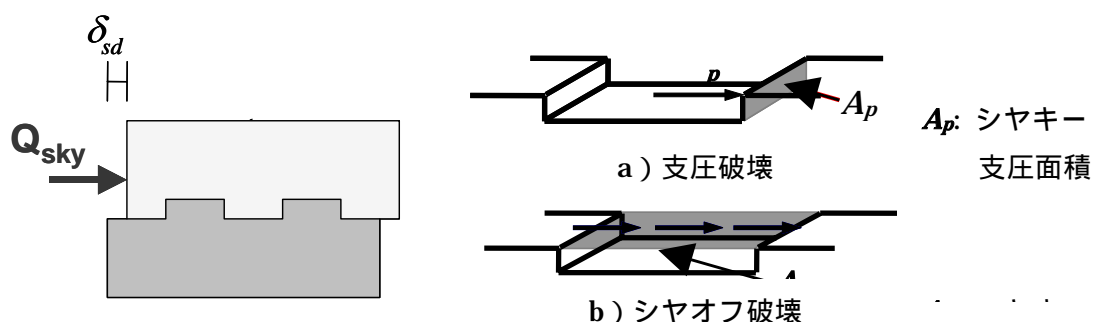


図 9 シャキーの直接せん断抵抗の概念

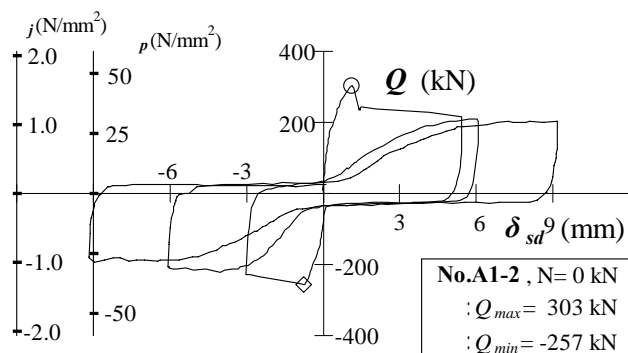


図 10 シャキーの直接せん断抵抗の復元力特性の実験例

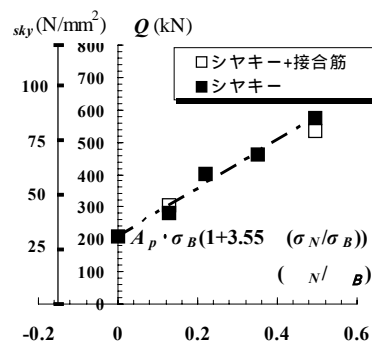


図 11 Q_{sky} と圧縮軸力との関係

支圧型シャキーを含む試験体の最大強度時の破壊モードが、シャキー支圧部の圧壊であること、および、シャキー抵抗力が（ N/B ）と比例関係にあることから、シャキー抵抗力（ Q_{sky} ）は（9）式で与えられることとした。

$$Q_{sky} = A_p \cdot \sigma_B \cdot (1 + \gamma) \quad \dots (9)$$

ここで、 γ ：圧縮軸力による抵抗力増加割合[実験結果より $\gamma = 3.55$ （ N/B ）とした]
 A_p ：シャキーの支圧面積（ mm^2 , $A_p = W_{sky} \times H_{sky}$, W_{sky} ：シャキーの幅, H_{sky} ：シャキーの高さ）
 σ_B ：コンクリート圧縮強度（ N/mm^2 ）

図 12 は、実験結果^[5]におけるシャキー抵抗力（ Q_{sky} ）と接合面のせん断ズレ変形量（ $\delta_{sd} = 0 \sim 3\text{mm}$ ）の関係である。図 12 より、シャキー抵抗力および剛性は圧縮軸力が上昇するにつれて大きくなっており、圧縮軸力の大きさに関係なく、 $\delta_{sd} = 1\text{mm}$ 程度でシャキー支圧部の圧壊が生じはじめ、その後の強度上昇は少ないが $\delta_{sd} = 3\text{mm}$ 程度まで抵抗力を維持している。支圧破壊型コンクリートシャキーの破壊時におけるせん断ズレ変形は、シャキー支圧部のコンクリート圧壊の進展状況およびシャキー隅角部から発生したせん断ひび割れ等により、正確には評価することは難しいが、包絡線モデルは、（9）式で定めたシャキー抵抗力によるバイリニア型の包絡線とし、 δ_{sdB} は（10）式で与えることとした。

