

論文 掻き出し破壊を伴う梁筋定着機構に関する2次元非線形有限要素解析

天野 達也^{*1}・後藤 康明^{*2}・城 攻^{*3}

要旨：RC造外部柱梁接合部内に90度曲げ上げ定着した梁下端筋の掻き出し定着破壊実験から典型的な破壊亀裂パターンを示す試験体を対象として、2次元非線形有限要素解析を行い、その諸性状を検討した。破壊を支配するコンクリートの亀裂面を離散化し、骨材の噛み合い作用及び亀裂を横切る柱筋のダウエル作用をモデル化する事により、実験で得た耐力をおおむね推定できるようになった。また破壊亀裂面における滑り抵抗の耐力に与える影響、ダウエル作用のモデル化の違いによる横補強筋の挙動及び接合部横補強筋比の増加に伴う掻き出し破壊定着耐力の増加などの基本性状が解析結果で示された。

キーワード：掻き出し破壊, 2次元FEM, 骨材の噛み合い作用, ダウエル作用, 横補強筋

1. はじめに

鉄筋コンクリート造柱梁接合部において、外柱など梁主筋を通し配筋できない場合では、90度折り曲げ定着を行うのが一般的な配筋法である。著者らの実験的研究¹⁾により接合部における折り曲げ定着破壊形式は3種(側方割裂破壊・局部圧縮破壊・掻き出し破壊)に分類された。側方割裂破壊に関しては和泉らの研究²⁾により、折り曲げ鉄筋の付着力と支圧力の組み合わせをボンドリンクによる簡便なモデルで2次元応力解析でも間接的に評価できることが示された。これに対して掻き出し定着破壊は梁筋列の群効果によりコンクリートが塊状に掻き出される破壊形式であり、梁筋の付着よりもむしろコンクリートの斜め引張り破壊や滑り破壊が主たる破壊要因と考えられる。しかしこの種の破壊機構に関する解析的研究はほとんど無いため、本報では2次元非線形有限要素解析を適用し、掻き出し定着破壊の基本性状について検討を行った。

略し、柱形の接合部想定位置に引張り側梁筋のみを折り曲げ定着した既発表のものである。¹⁾ 図-1に示すように基準試験体LA1-1は想定階高1750mm、梁応力中心間距離328mm、柱せい400mm、柱幅300mm、梁筋水平定着長200mm、梁筋余長部長228mm、側方被り厚64.5mm、コンクリート設計基準強度30MPa、横補強筋比0.21%、静的な一方載荷、軸力比0である。解析では配筋間隔がLA1-1と同一で接合部横補強筋比0.42%のLA7-1, 同0.83%で配筋間隔が45mmのLA7-2も併せて検討した。試験体諸元および材料特性をそれぞれ表-1, 表-2に示す。

表-1 試験体諸元

試験体名	LA1-1	LA7-1	LA7-2
仮想梁	4-D19 (引張り筋)		
柱	10-D16 (圧縮・引張り共に 5-D16)		
	2-6φ@90 (pw=0.21%)		
接合部	フープ	2-6φ@90 (pw=0.21%)	4-6φ@90 (pw=0.42%)
			4-6φ@45 (pw=0.83%)

表-2 材料定数

試験体名	LA1-1			LA7-1			LA7-2			
	種類	D19	D16	6φ	D19	D16	6φ	D19	D16	6φ
コンクリート	σ_B (MPa)	30.9			32.1			31.0		
	σ_t (MPa)	2.43			3.00			2.79		
	ϵ_{max} (μ)	2750			2700			2360		
	E_C (GPa)	21.4			24.3			25.9		
鉄筋	σ_y (MPa)	723	374	312	659	369	327	659	369	327
	ϵ_y (μ)	3650	2180	1780	3620	2460	1730	3620	2460	1730
	E_s (GPa)	207	172	175	184	159	199	207	172	175

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

解析対象試験体は、梁形及び圧縮側梁筋を省

*1 三菱重工業(株) 横浜製作所 工修(正会員)
 *2 北海道大学助教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 工博(正会員)
 *3 北海道大学教授 工博(正会員)

