

論文 あと施工アンカーで軸方向に接合された単純支持 RC はりの接合面の断面の剛性に関する一考察

山上 晶子*1・中田 裕喜*2・渡辺 健*3

要旨：既設構造物へ RC 部材を増設する場合、あと施工アンカーの配置や量等と接合面の挙動の関係が明らかになっていないことから、剛な接合を想定してあと施工アンカーが多量に配置される事例が多い。本研究では、骨組解析での評価を可能にするため、アンカーにより軸方向に接合された曲げ破壊するはりに対する非線形有限要素解析を行い、アンカーの位置や量が曲げ剛性や開口幅等に及ぼす影響を検証した。その結果、降伏モーメントが同等であっても接合面の断面の剛性が小さいと、はり全体の曲げ剛性の低下や開口幅の増加が生じることがわかった。また、伸出し量の算定式から接合面の剛性を算出する方法について検討した。

キーワード：接合面, 部材接合, あと施工アンカー, 曲げ剛性, 非線形有限要素解析

1. はじめに

既設構造物に新設の鉄筋コンクリート（以下、RC）部材を増設する手法として、あと施工アンカー（以下、アンカー）の適用が挙げられる。しかし、アンカーを用いた部材の増設に対して、アンカーの配置や本数等と接合面の挙動の関係が明らかになっていないため、剛な接合を想定し、多量にアンカーを配置する事例が多い。一方で、アンカーを多量に配置すると、鉄筋の干渉や施工不良が生じる可能性がある。

アンカーの本数や量に応じた接合面の断面剛性やひび割れ幅を評価できれば、接合面の断面剛性の影響を考慮した構造物の骨組解析が可能となり、接合面のアンカー量の削減や配置位置の自由度が向上すると考えられる。

本研究では、澤田ら¹⁾や野間ら²⁾が実施したはりの実験を非線形有限要素解析で再現し、さらにはり部材を接合するアンカーの配置位置や本数が耐力や曲げ剛性、接合面の開口幅や開口の角度（以下、開口角）に及ぼす影響について評価した。そして、骨組解析に用いる、伸出し量の算定式から接合面の断面剛性を算出する方法について検討した。

2. 非線形有限要素解析のモデル化

2.1 再現解析に用いる対象実験の概要

澤田ら¹⁾が実施した、アンカーで軸方向に接合したは

り試験体の4点曲げ載荷試験の再現解析を行った。図-1および表-1に、供試体概要および解析ケースを示す。J-15D, J-20D, J-30Dは、既設部を打設後に削孔とアンカーの挿入を行い、新設部を打設した供試体である。軸方向鉄筋は接合面で切断されており、既設部のアンカーの定着長はそれぞれ15D, 20D, 30D（D：アンカーの径）である。

文献¹⁾²⁾に示された荷重と変位の関係より、すべての供試体で軸方向鉄筋の降伏に伴い曲げ剛性が低下した。また、J-15Dの最大荷重は接合面を設けない一体打ちはりの0.78倍となったが、J-20D, J-30Dではそれぞれ1.02倍, 1.06倍となった。

軸方向鉄筋のひずみ分布は、J-15DおよびJ-20Dではアンカーの先端位置付近、J-30Dでは載荷点からアンカーの先端位置付近で軸方向鉄筋ひずみは最大になる三角形形状を示した。また、アンカーのひずみ分布は、接合面位置のひずみが最大となる三角形形状を示した。

2.2 コンクリートのモデル化

本研究では、汎用有限要素解析プログラム DIANA（Ver.10.5）を使用し、二次元非線形有限要素解析を実施した。図-2および表-2に、解析モデルおよび入力情報を示す。なお、材料強度は、材料試験結果を用いた。

コンクリートは、15mmメッシュの平面応力要素でモデル化し、圧縮側には軟化勾配を考慮した放物線モデルを、引張側には Hordijk の軟化勾配を適用した引張軟化

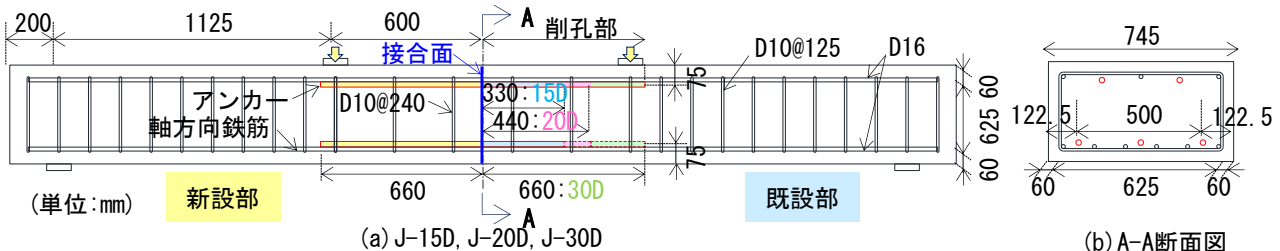


図-1 対象実験の供試体概要

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 修士 (工学) (正会員)
 *2 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士 (工学) (正会員)
 *3 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士 (学術) (正会員)

