

論文 RC 造内部梁・柱接合部への柱端からの鉛直方向力に関する研究

田中 信也*1・浅田 勇人*2・林 静雄*3・上村 智彦*4

要旨 : 接合部終局強度の算定に必要となる柱から接合部に入力される鉛直方向力の評価において、柱接合部端位置の柱主筋の歪みが平面保持を仮定した解析値よりも引張側にシフトする。本研究では、柱軸力と柱主筋量を変数とした実験および3次元弾塑性有限要素法解析を行い、歪みのシフトの原因、およびシフト量の評価方法について検討を行った。シフトの主な原因として、梁曲げひび割れの進展と接合部の損傷に伴う柱危険断面の柱付け根位置から接合部内への移行が考えられる。また、接合部終局強度時の、接合部ストラットの圧壊に関連する柱付け根の圧縮域と圧縮力の増加は、引張側への歪みシフトをもたらすと考えられる。

キーワード : 梁・柱接合部, 接合部終局強度, 柱軸力, 付着, 有限要素法, 接合部ひび割れ

1. はじめに

筆者らは、接合部アスペクト比（梁せい／柱せい）を変数とした内部梁・柱接合部の実験及び解析を行い¹⁾、接合部の終局強度の算定には、アスペクト比の変化に伴う接合部圧縮ストラットに入力される鉛直成分を考慮する必要があることを示した。しかし、上下柱危険断面の最外縁主筋の鉄筋の応力は、平面保持を仮定した解析で得られた鉄筋の応力から引張側にシフトする²⁾。また、外部接合部について歪みシフトの傾向について検討した論文はみられるが³⁾、内部接合部の歪みシフトの原因解明を試みた論文は殆どなく、柱からの鉛直方向力を算出する方法が見出せない現状である。

本研究では、シフト量に影響すると考えられる柱軸力と柱主筋量を変数として実験および3次元弾塑性有限要素法解析を行い、歪みシフトの原因、およびシフト量の評価方法について検討を行った。

2. 実験概要

実験変数は柱軸力と柱主筋量であり、試験体

は、基準試験体 S-60 の柱軸力を 0 とした試験体 S-0 と柱主筋量を変化させた試験体 L-60 の計 3 体である（記号：S(L)-N, S,L：柱主筋量の大小、

試験体		S-60	S-0	L-60
梁	$b_b \times D_b$	300 × 350		
	主筋	5-D19		
	肋筋	2-D10@60		
柱	$b_c \times D_c$	350 × 350		
	主筋	12-D16		8-D16
	帯筋	2-D10@60		
	軸力(kN)	588	0	588
接合部補強筋		2-D10@80 (※ $p_{jw} = 0.31(\%)$)		

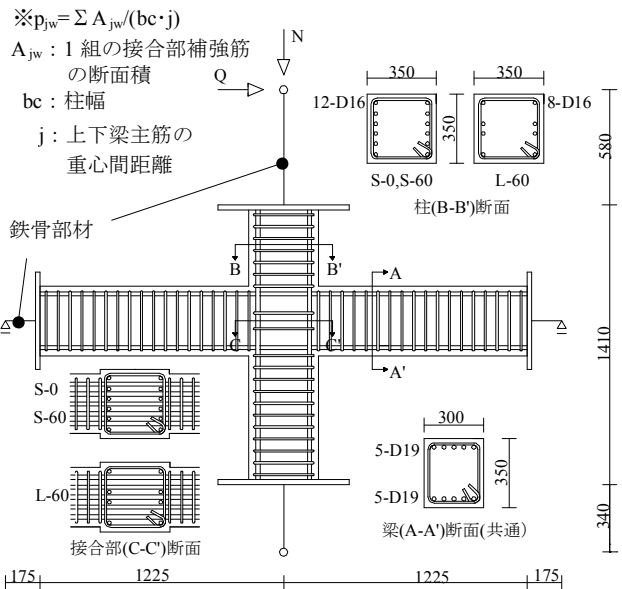


図-1 試験体形状 (単位 mm)

*1 東電設計株式会社 建築本部 (正会員)

*2 東京工業大学大学院 建築物理研究センター 環境理工学創造専攻

*3 東京工業大学 建築物理研究センター 教授 工博 (正会員)

