

論文 鉄骨部材と溶接された鋼製プレートで鉄筋コンクリート区間を強化した埋込み形式の複合構造梁の部材剛性の評価手法

佐藤 良介*1・小澤 潤治*2・阪井 由尚*3・中田 寛二*4

要旨: 本論文は、鉄筋コンクリート区間の主筋とナット接合、鉄骨部材と溶接接合された鋼製プレートが鉄筋コンクリート区間と鉄骨区間の境界に配された埋込み形式の複合構造梁の部材剛性について述べるものである。鉄筋コンクリート区間のせん断強度上昇等に見られるプレートの導入効果が既に実験的に明らかにされている一方で、部材剛性に関する議論の前例がない本複合構造梁に対し、設計実務への対応性をも考慮した評価手法の提案・定式化を行い、実験値との比較・検討を通じたその妥当性についても併せて論及している。

キーワード: 複合構造梁, 埋込み形式, 部材剛性, 寄り掛かりモデル

1. はじめに

著者らはこれまで、材端部が鉄筋コンクリート（以下、RCと略記）造で、中央部が鉄骨（以下、Sと略記）造で構成された埋込み形式の複合構造梁¹⁾について、材端のRC区間と中央のS区間の境界に鋼製プレート（以下、境界プレートと称する）を配し、これをRC区間の主筋とナット接合、S部材と溶接接合することで、この種の複合構造梁に求められる機能²⁾を合理的に満たし得ることを実験的に明らかにしてきた²⁾。本実験は、「境界プレートを有する埋込み形式の複合構造梁（以後、本複合構造梁と略記）は、境界プレートの導入およびそのS部材との溶接によって、既往の埋込み形式の複合構造梁がせん断破壊に到る条件下でもそれを回避できる」との結果²⁾を示すことでその有用性を相応に感じさせるものであったが、実用化のための課題を全て解決するには到っておらず、たとえば「部材剛性の評価」を、残された課題のひとつとして挙げる事ができる。

しかしながらこの部材剛性については、「境界プレートを有する埋込み形式の複合構造梁」はもとより、既往の埋込み形式の複合構造梁に関しても検討例が少なく、著者らの知る限りでは、僅かに一例、「境界プレートのない場合の構造実験結果の追跡手法」が良好な精度の下に報告される³⁾に止まっているのが現状である。すなわち、境界プレートの影響を考慮した部材剛性の評価手法は現状において皆無であり、本複合構造梁の実用化のためには、これを新たに定めることが不可欠と考えられる。またこの際、現行の構造設計体系への対応性も考慮した実用性が伴っていることが望ましい。

本論文は、以上を踏まえ、「境界プレートを有する埋込み形式の複合構造梁の部材剛性の評価手法」を、構造設計の実務への対応性を考慮しながら試行的に提案し、既往の実験値²⁾との比較・検討を通して、その妥当性についての検

証を試みるものである。なお本論文における論述に用いられる各記号は、特に断りのない限り鉄筋コンクリート構造計算規準⁴⁾（以下、RC規準と略記）に準拠するものとする。

2. 境界プレートを有する埋込み形式の複合構造梁の構成

図-1に、既報²⁾でその有用性が確認された本複合構造梁の接合部近傍の詳細を示す。この図に見るように、本複合構造梁は、材端部のRC区間にS部材が埋込まれた複合構造梁であるが、RC区間とS区間の境界に境界プレートが配され、これがRC区間の主筋とはナット接合、S部材とは溶接によって一体化されている点に特徴を有する。同図-1に示したように、本論文では以後、本複合構造梁のRC区間小口位置を「RC区間鼻先」、RC区間の柱フェイス位置を「RC区間端」、RC区間とS区間の境界位置を「S区間端」と呼称する。またS部材がRC区間に埋め込まれている部位のうち、RC区間鼻先側を「始端」、RC区間端側を「終端」と呼ぶこととする。更に本論文では、本複合構造梁を構成するコンクリートとS部材の弾性係数をそれぞれ E_c, E_s と、またRC区間とS部材の断面2次モーメントをそれぞれ I_{ec}, I_s と表現する。 I_{ec} は有筋の場合の等価断面2次モーメント⁴⁾であり、S部材による断面の欠損を特に考慮せず求められるものとする。

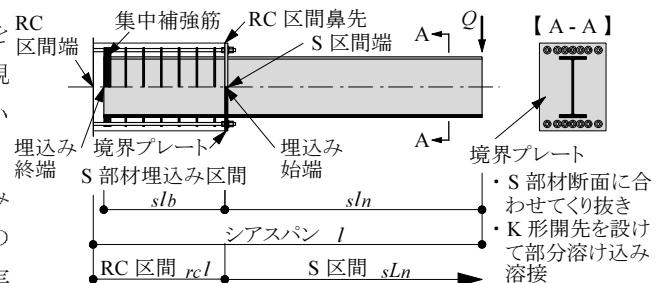


図-1 本複合構造梁の接合部近傍詳細

- *1 東急建設（株） 技術研究所 基盤技術開発部 博士（工学）（正会員）
- *2 東急建設（株） 技術研究所 基盤技術開発部 工修
- *3 東急建設（株） 設計本部 構造設計部 博士（工学）（正会員）
- *4 東急建設（株） 技術研究所 基盤技術開発部 修士（工学）（正会員）