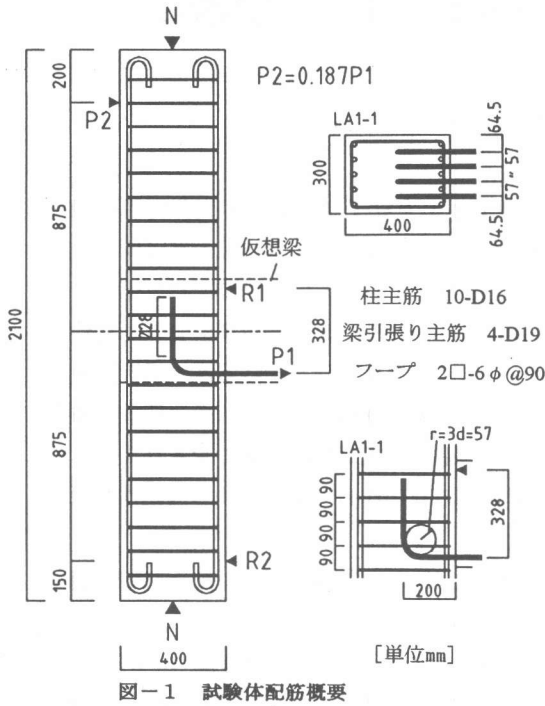


図-1 試験体配筋概要

2.2 解析手法

解析には、張らによって開発された2次元非線形有限要素解析プログラム³⁾を一部修正して用いた。また解析では、掻き出し破壊における主たる滑り破壊亀裂面を離散型ひび割れ要素(クラックリンク)で表現し、亀裂を横切る柱筋のダウエル作用を考慮したMODEL-Aとダウエル作用による柱筋の局所的な抵抗は無視するが、ダウエル作用に伴う柱筋沿いの割り裂きひび割れを考慮したMODEL-Bの2種類のモデルについて、ひび割れ面滑り剛性及び接合部横補強筋比をパラメーターとして検討を行った。MODEL-A,Bの要素分割を図-2に、解析モデルの一覧を表-3に示す。要素分割とクラックリンクの配置は後述図-10の破壊状況から最適なものとして選定した。コンクリート、梁筋については6節点三角形及び8節点四角形の平面応力要素を用いた。柱筋と接合部内及び下柱側一部の横補強筋は2節点線材要素で表現し、それ以外の横補強筋については、簡略化のためコンクリートに分布型鉄筋を重ね合わせた。