*4 芝浦工業大学 工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

N：柱軸力)。試験体断面・寸法等を図-1に、使用材料特性を表-1、表-2に示す。全試験体接合部破壊が先行するように設計し、試験体形状は柱主筋量を除いて全て共通である。変数の採用理由は、接合部破壊型で接合部補強筋量を同一とした場合、柱主筋の挙動には、主に接合部の破壊性状に関連する柱軸力と、柱主筋量が影響すると考えたからである。加力については、柱脚をピン支持、梁端をピン・ローラー支持とした試験体の柱頭に一定圧縮軸力及び正負交番水平力を加えた。柱及び梁部材の反曲点近傍は、試験体の破壊性状に影響しないと考えられるので鉄骨部材を用いている。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

表-3には諸現象発生荷重を示す。接合部ひび割れの発生荷重は、S-0で18.4(kN)、L-60で45.6(kN)、S-60で48.0(kN)であった。また、図-2に最大変形時の接合部破壊性状を示す。いずれの試験体も接合部域コンクリートの剥落が顕著である。

図-3には層せん断力-層間変形角曲線を示す。なお、層せん断力は梁端で測定される梁せん断力から算出した。実験時の最大層せん断力は、全試験体で、梁および柱曲げ耐力理論値を下回り、また、全試験体について、最大層せん断力以降は急激に耐力低下している。

接合部端柱付け根位置の柱主筋歪みを図-4に示す。いずれの試験体も、実験値が平面保持を仮定した断面解析の値よりも引張側にシフトする。S-0では、柱主筋が最大層せん断力時に降伏している。最大層せん断力時に梁主筋はいず

表-1 鉄筋の材料特性

	D10	D16	D19
降伏強度[MPa]	389	437	445
ヤング係数[$\times 10^5$ MPa]	1.86	1.85	1.82

表-2 コンクリートの材料特性

圧縮強度 σ_B [MPa]	圧縮強度時歪 ϵ_c	引張強度 σ_t [MPa]	ヤング係数 E_c [MPa]
-31.2	-0.0025	2.60	2.30×10^4

※コンクリートは一度に打設した

表-3 諸現象発生時と最大層せん断力(kN)

	梁曲げひび割れ*1		柱曲げひび割れ*2		最大層せん断力
	実験値	計算値	実験値	計算値	
S-0	18.4	18.9	18.4	22.7	123.5
L-60	19.6	18.9	58.4	54.5	129.8
S-60	14.8	18.9	67.4	53.2	139.8

*1 $M_c = \epsilon_c \sigma_t \cdot Z_c$ *2 $M_c = (\epsilon_c \sigma_t + \sigma_0) \cdot Z_c$, $\epsilon_c \sigma_t = 0.56 \sqrt{\sigma_B}$

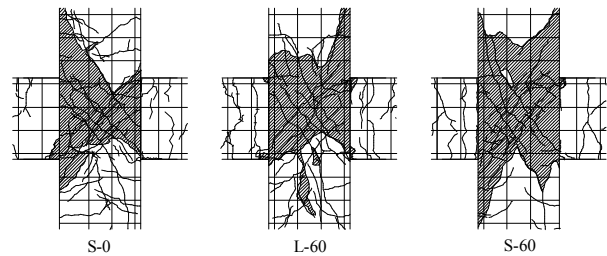
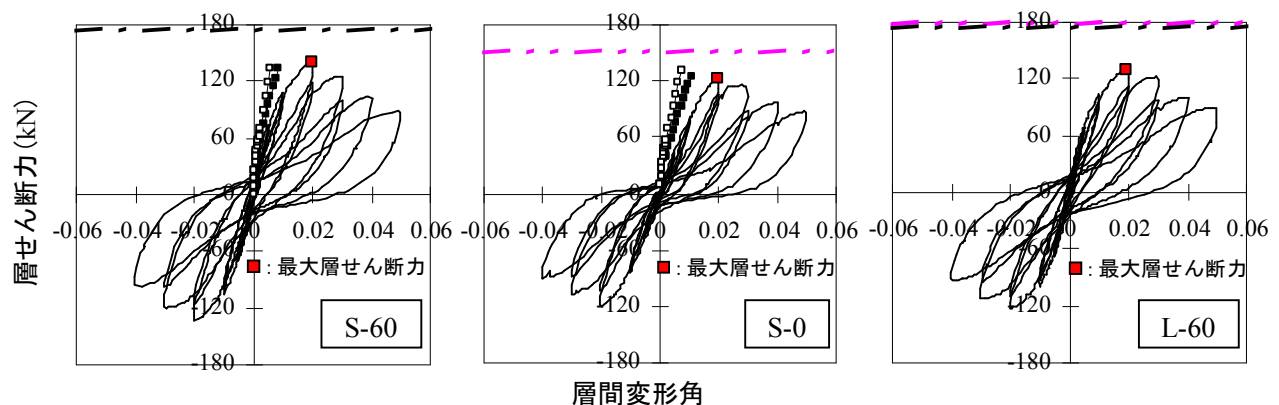


