

論文 スプライス PC 構造の継手構造に関する研究

今村 晃久*1・松岡 篤*2・天野 明子*3・角田 典史雄*4

要旨:「スプライス PC 構造」は工場製プレキャスト桁と場所打ち部材をポストテンション鋼材で一体化を図った構造である。その接合部にループ継手を採用するため、ループ継手に関する定量的検証が必要と考え、継手性状に着目した実験と非線形解析を行い、重ね継手とループ継手の性状の差と、打継目を跨ぐループ形状鉄筋の有効性を検証した。

キーワード: スプライス PC 構造, ループ継手, 打継目, 重ね継手

1. はじめに

「スプライス PC 構造」は PRC での使用も念頭に置いているため、接合部である打継目の補強方法に関する検証が重要な課題であり、設計的な観点からの検証¹⁾と、模型供試体による実験的検証²⁾を行った。その結果、本構造の妥当性と安全性を確認することが出来たが、プレキャスト部材からの突出鉄筋長の短縮を目的として検討に加えたループ継手に関して、次のような結果が得られた。

- ① ループ継手部鉄筋歪み値が重ね継手に比べて小さく、継手部にひび割れが発生しない。
- ② プレキャスト側の鉄筋歪み上昇が大きく、供試体によっては附着すべりが発生した。
- ③ 荷重増加に伴う打継目のひび割れ成長が速く、ひび割れ幅も重ね継手の供試体に比べて大きい。

上記の結果から、単純に重ね継手をループ継手に置き換えることは出来ないと考え、打継目における配筋のみをパラメータとする実験を行うこととした。

2. 実験概要

2.1 実験目的

本実験では継手性状だけをパラメータとなる

よう供試体を設計し、静的載荷実験を行った。

本実験の主な目的は、継手種類の違いによる初期ひび割れ発生荷重、終局耐力および、ひび割れ幅の比較である。また、先述の①に示したループ継手の特徴を図-1に示すようなループ効果によるものと仮定し、この効果が通常断面に比べて初期ひび割れの発生が早い打継目部のひび割れ発生抑制に有効ではないかと考え、補強目的で、打継目に跨るように配置したループ鉄筋(以降、このような配筋を便宜上アンクラック継手と呼称する)の検討も加えることとした。

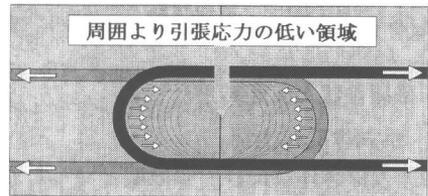


図-1 ループ効果概念図

2.2 供試体概要と載荷方法

供試体は継手種類が異なる 5 体を用意した。供試体名は、重ね継手を用いたものが K-1、ループ継手が R-1、アンクラック継手に関しては、ループの長さが 150mm, 200mm, 300mm のものを各々 U-1, U-2, U-3 とした。

*1 ドーピー建設工業(株) 本社設計部設計課長 (正会員)

*2 ドーピー建設工業(株) 本社設計部設計課

*3 ドーピー建設工業(株) 本社設計部設計課

*4 北海道大学大学院工学研究科 工博 (正会員)

後打部の材令差は2日間として、中央で打継目を設けた。打継目は型枠に硬化遅延材を塗布し、脱型後に洗い出し処理を行った。供試体の形状と鋼材配置を図-2に示す。供試体諸元を表-1に、使用材料の諸元を表-2～表-3に示す。

試験は、荷重載荷位置を打継目で想定する破壊が起こるように定めた単純梁の二点静的載荷試験とし、ひび割れ発生後と鉄筋降伏確認後の2回除荷を行い、その後破壊に至るまで単調載荷した。供試体には、両載荷点と打継目に変位計を、等曲げモーメント区間の引張鉄筋位置2段に歪みゲージ(50mm間隔)とひび割れ幅計測のため、コンタクトゲージ(100mm間隔)を設けた。載荷状態を図-3に示す。