3. 部材剛性の評価手法

埋込み形式の複合構造梁の部材剛性に関する検討例は少なく、僅かに境界プレートのないものを対象に「構造実験の結果を追跡する手法」が示される⁹⁾に止まっている。本論文の目的は、「境界プレートを有する埋込み形式の複合構造梁の部材剛性を設計実務に即して評価する手法」を提示することにあるが、まず初めに、上記の唯一の例⁹⁾に見る「埋込み形式の複合構造梁の部材剛性を評価する過程で考慮すべき変形」を、境界プレートの影響を反映させながら導いたうえで部材弾性剛性を定式化し、更にこの結果を非線形領域にまで拡張することを試みる。

3.1 部材剛性評価の立脚点と最終的な評価モデル

本論文では、部材剛性の評価過程に不可欠となる「埋込み形式の複合構造梁の変形⁹⁾」に境界プレートの影響を反映させるための力学的な立脚点として、埋込み形式の複合構造梁とほぼ同一の構成を有するS造根巻き柱脚の「寄り掛かりモデル⁹⁾」を試行的に取り上げる。ただし、本寄り掛かりモデルおよびこれを基に展開する部材剛性の評価手法の構造は、いわゆる「汎用構造設計プログラム」への親和性に乏しく運用面に若干の課題を抱くものであるため、定式化にあつてはこれを更に汎用的な形態へと変形させる構成とし、最終的には、図-2上段に示すようにRC区間をRC造梁として、S区間をS造梁と解釈したうえで、両者を曲げバネで結合させたモデルによる評価に帰着させることを試みる。同図-2下段は、この評価モデルの自由端に集中荷重 Q が作用した場合の曲げモーメントの分布 $M(x)$ であるが、本論文では以後、この図に見るように、RC区間鼻先を原点としてRC区間端に向かって正方向に伸びる局部座標を x と名称し、 $M(0)$ ならびに $M(rcl)$ を、簡単のため M_{no} ならびに M_{fa} と略称する。

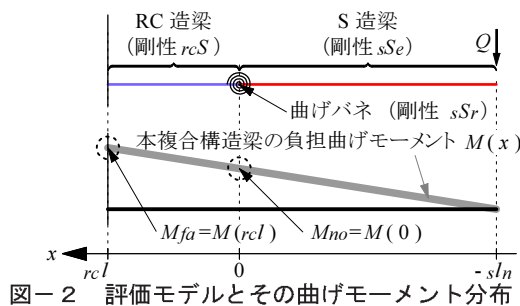


図-2 評価モデルとその曲げモーメント分布

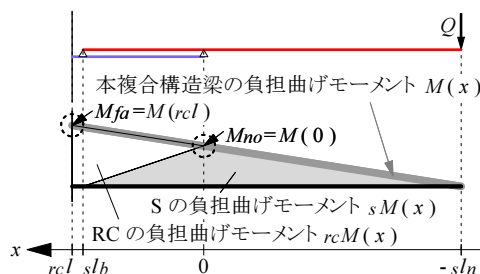


図-3 寄り掛かりモデルとその曲げモーメント分布

3.2 部材弾性剛性

図-3上段に、S造根巻き柱脚の寄り掛かりモデル⁹⁾に準じてモデル化された「自由端に集中荷重 Q を受ける片持ち形式の本複合構造梁」の模式図を示す。この図は、「S部材が、埋込み区間において、始端($x=0$)と終端($x=I_b$)のピンを介してRC区間と接合されている」と解釈するもの⁹⁾であり、先の図-1を寄り掛かりモデルとして表現したものに相当する。下段に示したのはこの系に生じる曲げモーメント分布図⁹⁾であるが、これは埋込み形式の複合構造梁の力学について体系的にまとめられている文献¹⁾にて想定されるそれと整合している。ここではまず、この寄り掛かりモデルを起点に本複合構造梁に生じる変形を誘導したうえで、これを反映させた「設計実務への対応性を備えた部材弾性剛性」の定式化を試みる。

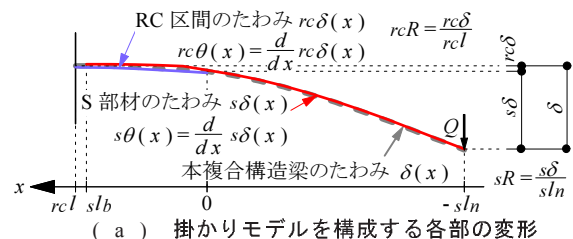
(1) 寄り掛かりモデルに立脚した本複合構造梁の変形

寄り掛かりモデルはこれまで、あくまで埋込まれたS部材とRCの間に生じる力の伝達を表現する一手段⁹⁾として利用されてきており、この種の構造の部材剛性について触れる端緒として活用された例は見られていない。そこで本論文ではまず、「自由端に集中荷重 Q が作用する本複合構造梁のたわみ曲線 $\delta(x)$ ならびに自由端におけるたわみ $\delta = \delta(-I_n)$ 」を、図-4(a)に示すように寄り掛かりモデルに準じて導出することから考えることにする。

