

[148] 2 スパン連続はりの曲げ破壊性状

正会員 ○酒井 康 宏 (岐阜大学大学院)

正会員 岩瀬 裕 之 (岐阜大学工学部)

正会員 六郷 恵 哲 (岐阜大学工学部)

正会員 小柳 洽 (岐阜大学工学部)

1. まえがき

従来、鉄筋コンクリート(以下RCと略す)不静定構造の終局段階の検討の上で非弾性構造解析を行うために塑性ヒンジの回転能やモーメント再分配の機構に関する研究が行われてきたが、RC不静定構造の最も簡単な連続はりに対してさえも破壊時のエネルギー吸収能や変形能といった破壊性状に関する研究はほとんどみられない。

本研究はRC連続はりの曲げ破壊過程にもつづいたエネルギー吸収能の算定方法を確立することを目的としている。簡単な例として2スパン連続はりを取りあげ、耐力と塑性回転能とが異なるはり断面を組み合わせた4種類の連続はりの載荷実験を行った。単純はりの載荷実験から得られた荷重変位($P-\delta$)関係あるいはモーメント曲率($M-\phi$)関係を用いて、連続はりの最大耐力点以後の領域をも含めた荷重変位関係を算定し実験結果と比較検討した。さらに、荷重変位関係をもとに連続はりのエネルギー吸収能について検討した。

2. RCはりの破壊性状

曲げを受けるRCはり断面のモーメント曲率($M-\phi$)関係(あるいは荷重変位関係)は、図-1に示すように、一般に曲げひびわれ発生点、引張鉄筋の降伏開始点、最大耐力点、引張鉄筋の降伏終了点あるいは破断点などによって特徴づけられる。

従来、RCはり断面の塑性回転能やエネルギー吸収能といった靱性に関する検討は最大耐力点までを対象としたものが多い。しかしながら、RC構造物のエネルギー吸収能を検討する場合には、部材要素の最大耐力点以後の破壊性状をも考慮する必要がある。

図-1に示すモーメント曲率関係(荷重変位関係の場合も同様)において、降伏開始点以前には、例えばモーメント M_1 に対応する曲率は ϕ_{1e} であり、これはほぼ弾性変形と考えられる。最大耐力点以後には、はりの破壊域の断面においては破壊が進行し、モーメント M_1 に対応する曲率は、弾性変形に起因する曲率 ϕ_{1e} と塑性変形に起因する曲率 ϕ_{1p} との和で表わされる。すなわち、RCはり断面の曲率は、破壊が進行している領域の断面では弾性成分と塑性成分との和で与えられ、破壊が進展していない領域の断面では弾性成分のみで与えられる。したがって破壊が集中する破壊域の大きさとその破壊域におけるモーメント曲率($M-\phi$)関係とが既知であれば、構造物全体の荷重変位($P-\delta$)関係を、断面の $M-\phi$ 関係をもとに算定することが可能となる。

3. 実験概要

(a)供試体

表-1に示すように、断面の組合せが異なる合計4種類8個の連続はり供試体について載荷実験を行った。連続はり供試体の形状寸法ならびに配筋を図-2に示す。中央支点を2点とする2スパン連続はりであり、はり断面は $10 \times 18 \text{ cm}$ 、有効高さは $15.2 \sim 15.5 \text{ cm}$ 、全長は 300 cm である。塑性ヒンジが形成される中央ならびに両側のモーメントスパンを 25 cm とし、せん断スパンを 50 cm とした。連続はりCB1616、CB1610、CB1016は、モーメントスパンを塑性回転能が比較的小さい単鉄筋断面とし、引張鉄筋比 P を表-1に示すように 0.9% (2D10)または 2.6% (2D16)とした。一方、連続はりCW13は複鉄筋断面とし、引張鉄筋比 P ならびに圧縮鉄筋比 P' を 1.6% (2D13)とした。せん断スパンには、せん断破壊が生じないようにスターラップを配筋した。

引張鉄筋比が 0.9% と 2.6% の単鉄筋断面の単純はりSB10、SB16と、引張および圧縮鉄筋比が 1.6%

の複鉄筋断面の単純はりSW13の合計3種類6個の単純はりについても載荷実験を行った。連続はりの場合と同じく、単純はりの断面は $10 \times 18 \text{ cm}$ 、モーメントスパンは 25 cm 、せん断スパンは 50 cm とし、全長は 170 cm である。

