中央大学大学 理工学部土木工学専攻 学生会員 中村 安孝 東京電力株式会社 技術開発研究所 工博 正会員 堤 知明 東電設計株式会社 七木本部 工博 正会員 鈴木 修一 中央大学 理工学部都市環境学科教授 工博 正会員 大下 英吉

1. はじめに

近年、既存の構造物を適切に維持管理し、長期 的な供用を目指す動向が活発となっている。既存 構造物の長期供用化に際しては,各種劣化に起因 した構造性能の変化を正確に把握する必要がある。 そのため近年では、内的及び外的要因により構造物 に生じる各種劣化現象が構造性能に及ぼす影響に ついて各方面で研究が行われている。鉄筋コンク リート構造物に生じる劣化現象は多岐にわたるが、 特に中性化や塩害による鉄筋腐食は非常に重要な 問題である。鉄筋の腐食は構造体として機能する 鉄筋量を減少させるとともに、鉄筋とコンクリー トの一体性すなわち付着性能を低下させる等,構 造性能に及ぼす影響が大きい劣化現象の一つであ る。しかしながら、鉄筋腐食が生じたコンクリー ト構造物の構造性能を定量的に評価可能な手法は いまだ確立されておらず、かなりの安全余裕度を もって構造性能を評価しなくてはならないのが現 状である。

そこで本研究では,鉄筋腐食を生じた RC 部材の 構造性能に関する既往の実験結果を耐荷機構ごと に整理し、耐荷機構と残存耐荷力を判定可能なシ ステムの体系化を目指した。

2. 鉄筋腐食を生じたRC梁部材の耐荷機構と耐荷 力の支配的要因

2.1 耐荷機構の概要

既往の研究より鉄筋腐食を生じたRC梁部材の 残存耐荷機構の流れを図 1.1 のように示すことが できる。

2.2 耐荷機構の支配的要因

(1)曲げ破壊先行型

鉄筋腐食を生じた R C 梁部材の破壊モードは, 主鉄筋の軸方向における腐食の不均一性(分岐1) の度合いを表す指標として、偏差率を導入した。

主鉄筋の腐食性状が均一な状態(偏差率 0.9 以 下)では、せん断補強筋の有無により分岐が生じ る (分岐2)。



まず, せん断補強筋を有する場合, せん断補強 筋の腐食領域が腐食によって消失せずに連続性を 有していると(分岐3),拘束効果によって曲げ破 壊が生じる (図 1.1 耐荷機構①)。せん断補強筋 の腐食領域が腐食によって消失して連続性を有し ていないと、その拘束効果がなくなりせん断補強 筋を有しない場合と同様の破壊性状を示すことと なる。すなわち、せん断補強筋を有しない或いは せん断補強筋の定着領域の腐食性状が不連続な場 合, 定着領域まで荷重が伝達され, 梁の耐荷機構 はアーチ機構に移行することとなる。この際、定 着性能(分岐4)によって破壊形態が異なり、コ ンクリートと鉄筋の定着が完全な状態では完全な アーチ耐荷機構が形成されることに対して、定着 が不完全な状態では不完全なアーチ機構となる。 前者においては、鉄筋が降伏しなければせん断圧 縮破壊となり、鉄筋降伏が生じれば曲げ破壊とな る (図1.1 耐荷機構③)。この際の耐力は、アー チの形成により曲げ理論よりも大きくなり、その 値は a/d(せん断スパン比)に依存する。また,既 往の研究の実験結果から a/d が 4.0 よりも小さけれ ば(分岐5)梁上縁の曲げ引張破壊が生じる(図 1.1 耐荷機構②)。後者では、不完全なアーチ機構 が生じ、またコンクリートと鉄筋の定着劣化の程 度に応じた付着割裂を生じる(図1.1 耐荷機構④)。

鉄筋の平均腐食率が 10%以上で定着の荷重伝達 がある場合は,定着性能(分岐4)および a/d の大 小(基準:4)(分岐5)により耐荷機構が決まる。 また,せん断補強筋を有している試験体で試験体 全体の平均腐食率 10%を規準として,それ以下の 場合,定着の荷重伝達(分岐6)がなく斜め引張 破壊を生じる(図1.1 耐荷機構⑤)。

一方,主鉄筋の腐食性状が不均一な状態(偏差率0.9以上)では,設計時の曲げ耐力とせん断耐力の大小の関係により分岐が生じる(分岐6)。設計時の曲げ耐力がせん断耐力に比べて小さい場合(曲げ破壊先行型のRC梁部材),せん断補強筋の有無や腐食率によらず,腐食が過度に生じた箇所(偏差率が0.9以上となる箇所)において変形が局所化し曲げ破壊が生じる(図1.1 耐荷機構⑥)。仮に,偏差率が0.9以上となる箇所が多く存在すると,等曲げ区間或いはその近傍において偏差率が最も大きい箇所で破壊が支配されることとなる。逆に,主鉄筋の不均一な腐食により設計時の曲げ