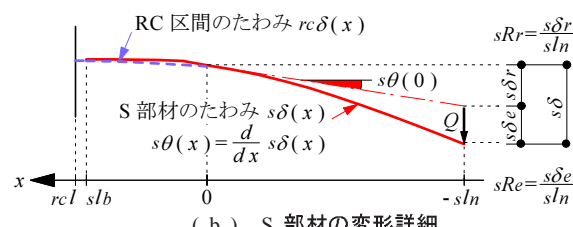
本複合構造梁のたわみ曲線 $\delta(x)$ は、同図-4(a)が表現するように、これがRC区間のたわみ曲線 $rc\delta(x)$ とS部材のたわみ曲線 $s\delta(x)$ から成ると考え、式(1)として書き下すことができるものとする。またこれらのたわみ曲線 $\delta(x)$ 、 $rc\delta(x)$ 、 $s\delta(x)$ を微分して得られる導関数を、それぞれのたわみ角曲線 $\theta(x)$ 、 $rc\theta(x)$ 、 $s\theta(x)$ と定義する。

$$\delta(x) = \begin{cases} rc\delta(x) & 0 \leq x \leq rcl \\ s\delta(x) & -sln \leq x \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

埋込み形式の複合構造梁の変形と部材剛性について詳しく触れられた数少ない議論の中では、図-4(a)のような埋込み形式の複合構造梁の自由端におけるたわみ $\delta (= \delta(-$



(a) 掛かりモデルを構成する各部の変形



(b) S部材の変形詳細
図-4 寄り掛かりモデルに生じる変形

l_n) を構成する S 部材の変形量 ${}_s\delta$ ($=\delta(-l_n)-\delta(0)$) が更に、図-4 (b) に示す通り「S 部材の剛体回転による変形 ${}_s\delta_r$ 」と「S 部材の弾性変形によるたわみ ${}_s\delta_e$ 」とに分解できるとされている³⁾。ここに、 ${}_s\delta_r$ が、RC 区間鼻先となる $x=0$ における S 部材のたわみ角 ${}_s\theta(0)$ を用いて式(2)として表現されることは幾何学的に自明であり、また ${}_s\delta_e$ は、初等梁理論により式(3)で表すことができるものである³⁾。

$${}_s\delta_r = {}_s\theta(0) \times {}_s l_n \quad (2)$$

$${}_s\delta_e = \frac{{}_s l_n^3}{3 {}_s E {}_s I} \times Q \quad (3)$$

本論文でも、「埋込み形式の複合構造梁の変形は、この3成分に分離できる」と考え、まずはこれを寄り掛かりモデルに準じて評価する方法を考える。

(2) RC 区間の変形

図-4 (a) 中の寄り掛かりモデルにおいて、RC 区間に作用している力ならびにこれに伴うたわみ曲線 ${}_{rc}\delta(x)$ およびその負担曲げモーメントの分布 ${}_{rc}M(x)$ を詳細に示すと、図-5 のようになる。この図に示すように、寄り掛かりモデルに立脚して考える場合、自由端で S 部材に作用している集中荷重 Q は埋込み始端と終端に配されたピンを介して RC 区間に伝達されるため、RC 区間のたわみ曲線 ${}_{rc}\delta(x)$ はこの応力条件に対して求められる必要があり、これを初等梁として解くことで式(4)が得られる。

$${}_{rc}\delta(x) = \begin{cases} \frac{Q}{6 {}_c E {}_c I_e} [x^3 + 3 {}_s l_n x^2 - 3({}_c r l^2 + 2 {}_c r l {}_s l_n - {}_s l_b {}_s l_n)x + 2 {}_c r l^3 + 3 {}_c r l^2 {}_s l_n] \\ \frac{Q}{6 {}_c E {}_c I_e} \left[\left(1 + \frac{{}_s l_n}{{}_s l_b}\right) x^3 - 3({}_c r l^2 + 2 {}_c r l {}_s l_n - {}_s l_b {}_s l_n)x + 2 {}_c r l^3 + 3 {}_c r l^2 {}_s l_n - {}_s l_b^2 {}_s l_n \right] \end{cases} \quad (4)$$

またその導関数であるたわみ角曲線 ${}_{rc}\theta(x)$ は、式(5)と書き表される。

$${}_{rc}\theta(x) = \begin{cases} \frac{Q}{2 {}_c E {}_c I_e} [x^2 + 2 {}_s l_n x - {}_c r l^2 - 2 {}_c r l {}_s l_n] \\ \frac{Q}{2 {}_c E {}_c I_e} \left[\left(1 + \frac{{}_s l_n}{{}_s l_b}\right) x^2 - {}_c r l^2 - 2 {}_c r l {}_s l_n + {}_s l_b {}_s l_n \right] \end{cases} \quad (5)$$

