

## 外側耐震補強フレームの補強効果に及ぼす接合部荷重－変形関係の影響に関する解析的検討

大阪工業大学 大学院博士課程〔株建研〕 正会員 ○坂田 博史  
 大阪工業大学 正会員 工博 中塚 信  
 〔株建研〕 松本 孝雄  
 〔株建研〕 中村 優

Abstract : Recently, seismic retrofitting for existing buildings is an urgent problem. Because residents in the buildings often demand to reinforce them as quickly as possible while living, various seismic retrofitting methods by setting new strengthening frames outside the existing buildings have been proposed. Therefore, a estimation method for performance of slab joints by pre-stressing connection between existing frames and newly added strengthening frames have been investigated by us. In this study, influences of load-deflection relationship of the slab joints on load-deflection relationships of newly added strengthening frames are examined analytically by using the proposed method.

Following main results are obtained. 1) Effects of newly added strengthening frames are controlled by characteristics of load-deflection relationships both the joints and the strengthening frames. 2) Satisfactory effects of the strengthening frames are obtained in the case of shear span ratio below 0.5 and yielding rotation angle over 0.4% of the strengthening frames. 3) Slip commencement deformations of the joints influence remarkably on efficiency of the strengthening frames.

Key words : Seismic retrofit, Pre-stressing connection, Load-deflection relationship of joint, Efficiency of newly added strengthening frames

### 1. はじめに

現在の緊急課題となっている既存建物の耐震改修では、建物を使用しながら補強可能な工法に対する要望が強く、それを実現できる建物外側からの耐震補強、すなわち外側耐震補強工法が種々提案されている。

外側耐震補強では、既存架構と新設補強架構との構造芯のずれが存在するため、既存架構内における補強とは異なる特有の課題がある。「外側耐震改修マニュアル」<sup>1)</sup>においても既存と新設架構との接合部のずれ変形をできるだけ小さくすることが基本的な成立条件とされており、接合部の設計に際して、せん断力だけでなく既存と新設架構との芯ずれによる偏芯モーメントを考慮することが記載されている。しかし、両応力に対する耐力設計のみを別々に行っているのが現状であり、外側耐震補強の構造性能と密接に関係すると考えられる既存と新設架構との接合部の荷重－変形関係については十分に考慮されていない。

筆者らは、PC圧着型外側耐震補強設計法の確立を目指して、これまで圧着接合部の挙動に関係する基礎実験研究と既存と新設架構をスラブを介して圧着接合したモデル試験体による実験研究を行い、2つの基本特性、すなわちコンクリートの支圧応力－めり込み変形特性と圧着コンクリート間の一面せん断応力－ずれ変形特性についてのモデル、および圧着接合部の水平荷重－水平変形関係の推定方法を提案してきた<sup>2)~4)</sup>。

本研究は、既存と新設架構をスラブを介してPC鋼棒により圧着接合した、接合部の荷重－変形関係に関する筆者らの推定方法を用いて解析的検討を行い、接合部の荷重－変形関係が外側耐震架構の補強効果に及ぼす影響、および新設補強架構の荷重－水平変形関係と補強効果との関わりを明らかにするものである。

### 2. 接合部の荷重－変形特性モデル

#### 2.1 接合部特性の各モデル

##### (1) コンクリートの支圧応力－めり込み変形特性モデル

圧着接合部では、既存と新設架構との芯ずれによる偏芯モーメントが存在し、それに起因するめり込み



図-5は、接合部の荷重-変形関係推定方法でのポイントとなる水平荷重(Q)- $\delta$ の算定方法概念図を示すが、その要点は想定めり込み鉛直変位( $\delta V$ )に対して開き鉛直変位( $\delta V'$ )を変化させ、圧着接合面における平面保持仮定のもとでC=Tの条件を満足する断面力および変形状態を求めることである。