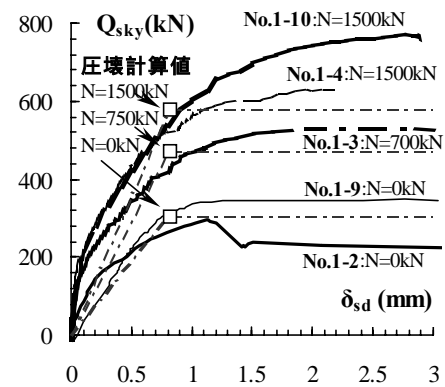


図 12 $Q_{sky} - \delta_{sd}$ 関係（圧縮軸力）

$$\delta_{sdB} = 2 \cdot \delta_{sd} \cdot L_{sky} \quad \dots (10)$$

ここで、 δ_{sd} ：コンクリート圧縮強度時のひずみ、 L_{sky} ：シャキーの長さ（ mm ）

図 13 で示したコンクリートシャキー抵抗の復元力特性は、繰返し載荷により徐々に強度低下する傾向がみられる。これはシャキー隅角部の剥落により、支圧面積が減少した影響によるものであり、通常、用いられている四辺を拘束したシャキーであれば、顕著な強度低下は生じないものと考えられる。しかし、支圧破壊型シャキーにおいても、圧縮軸力の大きさや接合面の固着抵抗の状態によっては接合面でせん断破壊に移行してしまう可能性がある。したがって、せん断ズレ変形が 3mm 以上では、せん断力に抵抗しないモデルとした。コンクリートシャキーの復元力特性は、2 軸拘束下におけるコンクリートの繰返し挙動であり、非常に複雑な性状を示す。除荷勾配は、弾性域にあるコンクリートによる歪みの戻りが除荷勾配を決定すると考えられる。また、繰返し載荷においては、2

軸拘束下において，1 度載荷したコンクリートを再載荷することになり，性状を正確にモデル化するのは困難であり，非常に複雑な形状の算出モデルになると考えられる．

したがって，コンクリートシャキー抵抗による繰返しモデルの下り勾配は，初期剛性と同じになると仮定し，繰返しモデルを以下のように定義した．

せん断ズレ変形が 3mm までは，完全スリップ型の復元力モデルとする．

せん断ズレ変形が 3mm を超えた場合は抵抗力は喪失する．

繰返し載荷の剛性および下り勾配は初期剛性と同じにする．

スリップ時の剛性は 0 とする．

図 13 に実験結果と繰返しモデルとの比較を示す．

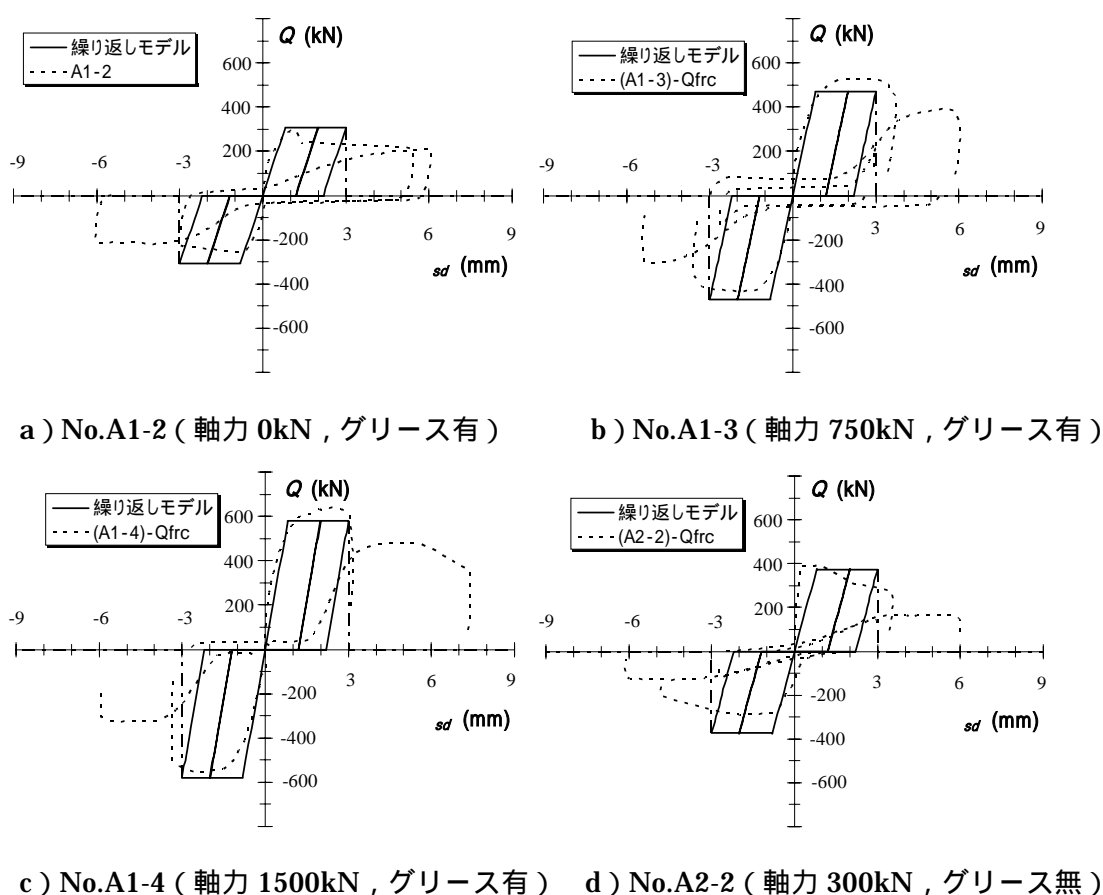


図 13 コンクリートシャキー抵抗の繰返しモデルと実験結果との比較

複数のせん断抵抗要素が存在する場合の復元力特性

接合部の復元力特性は，各せん断抵抗要素（本項では圧縮軸力下の摩擦抵抗，接合筋のダボ抵抗，および，コンクリートシャキーの直接せん断抵抗）のせん断ズレ変形を適合させて耐力を累加することにより表現できる．図 14 にせん断抵抗要素を含む試験体におけるせん断力 - せん断ズレ変形関係，および，各サイクル別エネルギー吸収量の実験結果^[3]