図-2 接合部の破壊性状(実験終了時)



— : 実験値 ■ : 解析1 □ : 解析2 - - - : 柱曲げ耐力理論値 ··· : 梁曲げ耐力理論値
(解析1, 2は有限要素法解析条件での取り扱いの相違で、その詳細は、本文4章の4.1に記載)

図-3 層せん断力-層間変形角関係

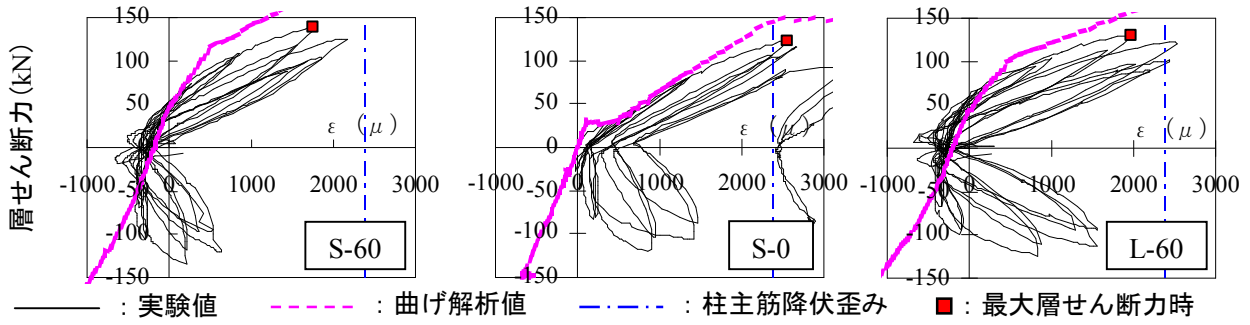


図-4 層せん断力-接合部端柱付け根位置主筋歪み関係

れの試験体も降伏していないが、接合部補強筋は降伏歪みに近い値であった。

3.2 接合部終局強度

最大層せん断力時の梁主筋の歪みから算出した接合部水平せん断力と、靱性指針⁴⁾で提案されている接合部終局強度式による計算値との比較を図-5に示す。S-0, L-60で実験値が若干小さいが、S-60については対応が良い。S-0は、柱主筋が降伏し、最大耐力が柱曲げ耐力に近いことから、柱曲げ降伏後の接合部破壊型、一方、L-60, S-60は柱主筋が降伏せず、最大耐力時の接合部破壊が顕著なことから接合部破壊型と判断した。

3.3 付着劣化に関する検討

柱に圧縮軸力が存在する場合、圧縮域が広いことから、付着劣化した場合に、同じ曲げ応力に対して、引張側柱主筋が引張力を負担し、歪みが引張側へシフトする可能性がある。

しかし、図-4から柱軸力のないS-0でも、歪みの実験値は、引張側にシフトすることがわかる。また、S-60とL-60の柱主筋の接合部端上と下の位置の応力差を用いて算出した接合部域柱主筋平均付着応力度を図-6に示す。L-60の劣化が顕著なのに対して、同じ層せん断力時での、柱接合部端位置柱主筋歪みの曲げ解析値と実験値を比較した図-7から、歪みのシフト量はS-60の方が大きい。柱主筋の歪みがシフトする原因として、付着劣化を考えただけでは、以上の点について説明できない。

柱主筋の接合部域における付着性状については、図-8の最大層せん断力時の接合部域柱主筋歪み分布の付着力に相当する歪み勾配を見ると、引張側では付着伝達は殆どない。それ以外