各はりに使用したコンクリートの圧縮強度を表-1に示す。使用した異形鉄筋D10、D13、D16の降伏強度はそれぞれ 3710 、 3600 、 4180 kgf/cm^2 であった。

(b) 試験方法

連続はりでは、中央ならびに両側のモーメントスパン内にせん断力がほとんど生じないように、左右対称に載荷するとともに、図-3に示すように左右の載荷位置において、内側の荷重と外側の荷重との比を $2:1$ とした。各供試体とも数回の漸増繰返し載荷を行い、図-3に示すように各載荷点における変位と全体の荷重との関係をX-Yレコーダに記録した。漸増繰返し載荷の除荷開始時ならびに除荷終了時に、図-3に示すようにはり側面に貼付した標点プラグ間の変形量をノギスで測定し、曲率分布を測定した。せん断スパンにおけるせん断変形は曲げ変形に比べ無視しうるほどわずかであった。

単純はりについても連続はりと同様に荷重と載荷点位置における変位との関係ならびに曲率分布を測定した。

4. 連続はりの破壊性状

(a) 荷重変位曲線の形状と耐力

4種類の連続はりならびに3種類の単純はりの荷重変位曲線をそれぞれ図-4.5に実線で示す。同一条件で試験した2個の供試体の荷重変位曲線はほぼ等しくなったため、図-4.5においては1個ずつの供試体の荷重変位曲線を示した。連続はりの左または右の2点ずつの載荷点の変位はほぼ同一となった。

