

論文 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

澤田 純之*1・新井 泰*2・水上 博之*3・西村 毅*4

要旨：既設 RC 構造物に新設構造物を接合する方法として、既設構造物に鉄筋(以後、接合鉄筋と呼ぶ)をあと施工して新設構造物と接合する工法がある。過年度に既設構造物側への接合鉄筋の定着長に関する検討を目的に、接合部を設けた RC 梁に関する曲げ載荷試験を実施した。試験結果より、定着長を鉄筋径の 20 倍(20D)とすることで接合部の無い一体梁と同程度の耐力を確保可能である事を明らかにしている。本論文では、当該試験データに関する詳細な分析を実施し、接合梁の必要定着長と耐荷性状の関係を明らかにし、合理的な定着長の設計方法に関する検討を行った。

キーワード：RC 構造, 既設・新設構造の接合部, 接合鉄筋, 破壊メカニズム, 定着長

1. はじめに

近年、地下鉄では駅の利便性・快適性向上や輸送改善等を目的としたホーム拡幅、連絡通路設置、留置線設置等の改良工事を推進している。これら工事では、既設構造物の側壁、床版等の一部を撤去するとともに、隣接した位置に新設構造物を接合する。その際、新設構造物の主鉄筋を既設構造物に定着させるための方策として、工程促進や既設構造物の配筋状況を考慮して、既設構造物側の接合面を削孔し、定着材を注入して接合鉄筋を挿入するあと施工アンカー工法を採用することが多い。この場合、当該接合鉄筋の定着長は、地上構造物の高欄の増設等を対象とした既往の基準類りに基づき設定している。しかしながら、地中構造物の接合鉄筋には曲げ部材の主鉄筋としての性能を満足する必要がある、接合部の無い一体部材と同程度の耐力や靱性能が要求される。また、施工箇所の性質上、狭隘な空間での施工性も要求される。そのため、部材性能および施工性を配慮した合理的な定着長の設計方法の開発が喫緊の課題となっている。

そこで本研究では、2016 年度に実施した地中構造物の床版を想定した一体梁(標準試験体)と、既設・新設構造物の接合を想定してあと施工アンカーによりスパン中央に接合面を作成した接合梁を対象とした 4 点曲げ載荷試験²⁾の試験データを用いて、詳細な分析を実施し、接合梁の必要定着長と耐荷性状に関する検討を行った。

2. 既実施の曲げ載荷試験について²⁾

2.1 試験に関する諸条件

(1) 試験ケース

表-1 には、試験体の一覧を示している。試験体名

は、接合部の無い一体梁(標準試験体)である N 梁および接合鉄筋を用いた接合面を有する接合梁の J 梁である。接合梁は、既設構造物側の接合鉄筋定着長をパラメータとし、定着長を接合鉄筋の鉄筋径(D=22mm)の倍数としている。本試験での定着長は 15D, 20D, 30D とし、試験体名の 2 項目に付して示している。なお、新設構造物側の接合鉄筋の定着長は 30D に統一した。

(2) 試験体概要

図-1 には、試験体の配筋図を示している。標準試験体の N 梁は、上下軸方向鉄筋に D16 を配置した複鉄筋矩形 RC 梁である。断面形状は 400×745mm であり、軸方向鉄筋の上下縁までの芯かぶりが 60mm となるように配置した。支点間隔は 3,450mm, 載荷点の間隔は 1,200mm である。なお、曲げ破壊が先行するよう、せん断補強鉄筋(D10)を 125mm 間隔で配置した。接合部を設けた J 梁は、標準試験体 N 梁のスパン中央で軸方向鉄筋を切断、切断面を接合鉄筋で接合した配筋となっている。接合鉄筋には D22 を用い、梁の上下縁までの芯かぶりが 75mm となるように配置した。なお、接合面の主鉄筋および接

表-1 試験ケース一覧

試験体名	接合部の有無	軸方向(主)鉄筋	接合鉄筋	接合鉄筋の定着長	
				新設側	既設側
N	無	D16	-	-	-
J-15D	有	D16	D22	30D (660mm)	15D (330mm)
J-20D					20D (440mm)
J-30D					30D (660mm)