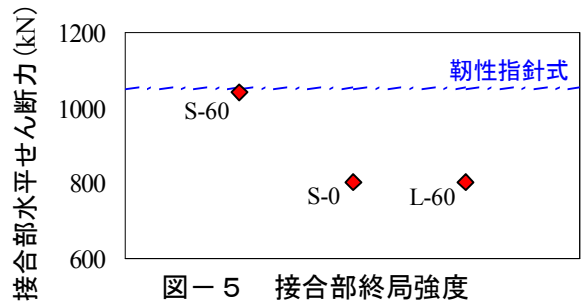


図-5 接合部終局強度

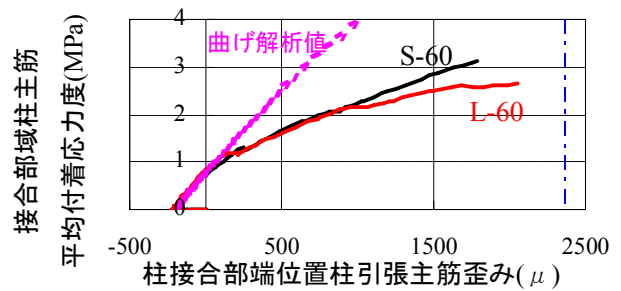


図-6 接合部域柱主筋平均付着応力度

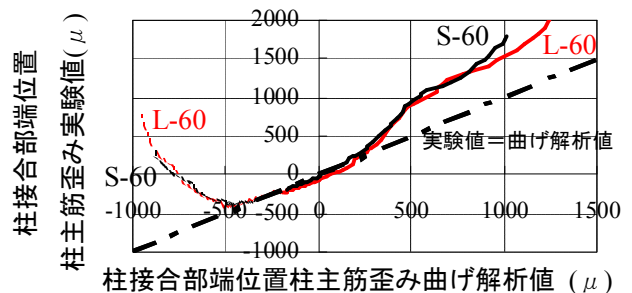


図-7 シフト量の比較

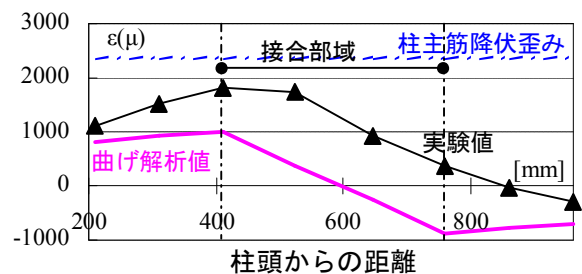


図-8 接合部域柱主筋歪み分布(S-60)

の部分では、最大層せん断力時の接合部端上下位置の、断面曲げ解析より求めた柱主筋の歪み

を直線で結んだ勾配と比較しても、殆ど劣化していないことがわかる。

4.3 次元有限要素法による解析的検討

4.1 解析概要

ここでは、3次元有限要素法による解析法を用いて、解析条件を完全付着とした場合でも、接合部域柱主筋歪みのシフトが見られるか検討を行う。解析対象は軸力を変数とした S-0 と S-60 である。

コンクリートと鉄筋要素の特性の取扱いについては、筆者等が過去に行った報告¹⁾と同様であるので省略する。鉄筋とコンクリートの材料特性は表-1に示す通りで、鉄筋の2次剛性については1次剛性の1/100とした。鉄筋とコンクリート間の付着は完全付着とした。この条件下で解析した結果を解析1と呼ぶことにする。また、解析1に接合部域のコンクリート要素の引張強度を増加させ、接合部域にひび割れが生じないような条件を加えた解析結果を解析2とする。解析では、S-60について梁端の拘束がない状態で、柱頭に荷重制御で軸力588(kN)を加え、次に

変位制御で柱頭水平方向に強制変位を与えた。

4.2 層せん断力-層間変形角関係

S-0 および S-60 の解析結果を、層せん断力(Q)-層間変形角曲線で図-3中に示す。S-0の解析値における初期剛性は実験結果と比較して高い。S-0では柱軸力がないため、実験初期段階に滑りが生じ、実験時の初期剛性が低くなっていると思われる。また、ひび割れ発生以降の剛性は、両試験体において解析結果が高くなっている。解析では、柱および梁付け根要素に圧壊が発生後、解が発散したため、本論文ではそれ以前の、実験時の最大層せん断力までを検討範囲とした。

4.3 解析における柱主筋歪みシフトの傾向

解析1での柱付け根位置の柱主筋要素の歪みを図-9に示す。完全付着にもかかわらず、圧縮側の主筋が引張側へシフトしている。この原因として接合部域に発生するひび割れの影響が考えられる。そこで、接合部域のコンクリート要素の引張強度を増加させ、接合部ひび割れが生じない条件で解析を行い、先の解析結果と比較した(解析2)。図-9の、接合部の損傷が顕著となる(実験時の最大層せん断力の7割程度)