モデルを、ひび割れ面でのせん断伝達には Al-Mahaidi のモデルを適用した。ひび割れ発生に伴う圧縮強度の低減にはコンクリート標準示方書[設計編]³⁾に準拠したモデルを、横拘束効果には Selby&Vecchio モデルを採用した。

2.3 軸方向鉄筋およびスターラップのモデル化

軸方向鉄筋およびスターラップはビーム要素の埋込鉄筋とし、von Mises 基準の降伏条件を用いた。軸方向の鉄筋付着特性は、島らの付着モデル⁴⁾に対し文献⁹⁾を参考にかぶりの影響等を考慮して付着応力を0.4倍とした。

2.4 アンカーのモデル化

アンカーおよび接合面は、筆者らの研究⁹⁾を元にモデル化を行った。アンカーは要素長 15mm のビーム要素としてモデル化し、von Mises 基準の降伏条件を用いた。また、図-2 に示すように、コンクリートとの付着の影響は2層のインターフェイス要素（以下、IF 要素）でモデル化した。さらに二次元モデルのため、アンカーより上下のコンクリートの平面保持を再現する目的で、軸方向は剛の IF 要素をオーバーラップでモデル化した。離散ひび割れは、文献⁹⁾と同様に IF 要素でモデル化した。本研究では接合面は等曲げ区間に入っており、接合面のずれによるアンカーに沿ったひび割れは発生しないと考えられるため、解析の収束を優先して IF 要素の法線方向・軸方向の剛性はともに剛とした。鉄筋付着を表す IF 要素の軸方向特性には、島らの付着モデルに対し、新設部は付着応力を 0.4 倍、既設部は 0.6 倍とした。これは、アンカーの定着材の付着応力は、先施工した鉄筋の付着応力と同等以上と考え、島モデルの付着応力に乗じる倍率に関する解析を行い、実験結果の荷重変位関係や鉄筋ひずみ分布に最も近い倍率を選定した。

2.5 接合面のモデル化

接合面の開口を再現するため、接合面の位置に要素幅（奥行き）745mm の IF 要素を設け、クーロン摩擦モデルおよびせん断剛性保持モデルを採用した。クーロン摩擦モデルでは粘着力 $c=0$ 、内部摩擦角 $\phi=21.8^\circ$ 、ひび割れ強度 $f_t=0$ とした。せん断剛性保持モデルの G_I は、プレキャスト部材における接合モルタルを想定した値であるが⁹⁾、本研究では接合面にせん断力による鉛直方向のずれは生じず、 G_I および G_2 の値が解析結果に及ぼす影響は小さいため、既往のモデルの通りとした。

3. 解析に基づく実験結果の評価

3.1 荷重-支間中央のたわみの関係と最大主ひずみ分布

図-3(a),(b)に荷重 P -支間中央のたわみ δ の関係を、図-4 に最大荷重時の最大主ひずみを示す。なお、J-15D-解析、J-20D-解析、J-30D-解析のいずれのケースにおいても、荷重低下した後に解析が収束せずに終了している。また、アンカーの降伏後の変形性能を定式化するのは困

表-1 解析ケース

	アンカー鉄筋径	アンカーかぶり・本数		アンカー定着長(mm)	
		(圧縮側)	(引張側)	既設側	新設側
J-15D-解析	D22	75mm 2本	75mm 3本	330 (15D)	660 (30D)
J-20D-解析				440 (20D)	
J-30D-解析				660 (30D)	