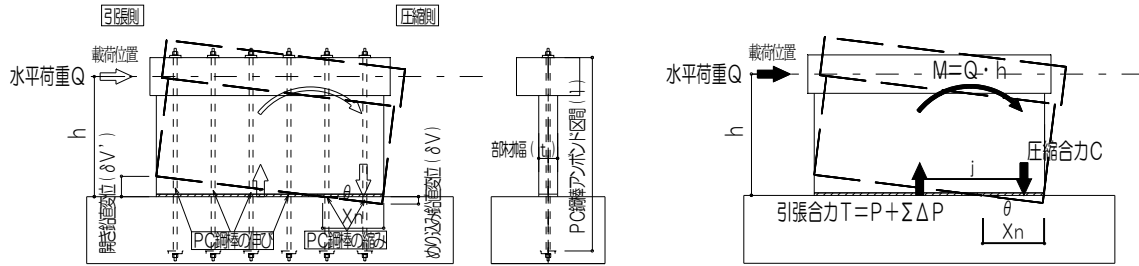


図-5 Q- $\delta$ の算定方法概念図

### 3. 接合部の荷重-変形関係が新設架構の補強効果に及ぼす影響についての解析的検討

建物の地震時水平力に対する設計では、床自体の変形は柱などの水平変位と比較すると非常に小さく、その影響は小さいものとして一般に考慮しない、すなわち剛床仮定が成立するとしている。

しかし、地震時における架構の挙動概念図を図-6に示すが、実際には既存建物と新設補強架構との接合部には、前述した図-4の各種変形( $\delta s_1$ ,  $\delta s_2$ ,  $\delta \gamma$ ,  $\delta M$ )による接合部変形( $\delta H$ )が生じると考えられる。一方、図-7は新設補強架構の荷重(Q)-水平変形( $\delta$ )関係の概念図を示したものである。剛床仮定が成立する場合、ある水平変形( $\delta x$ )時に補強架構に想定する負担荷重は $Q_x$ であるが、接合部変形( $\delta H$ )を考慮すると $\delta x$ はその分だけ小さく $\delta x'$ ( $=\delta x - \delta H$ )となるので、実際に寄与する荷重は $Q_x$ から $Q_{x'}$ に減少する。 $Q_{x'}$ の大きさは、図-6, 7の概念図より明らかなように、接合部のせん断力(QH)- $\delta H$ 関係、さらには新設補強架構のQ- $\delta$ 関係にも大きく影響を受けるものと推察される。それ故ここでは、2章で述べた圧着接合部の、基本特性モデルを用いた荷重-変形関係推定方法を用いて解析的検討を行い、各要因が新設架構の補強効果に及ぼす影響について考察する。