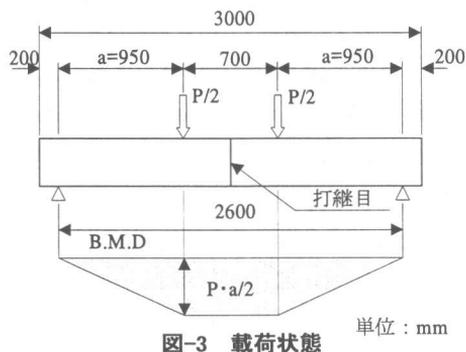


図-3 載荷状態

3. 破壊性状と実験結果

3.1 供試体破壊性状

全ての供試体は曲げ引張破壊となった。目視では各供試体共に約 30kN で打継目にひび割れが発生した。K-1(重ね継手), R-1(ループ継手)では打継目のひび割れ成長が早く、ひび割れ幅も他のひび割れに比べて大きなものであり、打継目の引張り鉄筋が降伏した後、破壊に至った。ただ、K-1では継手部にひび割れが載荷初期に発生したのに対して、R-1では載荷試験終盤までループ継手区間のひび割れの発生は無かった。U-1～U-3(アンクラック継手)では継目部ひび割れの成長は遅く、継手部左右のひび割れが急速に成長し、その位置での鉄筋が降伏後破壊した。継手部左右のひび割れについては、U-2, U-3

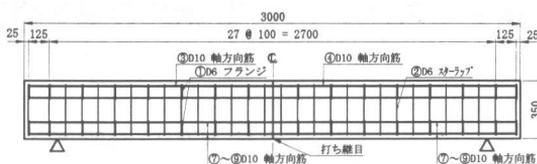


図-2a 側面図

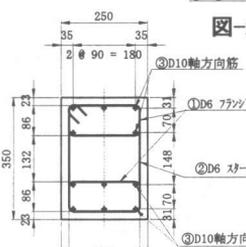


図-2b 断面図

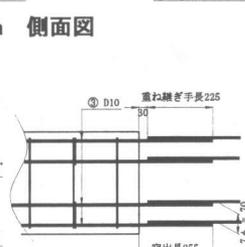


図-2c 重ね継手(K-1)

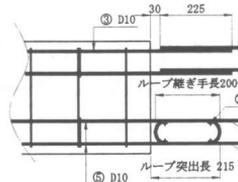


図-2d ループ継手(R-1)

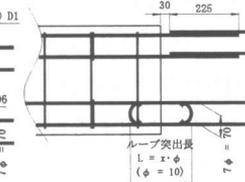


図-2e アンクラック継手(U-1～U-3)

単位: mm

図-2 供試体形状と鋼材配置

表-1 供試体諸元

NO.	記号	打継目	断面形状	強度 (N/mm ²)	鉄筋継手種類	備考
1	K-1	有	矩形	40	重ね継手	継手長: 225mm
2	R-1	有	矩形	40	ループ継手	継手長: 200mm
3	U-1	有	矩形	40	アンクラック継手	ループ長: 150mm
4	U-2	有	矩形	40	アンクラック継手	ループ長: 200mm
5	U-3	有	矩形	40	アンクラック継手	ループ長: 300mm

表-2 鋼材の機械的性質

鋼材の種類	断面積 (mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	伸び (%)
SD295A D6	31.67	375	516	210	27
SD295A D10	71.33	371	511	210	27

表-3 コンクリートの力学的性質

供試体	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
K-1	15	42.2	2.79	31.7
	13	37.7	2.59	30.3
R-1	21	43.9	2.86	32.2
	19	41.8	2.77	31.6
U-1	23	43.4	2.84	32.0
	21	39.5	2.67	30.8
U-2	19	38.1	2.60	30.4
	17	34.8	2.45	29.4
U-3	13	38.9	2.64	30.7
	11	37.0	2.55	30.1

* 引張強度と弾性係数は圧縮強度を基に算出した計算値³⁾

に比べて、U-1 のものが特にひび割れ幅が大きく、ひび割れの数も少なかった。

3.2 実験結果

(a) ひび割れ発生荷重と耐力について

ひび割れ発生荷重と耐力について、計算値³⁾と実験値の比較を表-4 に示す。耐力に関しては、継手種類による差異は無く、計算値に対して 25%~31%程度高い結果となった。ひび割れ発生荷重については、アンクラック継手を用いた供試体が従来継手である K-1, R-1 よりも 20% (5kN) 程度高い値となり、本継手構造が継目部補強に対して有効であることが確認出来た。