と繰り返しモデルとの比較を示す．図 14 で示した復元力特性に関しては，固着抵抗の大きな試験体の初期剛性に違いがみられるが，せん断ズレ変形が 3mm 時までの適合性は良い．また，せん断ズレ変形が 3 mm を超える大変形時において，シヤキー抵抗を低減しているため，耐力が過大評価されることはない．一方，エネルギー吸収量に関しては，せん断ズレ変形が 3mm までは復元力特性と同様に概ね評価できるが，3mm 以降に関してはコンクリートシヤキーの破壊形式の違いにより多少の違いがあり，今後の検討を要する．

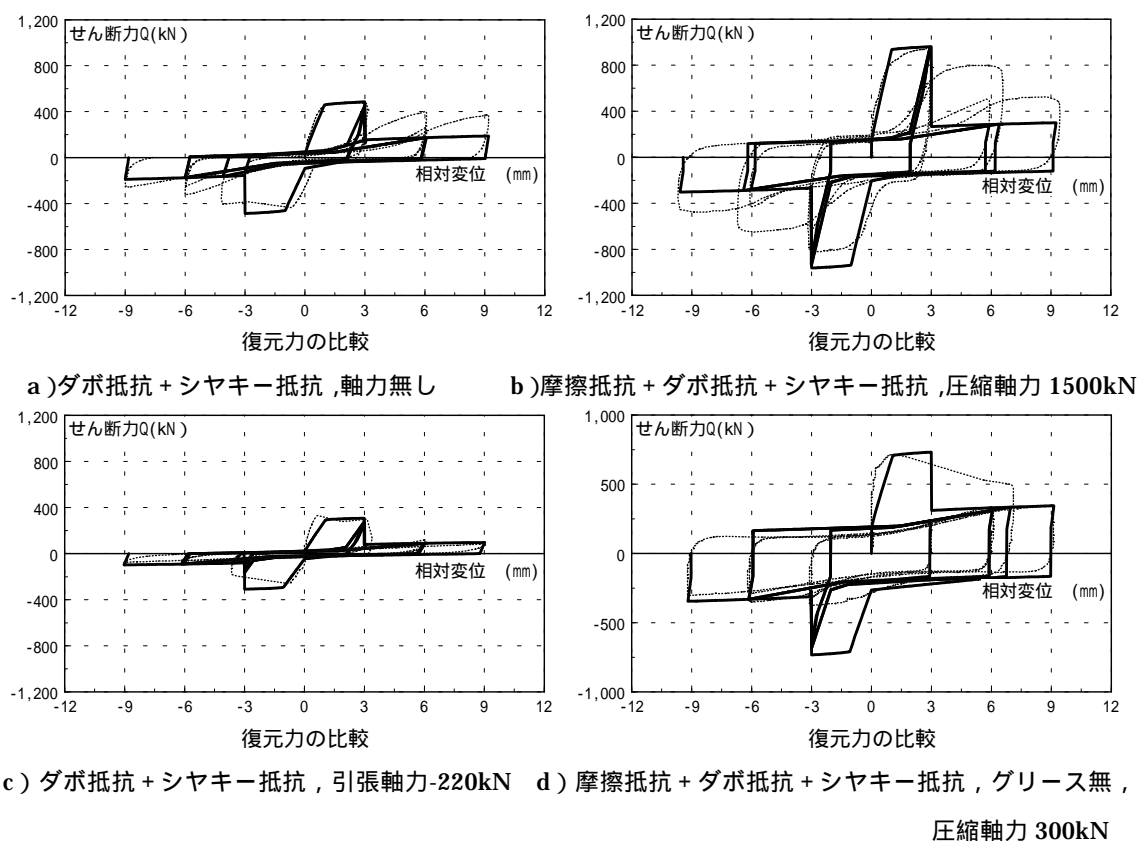


図 14 実験値と繰り返しモデルとの比較

4.2 部材の復元力特性

接合部を含んだ部材の復元力特性を決定する方法の一例を示す．東北大学の金子らは，図 15 に示す 3 種類の接合部を有する柱・梁接合部の非弾性解析を行っている．図 16 に解析結果の一例を示すが，タイプ 3 の接合部で残留変形が抑えられているのが確認される．このように，構造設計者は接合部を選択することにより，部材の損傷度を自由に決めることができる．