式(4)、式(5)ともに、第一式と第二式の定義域はそれぞれ ${}_s l_b \leq l \leq {}_c l$, $0 \leq x \leq {}_s l_b$ であり、式(4)が式(1)の第

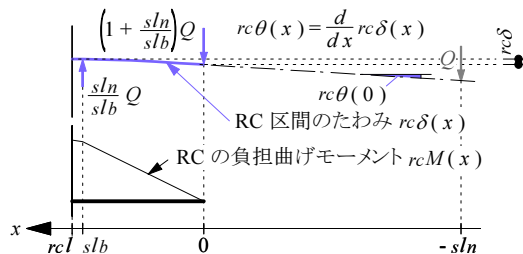


図-5 RC 区間の変形と曲げモーメント分布の詳細

一式に相当することになる。またこれより、「自由端に作用する集中荷重 Q と RC 区間鼻先におけるたわみ ${}_{rc}\delta = {}_{rc}\delta(0)$ の関係」を、式(6)として表現することができる。

$$Q = \frac{6 {}_c E {}_c I_e}{2 {}_c r l^3 + 3 {}_c r l^2 {}_s l_n - {}_s l_b^2 {}_s l_n} {}_{rc}\delta \quad (6)$$

この構成式が、あくまで「自由端に作用する集中荷重 Q と RC 区間鼻先のたわみ ${}_{rc}\delta$ の関係」として表現されている点には注意が必要である。

(3) S 部材の変形

S 部材については、上に見たような変形を呈する RC 区間とピンを介して接合される寄り掛かりモデルの連続条件を利用してそのたわみ曲線 ${}_s\delta(x)$ を求める。すなわち、本複合構造梁では S 部材と境界プレートが溶接されているため、RC 区間と S 部材が溶接を介して一体挙動すると考え、図-6 に示すように、RC 区間鼻先に配したピンにて、両者のたわみとたわみ角が連続すると仮定する。この場合、S 部材のたわみ曲線 ${}_s\delta(x)$ ならびにその導関数であるたわみ角曲線 ${}_s\theta(x)$ は、 ${}_s\theta(0) = {}_{rc}\theta(0)$ および ${}_s\delta(0) = {}_{rc}\delta(0)$ を初期条件とした初等梁理論によって求めることができ、それぞれを式(7)ならびに式(8)として表現できる。

$${}_s\delta(x) = \begin{cases} \frac{Q}{6 {}_s E {}_s I} \left[-\frac{{}_s l_n}{{}_s l_b} x^3 + 3 {}_s l_n x^2 - \frac{3 {}_s E {}_s I}{{}_c E {}_c I_e} ({}_c r l^2 + 2 {}_c r l {}_s l_n - {}_s l_b {}_s l_n)x - \frac{{}_s E {}_s I}{{}_c E {}_c I_e} (-2 {}_c r l^3 - 3 {}_c r l^2 {}_s l_n + {}_s l_b^2 {}_s l_n) \right] \\ \frac{Q}{6 {}_s E {}_s I} \left[x^3 + 3 {}_s l_n x^2 - \frac{3 {}_s E {}_s I}{{}_c E {}_c I_e} ({}_c r l^2 + 2 {}_c r l {}_s l_n - {}_s l_b {}_s l_n)x - \frac{{}_s E {}_s I}{{}_c E {}_c I_e} (-2 {}_c r l^3 - 3 {}_c r l^2 {}_s l_n + {}_s l_b^2 {}_s l_n) \right] \end{cases} \quad (7)$$

$${}_s\theta(x) = \begin{cases} \frac{Q}{2 {}_s E {}_s I} \left[-\frac{{}_s l_n}{{}_s l_b} x^2 + 2 {}_s l_n x - \frac{{}_s E {}_s I}{{}_c E {}_c I_e} ({}_c r l^2 + 2 {}_c r l {}_s l_n - {}_s l_b {}_s l_n) \right] \\ \frac{Q}{2 {}_s E {}_s I} \left[x^2 + 2 {}_s l_n x - \frac{{}_s E {}_s I}{{}_c E {}_c I_e} ({}_c r l^2 + 2 {}_c r l {}_s l_n - {}_s l_b {}_s l_n) \right] \end{cases} \quad (8)$$

式(7)、式(8)ともに、第一式と第二式の定義域は、それぞれ $0 \leq x \leq {}_s l_b$, $-{}_s l_n \leq x \leq 0$ である。すなわち式(7)の第二式が式(1)の第二式に相当する。したがって、この式に $x = -{}_s l_n$ を代入することで得られるたわみ ${}_s\delta(-{}_s l_n)$ が自由端におけるたわみ $\delta (= \delta(-{}_s l_n))$ となり、それ故、この値から ${}_{rc}\delta (= \delta(0))$ を減じた値が図-4 (b) に示した ${}_s\delta$ となる。既に同図-4 (b) を用いて示したように、