(b) ひび割れ幅について

図-4 に示すように、U-1~U-3 では、打継目部の鉄筋降伏が起きないため、K-1 や R-1 のような降伏後のひび割れ幅増大が無く、載荷初期における成長も鈍いという結果となった。

(c) 鉄筋歪み分布について

下縁引張鉄筋の歪み分布を、図-5 に K-1、図-6 に R-1、そしてアンクラック継手を用いた供試体内 U-3 を図-7 に示す。K-1 供試体では打継目の左右でほぼ対称な歪み分布となっており、打継目部で歪みが卓越した形となっているのに対して、R-1 ではループ継手部の歪みが小さく、載荷荷重が 80kN を超えた辺りで、その両外の歪みが非常に大きな値となっている。ひび割れ幅としては顕著な差が表れなかったが、歪み分布ではループ効果の影響を確認することが出来た。アンクラック継手の場合、打継目の歪みピークがループコア内にあることから、3 箇所歪みが分散し、重ね継手やループ継手に比べて、小さなひび割れ幅になったと考えることが出来る。

4. 解析を用いた考察

ひび割れ発生荷重とひび割れ幅に関して、従来継手とアンクラック継手では明らかな違いが確認出来た。その要因として下記の 2 点を考え、各々について解析を用いた検討を行った。

- ① 供試体相互の鉄筋換算剛性の違い
- ② 図-1 に示したループ効果による影響

表-4 計算値と実験値の比較

供試体	ひび割れ発生 (kN)		耐力 (kN)	
	計算値	実験値	計算値	実験値
K-1	31.0	25.5	81.2	105.8
R-1	31.0	24.5	81.2	104.4
U-1	31.0	30.4	81.2	102.5
U-2	31.0	29.4	81.2	106.1
U-3	31.0	29.4	81.2	102.2

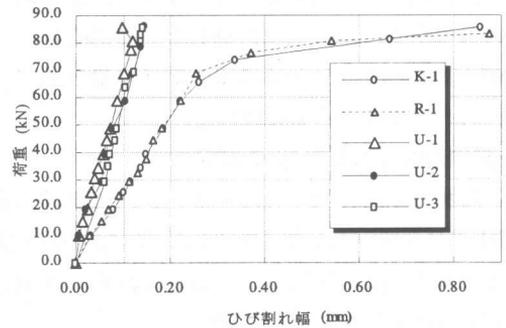


図-4 継目部における荷重-ひび割れ幅

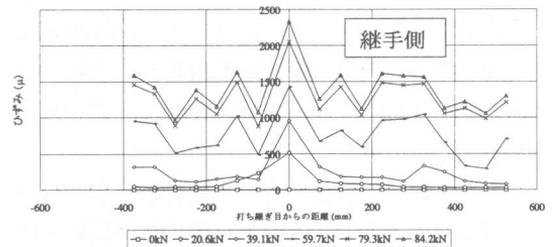


図-5 鉄筋歪み分布 K-1 (重ね継手)

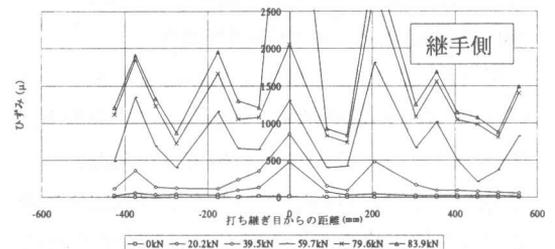


図-6 鉄筋歪み分布 R-1 (ループ継手)

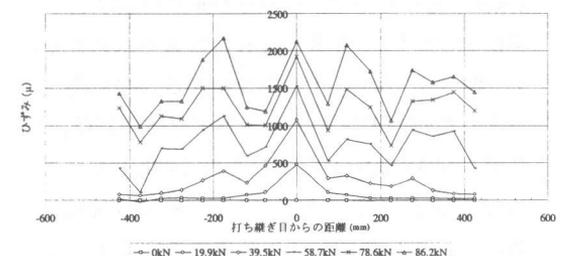


図-7 鉄筋歪み分布 U-3 (アンクラック継手)