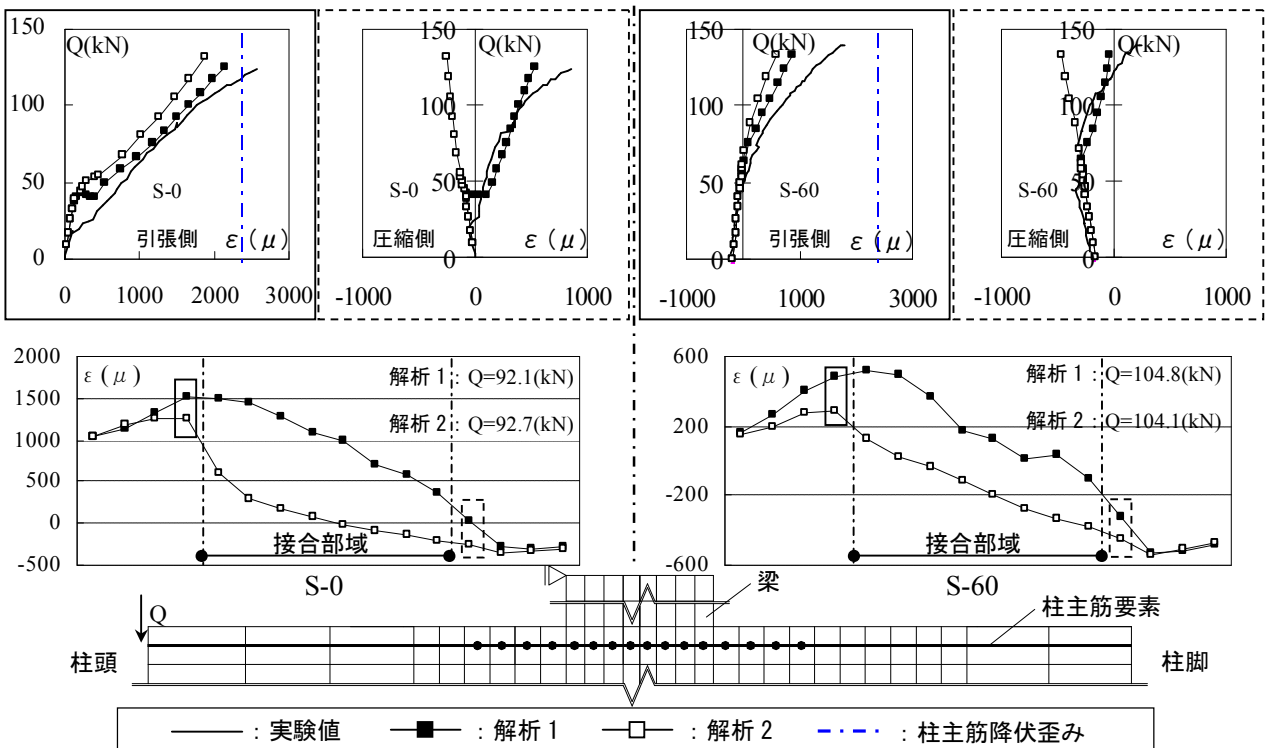


図-9 接合部ひび割れが柱主筋要素歪み分布に与える影響

ほぼ等しい層せん断力時で比較した柱主筋歪み分布から、接合部域のひび割れの発生によって、接合部域柱主筋要素の歪みが、全体的に引張側にシフトすることがわかり、実験においても、

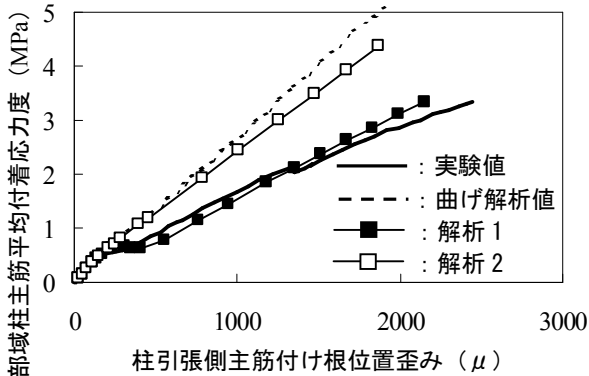


図-10 接合部域柱主筋付着性状 (S-0)