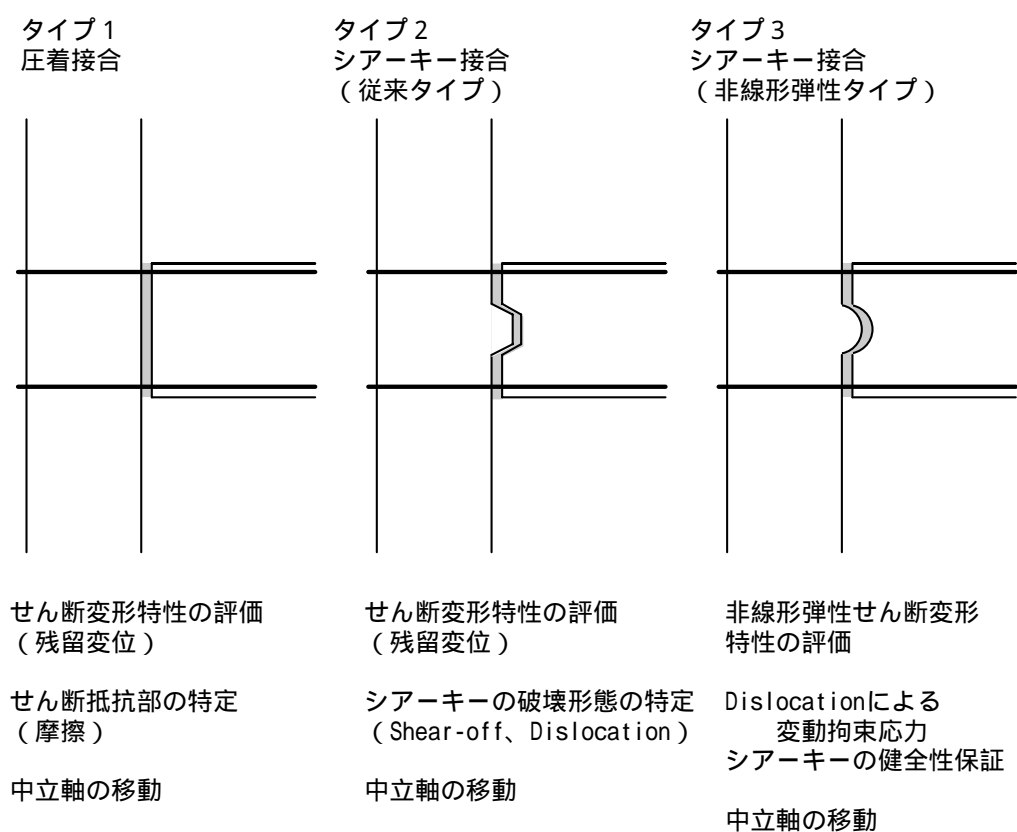


図 15 接合部のタイプ

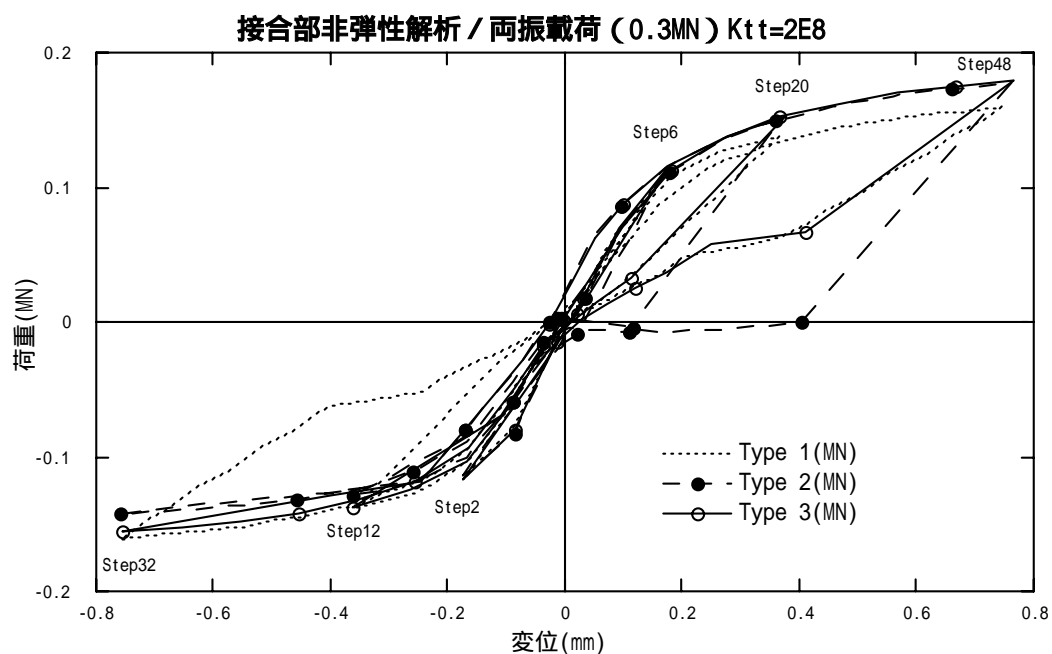


図 16 実験値と繰り返しモデルとの比較

4.3 建物の損傷度評価

建物の損傷度を評価するためには，主要な構造部材の残留する損傷状態に応じて算定される最大変形で評価することになる．PCa 造建物の耐震性能を解析する例として芳村らの研究⁸⁾を紹介する．この研究では，材端部に接合面を有する PCa 建物を対象とした地震応答解析を行い，接合面でのすべりが地震応答性状に及ぼす影響について検討している．