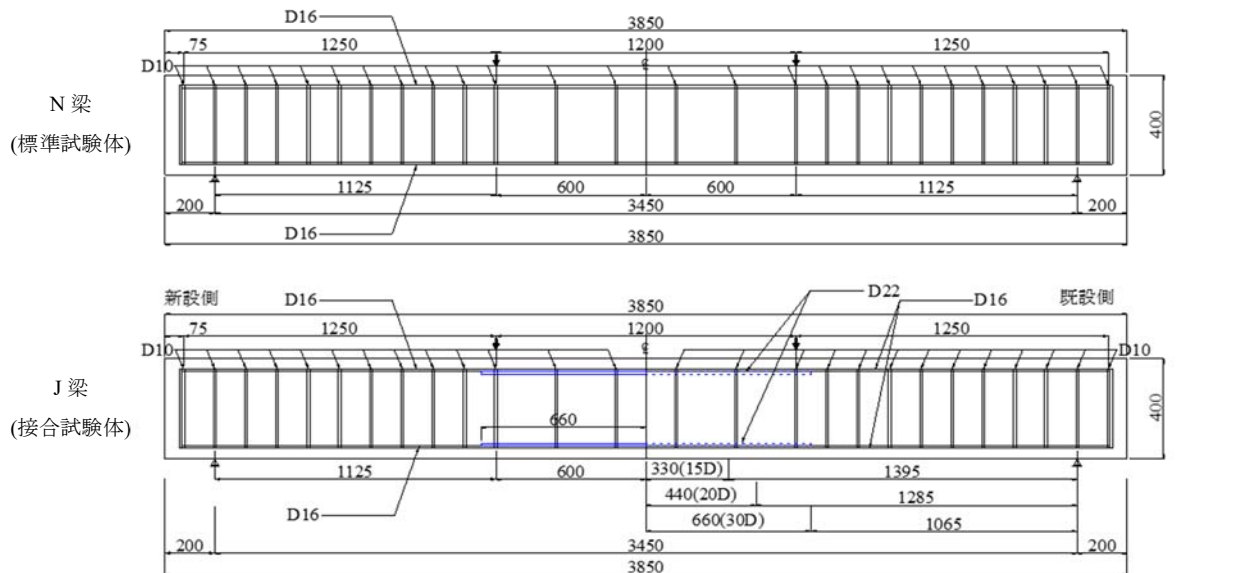
D: 接合鉄筋の径

*1 安藤ハザマ 技術本部技術研究所土木研究部 博士(工学) (正会員)

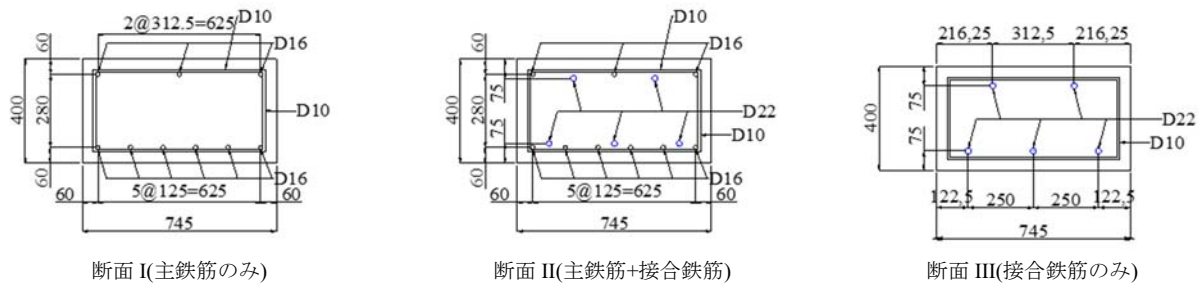
*2 東京地下鉄株式会社 鉄道本部改良建設部 博士(工学)

*3 メトロ開発株式会社 技術部 (正会員)

*4 安藤ハザマ 技術本部技術研究所土木研究部 博士(工学) (正会員)



(a) 側面図



(b) 断面図

図-1 試験体の配筋図

表-2 コンクリート、定着材の材料特性値

打込み材料	打込み部分	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
コンクリート	一体梁	34.7	2.60	22.2
	接合梁の既設部			
	接合梁の新設部	32.1	2.76	23.3
定着材	接合鉄筋の定着部	55.0	-	-

表-3 鋼材の材料特性値

鋼材	降伏強度 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
D10	380	558	186
D16	387	557	197
D22	385	571	190