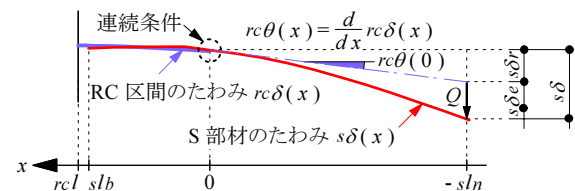


図-6 RC 区間と S 部材の連続条件

この δ の値は、 $x=0$ におけるたわみ角 $\theta(0)$ に起因した剛体回転による成分 δ_r と弾性変形によるたわみ δ_e から成る。したがってその値は、式(8)より求められる $\theta(0)$ を式(2)に代入して δ_r を導き、さらに式(3)で δ_e を算定して両者の和をとることでより簡易に算定できるものでもある。後者の場合に必要となる「自由端に作用する集中荷重 Q とS部材の剛体回転による変形 δ_r 」ならびに「自由端に作用する集中荷重 Q とS部材の弾性変形によるたわみ δ_e 」との構成関係を式(8)と式(7)から誘導すると、それぞれ式(9)ならびに式(10)のようになる。

$$Q = \frac{2cE_{rc}I_e}{rc^2s_n + 2rcI_{s_n}^2 - s_b s_n^2} s\delta_r \quad (9)$$

$$Q = \frac{3sE_s I}{s_n^3} s\delta_e \quad (10)$$

以上より、境界プレートとS部材を溶接で一体化した片持ち形式の複合構造梁の自由端に集中荷重 Q が作用した際のたわみ δ は、式(6)、式(9)および式(10)を重ね合わせることで、 $\delta = \delta_{rc} + \delta_r + \delta_e$ として求められることになる。

(4) 評価モデルへの置換

上に見てきた各変形成分の構成式は、「自由端に作用する集中荷重 Q と複合構造梁のたわみを構成する各部変形の関係」として展開してきたものであるが、設計実務の観点からすると、これは必ずしも運用面に優れた形態とは言えない。いわゆる汎用構造設計プログラムにおいては、曲げモーメント分布に従って架構の応力解析が行われるため、部材剛性も、「力と変形の関係」ではなく「負担モーメントと部材変形角の関係」を基調に評価されるのが一般的である。すなわち、これまでに展開してきた剛性評価手法のより円滑な運用を考えた場合、本複合構造梁の変形挙動を評価するための構成式は、上に示してきた「力と変形の関係」ではなく「負担モーメントと部材変形角の関係」として表現されていることが望ましいと考えられる。

そこで、図-4(a)または図-4(b)のように、RC区間のたわみ δ_{rc} 、S部材の剛体回転によるS区間の変形 δ_r 、S部材の弾性変形によるS区間のたわみ δ_e に対応する部材変形角を、それぞれが関連する区間の長さで除して $R_{rc} = \delta_{rc}/l$ 、 $R_r = \delta_r/l_n$ 、 $R_e = \delta_e/l_n$ と定義し、これらの部材変形角を生じせしめる最大曲げモーメントとの構成式を形成する部材弾性剛性をこの順に S_{rc} 、 S_r 、 S_e と名称すると、各変形成分の「負担モーメントと部材変形角の関係」を、次の式(11)として一般表示することができる。

$$\begin{cases} M_{fa} = S_{rc} R_{rc} \Leftrightarrow Q(rcI + s_n) = S_{rc} \frac{rc\delta}{rcI} \\ M_{no} = S_r R_r \Leftrightarrow Q s_n = S_r \frac{s\delta_r}{s_n} \\ M_{no} = S_e R_e \Leftrightarrow Q s_n = S_e \frac{s\delta_e}{s_n} \end{cases} \quad (11)$$

ここで、寄り掛かりモデルを起点に誘導される変形成分 δ_{rc} 、 δ_r 、 δ_e と本複合構造梁の自由端に作用する集中荷重 Q

との構成関係を示す式(6)、式(9)および式(10)を、式(11)に合わせて変形すると、部材弾性剛性 S_{rc} 、 S_r 、 S_e をそれぞれ、式(12)、式(13)、式(14)として表現できる。

$$S_{rc} = \frac{6cE_{rc}I_e(rcI + s_n)rcI}{2rcI^3 + 3rcI^2s_n - s_b^2s_n} \quad (12)$$