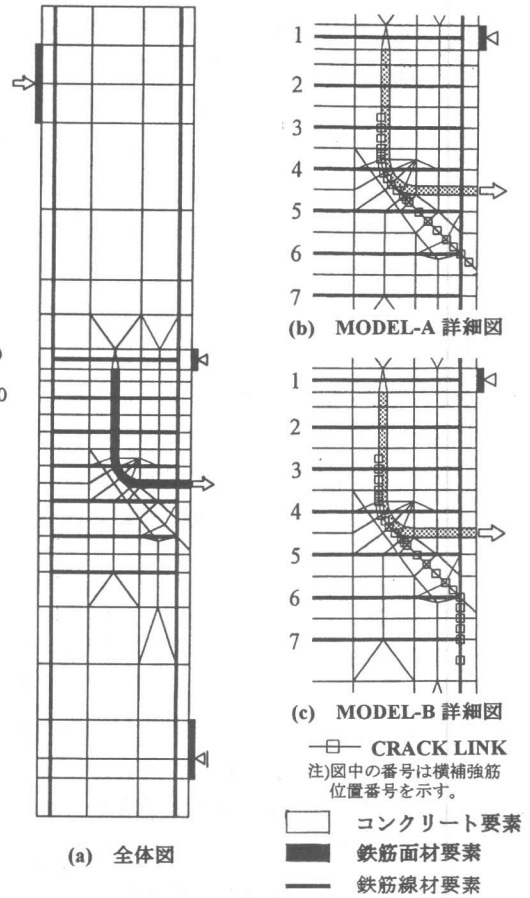


図-2 要素分割図

表-3 解析モデル一覧

NO.	解析モデル名	解析対象	要素分割	ひび割れ面滑り剛性低減率
1	A-1	LA1-1	MODEL-A	TYPE-1
2	A-2	LA1-1	MODEL-A	TYPE-2
3	A-3	LA1-1	MODEL-A	TYPE-3
4	A-4	LA7-1	MODEL-A	TYPE-1
5	A-5	LA7-2	MODEL-A	TYPE-1
6	B-1	LA1-1	MODEL-B	TYPE-1
7	B-2	LA1-1	MODEL-B	TYPE-2
8	B-3	LA1-1	MODEL-B	TYPE-3

梁筋及び図-1の右側柱筋の付着はボンドリンク要素を用いて表現し、左側柱筋については実験時の付着応力状態から判断してコンクリート要素と剛接した。また実験時と同様の剪断力分布となるように上柱加力点P2及び梁筋P1に一定割合の荷重を与える静的単調荷重増分解析とした。なお解析上の最大耐力の判断は、接合部内および下柱の横補強筋の降伏が増加し収束解が得られなくなった荷重値とし、一部の解析モデルでは要素変形も考慮した。

2.3 解析の材料モデル

(1) コンクリート

コンクリートの2軸応力下の構成則には Darwin・Pecknoldの等価1軸歪みに基づく直交異方性モデルを用い、破壊条件はKupfer等の実験に基づく。応力-歪み関係については図-3に示すように圧縮上昇域にはSaenzの式を用い、歪み軟化における横補強筋の拘束効果は考慮していない。なお材料定数は実験結果より求めた。

(2) 鉄筋

線材鉄筋要素及び平面応力要素で表現した面材鉄筋要素はいずれもバイリニヤ型の応力-歪みモデルとした。

(3) 付着

鉄筋とコンクリートの付着には直交2方向独立バネから成るボンドリンク要素とし、鉄筋軸方向は図-4に示すようにバイリニヤ型で剛性及び強度は藤井ら⁴⁾の研究を元にして梁筋の応力分布を検討し、表-4に示す値にした。なお梁筋についてはカバーコンクリート部分の付着が早期に劣化することから柱筋かぶり部とそれ以外のコアコンクリート部で分けた。鉄筋軸垂直方向の剛性は柱筋に関しては剛な弾性バネとし、梁筋との付着には肌離れ方向は剛性 0とし、圧縮方向は局部的な梁筋のめり込みを平面応力状態として扱うために、ある程度硬い弾性バネ (10⁴MPa/mm)で表現した。なお最大付着強度に達した場合、応力を半減し次ステップで解放した。

(4) コンクリートのひび割れ

コンクリート要素は分布ひび割れモデルとして評価しているが、局所的な滑り破壊亀裂面は離散型のクラックリンクを用い、両者を併用している。クラックリンクはひび割れ平行方向の滑り剛性バネとコンクリートのひび割れ発生による応力解放を評価するひび割れ直交方向バネによる2方向バネでモデル化した。ひび割れ面の滑り剛性は山田らの研究⁵⁾によると、平均ひび割れ幅 W (cm)と反比例の関係で減少する関数

$$K(\text{kg/cm}^3) = 36/W(\text{cm}) \quad (1)$$

で評価できるが、この結果の元になっているブ

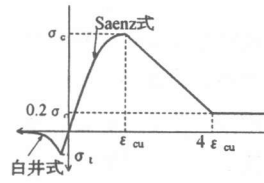


図-3 コンクリートのσ-ε関係

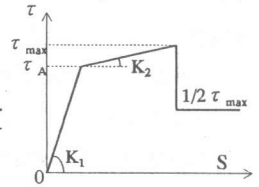


図-4 ボンドリンクのτ-s関係(鉄筋軸方向)