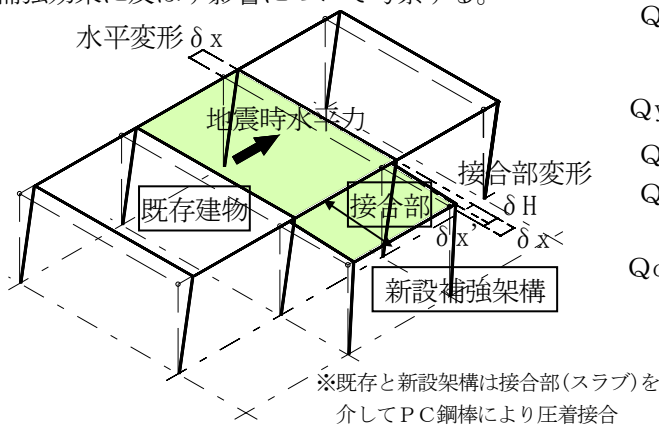


図-6 地震時における架構挙動の概念図

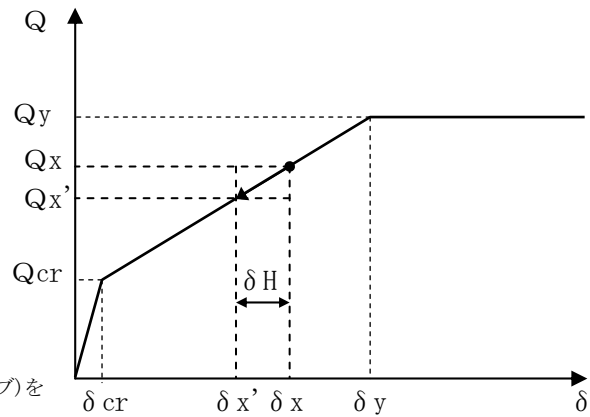


図-7 新設補強架構のQ- $\delta$ 関係概念図

#### 3.1 検討モデルの各要因と水準

基本としたモデル接合部は、図-8に示すように、実際の既存学校建物における外側耐震補強でよく見られる、1スパンが4.5m(接合面長さD:4.5-1.1=3.4m)、既存架構と新設補強架構との構造芯のずれ(h)が1.6m、スラブ厚さ(t)が300mm、および6本のPC鋼棒( $\phi 32$ mm)により圧着接合されたものを想定した。接合部のQH- $\delta H$ 関係に及ぼす各要因の影響を詳細に検討した既報<sup>5)</sup>の結果によれば、接合部のQH- $\delta H$ 関係はシアスパン比(h/D)および初期プレストレス力(P)に影響を受けるが、既存部のコンクリート強度( $\sigma_B$ )の影響はあまり受けない。したがって本検討では、4.5m1スパンとしてh/Dの影響を調べるために構造芯のずれ(h)を0.8, 1.6, 2.4, 3.2mの4種類とし、PC鋼棒1本あたりのPは200, 300, 400, 500kN/本の4種類とした。なお、既存部の $\sigma_B$ の影響は小さいので一般的に考えられる最小値の13.5N/mm<sup>2</sup>とし、補強架構の $\sigma_B$ はプレキャストを想定して50N/mm<sup>2</sup>とした。一方、新設補強架構は、1層で階高が3.6

m, 1 スパンの降伏荷重 $Q_y$ が1500kNで、次の3種類の $Q-\delta$ 関係、すなわち架構の降伏時変形角 $R_y$ (=降伏変形 $\delta_y/3600$ )が1/500( $\delta_y=7.2\text{mm}$ , 靱性指標 $F=0.80$ ), 1/250( $\delta_y=14.4\text{mm}$ ,  $F=1.00$ ), および1/150( $\delta_y=24.0\text{mm}$ ,  $F=1.27$ )の3種類を仮定した。なお、検討に際し、ひび割れ荷重( $Q_{cr}$ )およびその時の変形( $\delta_{cr}$ )は、耐震改修時の設計に一般に適用されている「RC耐震診断基準」<sup>6)</sup>で仮定されているように、それぞれ $0.3 \times Q_y (=0.3 \times 1500=450\text{kN})$ と $0\text{mm}$ とした。圧着接合における接合面のずれ変形( $\delta_{sl}$ )は、図-2に示したようにずれ破壊時で $0.15\text{mm}$ と小さい値を仮定している。一方、「外側耐震改修マニュアル」では接着系アンカーの場合に対して、せん断ずれ変形を $2\text{mm}$ 以下に制限するための耐力低減係数( $\phi_s$ )を考慮することが記載されている。それ故、本研究でもずれ変形量の影響を追加的に調べるために、架構の $Q_y$ 時に $\delta_{sl}$ が $1\text{mm}$ ,  $2\text{mm}$ , および $5\text{mm}$ の場合も検討した。検討モデルの各要因と水準を表-1にまとめて示す。

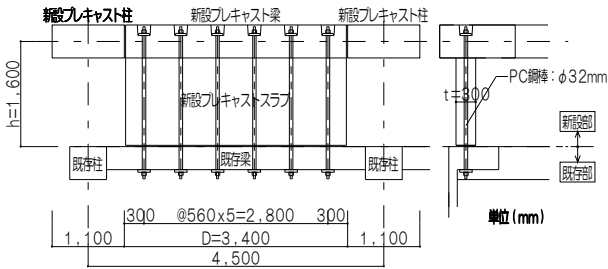


図-8 モデル接合部の概要

### 3.2 解析結果と考察

図-9に解析結果の整理方法概要を示す。図中、実線は仮定する新設補強架構の $Q-\delta$ 関係、一点鎖線は2.2節に示す解析方法により求めた圧着接合部の $QH-\delta H$ 関係を示している。接合部のせん断力 $QH$ は既存建物から新設架構に移行する荷重で、新設架構の荷重 $Q$ より小さくなる。しかし、移行荷重を厳密に算定することが本研究の目的でなく、要因も増え煩雑になるため、ここでは簡単化のために $QH=Q$ と仮定した。その仮定より、補強架構の荷重 $Q_x'$ での接合部の影響を考慮した変形は、接合部の $\delta H$ と補強架構の $\delta x'$ とを累加した値 $\delta_x$ となり、荷重( $Q'$ )-変形( $\delta$ )関係は二点鎖線のように表せる。また、水平変形 $\delta_x$ 時において補強架構の $Q_x$ と接合部の影響を考慮した $Q_x'$ との比が、架構の補強効果を表すものと考え、接合部による強度寄与係数 $\alpha_{jj}(=Q_x'/Q_x)$ と定義する。