J-■D-解析 J: Joint(接合)はり ■D: 鉄筋径D×■倍

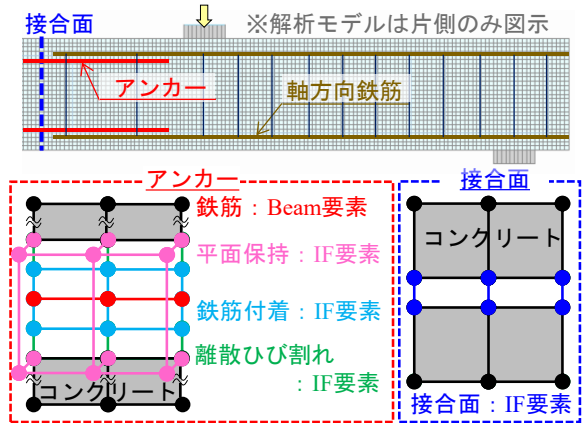


図-2 解析モデルの概要

表-2 モデルの入力情報

(a) コンクリートの入力概要

	圧縮強度 f_c (N/mm^2)	ヤング係数 E_c (kN/mm^2)	引張強度 f_t (N/mm^2)	ポアソン比 ρ	要素幅 (mm)
既設部	34.7	22.2	2.60	0.2	745
新設部	32.1	23.3	2.76		

(b) 鉄筋の入力概要

	鉄筋径	降伏強度 f_y (N/mm^2)	引張強度 f_u (N/mm^2)	ヤング係数 E_t (kN/mm^2)
軸方向鉄筋	D16	387	557	197
せん断補強鉄筋	D10	380	558	186
アンカー鉄筋	D22	385	571	190

(c) アンカー IF要素の入力概要

	アンカー		共通
	既設部	新設部	
	鉄筋付着		平面保持
軸方向	島モデル (付着応力0.6倍)	島モデル (付着応力0.4倍)	剛
法線方向	剛		剛性:微小
要素幅	鉄筋周長×1/2×本数		745mm

(d) 接合面 IF要素の入力概要

	クーロン摩擦モデル	せん断剛性保持モデル
パラメータ	$c=0N/mm^2$ $\phi=21.8^\circ$ $f_t=0N/mm^2$	せん断剛性 ひび割れ前: $G_1=400N/mm^3$ ひび割れ後: $G_2=10N/mm^3$
要素幅	745mm	

難であり、また設計上、他の部位で損傷を先行させることは可能と考えられることから、本検討ではアンカーの降伏までの挙動を主眼に評価する。

図-3(a),(b)より、最大荷重 P_{max} は J-15D-解析では $\delta=42.2mm$ 時に $P_{max}=252kN$ 、J-20D-解析では $\delta=38.6mm$ 時に $P_{max}=310kN$ 、J-30D-解析では $\delta=35.7mm$ 時に $P_{max}=309kN$ となった。軸方向鉄筋降伏時の荷重は、J-15D-解析、J-20D-解析、J-30D-解析でそれぞれ、223kN、221kN、227kN と同等であり、実験での軸方向鉄筋の降伏荷重

216~218kN と概ね一致した。また、いずれも軸方向鉄筋の降伏により剛性が低下した。

アンカー降伏時の荷重は、J-15D-解析、J-20D-解析、J-30D-解析でそれぞれ、214kN、221kN、222kN と概ね同等であり、アンカーの降伏後、J-15D-解析は J-20D-解析および J-30D-解析に比べて剛性が低下した。一方、J-20D-解析および J-30D-解析は降伏後も荷重と支間中央のたわみの関係は同様の傾向であり、本解析では、定着長が 20D 以上の場合は定着長が耐力や剛性に及ぼす影響は小さいと考えられる。軸方向鉄筋の降伏荷重や降伏に伴い剛性が低下する傾向は、実験と一致している。

図-4 より、すべての解析においてアンカー先端位置からの曲げひび割れの発生や、接合面の開口がみられた。さらに、荷重低下時に接合面位置のコンクリート上縁の圧縮ひずみは 2000×10^{-6} を超えていたため、圧縮破壊により荷重低下が生じたと考えられる。これらの傾向は実験と一致している。

3.2 軸方向鉄筋およびアンカーのひずみ分布

図-5 に、軸方向鉄筋のひずみ分布を示す。澤田ら¹⁾の文献と同様に、図-5 には $P=240\text{kN}$ 時のひずみ分布を示した。いずれの解析ケースも、既設部の軸方向鉄筋のひずみは三角形状を示し、ひずみが最大となる位置はアンカーの定着長が長いほど載荷点側に変化していることがわかる。これは、曲げモーメントに対し、アンカーの引張力の負担に対応して、軸方向鉄筋が負担する引張力が小さくなったためと考えられる。このひずみの分布は実験と同様の傾向を示している。

図-6 に、アンカーのひずみ分布を示す。いずれの解析ケースも実験の傾向と同様に、アンカーのひずみはスパン中央である接合面位置で最大となった。なお、スパン中央でアンカーのひずみは降伏ひずみに達しているため、卓越した値となっている。