材端部における曲げ挙動とすべり挙動を別個に評価する方法として，曲げ挙動を表す「曲げバネ」とすべり挙動を表す「すべりバネ」を直列に挿入した，ふたつの材端塑性回転バネから成るモデルを考え，これによる PCa 建物の地震応答解析を行っている．材端部にはふたつの回転バネが直列に並ぶモデルとなり（図 17 参照），「曲げバネ」の履歴特性には Takeda モデルを，「すべりバネ」の履歴特性にはスリップモデルを用いている（図 18 参照）．

解析対象は文献⁹⁾に示される 5, 10, 15 階建て純ラーメン構造，解析パラメータはすべり変形率（SD 率：直列系の降伏後変形量に占めるすべりバネの降伏後変形量の比率を表したもの）である．地震応答解析を行った結果として，以下のまとめを示している．

最大層間変形が小さい場合（層間変形角 1/100，塑性率 2 倍程度以下）には，SD 率による差はないが，最大層間変形が大きい場合（同以上）には SD 率が 20%でも差が生じる場合がある．

SD 率の違いによる地震応答の差は，最大値までの応答性状に左右される．

直列系モデルでは，Takeda-slip モデルに比べて大振幅後の小振幅時のすべり変形が大きくなるため h_{eq} が小さくなり，応答が大きくなる傾向がある．

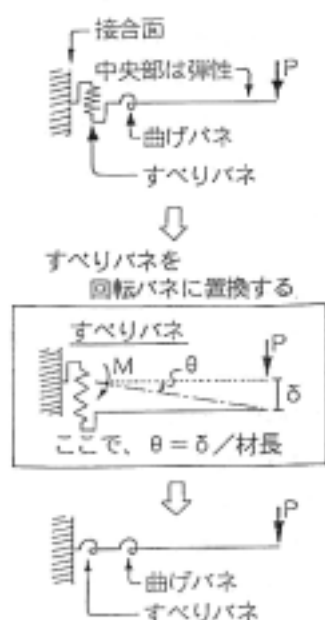


図 3.17 ふたつの回転バネ

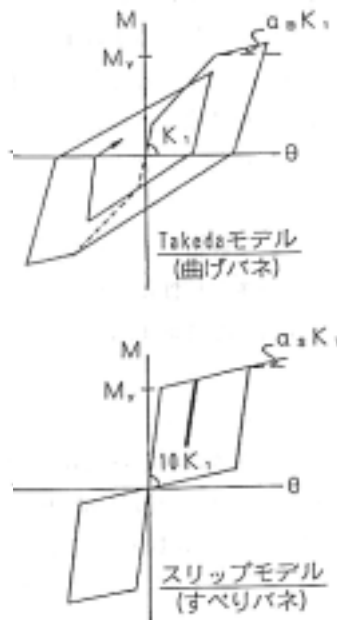


図 3.18 ふたつのバネの履歴特性

4.4 現場打ち同等型の設計例

ここでは、一体打ちの RC 造と同等な構造性能を有する接合部の構造設計法として、接合部で許容できるせん断ズレ変形量を設定し、このせん断ズレ変形量に対する各せん断抵抗要素の設計用算定式および強度累加法を示すこととする。接合部の応力伝達機構には、図 1 に示したような接合部に垂直な軸方向力と接合部に平行なせん断力の 2 種類の伝達機構がある。曲げモーメントおよび圧縮または引張力による軸方向力に対する抵抗は、接合部の有無によって本質的にはあまり大きな差がない。したがって、接合部の応力伝達の検討は、せん断力に対する応力伝達を検討するものとする。

以下に、接合部における応力伝達性能の確認手順を示す。

PCa 部材の目標性能に応じた許容せん断ズレ量を設定する。

許容せん断ズレ量に対して、適切な剛性、強度および靱性を有する抵抗要素を選択する。

PCa 部材に生じる応力から、で選択した抵抗要素を適切に配置する。

許容せん断ズレ量における抵抗要素の累加耐力が接合部に生じる応力を上回っていることを確認する。

(1) 接合部の目標性能

接合部の目標性能を一体打ち同等型に設定するという事は、言い換えれば、接合部にせん断ズレ変形を生じさせないことが接合部の目標性能である。しかし、接合部が存在する限りは、接合部のせん断ズレを生じさせない事は不可能である。

ここでは、以下の 3 水準の許容せん断ズレ量を設定するものとする。

使用性能保持または強度設計のための許容せん断ズレ変形 ($s_d = 0\text{mm}$ 程度)

接合部でのせん断ズレ変形がほとんど生じていない状態である。

使用性能を考慮した長期設計の中で剛性に関する安全性に対する検討、または、せん断ズレ変形をほとんど生じずに抵抗するせん断抵抗要素を用いて強度設計する場合である。基本的にはせん断抵抗要素が個々の材料の弾性範囲内で挙動することを意図している。

終局耐力保持のための許容せん断ズレ変形 ($s_d = 2\text{mm}$ 程度)

接合部を含む PCa 部材の構造性能が、一体打ち部材の構造性能と同等であるせん断ズレ変形の限界値であり、次項で取り上げるせん断抵抗要素が全て抵抗力を発揮できるせん断ズレ変形である。この 2mm の値は以下の理由により定めた。