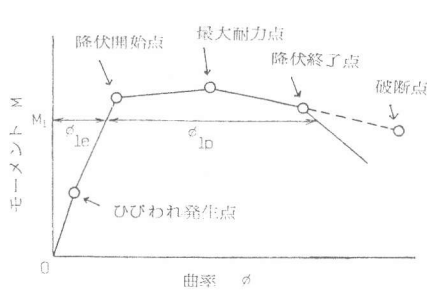


図-1 RCはりの破壊過程

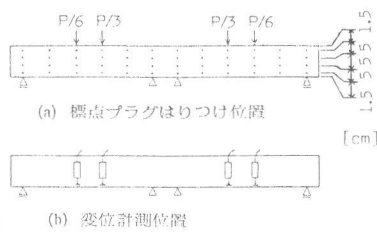


図-3 はりの変位と曲率の計測

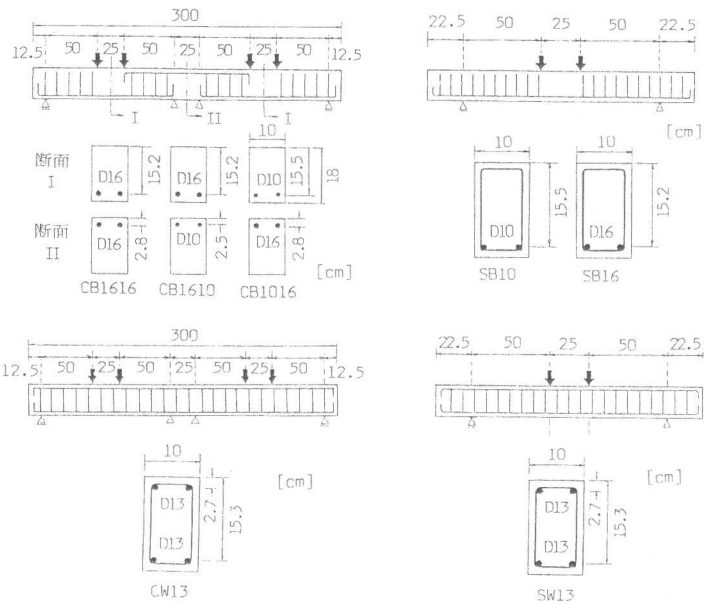


図-2 RCはりの配筋とスパン

表-1 試験条件と試験結果

はりの種類	モーメントスパンの鉄筋比と鉄筋位置								コンクリートの強度 σ_c (kgf/cm^2)	降伏荷重		
	中央				両側					実測 P_{ym} (tonF)	計算 P_{yc} (tonF)	比 $\frac{P_{yc}}{P_{ym}}$
	p (%)	d (cm)	p' (%)	d' (cm)	p (%)	d (cm)	p' (%)	d' (cm)				
連続はり	2.6	15.2	0	—	2.6	15.2	0	—	380	25.1	25.8	1.03
CB1616	2.6	15.2	0	—	2.6	15.2	0	—	380	20.0	20.7	1.04
CB1610	2.6	15.2	0	—	0.9	15.5	0	—	380	15.5	15.6	1.01
CB1016	1.6	15.3	1.6	2.7	1.6	15.3	1.6	2.7	370	20.0*	19.0*	0.95
単純はり	0.9	15.5	0	—	—	—	—	—	380	3.5	8.6	—
SB10	2.6	15.2	0	—	—	—	—	—	380	8.6	—	—
SB16	1.6	15.3	1.6	2.7	—	—	—	—	370	12.8*	—	—
SW13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* 変位が 40 mm のときの値

複鉄筋断面の連続はりCW13では、引張鉄筋が降伏した後、荷重が少しずつ増加しながら両側の荷点の変位がともに増大し100mmとなった。なお、大変形となったため変位が100mmとなったところで荷重を中止した。しかし、単鉄筋断面の3種類の連続はりCB1616、CB1610、CB1016では、鉄筋が降伏した後、いずれも変位が約10mmとなったところで荷重の低下が生じた。これは、引張鉄筋比が2.6%の断面の抵抗曲げモーメントがこの時点で低下しはじめたためと考えられる。単鉄筋断面の連続はりCB1616、CB1610では、両側の荷点のうちの一方向の変位のみが増大し他方の変位は減少する現象がみられたが、これは、降伏後の耐力の増加が小さくかつ高荷重レベルでの変形能が小さいためと考えられる。

連続はりと単純はりの降伏荷重 P_{ym} を表-1に示す。単純はりの降伏荷重をもとに、いわゆる極限解析法により、連続はりの降伏荷重 P_{yc} を計算し表-1に示す。連続はりの降伏荷重は実測値 P_{ym} と計算値 P_{yc} がよく一致した。

はり軸方向の曲率分布の計測例として、連続はりCB1016ならびに単純はりSB16の最終的な曲率分布を図-6に示す。図-6より、曲率はモーメントスパンに集中することがわかる。

(b)連続はりの荷重変位曲線の算定

まず、単純はりのモーメントスパンで実測したモーメント曲率($M-\phi$)関係をもとに連続はりの荷重変位曲線を算定する。連続はりの曲率の分布は、図-7(a)に示すように、弾性成分と塑性成分とで表わされる。ここで両側のモーメントスパン内ならびに中央のモーメントスパン内においては曲率分布は一定であり、塑性成分は図-7(a)に示すようにモーメントスパンに集中するものと考え、中央スパンと両側のスパンにおける曲率のうち、塑性成分 ϕ_{cp} 、 ϕ_{sp} は計算上互いに等しく、弾性成分 ϕ_{ce} 、 $\phi_{se}(=0.91\phi_{ce})$ も計算上ほぼ等しくなる。図-8に示す3種類の単純はりのモーメントスパン(25cm)内で測定したモーメント曲率($M-\phi$)関係をもとに連続はりの各モーメントスパンの曲率が ϕ のときの全荷重 $P(\phi)$ と荷点の変位 $\delta(\phi)$ とを計算し、連続はりの $P(\phi)-\delta(\phi)$ 関係を図-4に一点鎖線で示す。なお単鉄筋断面の連続はりの内側のせん断スパンには圧縮鉄筋が存在し単純はりのせん断スパンの配筋と異なるが、この圧縮鉄筋の影響は無視した。