#### (1) 新設架構の補強効果に及ぼす各要因の影響

図-10は新設架構の $Q-\delta$ 関係における降伏時変形角 $R_y$ が1/250( $\delta_y=14.4\text{mm}$ ,  $F=1.00$ )で、 $\sigma_B=13.5\text{N/mm}^2$ ,  $P=400\text{kN/本}$ の場合を例にとって、新設架構の補強効果に及ぼす構造芯のずれ $h$ の影響を調べたものである。図中、実線が補強架構、白抜き記号が接合部、黒塗り記号が接合部を考慮した補強架構を示している。接合部の $QH-\delta H$ 関係は、荷重の増大に伴う剛性低下がない $h$ が小さい $0.8\text{m}$ の場合から、 $h$ が大きくなるに従い顕著な剛性低下が見られる。したがって、接合部を考慮した補強架構の $Q'-\delta$ 関係にも $h$ の増大に対し剛性の低下が見られ、その影響度は $h$ が大きくなるにしたがい増える傾向を示している。

図-11は新設架構の $R_y$ が1/250で、 $h=1.6\text{m}$ ,  $\sigma_B=13.5\text{N/mm}^2$ の場合を例にとって、新設架構の補強効果に及ぼす初期プレストレス力 $P$ の影響を調べたものである。接合部の $QH-\delta H$ 関係は $P$ が大きくなると若干の剛性の増加はみられるが $h$ の場合と比較すると影響は小さい。しかし、接合部のずれ破壊耐力は $P$ に依存するため、 $P$ が小さい $200\text{kN/本}$ の場合、接合部を考慮した補強架構の $Q'-\delta$ 関係は、補強架構の降伏

表-1 検討モデルの各要因と水準

要因		水準				
モデル形状・耐力	架構形状	スパン(m)	4.5			
		階高(m)	3.6			
		スパン数	1			
	接合面形状	層数	1			
		接合面長さ: D(m)	3.4			
		接合面厚さ: t(m)	0.30			
	架構の降伏荷重: $Q_y$ (kN/スパン)	1500				
	架構の降伏時変形角: $R_y$	1/500, 1/250, 1/150				
	構造芯のずれ: h(m)	0.8	1.6	2.4	3.2	
	シアスパン比: h/D	0.235	0.471	0.706	0.941	
接合部	既存部のコンクリート強度: $\sigma_B$ ( $\text{N/mm}^2$ )	13.5				
	新設部のコンクリート強度: $\sigma_B$ ( $\text{N/mm}^2$ )	50				
	プレストレス力	初期プレストレス力: P(kN/本)	200	300	400	500
		PC鋼棒本数: n(本)	6			
		初期圧着応力: $\sigma_o$ ( $\text{N/mm}^2$ )	1.18	1.76	2.35	2.94
接合面のずれ変形特性モデル	圧着接合	$\tau_{\text{max}}$ 時の $\delta_{sl}=0.15\text{mm}$				
	ずれ変形( $\delta_{sl}$ )量の検討	$Q_y$ 時の $\delta_{sl}=1, 2, 5\text{mm}$				

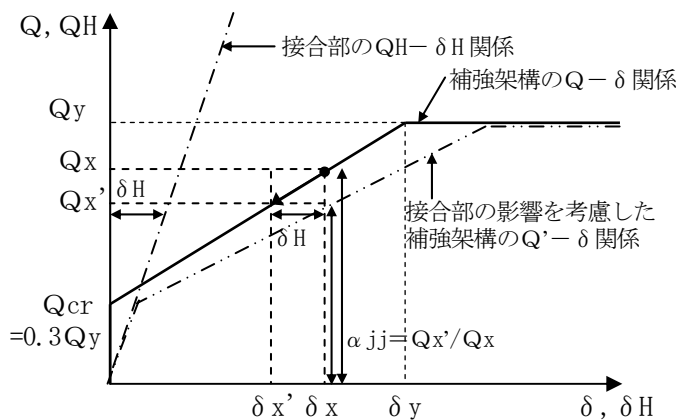


図-9 解析結果の整理方法概要

荷重 $Q_y$  (1500kN) より低い荷重 ( $0.85 \times 200\text{kN}/\text{本} \times 6\text{本} = 1020\text{kN}$ ) でのずれ破壊に対応するものとなる。言い換えれば、架構の耐力を全て活かすには、ずれ破壊を生じさせない $P$ を選ぶ必要がある。