$$S_r = \frac{2cE_{rc}I_e s_n}{rcI^2 + 2rcI s_n - s_b s_n} \quad (13)$$

$$S_e = \frac{3sE_s I}{s_n} \quad (14)$$

式(12)の S_{rc} は、RC区間を「図-5のような応力条件下にある長さ l のRC造片持ち梁」と解釈した場合の弾性解に基づく部材弾性剛性、式(14)の S_e は、S区間を「自由端に集中荷重 Q が作用する長さ l_n のS造片持ち梁」と解釈した場合の弾性解に基づく部材弾性剛性である。本複合構造梁の部材弾性剛性は、さらにRC区間鼻先($x=0$)における負担曲げモーメント M_{no} に応じて、式(11)の第二式より与えられる変形成分を付加的に考慮することで評価されるものであり、図-2上段に示した評価モデルは、この付加分を曲げバネと解釈してRC造梁とS造梁を結合したものに相当する。ただしRC造梁の部材弾性剛性 S_{rc} は、前記の通り「集中荷重 Q とRC区間鼻先のたわみ δ の関係」を表現するものであるため、式(12)は、云わば「寄り掛かりモデルに準じた本来の応力条件下の変形挙動から求めた等価な部材弾性剛性が見かけの値として示されたもの」と考えるのがより正確と言える。すなわち S_{rc} は、通常の「長さ l のRC造片持ち梁の部材弾性剛性」とは異なるため、本複合構造梁を図-2上段に示す評価モデルとして汎用プログラムに入力する際には、この点に十分な注意が必要となる。一方式(14)が示すS部材の部材弾性剛性 S_e は、図-2下段と図-3下段の曲げモーメント分布図の比較からも明らかのように、「自由端に集中荷重 Q が作用する長さ l_n のS造片持ち梁」と何ら異なる点はなく、このことが式の形態としても表れている。

3.3 非線形性の評価

本複合構造梁の部材剛性を非線形性を交えて評価する場合も、部材弾性剛性同様、その自由端におけるたわみ $\delta = \delta(-l_n)$ が、図-4(a)および図-4(b)に示したように、RC区間のたわみ δ_{rc} 、S部材の剛体回転によるS区間の変形 δ_r 、S部材の弾性変形によるS区間のたわみ δ_e を用いて $\delta = \delta_{rc} + \delta_r + \delta_e$ と表現できる³⁾ことを前提とする。すなわち、図-8に示すように各変形成分にそれぞれの状況に応じた非線形性を付与し、これらを重ね合わせることで求められるものとする³⁾。ただし、先の式(12)～式(14)に示した通り、それぞれの非線形挙動の起点となる部材弾性剛性 S_{rc} 、 S_r 、 S_e が、評価モデルへの帰着を想定して「モーメントと部材変形角の関係」を表現するために定式化されていることから、以降の記述も図-8と等価な「モーメントと部材変形角の関係」である図-9に基づい

て展開する。なおこの図-8および図-9は、RC区間端に塑性ヒンジを想定する場合を例示したものである。

まずRC造梁の部材剛性は、図-9(b)に示すように、「曲げひび割れ発生点」および「曲げ降伏点」を特異点とするトリリニア型の剛性低下を呈するものとする。すなわち、その変形挙動を通常のRC梁と同様に評価できるとして、同図-9(b)中の曲げひび割れモーメント ${}_{rc}M_c$ 、降伏モーメント ${}_{rc}M_y$ 、ならびに降伏点における剛性低下率 α_y が、いずれもRC規準⁹⁾の定める次式(15)~式(17)によって求められると考える。

$${}_{rc}M_c = 0.56 \sqrt{c\sigma_B} \times {}_{rc}Z_e \quad (15)$$

$${}_{rc}M_y = 0.9 a_t r \sigma_y {}_{rc}d \quad (16)$$

$$\alpha_y = \left(0.043 + 1.64 n p_t + 0.043 \frac{a}{{}_{rc}D} \right) \left(\frac{{}_{rc}d}{{}_{rc}D} \right)^2 \quad (17)$$

ここに、 c はコンクリートの材料強度、 ${}_{rc}Z_e$ は有筋の場合の断面係数⁹⁾、 a_t は引張鉄筋の断面積、 r は鉄筋の降伏強度、 d はRC区間の有効せい、 n はコンクリートと鉄筋の弾性係数比、 p_t はRC区間の引張鉄筋比、 ${}_{rc}D$ はRC区間の梁せいである。 ${}_{rc}Z_e$ は、 ${}_{rc}I_e$ と同様S部材による断面の欠損を考慮せずに求める。また α_y の導出時に求められるシアスパン a はRC区間の長さ ${}_{rc}l$ とする。なお α_y について、RC規準においては式(17)の適用範囲としてシアスパン比2.0~5.0が定められ、これよりも短いものに関しては主に短柱を対象とした別の式が提案されているが⁹⁾、複合構造梁には軸力が作用しないこと、また設計検討時に僅かな ${}_{rc}l$ の差異によって α_y が不連続的に変動することを避けるため、既報⁹⁾に準じて一律的に式(17)を用いることとする。

次に曲げバネは、図-9(c)が表現するようにRC造梁同様のトリリニア型の非線形性を示すものとする。これは、この変形成分がRC区間鼻先($x=0$)におけるS部材の剛体回転角 $\theta(0)$ に比例し、かつその際の $\theta(0)$

の値がRC区間の変形との連続条件を起点に求められているためである。すなわち図-9(c)は、「曲げバネとしての剛性低下がRC造梁のそれに従属する」として、図-8(c)に示す自由端に作用する力 Q とS部材の剛体回転による変形 δ_r の関係が、RC造梁の剛性低下と同期して挙動するように描かれた「モーメントと部材変形角の関係」であり、RC造梁の曲げひび割れモーメントおよび降伏モーメントに対応する点が、それぞれ ${}_{rc}M_c$ および ${}_{rc}M_y$ に (M_{no}/M_{fa}) を乗じることで得られている。またこの過程で求められる降伏点における剛性低下率は、式(17)より得られる α_y を転用できるものとする。