耐力がせん断耐力に比べて大きくなるような試験 体は既往の研究の実験結果は存在しない。

破壊形態が曲げに関しては、鉄筋軸方向におい

て最も腐食が進んだ箇所における腐食率を用いた 曲げ理論により算出可能である。一方, せん断破 壊に関しては, 二羽式に基づいて算出した値を一 つの指標として適用して算出可能である。

(2) せん断破壊先行型

設計時にせん断破壊先行型のRC梁部材では, せん断補強筋を有し腐食率が小さい状態と大きい 状態ならびにせん断補強筋が無い場合で分岐が生 じる(分岐8,9)。前者では,せん断区間の付着 劣化が抑制されることにより,設計時と同じ斜め 引張破壊を生じる(図 1.1 耐荷機構⑦)。後者で は,アーチ耐荷機構が形成されることとなり,鉄 筋とコンクリートの定着性能(分岐10)が完全 であれば完全なアーチ機構が生じる。また鉄筋降 伏が生じなければせん断圧縮破壊が生じる。また, 腐食が局所的に生じている箇所での曲げ破壊(図 1.1 耐荷機構®)となり,定着性能が不完全であ れば不完全なアーチ機構が生じる。また,コンク リートと鉄筋の定着劣化の程度に応じた付着割裂 破壊が生じる(図 1.1 耐荷機構®)。

2.3 耐荷力の支配的要因と予測式

(1) 腐食の不均一性

腐食の不均一性は式(1)に示す偏差率を指標と して評価する。

$$k = (\alpha - \alpha a v g) / \alpha a v g \tag{1}$$

ここで,

- k: 偏差率
- α:主鉄筋の局所的な 平均腐食率
- α avg:等曲げ区間の平均腐 食率
- (2) 曲げ破壊

曲げ破壊となる耐荷機構①,③,⑥,⑧では, 設計曲げ耐力式を用い式(2)より算出する。

$$Mud = T \times z$$

$$T = As \cdot f yd$$
(2)

Mud:設計曲げ耐力,T:引張主鉄筋の引張力,z: アーム長, As:腐食時の引張鉄筋の断面積

(3)斜め引張破壊

斜め引張破壊となる耐荷機構⑤,⑦については コンクリート標準示方書の設計せん断耐力式¹⁾よ り式(3)を用い求める。

$$Vdd = \beta d \cdot \beta n \cdot \beta p \cdot fdd \cdot bw \cdot d \cdot \gamma b$$
(3)

(4) 完全アーチおよび不完全アーチ

a)完全アーチ耐力に及ぼすせん断スパン比の影響

図 2.1 は,支点間の付着の有無による耐力の増加 割合(耐力比)と a/d の関係を示したものである。 ここで,耐力比とは非腐食試験体で支点間の付着 を除去した際の耐荷力(Varch)を同一条件で付着 を有する耐荷力(Vc)で無次元化した値である。同 図に示すように完全アーチ試験体の耐力は, a/d と 良好な線形関係にあり, a/d が小さい程耐力増加が 大きいことが分かる。同図よりアーチ耐力比と a/d の関係を線形近似すると以下の関係が得られる。

$$Varch/Vc = -0.5492(a/d) + 3.2838$$
(4)

b)アーチ耐力に及ぼす鉄筋腐食の影響

図2.2は、せん断圧縮破壊を生じた試験体の耐力 比と主鉄筋の平均腐食率の関係を示したものであ る。ここで、耐力比とはアーチ耐荷機構を生ずる 鉄筋腐食した試験体の耐荷力(Varchc)を上述の Varchで無次元化したものであり、鉄筋腐食による 耐力の増加或いは低下率に相当する。

図 2.2 より主鉄筋の腐食率と耐力比の関係式は 次式のようになる。

$$Varchc/Varch = -0.0094\alpha + 1$$
(5)