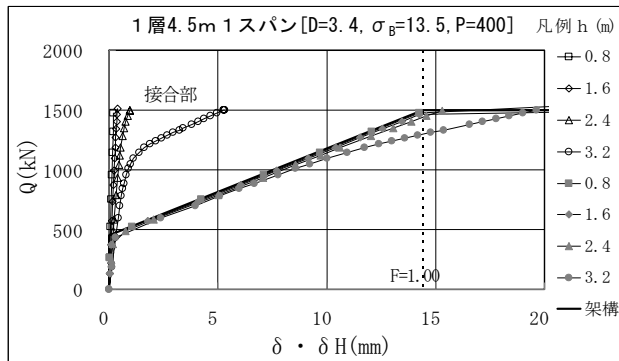


図-10 hの影響

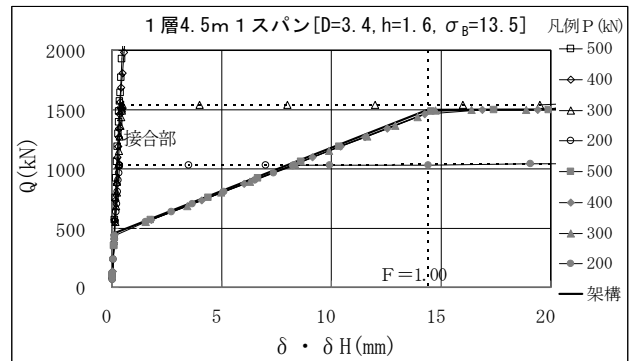
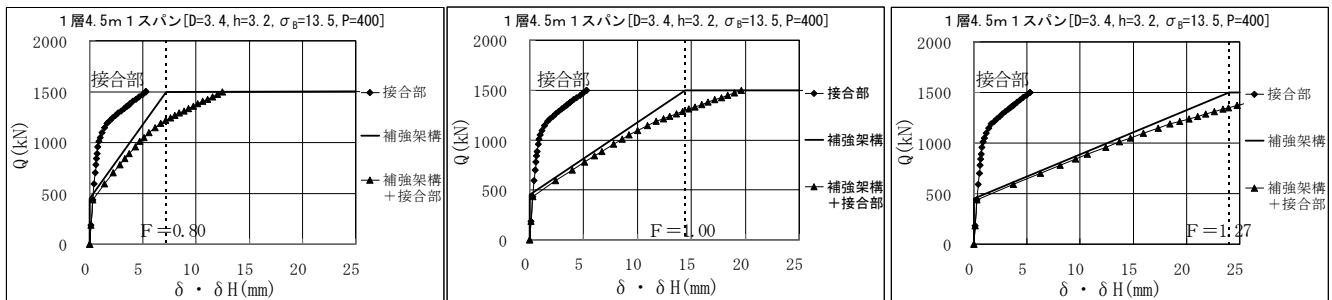


図-11 Pの影響

図-12は $h = 3.2\text{m}$ ,  $\sigma_B = 13.5\text{N}/\text{mm}^2$ ,  $P = 400\text{kN}/\text{本}$ の場合を例にとって、補強効果に及ぼす新設架構の $Q-\delta$ 関係における降伏時変形角 $R_y$ の影響を調べたものである。 $h$ が $3.2\text{m}$ の場合、接合部の $QH-\delta H$ 関係には顕著な剛性低下が見られるため、その影響を考慮した荷重 $Q'$ は $Q$ に比べ明らかに小さくなっている。しかし、その割合は架構の $R_y$ が大きくなるに従い小さくなる傾向が見られる。これは、 $R_y$ が大きくなるに従いひび割れ荷重 $Q_{cr}$ 時から降伏荷重 $Q_y$ 時までの剛性、すなわち勾配が小さくなるので、同一の接合部変形による荷重差が小さくなるためだと考えられる。したがって、接合部の影響を小さくするという観点のみからは、同一の $Q_y$ で考える場合、補強架構の降伏時変形角 $R_y$ を大きくした方がよいと考えられる。