3.3 荷重と接合面の開口幅の関係

図-7(a)に荷重 P とアンカーの拔出し量 l を、図-7(b)にアンカーの拔出し量が 0mm~1.5mm の範囲の拡大図を示す。本研究におけるアンカーの拔出し量とは、解析モデルにおけるアンカーの先端の節点と、IF 要素で結合した同座標のコンクリートの節点との水平方向の相対変位を指す。図-7(a)より、荷重低下時のアンカーの拔出し量は、J-15D-解析では 13.3mm、J-20D-解析では 0.30mm、J-30D-解析では 0.11mm であり、J-15D-解析のアンカーが顕著に抜け出していることがわかる。図-7(b)より、J-15D-解析では、 $P=150\text{kN}$ 以降、アンカーの拔出し量が急激に増加し、このアンカーの拔出しに起因して、開口幅の増加や最大荷重および剛性の低下が生じたと考えられる。一方、J-20D-解析および J-30D-解析では、アンカーの拔出し量は小さく、さらに開口幅の増加割合や最大耐

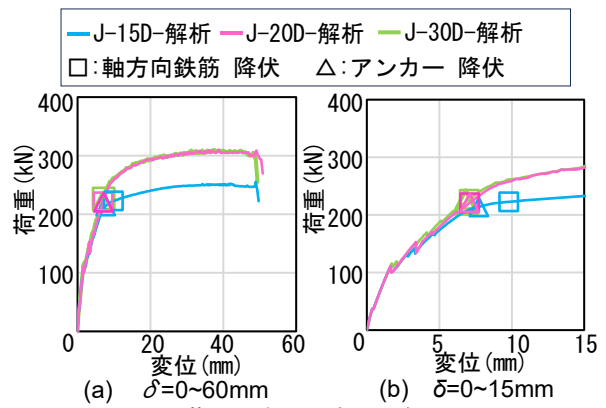


図-3 荷重-支間中央のたわみの関係

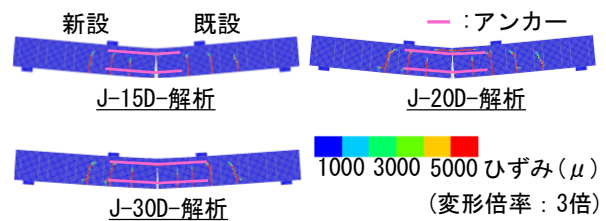


図-4 最大主ひずみ分布 (荷重低下直前)

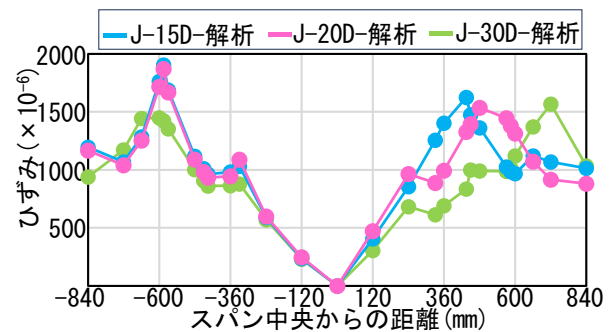


図-5 $P=240\text{kN}$ 時の軸方向鉄筋のひずみ分布

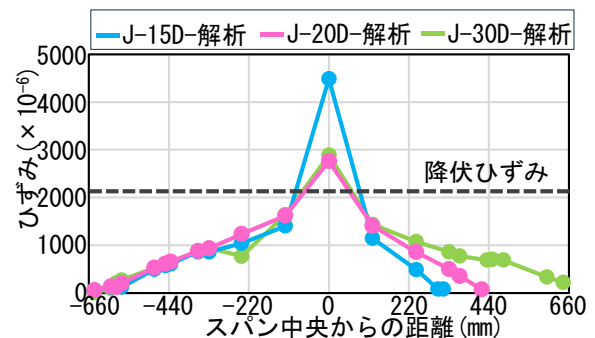


図-6 $P=240\text{kN}$ 時のアンカーのひずみ分布

力および剛性は概ね同等であった。

図-8(a)に荷重 P と接合面の開口幅 w の関係を、図-8(b)に開口幅が 0mm~1.5mm の範囲の拡大図を示す。図-8(a)より、荷重低下時の開口幅は J-15D-解析では 17.8mm、J-20D-解析および J-30D-解析では 16.9mm である。また、J-20D-解析および J-30D-解析では、荷重低下時までの荷重と接合面の開口幅の関係は概ね一致するため、定着長が 20D 以上の場合は、アンカーの定着長が開口幅に及ぼす影響は小さいと考えられる。また、図-8(b)より、J-15D-解析では $P=150\text{kN}$ 以降、アンカーの拔出し