4.1 鉄筋換算剛性の影響について

(a) 解析モデル

鉄筋換算剛性の影響を確認するため、FEPAS⁴⁾ Ver.1.2 により、図-8 に示すファイバーモデルを使用した弾塑性解析を行った。本モデルでは配置鉄筋のループ形状は評価出来ないため、ループ鉄筋についても重ね継手と同様に、継手区間の鉄筋量を2倍として評価した。図にはU-3の例を表示したが、各供試体の継手位置と継手長に合わせてモデルを作成した。

(b) 構成則 (応力-歪み関係)

解析に用いたコンクリート、鉄筋の構成則を図-9 に示す。コンクリートは圧縮側について強度試験を、引張側について載荷試験時の初期ひび割れ発生荷重を用いて算出した。

(c) 解析結果(1) — 荷重-変位関係 —

U-3 の打継目における解析値と実験値の荷重-変位関係を図-10 に示す。最大耐荷力、荷重-変位関係に関して、実験値と解析値はほぼ一致した。尚、他の供試体についても同程度の一致を確認することが出来た。

ループ形状を評価しない本解析値が実験値と一致したことから、各継手を用いた供試体の載荷から破壊に至る挙動に関しては、二重鉄筋として評価することが出来ると考えられる。

(d) 解析結果(2) — ひび割れ発生 —

図-11、図-12 に本解析で求めたK-1とU-3モデルのM- ϕ 曲線を示す。これらから、実験と同様にU-3モデルが打継目で破壊に至らないことが分かる。次に打継目におけるひび割れ発生荷重の差を鉄筋換算剛性の面から説明するために、実験におけるK-1のひび割れ発生荷重がおよそ25kNであったので、その時の曲率を基準として、各供試体で同一曲率となる荷重値を求めたものを、表-5 に示す。その荷重値をひび割れ発生荷重とした時のK-1モデルと各供試体の差は、U-1モデルが1.46kN、U-2モデルが1.88kN、U-3モデルで2.92kNとなった。これは、鉄筋換算剛性の差によってひび割れ発生荷重に差が生じることを表していると考えることが出来る。

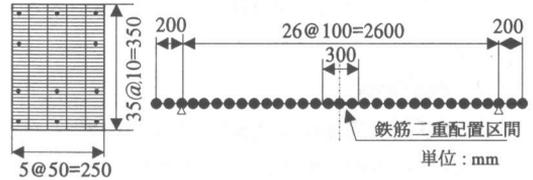


図-8 ファイバーモデル断面図(左) 平面骨組図(右)

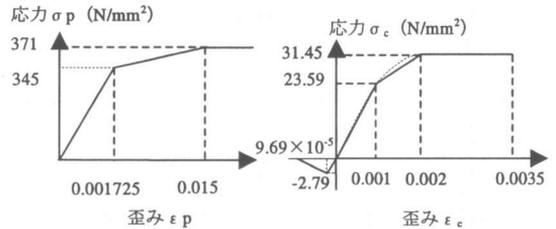


図-9 構成則(鉄筋(左), コンクリート(右))