次に、図-5に示す3種類の単純はりの実測した荷重変位曲線をもとに、連続はりの荷重変位曲線を算定する。

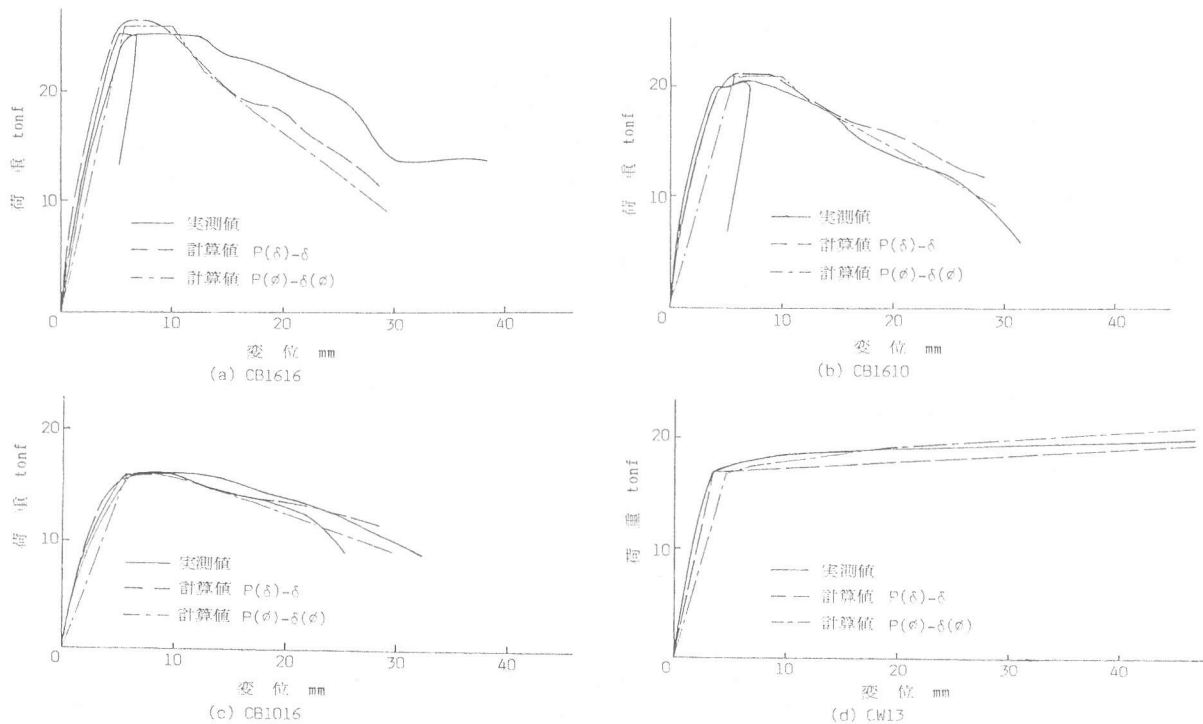


図-4 連続はりの荷重変位曲線

本実験で用いた連続はりの曲率分布は、図-7(a)に破線で示すように分解できる。したがって、図-7(b)に示すように、3個の単純はりの変位 δ に対応する荷重の和として、連続はりの変位が δ のときの荷重が簡単に求められる。すなわち、連続はりの荷重点変位が δ のときの全荷重 $P(\delta) (= 2P_S(\delta) + P_C(\delta))$ を求め、連続はりの $P(\delta) - \delta$ 曲線を図-4に破線で示す。

図-8に示す単純はりの $M - \phi$ 関係においては降伏点と原点とを直線で結んでいるため、単純はりの $M - \phi$ 関係にもとづく連続はりの $P(\delta) - \delta$ 曲線(図-4中一点鎖線)は、降伏開始点までの領域で実測値と多少差がみられる。しかしながら、単純はりの $M - \phi$ 関係をもとにした連続はりの $P(\delta) - \delta$ 曲線も、 $P - \delta$ 関係をもとにした連続はりの $P(\delta) - \delta$ 曲線も、実測の連続はりの荷重変位曲線と最大耐力点以後もよく一致した。

$P - \delta$ 関係や $M - \phi$ 関係で表わされる単純はりの破壊性状をもとに、不静定構造である連続はりの最大耐力点以後の領域をも含む荷重変位関係を容易に算定することができるため、連続はりのエネルギー吸収能や変形能の評価を荷重変位関係をもとに行うことが可能となる。