合鉄筋の端部は、実施工時の状況を考慮して直筋の状態
で配筋している。接合梁は以下の手順で製作している。
1) 梁中央部より既設側の鉄筋、型枠を組み、1回目のコン
クリートを打込む、2) 1回目のコンクリート硬化後、
接合面の所定の位置に接合鉄筋用の孔を削孔、所定の定
着長まで接合鉄筋を挿し込み、定着材(無機系セメント系
アンカー注入材)により固定する、3) 定着材硬化後に新
設側の鉄筋、型枠を組み、2回目のコンクリートを打込

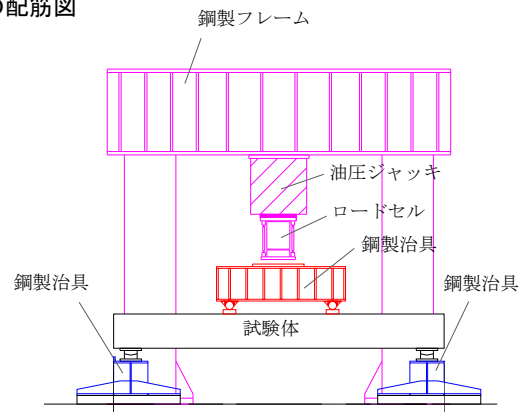


図-2 梁の荷重試験状況

む、ことにより製作した。表-2 には、コンクリートお
よび定着材、表-3 には鋼材の材料特性値を一覧にして
示している。

(3) 試験方法

図-2 には、梁の荷重試験状況を示している。試験体
は、鋼製の支点治具上に設置した。試験は、試験体上に
載せた鋼製荷重治具を、油圧ジャッキにより押すことで
実施した。測定項目は、ロードセルによる荷重荷重、ス
パン中央の鉛直変位、軸方向鉄筋および接合鉄筋に貼り
付けたひずみゲージによるひずみを計測した。また、試
験時には梁側面のひび割れ状況写真の撮影、試験後に梁
底面のひび割れスケッチを行っている。

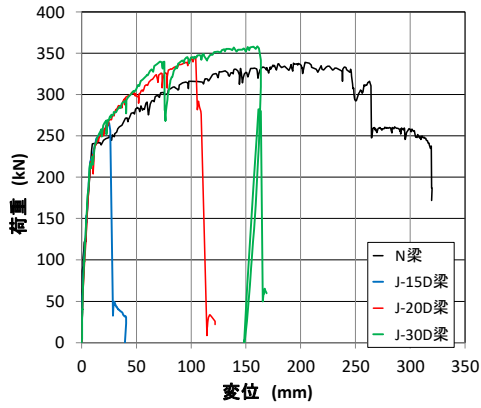


図-3 荷重-変位関係

表-4 試験結果一覧

試験体名	各梁の降伏荷重時		各梁の最大荷重時		N梁の最大荷重到達時	
	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)
N	240	9.7	339	319	339	319
J-15D	218	7.9	266	24	-	-
J-20D	219	8.2	345	104	339	95.1
J-30D	216	7.7	358	160	339	70.7

2.2 曲げ荷重試験の結果

図-3 には、全試験体の載荷荷重とスパン中央変位の関係を比較して示している。また、表-4 には各梁の降伏時、最大荷重発生時の荷重、変位およびN梁の最大荷重(339kN)と同一荷重時における他試験体の変位を一覧にして示している。

図より、N梁は載荷荷重の増加とともに変形が増大し、約240kNで主鉄筋の降伏に伴う剛性低下が見られる。主鉄筋降伏後は、剛性勾配が低下するものの荷重および変位は増加し、最大荷重339kN、最大変位319mmまで達している。接合梁のJ-15D/20D/30D梁は、いずれもN梁と同程度の降伏荷重で鉄筋降伏に伴う剛性勾配の低下が見られる。また、降伏後の剛性勾配はN梁よりも大きく示されている。これは、接合断面近傍に配置された接合鉄筋および軸方向鉄筋の影響を受けて断面剛性が大きくなったと推察される。接合梁の終局時には接合鉄筋の引き抜けによる急激な荷重低下が見られ、その荷重と変位は定着長が長いほど大きい。また、最大荷重値は、J-15D梁を除いてN梁のそれと同程度以上を示している。なお、N梁の最大荷重(339kN)到達時の変位を比較すると、J-20D/30D梁はN梁の変位より小さく示されており、接合梁で剛性が大きくなっていることが分かる。