-) 既往の梁、柱および壁等の PCa 部材の構造実験結果を調査・検討した結果、 s_d が 2mm 以内であれば、一体打ち RC 部材と同等な構造性能を示すことが確認されている。
-) 要素実験では、接合筋がダボ抵抗力（接合筋の局部降伏点）に達し、コンクリートシヤキーに圧壊が生じることにより抵抗力を維持している状態である。
-) 架構式 PCa 造の実建物では、階高を 3m とすると、 s_d が 2mm で 1/1500rad.程度

であり，建物自体の降伏時層間変形角（ $1/150\text{rad.}$ ）の 10% 程度である．

安全性確保のための許容せん断ズレ変形（ $s_d > 2\text{mm}$ ）

接合部で 2mm を超えるせん断ズレ変形が生じている状態であり，接合部が最大耐力に達した以降も耐力に関する安全性に対する検討に用いられる．

（２）抵抗要素

接合部における抵抗要素は接合部に生じる設計応力を伝達させる手段であり，a) 接合部を横切る抵抗要素，b) 圧縮軸力による摩擦抵抗，c) 接合面の固着抵抗 とする．

a) の接合部を横切る抵抗要素は，各種 PCa 工法により，鉄筋，プレート，スタッド，あと施工アンカー，コンクリートシャキー等の様々な抵抗要素が考えられる．基本的には，各抵抗要素がコンクリート接合面に存在する場合の構成則（応力 - 変形関係）が定式化されていれば適用できる．ここでは，「接合筋」，「コンクリートシャキー」および「圧縮軸力下の摩擦抵抗」を取り扱うものとする．

図 19 に接合部の抵抗要素，図 20 に抵抗要素のせん断抵抗力とせん断ズレ変形との関係を示す．

接合筋

接合筋は，接合面を挟んだ両側のコンクリートまたはモルタルに十分に定着されており，接合筋の耐力まで有害な抜け出し等が生じないものとする．したがって，接合部に生じる軸方向応力に対する抵抗力は，従来の RC 造で用いられている鉄筋の復元力特性を用いて算定する．

せん断力に対しては，接合筋のダボ抵抗により抵抗する．接合筋のダボ抵抗とは，接合面のような不連続界面を横切る接合筋が局部的に曲げ変形することにより，せん断力に抵抗するものであり，接合筋の曲げ抵抗力は接合筋のコンクリートに対する支圧力により釣り合っている．したがって，ダボ抵抗はコンクリートの圧縮応力と接合筋の曲げ応力に応じたせん断ズレ変形を前提としている．

コンクリートシャキー

コンクリート接合面に凹凸を設けてせん断力に抵抗するものである．したがって，接合部に生じる引張軸方向応力には抵抗しない．

コンクリートシャキーの抵抗力は，シャキーせん断面のせん断破壊（シャオフ破壊）で決まるせん断強度，またはシャキー支圧面のコンクリート圧縮破壊（支圧破壊）で決まるせん断強度のうち，小さい値である．しかし，シャオフ破壊型のシャキーのせん断抵抗力とせん断ズレ変形との関係は，図 20 に示すように，最大強度以降に急激な強度低下を示すため，接合部の剛性には評価できるが，抵抗力としては余剰強度とするものとする．

また，シャキーは凹凸のコンクリートのかみ合いでせん断伝達を行う機構のため，せ

せん断ズレ変形は微小であるが，シヤキー支圧面に局部応力が生じるため，シヤキー形状および配置等により無視できないせん断ズレ変形を生じる場合がある．

圧縮軸力下の摩擦抵抗

コンクリート面と，コンクリート面またはモルタル面との摩擦力によりせん断力に抵抗するものであり，接合面の状態により抵抗力の大きさが異なる．したがって，接合部に生じる引張軸方向応力には抵抗せず，圧縮方向軸力が生じない場合にはせん断力に対して抵抗しない．

接合部に生じる曲げおよび軸力により生じた圧縮力に摩擦係数を乗じた値が摩擦抵抗力であり，摩擦係数は接合面の仕上げ状態に依存したものとなる．したがって，接合部に生じるせん断力が摩擦抵抗力以下の場合にはせん断ズレ変形を生じず，摩擦抵抗力を超えた場合には摩擦抵抗力を維持しながらせん断ズレ変形を生じることになる．

固着抵抗

目荒し等の物理的ななみ合い，打ち継ぎコンクリートおよび接着剤等による化学的な結合（接着）により，軸方向およびせん断力に抵抗するものである．目荒し等の物理的ななみ合いは小さなシヤキーの集まりと考えられ，抵抗メカニズムはシヤキーの抵抗機構と同じであると考えられる．また，科学的な結合の結合材としては，コンクリート，モルタルおよび合成樹脂等が考えられ，結合材によっては軸変形およびせん断ズレ変形を生じた後も抵抗力を維持するものもあるが，基本的には，接合部に生じる軸方向力およびせん断力が固着抵抗以下の場合にはズレ変形を生じず，固着抵抗力を超えた場合には抵抗力は0になると考えられる．これらの2つの抵抗要素は複合している場合が多く，化学的な結合力が喪失した瞬間に物理的ななみ合いも効果をなくしてしまうことになると考えられる．したがって，抵抗力としては余剰強度とするものとする．