(a)  $R_y = 1/500$  ( $F = 0.80$ ) 架構

(b)  $R_y = 1/250$  ( $F = 1.00$ ) 架構

(c)  $R_y = 1/150$  ( $F = 1.27$ ) 架構

図-12  $R_y$ の影響

(2) 接合部による強度寄与係数( $\alpha_{jj}$ )

新設補強架構の補強効果をさらに詳細に調べるため、接合部による強度寄与係数 $\alpha_{jj} (= Q' / Q)$ と水平変形( $\delta$ )の関係に及ぼす、主要因である $R_y$ と $h$ の影響に関する検討結果を図-13に示す。 $\alpha_{jj}$ はいずれの $R_y$ の場合でも、図-9の模式図から分かるように、 $Q$ と $Q'$ の差が $Q-\delta$ 関係の $\delta_y$  ( $R_y$ )に達するまでは大きくなるため減少し、到達後は小さくなるので増加し、 $R_y$ 時に極小値をもつ。また、各 $R_y$ では $h$ が大きくなると接合部変形が大きくなるので、 $\alpha_{jj}$ は $h$ の増加に対して減少し、とくに接合部の剛性低下が顕著な $h/D$ が $0.5$ を超える $h = 2.4, 3.2\text{m}$ の場合には低下度が大きい。一方、補強架構の $R_y$ の増加に対しては、前述したように同一の接合部変形による荷重差が小さくなるため、いずれの $h$ でも $\alpha_{jj}$ は大きくなる傾向が見られる。同図によれば既報<sup>5)</sup>で明らかにしたように、 $h/D$ が $0.5$ 以下で剛性低下が無い $h = 1.6, 0.8\text{m}$ の場合、接合部変形が小さくなり、 $R_y$ が $1/250$ 以上であれば $\alpha_{jj}$ は $0.98$ 以上で、接合部の変形の影響は考慮しなくても問題ないものと考えられる。

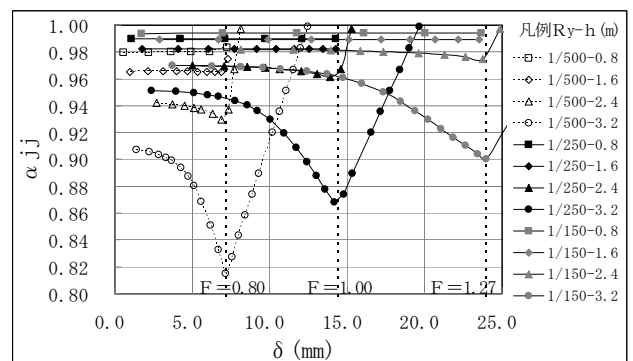


図-13  $\alpha_{jj}-\delta$ 関係 ( $R_y, h$ の影響)

(3) 接合面の荷重—ずれ変形関係の影響

補強架構の  $R_y$  が  $1/250$  で、  $h = 1.6\text{m}$ 、  $P = 400\text{kN}$  の場合において、  $R_y$  時に接合面のずれ変形  $\delta_{sl}$  のみが  $1\text{mm}$ 、  $2\text{mm}$  および  $5\text{mm}$  になるように荷重に対して線形的に変化させたとき、  $\delta_{sl}$  の増大が  $Q' - \delta$  関係および  $\alpha_{jj} - \delta$  関係にどのような影響を及ぼすかを調べた結果が図-14 (a), (b) である。図から明らかなように、新設架構の補強効果に接合面のずれ変形が及ぼす影響は非常に大きく、ずれ破壊時の変形量が  $0.15\text{mm}$  と小さい圧着接合では  $\alpha_{jj} = 0.98$  であるのに対し、ずれ変形の増大に従い  $0.94$ 、  $0.90$ 、  $0.80$  と大きく減少する。すなわち、補強効果を上げるためには、接合面のずれ変形をできる限り小さくすることが重要であり、ずれ変形が小さい PC 圧着接合は接合部の影響を小さくし、新設架構の補強効果を大きくするためには非常に有効な工法であると言える。