写真-1 には、各試験体の荷重低下後における等曲げモーメント区間近傍のひび割れ性状を示している。N梁は等曲げモーメント区間内の梁下縁に曲げひび割れが等間隔で発生していることが分かる。また、上縁コンクリートには上端鉄筋から梁上縁の範囲にひび割れが確認出来、コンクリート圧縮破壊まで耐力力を保持したことが

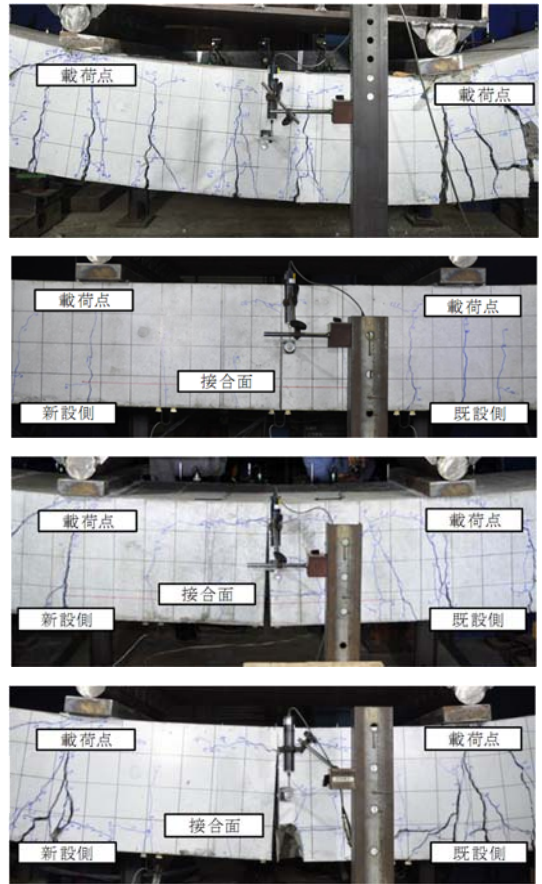


写真-1 荷重低下後のひび割れ性状

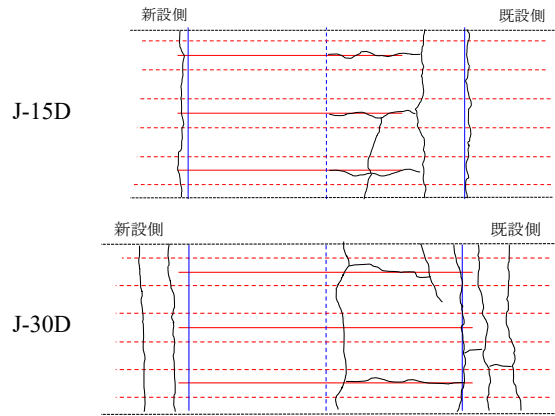


図-4 J-15D/30D梁の底面ひび割れスケッチ

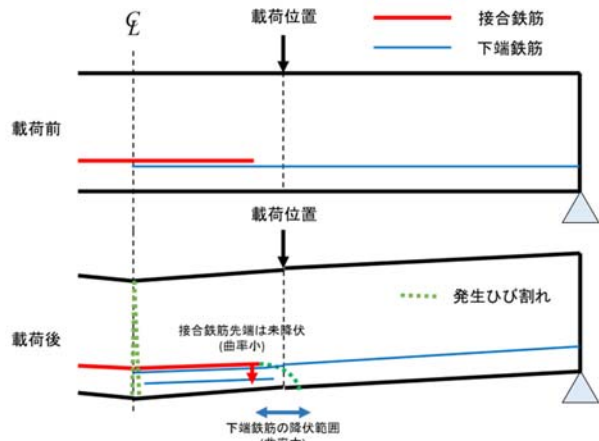


図-5 接合鉄筋の下方押し出し概念図

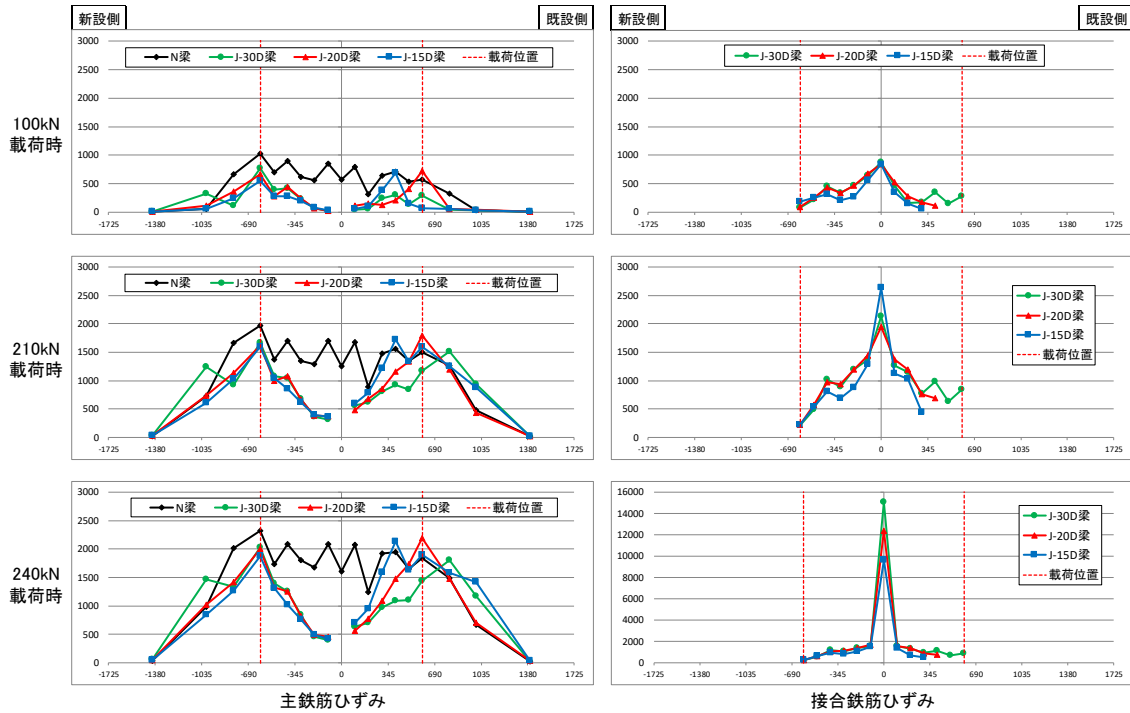


図-6 下端鉄筋(主鉄筋および接合鉄筋)のひずみ分布性状

推察される。J-20D/30D 梁では、スパン中央の接合部のひび割れが大きく開口し、上縁コンクリートには圧縮破壊に伴うひび割れが見られる。