最後に、図-8(d)または図-9(d)に示したS造梁の骨格曲線は、部材弾性剛性の誘導時同様、「自由端に集中荷重 Q が作用する長さ l_n のS造片持ち梁」の変形挙動と何ら変わるところのないものである。

4. 実験値との対応

以上に見てきた手法によって、本複合構造梁は、寄り掛かりモデルを起点に図-2としてモデル化でき、またその変形挙動を非線形領域まで評価できると考えられる。ここでは、本複合構造梁の構造性能を確認するために実施された既報⁹⁾の構造実験の試験体3体を取り上げ、その正方向処女加力時包絡線と本手法による骨格曲線の比較・検討に基づき、本手法の妥当性に関する検証を行う。

表-1に、本検証の対象となる既報⁹⁾の試験体の緒元を示す。試験体はB-1、B-2、B-3の3体で、いずれもRC区間の長さ l が870mmとなっている。B-1とB-2の差異がせん断補強筋比のみであり、本剛性評価手法への変動因子が同一となっている一方で、B-3のみS部材埋込み区間長さ l_b が短く設定されている。なおこれらの試験体のその他詳細に関しては既報⁹⁾を参照されたい。

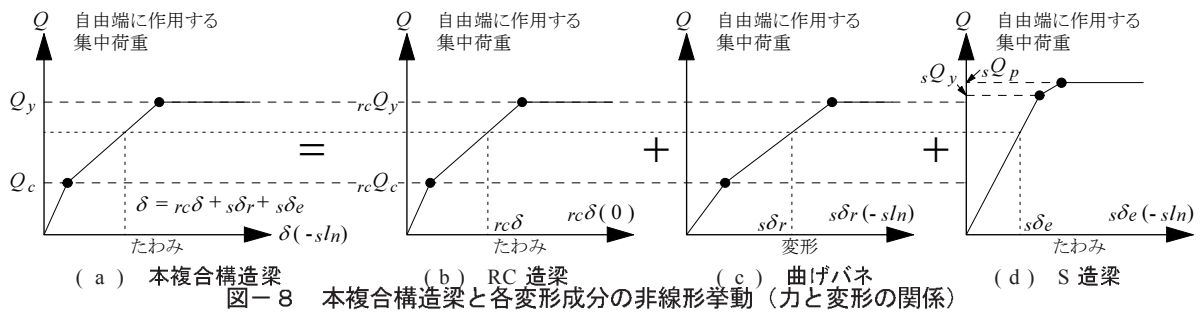


図-8 本複合構造梁と各変形成分の非線形挙動 (力と変形の関係)

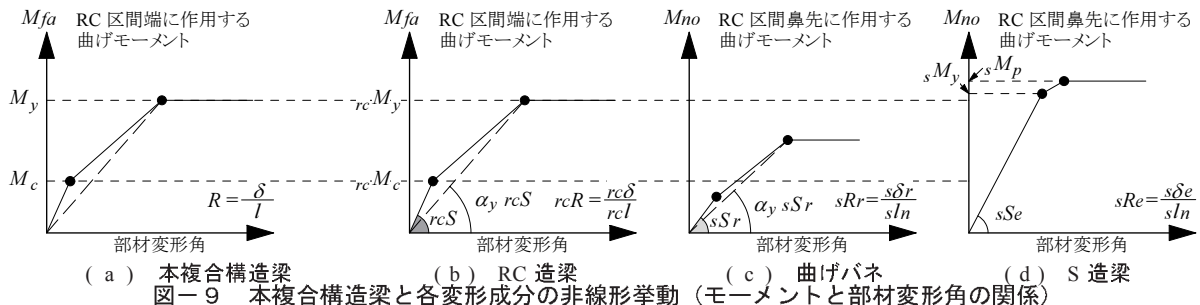


図-9 本複合構造梁と各変形成分の非線形挙動 (モーメントと部材変形角の関係)