により開口幅は増加したと考えられる。

以上より、荷重と支間中央のたわみの関係、破壊性状、軸方向鉄筋およびせん断補強鉄筋のひずみ分布について解析は実験と同様の傾向を示した。アンカー拔出し後の変形等を評価するためには、付着応力とすべり関係のモデル化に検討の余地はあるものの、定着長が十分に確保する場合、降伏モーメント M_y までは本解析で評価できると判断し、再現解析の解析条件を用いて4章の検討を行った。

4. アンカーの配置位置の曲げ剛性への影響の評価

4.1 解析概要

2章および3章で用いた解析モデルを元に、アンカーの位置や本数をパラメータとした解析を行う。実構造物での適用を踏まえると、列車荷重や地震力のように繰返し作用する外力に対し、アンカーの拔出しに起因する接合面の目開きや曲げ剛性等の制御は困難であると考えられる。そのため、構造物の諸元や作用等に応じた定着長の検討は別途行うこととし、本解析においては、アンカーは供試体全長と同じ長さとして端部には剛ばねを設定することで、拔出しの影響を排除した。

表-3 および図-9 に、解析ケースおよび解析モデル概要を示す。75mm-3 は、既存のモデルからアンカーの定着長を供試体全長に伸ばした解析モデルである。169mm-3 は、75mm-3 から引張側のアンカーの位置を引張縁下端から169mmとし、断面計算により算出したアンカーの降伏モーメント M_y は75mm-3 の0.71倍となる。169mm-4.5 は、169mm-3 から M_y が75mm-3 と同等となるようにアンカーの本数を4.5本に増加させた。

4.2 荷重一支間中央のたわみの関係と最大主ひずみ分布

図-10 に、75mm-3、169mm-3 および169mm-4.5 の荷重 P 一支間中央のたわみ δ の関係を示す。なお、75mm-3 および169mm-4.5 では荷重低下以降、169mm-3 では $\delta=40.5\text{mm}$ 以降は解析が収束せず終了した。

75mm-3 では、 $P=247\text{kN}$ 時にアンカーが降伏し、その後最大荷重 $P_{max}=335\text{kN}$ に達した時に荷重が低下した。169mm-3 では、 $P=175\text{kN}$ でアンカーが降伏し、 $P_{max}=248\text{kN}$ に達した時に荷重が低下した。169mm-4.5 では、 $P=244\text{kN}$ 時にアンカーが降伏し、 $P_{max}=324\text{kN}$ に達した時に荷重が低下した。いずれの解析ケースも、軸方向鉄筋は降伏せずにアンカーの降伏により剛性が低下し、3章での解析ケースとは傾向が異なる。これは、アンカーの定着長を伸ばしたことにより、アンカーが負担する引張力が増加し、軸方向鉄筋が負担する引張力が減少したためと考えられる。

また、75mm-3 と169mm-4.5 を比較すると、降伏荷重は概ね一致するが、169mm-4.5 の剛性は75mm-3 の剛性

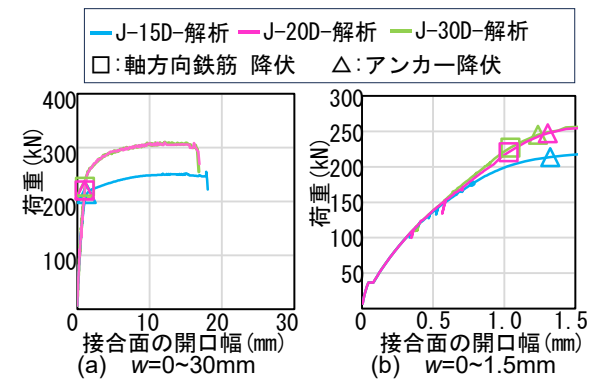
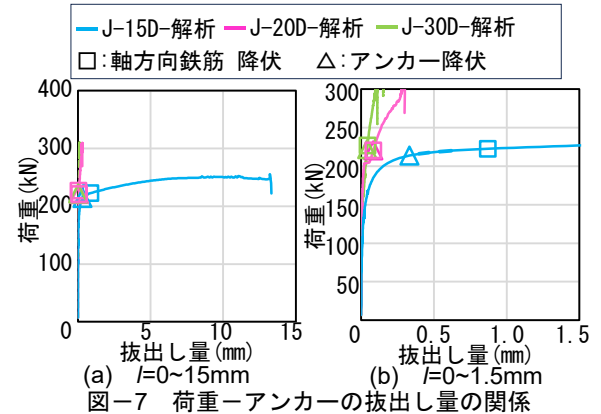