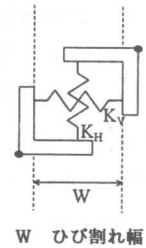
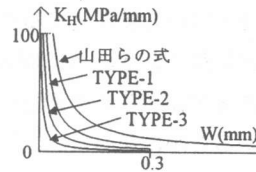
表-4 ボンドリンク定数

部位	K ₁ (MPa/mm)	K ₂ (MPa/mm)	τ _A (MPa)	τ _{max} (MPa)	
柱筋	98.1	9.81	1.96	3.92	
梁筋	かぶり部	98.1	9.81	0.49	0.98
	かぶり以外	98.1	9.81	1.96	3.92

表-5 ひび割れ面滑り剛性

モデル名	低減割合	滑り剛性K _H (MPa/mm)
TYPE-1	2倍	K=183/K
TYPE-2	4倍	K=91.7/W
TYPE-3	10倍	K=36.7/W

ただしW(mm)



W ひび割れ幅

図-5 滑り剛性-ひび割れ幅関係

ッシュオフ型の実験に比べてこの解析対象では亀裂に沿って亀裂幅が変化し一定ではない。これを平均ひび割れ幅で考慮する場合に有効な補強筋比はかなり小さいと考えられることから山田らの実験結果の下限を通るような反比例曲線を基本とし、3種類の剛性低減割合で検討した。表-5にひび割れ面滑り剛性式を示す。図-5に示すとおりTYPE-1, 2, 3は山田らの式(1)に比べ滑り剛性の低減割合が大きく、ひび割れの拡幅により滑り剛性は早期に劣化するものである。また解析対象の柱試験体では使用している粗骨材の最大寸法が $d=13\text{mm}$ と非常に小さいため、ひび割れ幅 W による滑り破壊条件($W=0.3\text{mm}$ で破壊)を定め、破壊後はリンクの持つ応力を収斂計算の過程も含め次ステップから1%ずつ低減した。これは滑り破壊による応力の解放で収束解が得られなくなることを防ぐための措置である。同様にひび割れ直交方向の応力の解放も同様に2分の1ずつ解放した。

(5)ダウエル剛性

CASE-Aにおける斜め亀裂をまたぐ柱筋のダウエル作用はひび割れ面の鉄筋位置のコンクリート要素の間にダウエル剛性バネを重ね合わせた。このダウエル剛性に関しては、著者らによる梁型ダボ実験結果⁶⁾から、斜めひび割れ面と交差する鉄筋位置における鉄筋軸と直交する方向の荷重-変位関係をバイリニヤ型でモデル化し、このモデルを用いてそれぞれの試験体の解析を行った。図-6及び表-6にダウエル剛性バネモデルを示す。