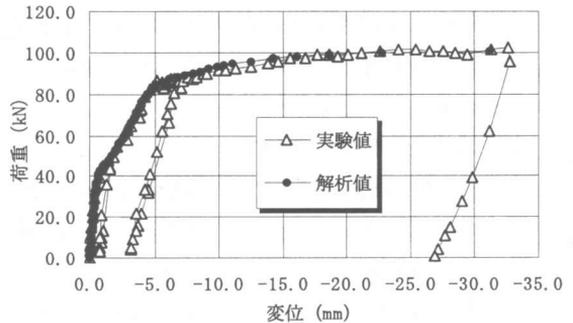


図-10 U-3 打継目位置における荷重-変位関係

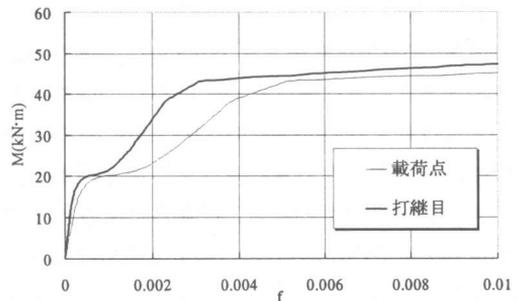


図-11 K-1 載荷点と中央のM- ϕ 曲線

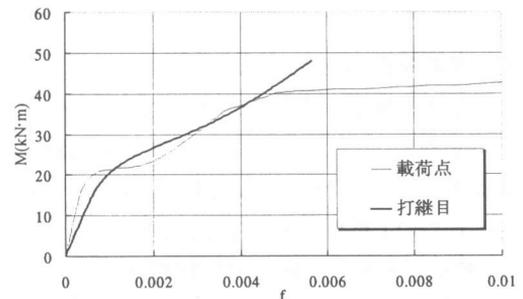


図-12 U-3 載荷点と中央のM- ϕ 曲線

表-5 計算ひび割れ荷重の比較

(kN)	ひび割れ発生荷重	K-1との差
K-1	25.00	-
R-1	25.00	0.00
U-1	26.46	1.46
U-2	26.88	1.88
U-3	27.92	2.92

図-1で想定したループ効果が無視した解析で、荷重-変位関係、耐荷力および、ひび割れ発生荷重の差が生じたことに関する実験値の妥当性を説明することが出来た。また、実験における鉄筋の歪み分布に関して、継手種類による差が顕著になるのは、載荷荷重が80kNを超えてからであることを考えると、先に想定したループ効果は局所的に影響する効果であり、ループ形状鉄筋の実用上の効果は、付着長を十分に取った二重配置鉄筋と同様の挙動を示すことにあると思われる。以上より構造的な弱点である打継目補強の手段として、打継目に跨る二重鉄筋効果が有効であることを確認することが出来たと考える。

4.2 ループ効果の影響について

ループ形状鉄筋の局部的挙動を把握するため、ADINA^{5),6)} Ver.7.3によるFEM非線形解析を行った。4.1の解析では、ループ長が長い方がその効果が大きかったが、先に想定したループ効果はループ長が短い方が、効果が大きくなると考えられるので、本解析ではU-1で用いた150mmのループ長に対して行うこととした。

(a) 解析モデルと付着構成則

ループ効果を定性的に確認するため、厚さ90mm(供試体の鉄筋間隔)の二次元要素を用いて、U-1のループ鉄筋部を局部的に取り出したモデル(図-13)と、通常通りの鉄筋を配置したモデル(図-14)の両端に引張荷重を増分法にて与えた。ループ形状部の鉄筋要素を折れ線配置としたため、荒い要素割では折れ角部に応力集中が起こるため、精度上の問題から非常に細かな要素割となったが、鉄筋要素を配置しない状態で荒い要素割のモデルと対比を行い、コンクリート構成則の適用等に関して、解析上の

問題が無いことを確認した。

鉄筋の付着構成則は式(1)⁷⁾を用いた付着-すべり関係(図-15)を近似的にバイリニアな曲線で与えた。

$$\tau = 0.9 f'_c{}^{2/3} \{1 - \exp(-40 \cdot s^{0.6})\} \quad (1)$$

ここに、 τ : 付着応力 (N/mm²)

f'_c : コンクリート強度 (N/mm²)

s : 基準すべり = 1000 · S/D

S : すべり

D : 鉄筋径

尚、ループ円曲部の節点については、法線方向をコンクリート要素と完全付着、接線方向に上記の付着特性を与えた。また、モデル端における鉄筋とコンクリートには、変位が一致するように完全付着条件を与えた。

(b) 解析結果

本解析ではループ鉄筋内での応力状態が問題となるので、図-13、14の●で示したループコア中心での応力度の変化を比較したものを

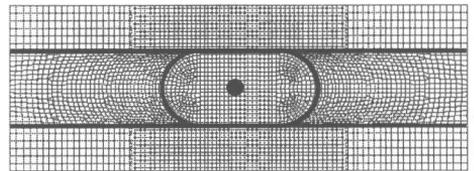


図-13 ループ鉄筋局部モデル (Type1)

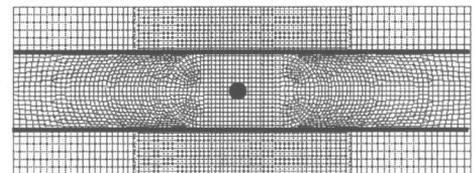


図-14 通常鉄筋局部モデル (Type2)