また、荷重点および接合鉄筋先端部近傍にも曲げひび割れや下端の軸方向鉄筋に沿った割裂ひび割れが見られ、上縁コンクリートも圧縮破壊の状況が見られる。一方、N 梁で見られる等曲げモーメント区間に発生する等間隔の曲げひび割れは確認出来ない。J-15D 梁では、J-20D/30D 梁と同様にスパン中央の接合部のひび割れの開口、上縁コンクリートの圧縮破壊および、荷重点直下および接合鉄筋端部の曲げひび割れが確認出来るものの、下端鉄筋に沿った割裂ひび割れは確認出来ない。

図-4 には、J-15D 梁および J-30D 梁の梁底面のひび割れスケッチ図を示している。梁底面のひび割れは、曲げひび割れが荷重点直下および接合鉄筋の端部に発生していることが分かる。また、接合鉄筋に沿った割裂ひび割れが確認出来るものの、いずれの梁も既設構造物側のみである。この割裂ひび割れは、荷重とともに接合鉄筋端部の断面変化点にて鉄筋降伏が発生し、曲率が増大し、図-5 に示す概念図のように未降伏の剛性を保持した鉄筋が追従できずに下方に押し出す機構になったため、と考えられる。また、既設側に割裂ひび割れが集中したのは、あと施工により接合鉄筋を設置したことによるコンクリートかぶりの減少が影響したと考えられる。