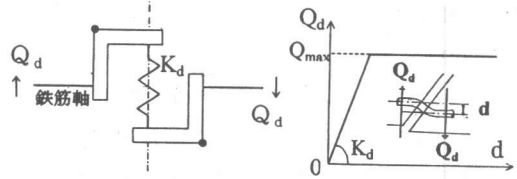


図-6 ダウエル剛性バネモデル

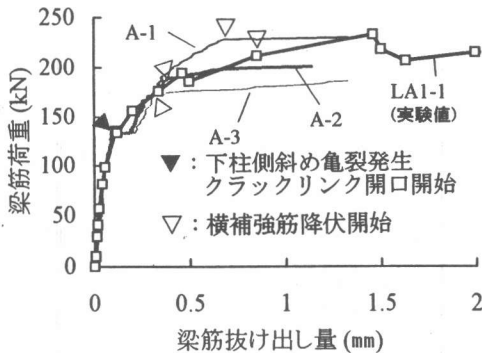
表-6 斜め亀裂ダウエル剛性定数

解析対象	Kd (kN/mm)	Qmax(kN)
LA1-1	11.2	33.2
LA7-1	11.5	33.2
LA7-2	11.2	32.8

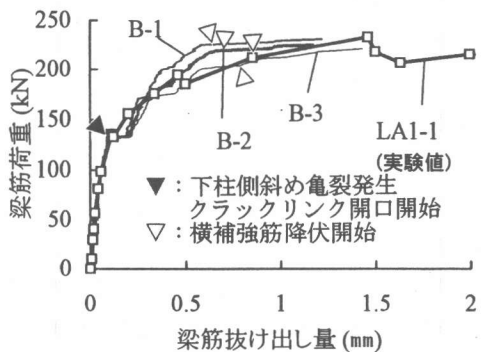
3. 解析結果

3.1 ひび割れ面滑り剛性の影響

3種類の滑り剛性を用いた場合のMODEL-AとBそれぞれの荷重-変形関係を図-7に示す。ここで、梁筋抜け出し量とは柱心軸に対する梁付け根の梁筋相対抜け出し量である。MODEL-Aの場合には滑り剛性の変化により最大耐力に大きな違いがあることが明らかになった。



(a) MODEL-A の場合



(b) MODEL-B の場合

図-7 梁筋荷重-梁筋抜け出し量関係

概して亀裂面の滑り抵抗が小さくなると下柱側の横補強筋の負担力が増加し、特に梁筋に最も近い下柱側の横補強筋の降伏が、抜け出し剛性の低下に大きく影響している。また、滑り剛性の低減割合の大きなモデルほどひび割れ幅の増加も大きくなる。従って骨材のかみ合いにより伝達される剪断力とダウエル力の割合は大きく変化していると考えられる。ダウエル作用により伝達されている剪断力の梁筋荷重に対する割合を図-8に示す。最大耐力まではダウエル作用により伝達されている剪断力はそれほど大きくないと考えられる。また実験では梁筋直線定着部上下に配筋された横補強筋のうち図-9に示すように接合部側の負担鉄筋力が折り曲げ定着部近傍の亀裂の発生荷重($P_1=136\text{kN}$)から増加率が大きい。しかしこれは実験時のひずみ計測位置が亀裂のごく近傍であることも影響していると思われるため、鉄筋の平均応力-歪み関係としては過大評価している可能性がある。さらに実験の際には図-10に示すような余長部半ばを通り圧縮部へ向かう斜め亀裂が

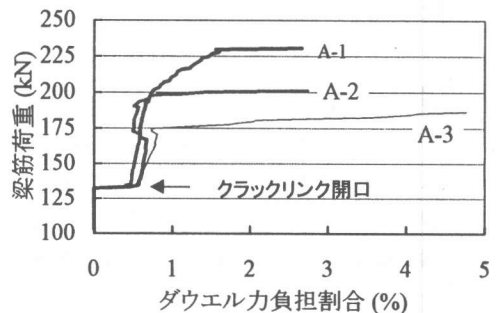


図-8 ダウエル力負担割合(解析値)

最大耐力時に明瞭であったが、この亀裂で滑り破壊が生じなかったことにより解析では積極的に表現しなかったため、接合部側の補強筋力解析値が小さくなったと考えられる。MODEL-BについてはMODEL-Aに比べて耐力に与える滑り剛性の影響は小さいか、耐力はおおむね合致している。そこで両モデルの抵抗機構の違いが最も明瞭なA-3とB-3の場合について同一荷重時($P_1=184\text{kN}$)における変形を図-11に示す。MODEL-Aの場合にはひび割れ幅の拡幅により骨材の噛み合い抵抗がほとんど消失し、ダウエル鉄筋の変形が顕著に現れている。またMODEL-Bの場合にはひび割れの開口が緩慢で、下柱側斜め亀裂の相対滑りに伴い、柱筋沿いの割り裂きひび割れが開口することで下柱側の横補強筋が下柱側へのトラス機構による剪断力伝達機構において有効に機能していると思われる。図-12に下柱側横補強筋力分布を示す。これによりMODEL-AとMODEL-Bでは有効に作用する横補強筋範囲が顕著に異なることが示された。これらの結果からMODEL-Aではひび割れ面滑り剛性が部材の変形状態に大きく影響するためダウエル剛性とひび割れ面滑り剛性の組み合わせが解析結果を支配すると考えられるのに対し、MODEL-Bについては局所的な柱筋のダウエル変形が考慮されていないため柱筋沿いの割り裂きひび割れが発生しやすく、実験時の発生荷重($P_1=194\text{kN}$)よりもB-3ではかなり低荷重($P_1=145\text{kN}$)で発生しており、割り裂きひび割れ沿いの横補強筋のひび割れ開口抑制効果が支配的となる。このようなことからMODEL-A、Bとも一長一短を有し、さらに精度の高いモデル化の検討が必要である。