図-8 荷重-接合面の開口幅の関係

表-3 解析ケース

	接合面	アンカー			降伏モーメント M_y (kN·m)
		鉄筋径	(圧縮側) かぶり・本数	(引張側) かぶり・本数	
75mm-3			75mm:3本	75mm:3本	133.3
169mm-3	あり	D22	75mm:2本	169mm:3本	94.0
169mm-4.5			169mm:4.5本	169mm:4.5本	134.9

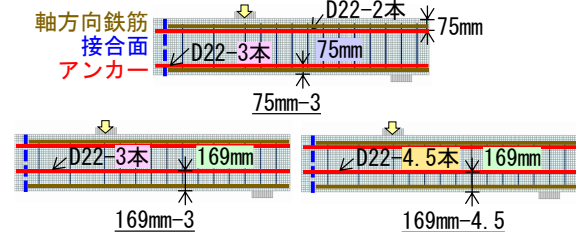


図-9 解析モデル概要

を下回った。169mm-4.5 の接合面の断面剛性は、75mm-3 に比べて小さいため、接合面の断面剛性がはり全体の剛性に影響を及ぼすことが考えられる。

図-11 に、最大荷重時の最大主ひずみ分布を示す。接合面の開口や載荷点付近に曲げひび割れが確認された。最大荷重時における接合面位置のコンクリート上縁の圧縮ひずみは 2000×10^{-6} を超えており、圧縮破壊により荷重低下が生じたと考えられる。

4.3 荷重と接合面の開口幅の関係

図-12(a)に荷重 P と接合面の開口幅 w の関係を、図-12(b)に、開口幅が0mm~5mmの範囲の拡大図を示す。接合面の開口幅は、75mm-3 ではアンカーの降伏時には2.3mm、最大荷重時には20.9mm、169mm-3 ではアンカー

の降伏時には2.3mm，最大荷重時には14.6mm，169mm-4.5ではアンカーの降伏時には2.6mm，最大荷重時には14.4mmとなった。いずれの解析ケースにおいても，アンカーの降伏後は荷重に対する開口幅の増加割合が増加した。また，75mm-3と169mm-4.5を比較すると，接合面の断面剛性が小さいほど開口幅の増加割合は大きいことがわかる。

4.4 モーメントと接合面の開口角の関係

図-13に，モーメント M と接合面の開口角 θ の関係を示す。 θ は式(1)として算出した。

$$\theta = w/x \quad (1)$$

ここに， x ：接合面の開口の長さ(mm)

w ：引張縁下端の開口幅(mm)

開口角 θ は，75mm-3ではアンカーの降伏時には 7.2×10^{-3} rad，最大荷重時には 5.9×10^{-2} rad，169mm-3ではアンカーの降伏時には 6.4×10^{-3} rad，最大荷重時には 4.2×10^{-2} rad，169mm-4.5ではアンカーの降伏時には 8.2×10^{-3} rad，最大荷重時には 4.1×10^{-2} rad となった。いずれの解析ケースにおいても，アンカーの降伏後は曲げモーメントに対する接合面の開口角の増加割合が大きくなり，75mm-3と169mm-4.5を比較すると，接合面の断面剛性が小さいほど開口角の増加割合は大きくなることがわかる。

図-14に示すように，開口幅やアンカーの変形量は中立軸からの距離に比例すると考えられるため，式(2)を用いてアンカーの降伏時の変形量 L_1 を算出した。

$$L_1 = w \times \frac{a}{x} \quad (2)$$

ここに， a ：開口中心からアンカーまでの距離(mm)

アンカーの伸出量 ΔL_y は式(3)により求め，さらに伸び出しは両側から発生するため式(4)を用いて，アンカーの降伏時の変形量 L_2 を算出した。

$$\Delta L_y = 7.4\alpha \cdot \varepsilon_y (6 + 3500\varepsilon_y) \phi / (f'_{cd})^{2/3} \quad (3)$$

ここに， ε_y ：アンカーのひずみ

ϕ ：引張鉄筋の直径(mm)

f'_{cd} ：部材接合部のコンクリートの設計
圧縮強度(N/mm²)