3. 耐力性状の検討

3.1 下端鉄筋のひずみ分布性状

図-6 には、J-15D/20D/30D 梁の下端鉄筋のひずみ分布

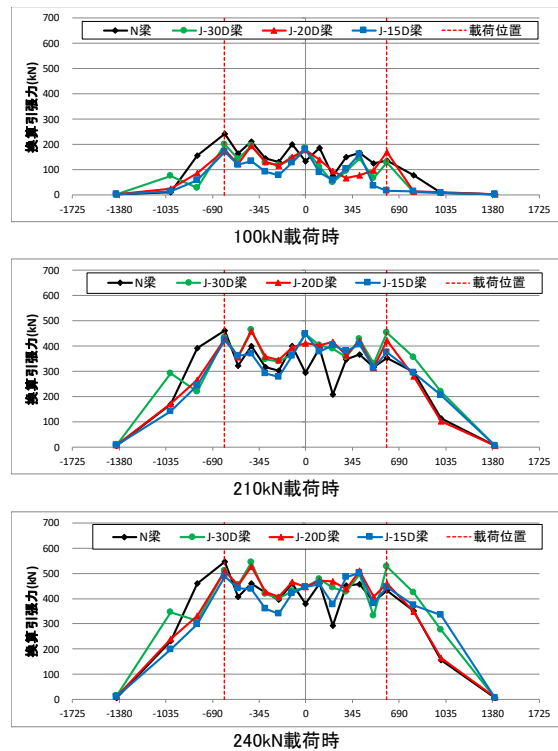


図-7 発生ひずみより換算した
下端鉄筋の張力分布性状
(主鉄筋および接合鉄筋の合算)

を同一荷重時の N 梁の結果と比較して示している。比較荷重は 100kN、210kN(接合梁の降伏荷重)および 240kN(N 梁の降伏荷重)とした。なお、図は主鉄筋と接合鉄筋のひずみを分けて比較している。

主鉄筋のひずみ分布より、一体梁の N 梁では、いずれの荷重段階においても理論通り、等曲げモーメント区間

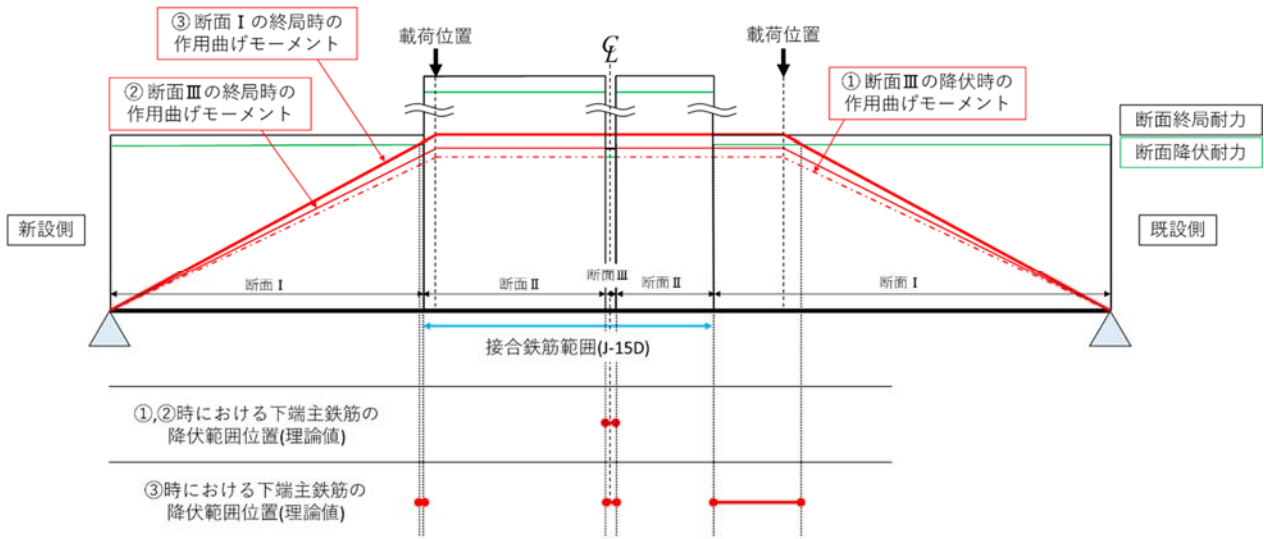


図-8 断面耐力と作用曲げモーメントの関係に関する概念図(J-15D 梁)