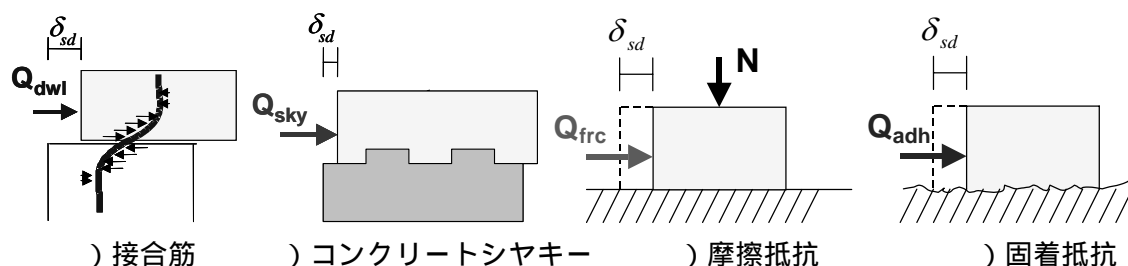


図 19 接合部の抵抗要素

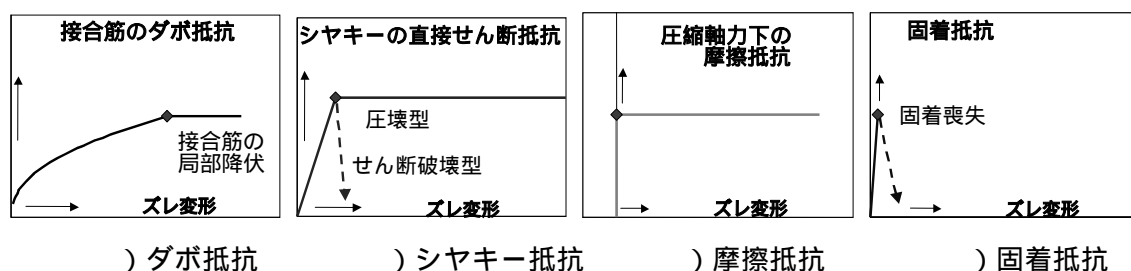


図 20 抵抗要素のせん断抵抗力とせん断ズレ変形の関係

(3) 抵抗要素の配置と累加方法

接合部の構造設計者は、強度や剛性に関する特性を考慮して、接合部の目標性能を満たす範囲で、設計応力が安全に伝達できる応力伝達要素を選択する。

同じ種類の応力を2種類以上の抵抗要素の複合により抵抗する場合は、許容せん断ズレ変形に適合する個々の抵抗要素の抵抗力を累加するものとする。以下に、(1)接合部の目標性能で示した許容せん断ズレ変形ごとに、累加できるせん断抵抗要素の組合せを示す。

使用性能保持または強度設計のための許容せん断ズレ変形 ($s_d = 0\text{mm}$ 程度)

せん断抵抗要素：コンクリートシャキー、圧縮軸力下の摩擦抵抗

コンクリートシャキーの配置によっては、コンクリートシャキーの局部支圧により無視できないせん断ズレ変形が生じるため、使用性能保持のためにコンクリートシャキーを用いる場合には、コンクリートの支圧部分を分散または広げ、設計用応力により負担するコンクリート圧縮強度が長期許容応力度レベル以下となるように設計する。また、シャオフ破壊型のコンクリートシャキーを用いる場合には、圧縮強度に長期許容応力度を用いた支圧強度よりも終局時のせん断強度が上回ることを確認する。

終局耐力保持のための許容せん断ズレ変形 ($s_d = 2\text{mm}$ 程度)

せん断抵抗要素：接合筋のダボ抵抗、コンクリートシャキー、圧縮軸力下の摩擦抵抗
コンクリートシャキーを終局耐力保持のために用いる場合は、許容せん断ズレ変形時において、最大耐力以降も耐力を維持する支圧破壊型のシャキーを用いるものとする。

安全性確保のための許容せん断ズレ変形 ($s_d > 2\text{mm}$)

せん断抵抗要素：接合筋のダボ抵抗、圧縮軸力下の摩擦抵抗

連続していない接合筋（差し筋、接着系あと施工アンカー 等）を用いる場合には、付着破壊、コンクリートの割裂破壊およびコーン破壊による有害な抜け出しが生じないように、接合面を挟んだ両側のコンクリートに十分に定着されていなければならない。

(4) 評価式

接合面を介して応力を伝達させる応力伝達要素は、接合筋、コンクリートシャキーおよび圧縮軸力下の摩擦抵抗の3種類によることを原則とし、接合面に複数の応力伝達要素を配置した場合には、個々の要素のせん断ズレ変形を考慮した累加方法を用いることとする。

接合部のせん断強度 (Q_{suj}) は各抵抗要素のせん断ズレ変形を考慮した(11)式によって与えられる。

$$Q_{suj} = n_{dwl} \cdot Q_{dwl} + n_{sky} \cdot Q_{sky} + Q_{frc} + Q_{adh} \quad \cdots (11)$$