α ：鉄筋間隔を表す係数

$$L_2 = 2 \times \Delta L_y \quad (4)$$

表-4に，式(2)～式(4)より算出したアンカーの降伏時の変形量を示す。 L_1 は L_2 に対して1.24~1.46倍大きく算出され，特にかぶりの小さい75mm-3では L_1 と L_2 の差が大きい。解析では，アンカーのかぶりが小さいことや定着材の付着応力を考慮して，島モデルの付着応力を低減しており， L_2 はこれが反映されたものである。一方で，式(3)は島らの付着応力すべり関係に基づき，マッシュピなコンクリートを対象に導出されたものであるため， L_1 は L_2 に対して大きくなっている。式(3)ではアンカー間隔の影響を考慮することができるが，かぶりや定着材を考慮

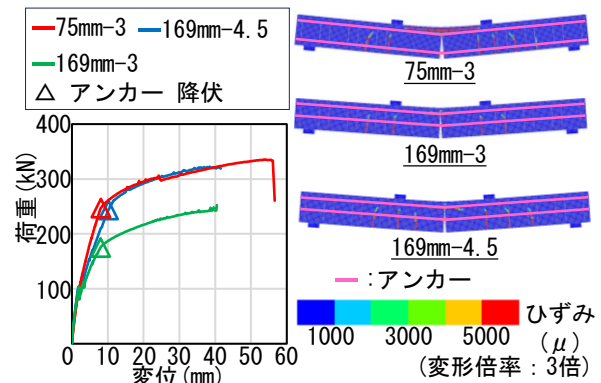


図-10 荷重-支間中央のたわみの関係

図-11 最大主ひずみ分布

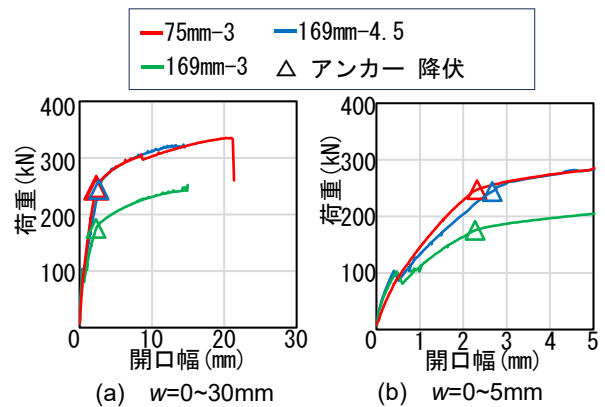


図-12 荷重-接合面の開口幅の関係

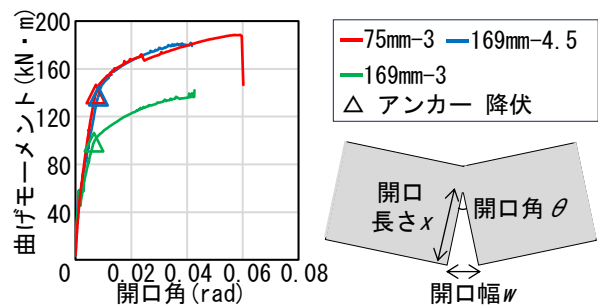


図-13 荷重-接合面の開口角の関係

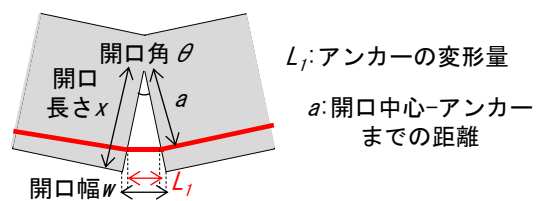


図-14 アンカー降伏時の L_1 の算定

表-4 アンカーの降伏時の変形量の比較

	アンカーの変形量		L_1/L_2
	L_1 (mm)	L_2 (mm)	
75mm-3	1.79	1.23	1.46
169mm-3	1.20	0.96	1.25
169mm-4.5	1.34	1.08	1.24