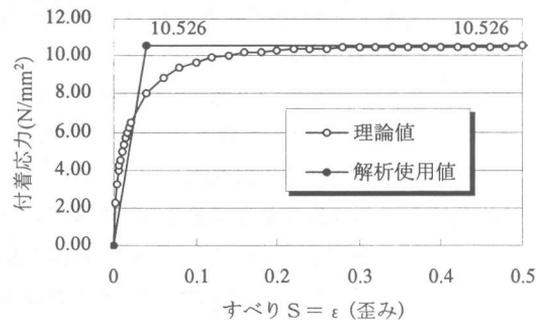


図-15 付着-すべり構成則

図-16 に示す。着目点の応力度がコンクリートの引張強度 2.69N/mm^2 に達した時の荷重値は、Type1 (ループ形状鉄筋) が 35.27kN 、Type2 (通常鉄筋) が 33.37kN となり、その差は 1.90kN であった。単純比較は出来ないと考えるが、この荷重差を本実験供試体に換算すると、作用曲げモーメントで $0.83\text{kN}\cdot\text{m}$ となり、載荷荷重としては 1.75kN となる。二重配置鉄筋としての検証では、二重鉄筋配置区間が短ければその影響は小さくなるが、本解析の効果でもひび割れ発生限界は若干高くなるものと考えられる。

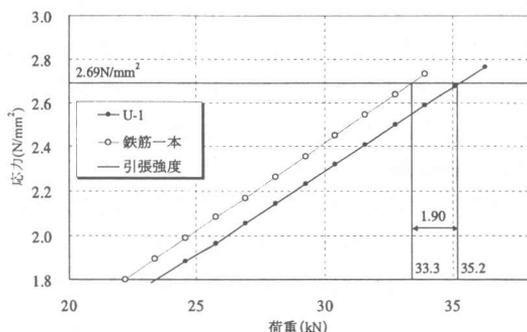


図-16 着目点の荷重-応力関係

5. まとめ

- (1) 耐力に関しては継手種類による影響は見られず、土木学会式³⁾で安全側の値を示したことから、通常部材と同様の設計を行うことが出来る。
- (2) 実験において、ループ継手は継手部鉄筋とその左右の歪み分布に大きな差が発生する。奥行き方向の鉄筋間隔を実験パラメータとしていないため、定量的検証は出来なかったが、ループ継手を集中配置する場合には重ね継手との明瞭な差が生じると考える。
- (3) アンクラック継手は、 $150\text{mm}\sim 300\text{mm}$ のループサイズに関して、打継目の歪みを左右に分散させる効果が確認出来た。
- (4) 打継目のひび割れ発生荷重は、計算値³⁾に対して重ね継手とループ継手を用いた供試体が 81% 、アンクラック継手を用いた供試体が 97% という結果となった。継手種類相互の差

は解析により鉄筋換算剛性の影響であることを確認した。また、想定したループ効果によってもひび割れ発生荷重に差が生じることを解析により定性的に説明することが出来た。

アンクラック継手は便宜上「継手」と呼称したが、単なる打設継目に使用する場合を除き、プレキャスト部材からの突出に対する継手が必要になる。実構造物への適用にはこの点を含め、さらなる検討が必要であるが、構造的な弱点である打継目の補強方法として、有効な方法であると考えられる。また、スプライス PC 構造の場合、ひび割れを許容しない PC 構造では何ら問題のないことが確認されているが、本実験で PRC 構造のようなひび割れ制御を行う構造に対しての適用可能性が確認出来た。

参考文献

- 1) 今村晃久, 毛利忠弘, 石戸良平, 加地 久 : スプライス PC ホロー構造の特性について, 第 8 回 プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp203~208, 1998
- 2) 今村晃久, 毛利忠弘, 天野明子, 角田與史雄: スプライス PC 構造に関する実験的研究について, コンクリート工学年次論文集, Vol22, No.3, pp847~852, 2000
- 3) 土木学会 : コンクリート標準示方書 設計編 平成 8 年制定
- 4) 野中哲也, 吉野広一, 藤谷義信, 藤井大地: 鋼構造物の非線形数値解析手法の比較検討, 計算工学講演論文集 Vol5, No1, pp23~26, 2000
- 5) ADINA R&D, Inc.: ADINA Theory and Modeling Guide, Report, ARD99-7, 1999
- 6) K.J.Bathe: Nonlinear Analysis of Concrete Structures, Computers & Structures, Vol.32, No.3/4, pp.563-590, 1989
- 7) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991