でほぼ一定の値を示し、等曲げモーメント区間より外側は支点位置まで線形に漸減する台形状を示している。J-15D/20D/30D 梁の分布は、新設構造物側でいずれの梁も荷重位置を頂点とする三角形を示している。一方、既設構造物側の主鉄筋ひずみは接合鉄筋の先端部で大きく示され、240kN 時にはその先端部を最大発生ひずみとする三角形を示している。

接合鉄筋のひずみ分布は、100kN 時よりスパン中央の接合位置におけるひずみ値が励起し、荷重の増加とともに増大している。240kN 時では、スパン中央のひずみは定着長が長いほど大きく、スパン中央部にひび割れ開口が集中していると推察される。

図-7 には、ひずみ値より換算した下端鉄筋の張力を分布にして示している。図中の張力は、梁スパン方向の同一位置における主鉄筋および接合鉄筋の合算値として示している。なお、降伏ひずみを超えた鉄筋の張力については、配置鉄筋の降伏強度が発生していると仮定して算出した。張力分布より、N 梁はひずみ分布と同様の形状を示している。N 梁と J-15D/20D/30D 梁の張力分布を比較すると、接合鉄筋の定着長にかかわらず、等曲げモーメント区間では N 梁と同程度であり、等曲げモーメント区間の外側においても、発生張力に若干の違いは見られるものの、同性状を示している。このことから、新設側と既設側の発生応力は接合鉄筋を介して伝達し、構造物としては一体梁の N 梁と同様の耐荷機構を示すことが分かる。

3.2 接合部を有する RC 梁の破壊性状

図-8 には、J-15D 梁の断面耐力(緑線：降伏耐力、黒線：終局耐力)と作用曲げモーメントの理論値を重ねた概念図を示している。曲げモーメント図には、作用順に①接合部断面(断面 III)の降伏時作用モーメント、②接合部

表-5 各断面の曲げ耐力一覧

断面	配置鉄筋				断面の曲げ耐力	
	上端鉄筋		下端鉄筋		降伏耐力 kN・m	終局耐力 kN・m
	鉄筋種	数量	鉄筋種	数量		
断面Ⅰ	D16	3本	D16	6本	143.9	151.6
断面Ⅱ	D16	3本	D16	6本	252.4	-
	D22	2本	D22	3本		
断面Ⅲ	D22	2本	D22	3本	133.5	140.4

断面(断面 III)の終局時作用モーメント、③接合鉄筋より外側断面(断面 I)の降伏時作用モーメント、を示している。なお、③の時点は、試験の結果より、接合梁全体としての挙動が接合面での集中的な損傷に支配されず、接合鉄筋により一体化され、荷重が大きく示されているようにも解釈できるため検討を行った。

図より、J-15D 梁における理論上の鉄筋降伏は以下の順で発生すると考えられる。なお、表-5 には一般的な断面分割によって算出した各断面の断面耐力を一覧にして示している。

- 1) 断面 III の降伏曲げモーメント作用時に、接合断面の接合鉄筋が降伏する
- 2) 荷重の増加とともに、断面 III の接合部断面の終局曲げモーメントに達し、上縁コンクリートが圧壊するものの、下端鉄筋の降伏範囲は拡大しない
- 3) 断面 I の終局曲げモーメント作用時には、接合面および接合鉄筋端部近傍の断面で主鉄筋が降伏した状態で終局となる

ここで、前節におけるひずみ分布と比較すると、下端鉄筋のひずみ励起箇所がスパン中央の接合面および接合鉄筋の先端部であること、上縁コンクリートの圧縮破壊位置も終局時の概念図とほぼ一致していることから、破壊性状は耐力分布を考え合わせることで、概ね推測可能であることが分かった。

4. 接合鉄筋の必要定着長の検討

4.1 耐力保持に必要な必要定着長の検討

本試験の結果より、N 梁と同等以上の耐力を保持するためには、接合鉄筋の既設側の定着長を 20D 以上とする必要がある事が分かった。本結果は、既往の要素試験結果³⁾より得られた知見、1) 15D 以上の定着長を確保することにより鉄筋の引張り強さ程度までの耐力を確保可能である、2) へりあき長さ(梁試験体の場合は、鉄筋のかぶり)が小さい場合には降伏荷重程度まで耐力が確保される、とも整合する。