接合部ひび割れの発生が原因で、柱主筋の歪みが、曲げ解析値よりも引張側にシフトしたと考えられる。また、S-60も同様であるが、S-0の柱付け根位置での歪みを用いた接合部域柱主筋平均付着応力度を図-10に示すと、接合部ひび割れにより引張側主筋の歪みがシフトするために、付着劣化傾向にあるように見える。

4.4 解析における梁主筋歪みシフトの傾向

柱主筋と同様に、実験と解析における梁付け根位置の梁上端筋要素の歪みを図-11に示す。梁主筋引張側の歪みは、実験では軸力の影響はあまり見られない。これに対し解析1では、接合部のひび割れ発生時に引張方向にシフトし、S-0では、引張側および圧縮側で、S-60よりもシフトが顕著である。

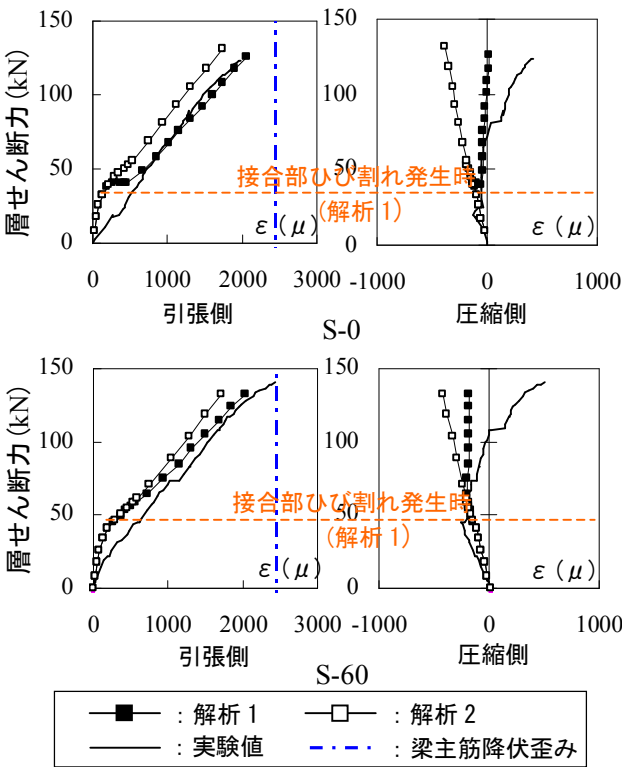


図-11 接合部ひび割れの梁主筋要素歪み分布への影響

5. 危険断面の移行に関する検討

前項の検討、および、実験及び解析時の接合部域柱主筋の歪み分布から、柱付け根から接合部内に渡って、歪みがほぼ一定となっている領域がある。従って、柱主筋歪みのシフトは、図-12のように梁曲げひび割れの進展と接合部