(c) 連続はりのエネルギー吸収能

図-4に示す連続はりの荷重変位曲線の実測値ならびに算定値からわかるように、連続はりのエネルギー吸収能は、形成される塑性ヒンジにおけるエネルギー吸収能の和として求められる。ただし、耐力が低下しない領域でのエネルギー吸収能は、塑性回転能の小さいヒンジの挙動に支配される。連続はりのエネルギー吸収能の算定にあたっては、せん断破壊や引張鉄筋の破断による破壊などに対する検討が必要である。さらに、連続はりCB1616、CB1610においては片側のスパンでのみ塑性破壊が進行したが、こうした破壊様式についての検討も必要と考えられる。

5. まとめ

本研究においては、不静定RC構造の例として2スパン連続はりを取りあげ、荷重変位曲線をもとに、破壊性状について検討し、次の結果を得た。

(1) 単純はりの荷重変位関係あるいはモーメント曲率関係をもとに、連続はりの荷重変位曲線を最大耐力点以後の領域をも含めて算定することができた。これらの方法で算定した連続はりの荷重変位曲線は実験で得られた荷重変位曲線とよく一致した。

(2) 連続はりのエネルギー吸収能は、形成される各塑性ヒンジのエネルギー吸収能の和として与えられる。ただし、耐力が低下しない領域でのエネルギー吸収能は、塑性回転能の小さいヒンジの挙動に支配される。

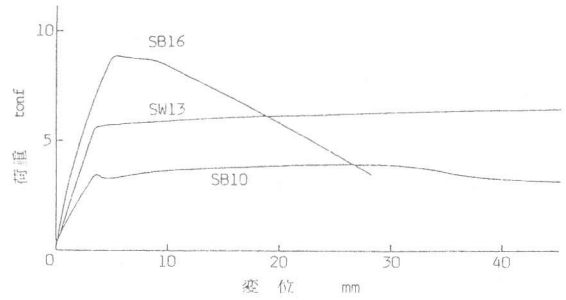


図-5 単純はりの荷重変位曲線

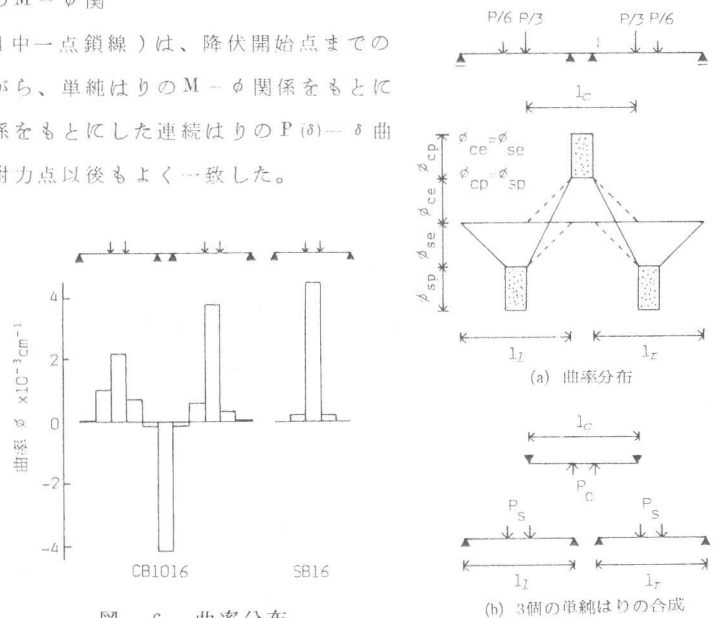


図-6 曲率分布

図-7 曲率分布とはりの合成

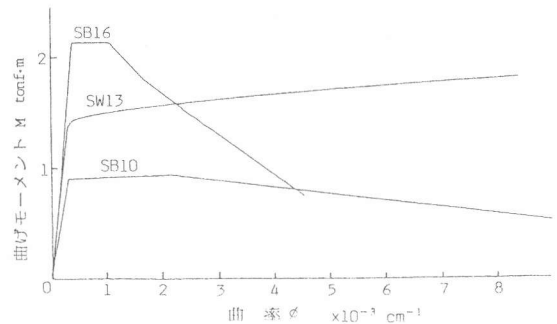


図-8 単純はりのモーメント曲率曲線