した付着応力すべり関係を用いることで⁵⁾， L_1 に対応するアンカーの伸出量が算定可能となる。

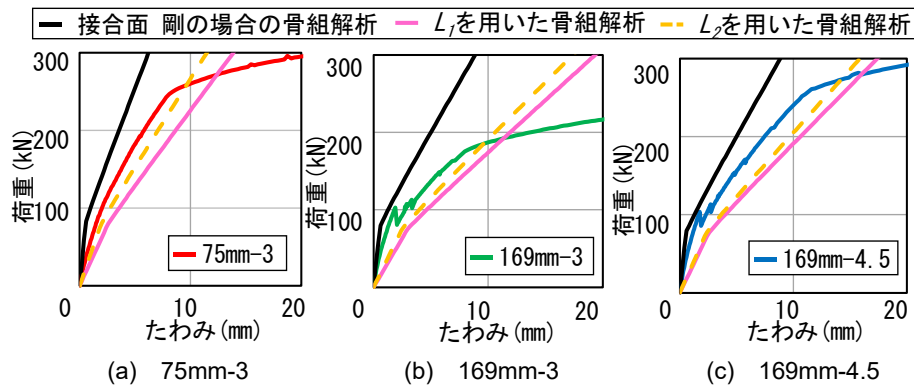


図-15 荷重-支間中央のたわみの関係の比較

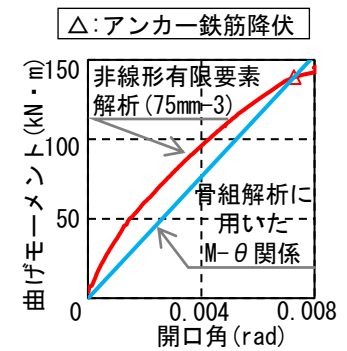


図-16 M-θの比較

4.5 接合面の M-θ 関係を用いた骨組解析による試計算

接合面のモーメント M と L_1 および L_2 から算出した接合面の開口角 θ の関係を用いて、75mm-3、169mm-3 および 169mm-4.5 の二次元骨組解析（以下、骨組解析）を行った。

図-15(a)~(c)に、荷重 P と支間中央のたわみ δ の関係の比較を示し、図-16 に、非線形有限要素解析により得られた M - θ 関係と、骨組解析に用いた M - θ 関係の比較を示す。骨組解析は、接合面の開口を考慮したケースに加え、比較のために接合面を剛としたケースについても示した。すべてのモデルにおいて、 L_1 および L_2 を用いた骨組解析から求めた P - δ 関係の剛性は、非線形有限要素解析の剛性を下回った。骨組解析では、接合面以外の一般部のコンクリートの引張剛性を考慮されていないことに加え、骨組解析では M - θ 関係の原点とアンカーが降伏する点の傾きを接合面の断面剛性とみなしているが、非線形有限要素解析の M - θ 関係はやや膨らむことから、骨組解析の剛性は非線形有限要素解析の剛性を下回ったと考えられる。

5. まとめ

- (1) 二次元の非線形有限要素解析において、アンカーと定着材、コンクリートの付着や離散ひび割れ、平面保持の IF 要素を用いてアンカーの拔出しをモデル化することで、軸方向に接合した単純支持 RC はりの実験のひび割れ性状や剛性、鉄筋ひずみ、曲げ降伏耐力等を概ね再現できた。
- (2) アンカーの定着が確保された条件下において、同程度の降伏モーメントであっても、アンカーの配置位置や本数の違いによって接合面の断面の剛性は異なり、はり全体の曲げ剛性が低下することや接合面の開口幅が増加することを定量的に検証した。
- (3) 解析で得られた接合面の断面剛性をモデル化し、

二次元骨組解析で考慮した試計算を行った。かぶりや定着材を考慮した付着応力すべり関係のモデル化が今後必要であるものの、アンカーの伸出量と断面計算による中立軸高さに基づいて、接合面の断面剛性をモデル化できる可能性を示した。

参考文献

- 1) 澤田純之, 新井泰, 水上博之, 西村毅: あと施工アンカー工法で施工した接合梁試験体における接合鉄筋の定着長と接合部の耐荷性状に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.565-570, 2018.
- 2) 野間康隆, 新井泰, 水上博之, 西村毅: 主鉄筋をあと施工アンカーで施工した接合面梁試験体の曲げ耐荷性能ならびに破壊性状に及ぼす定着長の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.451-456, 2017.
- 3) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編], 丸善, 2018
- 4) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり関係, 土木学会論文集, 第 378 号/V-6, pp.165-174, 1987.2
- 5) 飯塚敬一, 檜貝勇, 斉藤成彦, 高橋良輔: かぶり厚の影響を考慮した異形鉄筋の付着応力-すべりひずみ関係, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.2, 280-296, 2011
- 6) 大野又稔, 中田裕喜, 渡辺健, 田所敏弥: プレキャストコンクリート構造のせん断伝達メカニズムとスターラップによる補強効果の解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, 2022.
- 7) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物), 丸善, 2023