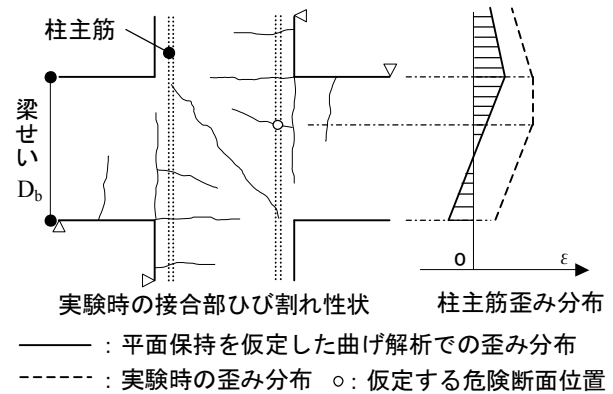


図-12 柱危険断面の移行 概念図

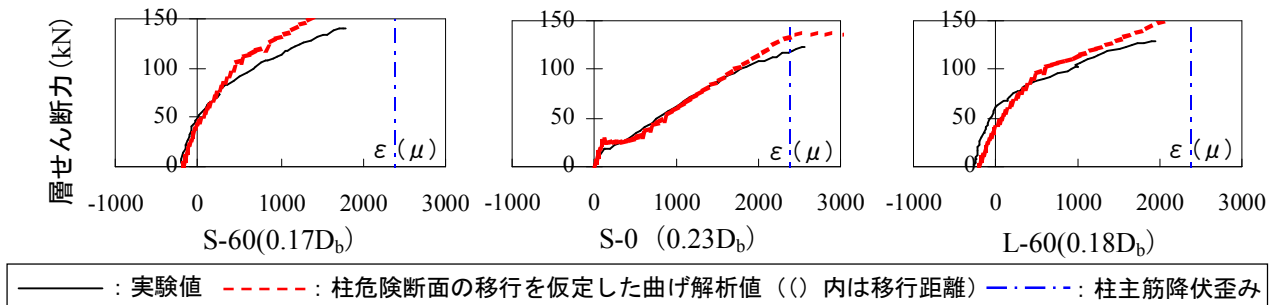


図-13 柱危険断面の移行を考慮した曲げ解析

内に発生する柱曲げひび割れによって、危険断面が柱付け根から接合部内のひび割れ位置に移行するためと考えられる。

最大層せん断力時に接合部内に生じる柱曲げひび割れと柱主筋が交わる位置を危険断面（図-12 中○印）と考えて計算し、柱付け根位置の測定された柱引張側主筋歪みとの比較を図-13 に示す。なお、図中には測定されたひび割れから接合部端柱付け根位置までの距離（ $0.17D_b, 0.23D_b, 0.18D_b$ ）を示す。図-13 から、計算値が実験値に近づくが、最大層せん断力付近では実験値の方が大きくなる。

また、梁主筋の解析結果についても、S-0 の柱軸力がないために、早期に柱曲げひび割れが進展し、危険断面が S-60 よりも早期に接合部内へ移行することが考えられる。

6. 接合部破壊が歪みのシフト量に与える影響

図-14 に歪みシフトが特に顕著である S-60 の正荷重時に形成されると考えられる接合部圧縮ストラット方向に並列に 3 箇所配置したモールドゲージによって測定した接合部圧縮ストラットの歪みを示す。図から最大層せん断力以前に中央部で圧縮強度時歪みに達し、その後離れたゲージでも圧縮強度時歪みに達することがわかる。このことは、柱の圧縮域の拡大に関連する接合部ストラット圧縮域の増大を示している。結果として、柱の圧縮域の拡大が、柱主筋の歪のシフトをもたらすことが考えられる。

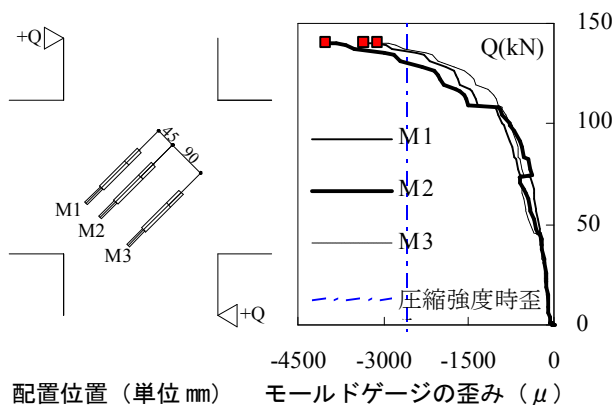


図-14 接合部圧縮ストラットの歪み (S-60)

7. まとめ

接合部に入力される鉛直方向力の算出に必要な接合部端柱主筋の歪みが、曲げ解析値よりも引張側へシフトする現象について、以下の知見を得た。

- 1) 柱軸力がない試験体でも柱主筋の歪みは曲げ解析値よりも引張側にシフトする。
- 2) 3次元有限要素法解析において、完全付着とした場合でも、接合部域のひび割れの発生により、柱主筋の歪みは引張側にシフトする。
- 3) 1),2)から、柱危険断面が、柱付け根位置より接合部内へ移行することが、歪みシフトの主たる原因と考えられる。
- 4) 最大層せん断力付近での接合部域の圧壊は、柱付け根主筋の引張側への歪みシフトと関連すると考えられる。

謝辞

本研究は、東京工業大学物理研究センターとの共同研究であり、また、実験にあたっては、首都大学東京北山先生および研究室の方々、本学岸田先生にご協力いただきました。

参考文献

- 1) 田中信也, 上村智彦, ほか: 鉄筋コンクリート造内部梁・柱接合部の接合部アスペクト比の変化に伴う接合部せん断挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.391-396, 2005.7
- 2) 藤井 栄, 森田司郎: 鉄筋コンクリート内部、外部接合部の性状の比較, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.2, pp.691-696, 1990.7
- 3) 浅草 肇, 角 徹三, ほか: 鉄筋コンクリート造柱はり外部接合部内主筋の応力性状(その2 柱主筋の応力), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.401-402, 1990.10
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説, 1997