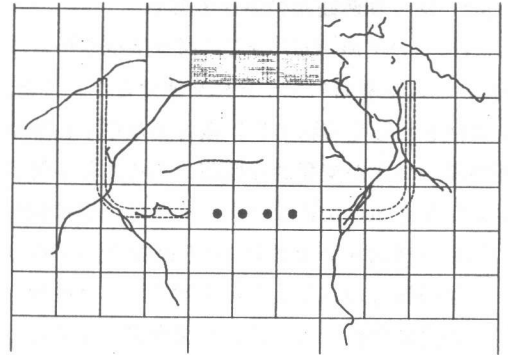
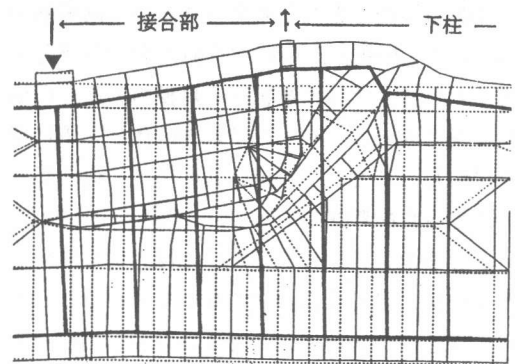
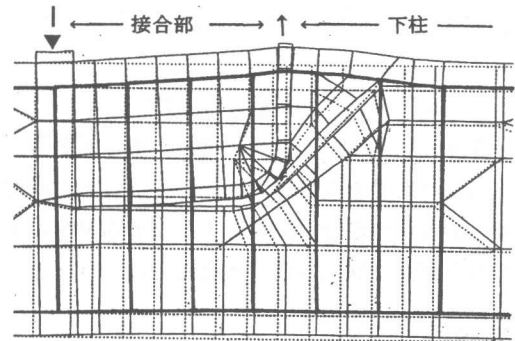


図-10 LA1-1最大耐力時亀裂状況



(a) A-3 1 mm



(b) B-3 1 mm

図-11 接合部変形図 ($P_1=184\text{kN}$ 時)