ここで, *α*: 主鉄筋の平均腐食率である。 **c)**せん断圧縮破壊時の耐力と定着性能

図 2.3 は単位せん断応力あたりの定着性能(τ archor/τu)とアーチ角度(θ)との関係を示したも のである。ここで、τ archor は定着領域における 平均付着応力の最大値、τu は終局時のせん断耐力 を有効面積で除した値であり、単位せん断応力あ たりとすることで部材の断面寸法を考慮した。図 2.3 より単位せん断応力あたりの定着性能はアーチ 角度の増加に伴って線形的に低下している。この ことはアーチ角度が大きいほどアーチ耐力を保持 するために必要な定着性能が小さいということを 示している。図2.3 より定着性能とアーチ角度の 関係は次式のように示される。

| τ archcor/ τ <i>u</i> = -4.8055tan θ + 3.4399 | (6) |
|--|-----|
| $\tan \theta = 1/(1.4112(a/d) - 0.7054)$ | (7) |

d)完全定着状態を基準としたせん断耐力と定着性 能の関係

図 2.4 は、アーチ機構の耐力比と定着性能の関

係を示したものである。ここで,耐力比とは不完 全アーチ時の耐力を完全アーチ機構時の耐力で除 したものである。同図に示すように,定着性能と 耐力比は鉄筋腐食のみならず,断面諸元や載荷条 件によらず線形関係を示していることがわかる。 すなわち,定着が不十分な状態であっても定着性 能が既知であれば,せん断耐力をある程度定量的 に評価することが可能である。図 2.4 よりアーチ 耐力と定着性能の関係を線形近似すると以下のよ うな関係が得られる。

 $Varchd/Varchc = 0.6006(\tau \ archd/\tau \ archc) + 0.4195$ (8)

ここで、Varchd:不完全アーチ機構時の耐力、Varchc: 完全アーチ機構時の耐力、 τ archc:完全アーチ機構時の定 着性能(定着領域の最大平均付着応力)、 τ archd:定着 性能(実験値)である。

定着破壊が生じる前に鉄筋が降伏する場合には 曲げ耐力式を適用することになる。すなわち, Varchc に比べて Vbend が小さい場合は,アーチ耐 荷機構の形成に伴うせん断耐力の最大値は曲げ田 力を有するせん断力(Vbend)とする。

式(4)~(8)より完全アーチ,不完全アーチ耐荷 機構の耐力を算出することができる。





3. 耐荷機構と耐荷力の評価モデル

耐荷機構と耐荷力の評価モデルを破壊形態ごと に図 3.1 にまとめる。

入力値は、「せん断補強筋の有無」、「定着筋の有 無」、「鉄筋径D」、「鉄筋の本数」、「h:高さ」、「c: かぶり」、「a:支持部前面からの載荷点までの距 離」、「b:腹部の幅」、「α:主鉄筋の局所的な平 均腐食率」、「α avg:主鉄筋全長の平均腐食率」、「f yd:降伏強度」、「公称断面積」、「せん断補強筋の 定着領域における腐食の連続・不連続」であり、 鉄筋腐食を生じたRC梁部材の残存耐荷機構と耐 荷力の予測値を出力とするシステム構築すること とする。

3.1 曲げ耐荷機構

すべての試験体における(実験値/予測値)の平 均値は0.94であり,標準偏差0.08である。本手法 は実験値と比較的精度評価していると言える。

3.2 斜め引張破壊

すべての試験体における(実験値/予測値)の 平均値は1.10であり,標準偏差は0.13である。本 手法は実験値と比較的精度良く評価していると言 える。

3.3 完全アーチ不完全アーチ

せん断圧縮破壊機構の試験体における(実験値/ 予測値)の平均値は1.02であり,標準偏差は0.21 である。正規分布に従うと仮定すると,曲げ破壊, 斜め引張破壊の試験体に比べ標準偏差σの値が約 1.6~3倍あることから若干のばらつきがあり,今 後より精度を向上させる必要がある。

付着割裂破壊の試験体における(実験値/予測値) 平均値は 1.05 であり,標準偏差 0.17 である。 せん断圧縮破壊の耐力を算出する式を用いたこと によりせん断圧縮破壊の耐力と同様に若干のばら つきがあると考えられる。

3.4 定着上縁・梁上縁曲げ引張

定着上縁破壊については不完全アーチ・付着割 裂の試験体の耐力を算出するための耐力式を用い たが、定着上縁破壊の耐力を算定するための耐力 式はまだ正しく評価されていないため正しく評価 できないのが現状である。

4. 結論

本研究では既往の実験結果より耐荷機構と耐荷 力評価モデルを作成し,鉄筋腐食を生じたRC梁 部材の残存耐荷機構・耐荷力の支配的要因を考慮 し,鉄筋腐食を生じたRC梁部材の耐荷機構のフ ローチャートと耐力式を予測評価できるシステム を構築できた。

しかし,実験結果と異なる破壊形態になるもの があった。それは,斜め引張,完全アーチ,不完全ア ーチらの耐荷機構であり,今後の課題として支配 的要因に関しては単に腐食率の大小関係だけでな く腐食ひび割れを考慮しなければならないと考え られる。

参考文献

(1) 土木学会:コンクリート標準示方書[構造性能 照査編], 2002