以上から、一体型の梁と同程度以上の耐力を確保するための合理的な定着長は 20D 以上であることが言える。また、その耐力は一般的な断面分割法に基づいて算出可能であると考えられる。

4.2 変形性能を考慮した必要定着長の検討

J-20D/30D 梁は、N 梁と同程度以上の耐力を保持しているものの、最終的な変位は N 梁に劣っている。一方で最大荷重到達後の変形性能については、耐震性の照査や安全側の設計時における冗長性を考慮する上で重要な要素である。

図-9 には、鉄筋コンクリート棒部材モデルの骨格曲線および損傷レベル⁴⁾を示す。本試験の結果より、N 梁は図の骨格曲線と同様、部材降伏、最大耐力を示した後に軟化勾配を示して終局に至っている。一方、接合梁は接合鉄筋が配置された区間で断面剛性が相対的に大きくなるため、図中の赤線に示すような M- θ 関係になると推察される。また試験結果より接合鉄筋の引抜けにより荷重低下し、接合鉄筋の定着長が長いほど終局変位が大きくなった。このことより、図中の θ_{20D} や θ_{30D} のような終局ポイントが存在すると考えられる。以上から M- θ 関係における θ_m に対して接合鉄筋の定着長に関する係数を考慮することにより安全かつ合理的な断面設計が可能になると考えられる。

5. 検討課題

接合梁の変形性能が下回る要因として、断面変化点の降伏範囲における曲率変化に伴う接合鉄筋端部の下方押し出し作用が大きく影響していると考えられる。接合鉄筋を用いた接合構造において冗長性の高い設計を可能にするためには、接合鉄筋の太径使用の影響、下方押し出し抑制に対するせん断補強鉄筋の影響等に関する試験を実施して検討する必要があると考えられる。

6. まとめ

新設・既設構造物の接合部に使用する接合鉄筋の合理的な定着長を見出すため、過年度に実施した一体梁・接

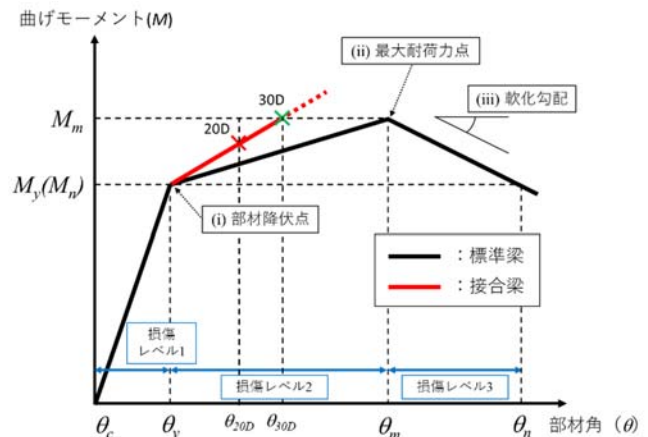


図-9 部材モデルの骨格曲線および損傷レベル⁴⁾

合梁試験体の 4 点曲げ載荷試験結果を詳細に分析し、接合鉄筋の必要定着長と耐荷性状の関係について考察した。その結果、以下の事項が明らかになった。

- (1) 接合梁の構造体としての耐荷性状は、一体梁と同様であることが確認された。
- (2) J-20D/30D 梁の試験結果より、下端鉄筋では降伏に伴い曲率が増加し、接合鉄筋端部において RC 断面特有の破壊性状が確認された。
- (3) 一体梁と同程度以上の耐力を確保するために必要な接合鉄筋の合理的な定着長は 20D 以上であると考えられる。
- (4) 耐震性の照査に必要な変形性能を考慮した設計は、接合鉄筋特有の M- θ 関係を策定し適用することにより、合理的に実施可能になると考えられる。ただし、一体梁に劣る変形性能に関しては接合鉄筋端部の下方押し出し作用が影響していると推察され、別途試験等の実施により確認が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 鉄道総研：あと施工アンカー工法設計施工の手引き、1987.9
- 2) 野間 康孝，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.451-456，2017.6
- 3) 澤田 純之，新井 泰，水上 博之，村上 祐治：RC 構造物への接合を想定した接合用鉄筋に関する引抜き試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，pp.457-462，2017.6
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2007.3