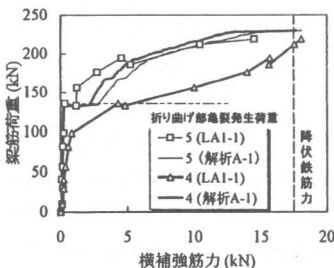


図-9 梁筋荷重-横補強筋力関係

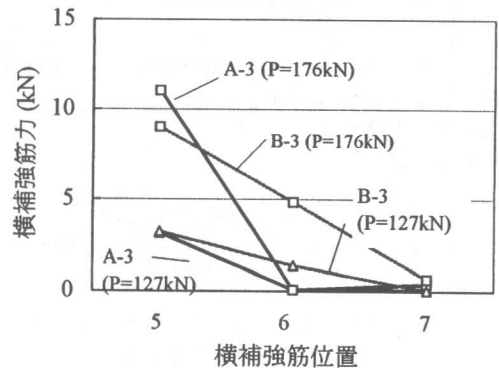


図-12 下柱側横補強筋力分布

3.2 接合部剪断補強筋比の影響

3.1においてMODEL-Aでは滑り抵抗の小さな場合には、定着耐力を十分に発揮できないこと、また掻き出し定着耐力には接合部及び下柱側横補強筋の降伏が支配的な要因であることが解析結果からも明らかになった。そこで、横補強筋の効果を検討するためにA-1を基準として接合部横補強筋比の異なる3体を対象にした解析を同一の要素分割で行った。結果を図-13に示す。pw=0.21%及び0.42%の試験体において耐力は概ね評価できたと考えられるが、高補強のpw=0.83%の場合には実験時耐力を14%ほど下回っている。これは解析上では横補強筋の配筋間隔を考慮せず、pw=0.42%の場合と同様に集約配筋したこと、また補強筋の増加に伴う梁筋の付着性状を考慮していないためと考えられる。しかし横補強筋比を変化させた場合にも解析上は下柱側の横補強筋がまず降伏していることから、掻き出し破壊においてはひび割れの開口を抑制する梁筋直線定着部近傍の横補強筋のひび割れ開口抑制効果はかなり大きいと考えられる。

なお本報においては全解析モデルで梁筋の付着定数を一律として解析を行ったが、実際には付着はコンクリート強度、軸力、接合部横補強筋比等の影響を受けており、今後はさらに高補強した場合の定着機構の変化及び梁筋付着の影響等も重要な検討課題であると思われる。

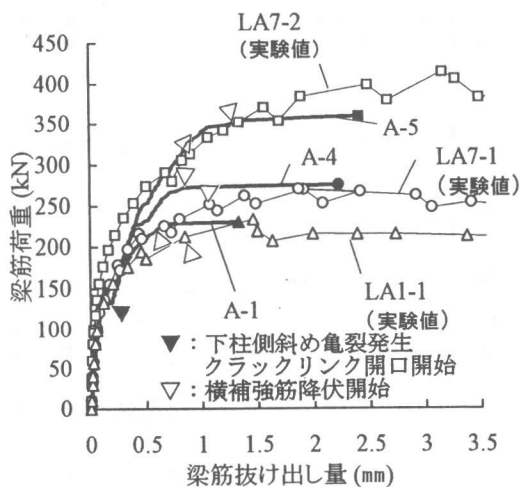


図-13 梁筋荷重-梁筋抜け出し量関係 (pwの影響)

4. まとめ

RC造外部柱梁接合部における梁下端筋の掻き出し定着破壊に関する2次元非線形有限要素解析を行い、以下のことが明らかになった。

1. 掻き出し破壊における主たる破壊亀裂面を離散ひび割れ要素で表し、骨材の噛み合い作用及びダウエル作用を考慮することにより、掻き出し破壊耐力を概ね評価できることが示された。
2. 柱筋のダウエル剛性考慮の有無及びダウエル作用に伴う柱筋沿いの割り裂きひび割れ考慮の有無による荷重変形関係に対する影響、横補強筋鉄筋力の違いが示された。
3. 接合部横補強筋比を2倍、4倍にした試験体の解析結果についてもMODEL-Aで掻き出し定着破壊耐力をおおむね評価できるが、高補強したものについては配筋詳細及び梁筋付着性状などの考慮が必要であると考えられる。

【謝辞】本研究の遂行において、解析プログラムを提供して頂いた千葉大学 野口博教授並びに貴重なご助言を頂きました同大柏崎隆志助手に深く感謝致します。

【参考文献】

- 1) 宮本・城・後藤ほか：柱梁接合部における90°折り曲げ鉄筋の掻き出し定着破壊耐力の評価、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1017-1022, 1997.6
- 2) 和泉信之ほか：RC壁柱・はり接合部における梁主筋の折り曲げ定着機構に関する研究、日本建築学会構造系論文集, 第462号, pp.121-130, 1994.8
- 3) 張愛暉：鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に関する非線形解析、千葉大学学位論文, 1991
- 4) 藤井・森田ほか：高強度コンクリート柱・梁接合部における梁通し筋の付着性状、コンクリート工学年次論文報告集, 13-2, 1991 pp.483-488
- 5) 山田ほか：ひび割れ面における剪断伝達、RC構造の剪断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, PP.19-26, 1983.10
- 6) 佐藤・城・後藤ほか：斜張力が支配的となるRC梁の剪断抵抗機構に関する実験的検討(その2 斜め亀裂ダボ耐力・梁の剪断終局耐力)、日本建築学会大会学術講演梗概集C-2, pp.415-416, 1996.9