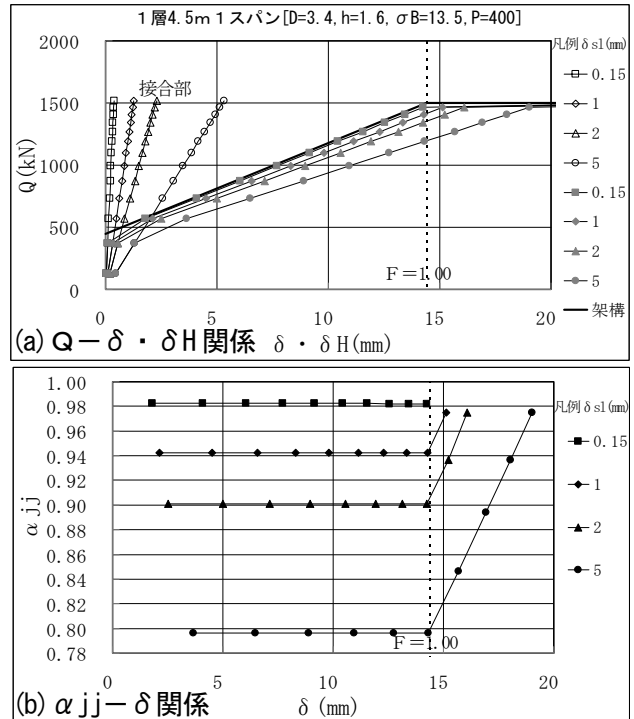


図-14 接合面のずれ変形の影響

4. まとめ

接合部の荷重—変形関係が新設架構の補強効果に及ぼす影響について得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 新設補強架構に想定する変形での負担荷重は、架構自身の荷重—変形関係において考えている強度寄与係数  $\alpha_j$  以外に、接合部の荷重—変形関係の影響による強度寄与係数  $\alpha_{jj}$  を考慮する必要性を示した。
- (2) 接合部の強度寄与係数  $\alpha_{jj}$  は、接合部の荷重—変形関係の影響だけでなく、新設補強架構の荷重—変形関係の影響を受け、架構の降伏荷重  $Q_y$  が同じ場合には、降伏時変形角  $R_y$  に依存することを示した。
- (3) 新設補強架構の補強効果を上げる、すなわち  $\alpha_{jj}$  を大きくするためには、  $h/D \leq 0.5$  として接合部の変形を小さくし、架構の  $R_y$  を  $1/250$  ( $F = 1.0$ ) 以上とすることが有効であり、その時の  $\alpha_{jj}$  は  $0.98$  となり接合部の影響はほとんど考える必要がないことを明らかにした。
- (4) 新設補強架構の補強効果に接合面のずれ変形が及ぼす影響は非常に大きく、  $\alpha_{jj}$  を大きくするためには、接合面のずれ破壊を生じさせず、ずれ変形をできる限り小さくすることが重要で、その実現にはずれ変形が小さい PC 圧着接合が有効な工法であることを明らかにした。

謝辞

本研究を行うにあたり、平成19、20年度科学研究費補助金(課題番号：19560585、代表者；中塚侑)を受けた。また、PC付着研究会の皆様には有益な議論を頂いた。ここに記して心より謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の「外側耐震改修マニュアル」，2002。
- 2) 坂田，森田，中塚，松本：PC圧着型外側耐震補強における圧着接合部の荷重—変形関係推定に関する基礎研究，プレストレストコンクリート技術協会 第18回シンポジウム論文集，pp. 327-332，2009.10
- 3) 坂田，森田，中塚：コンクリートの支圧応力—めり込み変形特性に関する研究(支圧強度式の提案と許容応力度の検証)，構造工学論文集 Vol. 56B，pp. 81-86，2010.3
- 4) 坂田，中塚，森田：PC圧着型外側耐震補強の圧着接合部における荷重—変形関係と破壊モードの推定，構造工学論文集 Vol. 57B，pp. 673-680，2011.3
- 5) 坂田，中塚，松本：研究報告 PC圧着型外側耐震補強における接合部構造特性と諸要因の影響，プレストレストコンクリート，Vol. 53，No.4，July 2011(掲載予定)
- 6) 日本建築防災協会：2001年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説