ここに、 Q_{dwl} : 接合筋のダボ抵抗力、 Q_{sky} : シャキーの支圧耐力、 Q_{frc} : 圧縮軸力下の摩擦抵抗力、 Q_{adh} : 接合面の状態による固着抵抗力 ($Q_{adh}=0$ と定義)、 n_{dwl} : 接合筋本数、 n_{sky} : シャキー個数

接合筋のダボ抵抗 (Q_{dwl}) は、(3-2) 式において接合面を挟んだ片側のせん断ズレ変形量が 1mm の場合の抵抗力であり、(12) 式による。

$$Q_{dwl} = \frac{d_s^3 \cdot \sigma_y \cdot (1 - \alpha^2)_i \beta}{1.934} \quad \cdots (12)$$

コンクリートシャキーの直接せん断抵抗力 (Q_{sky}) は (9) 式による。

圧縮軸力下の摩擦抵抗力は、(1) 式による。

設計用応力に関しては現行の構造設計手法に準じることとなるが、各せん断抵抗要素の強度の検定にあたっては、原則として接合部材料の強度のばらつき特性等の効果を考慮して接合部強度を低減して用いる必要がある。(12)、(9) および (1) 式は、せん断抵抗要素を含む試験体の直接せん断実験により確かめられ導かれている強度式であり、部材中の接合部の実際の強度を与えるものではないが、以下に示す理由により接合部強度を低減する必要はないと考えられる。

接合筋のダボ抵抗はせん断ズレ変形が 2mm 以下、または、接合筋の局部降伏時の強度を与える式であり、ほぼ弾性限界値である。接合筋のせん断抵抗力は、ダボ抵抗以降も徐々に高くなり、接合筋の終局時のせん断強度はダボ抵抗の 2 倍程度となる。

コンクリートシャキーの抵抗力は、シャキー支圧部の圧壊発生時の抵抗力であり、最大強度はシャキー抵抗力の 1.2 倍程度となる。

圧縮軸力下の摩擦抵抗力は、接合面で最も厳しい条件である平滑面を評価した抵抗力であり、下限値であると考えられる。

接合面状態によっては固着抵抗力が余剰抵抗力となる。

5. まとめ

接合部に変形を許容することにより、構造物全体の挙動は接合部の挙動に支配され、構造設計者が構造物全体の挙動を接合部の変形により制御できる。接合部の設計方法としては、接合部に存在するせん断抵抗要素の分類と個々の抵抗要素の復元力特性を確立し、理論的モデルによって接合部の構造性能評価法を体系化することである。具体的には、以下に示す設計法を提案した。

変形を集中させることによる損傷制御設計

接合部に入力エネルギーを集中させ、ひび割れ等の損傷部位を限定することで修復を容易にすることができる。さらには、接合部に取替え可能な部材を挿入したり、高靱性材料を接合部に組み込むことにより新たな構造形式の広がりを持つことが予想される。特に、今後の設計法として残留変形を制御することが重要であると考えられる。

しかしながら、このような構造物の設計には、部材の耐力・靱性能を含めて従来の設

計法を適用できないので，その設計法を確立する必要がある．

許容変形に変形制御する強度型設計

接合部で許容できる変形量を設定して，この変形量に対する各せん断抵抗要素の強度算定および変形適合による強度累加法により接合部の強度を算定する．この接合部の許容変形を決めることにより，一体打ち RC 造と同等に扱う一体打ち同等型の設計が適用でき，許容応力度設計，限界状態設計（使用限界状態，修復限界状態，終局限界状態）等の設計を自由に選択できる．

文献

- [1] 黒正清治：プレカストコンクリート構造接合部耐力に関する研究（打継ぎ部の形状と強度について），日本建築学会論文報告集，No.89（臨時増刊 昭和 38 年度大会学術講演要旨集），1963.9，pp.141
- [2] 品川多美二 他：特殊コンクリート構造（建築学大系 21）彰国社，1968.3，pp.19-21
- [3] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説，2004.1
- [4] 松崎育弘，吉野次彦 他：プレキャスト部材接合面の性能評価に関する研究（その 1）部材実験より得られた接合面のすべり変位について，（その 2）既往の耐力評価式とずれ変位量との関係，大会学術講演日本建築学会梗概集，C-2，構造，1995.8，pp.643-646
- [5] 中野克彦，松崎育弘：プレキャスト RC 部材接合面におけるせん断抵抗要素の耐力累加方法，日本建築学会構造系論文集，第 550 号，2001.12，pp.151-158
- [6] 大淵英夫，鈴木基晴，南尚吾，中野克彦，松崎育弘：ずれ変形を考慮したプレキャスト部材接合面におけるせん断伝達に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 491 号，1997.1，pp.97-104
- [7] 江戸宏彰，武田寿一：鉄筋コンクリート構造物の弾塑性地震応答フレーム解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，1977.10，pp.1877-1878
- [8] 千葉隆史，芳村学：接合面でのすべりを考慮した PCa 構造の地震応答解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15-2，pp.707-712，1993
- [9] 川端一三：PCa 造試設計建物，PRESS 指針分科会解析ワーキング資料，日本建築センター，1992