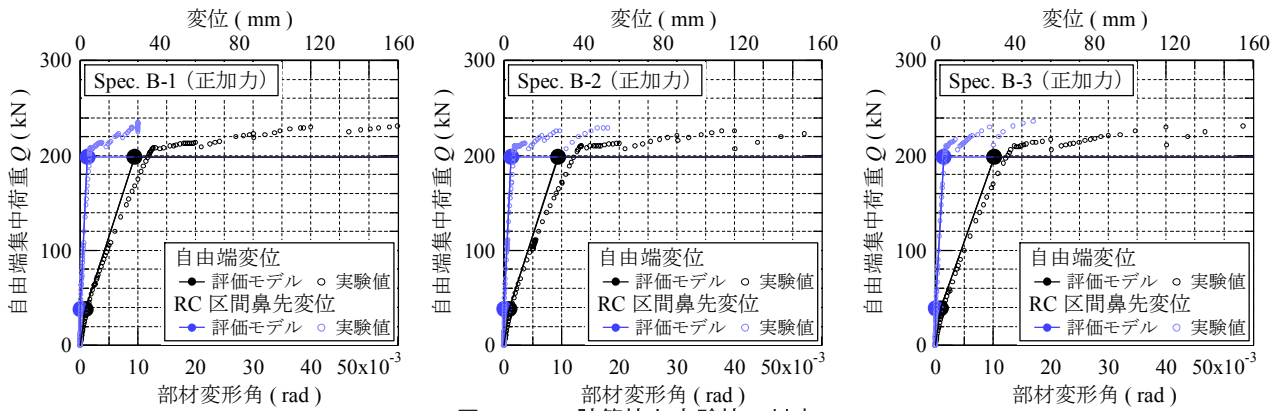


図-10 計算値と実験値の対応

表-1 解析条件一覧

試験体名		B-1	B-2	B-3	
断面	RC 区間	断面外形 $b \times r_c D$ (mm)	440 × 580		
		主筋 上下対称 (SD 390)	1段目	7 - D19	
			2段目	2 - D19	
		有効せい $r_c d$ (mm)	520		
		引張鉄筋比 p_t (%)	1.13		
S 部材	断面形状 (mm) ($s D$: 梁せい)	BH-400×175×9×16			
	鋼種	SN 490 B			
シアスパン l (mm)		2900			
RC 区間長さ $r_c l$ (mm)		870			
S 部材埋込み長さ $s l_b$ (mm)		800	600		
せん断補強筋比 p_w (%)		0.58	0.34	0.58	
RC 区間コンクリート強度 σ_c (N/mm ²)		39.9	41.2	42.8	
RC 区間コンクリート弾性係数 E (N/mm ²)		23900	24400	24900	
主筋降伏強度 σ_s (N/mm ²)		477			
主筋弾性係数 E (N/mm ²)		190000			
フランジ降伏強度 σ_s (N/mm ²)		411			
フランジ弾性係数 E (N/mm ²)		213000			

図-10に、これら3体の試験体の「自由端に作用する集中荷重 Q とそのたわみ δ の関係」ならびに「自由端に作用する集中荷重 Q と RC 区間鼻先位置のたわみ δ_c の関係」の計算値と実験値の対応を示す。これらの図よりまず、本手法による計算値が全て、集中荷重 Q の漸増に伴う自由端たわみ δ の実験値の推移を比較的良好な精度で捕捉できていることを読み取ることができる。本手法では、RC 区間と S 部材との間に図-6に示したような連続条件を仮定して最終的な変形が求められているが、この結果は、この条件が、境界プレートと S 部材の溶接による RC 区間と S 部材の一体化の影響を相応に反映できていたことを示唆するものと考えられる。次に RC 区間のたわみ δ_c の推移に目を向けると、これについても3体全てにおいて計算値と実験値の比較的良好な対応を見ることができる。この δ_c の計算値は、図-5のような応力条件を前提に導出されるものであるが、この結果より、本前提が現実を無視したものではなかったことを窺い知ることができる。またこの δ_c の非線形領域における挙動については、上記の前提の下、RC 規準⁹⁾の剛性低下率 α_y を準用のうえ、算定時に求められるシアスパンとして RC 区間の長さ $r_c l$ を採用して式(17)に拠ることとしたが、本結果はこの仮定の妥当性をも指し示すものと考えられる。本手法における曲

げ降伏時の剛性低下率 α_y に関してはもう一点、「RC 区間を対象に求められたこの値を S 部材の剛体回転による変形 δ_r を表現する曲げバネの構成則に転用する」との仮定も設けられているが、改めて3体の試験体の自由端たわみ δ に対する計算値と実験値の対応を眺めてみると、この仮定もまた、相応の妥当性を有しているように見える。

5. まとめ

本論文では、「RC 区間の主筋とナット接合、S 部材と溶接接合された境界プレートを有する埋込み形式の複合構造梁の部材剛性」を、設計実務への対応性に配慮しながら非線形領域まで評価する手法の提案を試みた。本手法は、埋込み形式の複合構造梁とほぼ同一の構成を有する S 造根巻き柱脚の寄り掛かりモデル⁹⁾に基づき、溶接による RC 区間と S 部材の一体化の影響を反映させた定式化を試行するものであり、計算値と既往の実験値²⁾との対応より、相応の妥当性を有するものと考えられる。今後は、本試行においては無視されているせん断変形の影響を考慮する等により、更なる洗練が必要になると考えている。

参考文献

- 1) 日本建築学会:鋼コンクリート構造接合部の応力伝達と抵抗機構, 2011. 2
- 2) 佐藤良介, 小澤潤治, 阪井由尚:材端部鉄筋コンクリート造中央部鉄骨造で構成された埋込み形式の複合構造梁の構造性能, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 2, pp. 1171 - 1176, 2012
- 3) 鈴木英之, 西原 寛:材端部 RC 造中央部鉄骨造で構成される複合構造梁のせん断耐力と変形性能, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.631, pp.1673-1680, 2008.9
- 4) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010. 2
- 5) 平野道勝, 伊藤倫雄, 穂積秀雄:角形鋼管の根巻き柱脚に関する実験(その5), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp. 891 - 892, 1986. 8