

論文

[2132] 終局時に PC 鋼材が降伏しないプレキャスト PC 梁の曲げ変形解析

是永健好\*1・小林 淳\*1・桑田由加子\*1

1. はじめに

圧着接合方式のプレキャストプレストレストコンクリート（以下、プレキャストPC）部材は、PC鋼材量が比較的多く、断面の平均プレストレスも大きい。そのため、地震時応力を受ける終局時にPC鋼材が降伏せず、圧縮側コンクリート部で耐力が決まる場合もある [1], [2]。そこで、既往の研究を参考に、塑性ヒンジ、鋼材の抜け出し等に関して仮説をたて、既発表実験の変形解析を実施し、PC鋼材が降伏しない主たる原因について検討を行なった。

本報告では、その解析および検討結果について述べる。

2. 解析方法

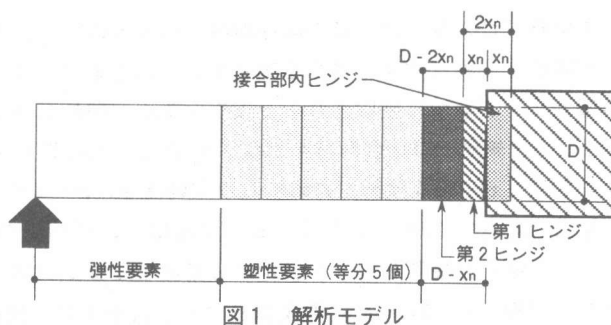
2.1 解析モデルおよび材料特性のモデル化

解析モデルは、図1に示すように、梁部材を、3つの塑性ヒンジ要素、ひび割れが発生する塑性要素（5個）、弾性要素に分割したモデルである。圧着目地は梁危険断面に存在し、目地幅は考慮していない。また、各要素の断面をスライス状に水平分割して釣り合い計算を行う。塑性ヒンジ要素、要素分割の考え方については、2.3節で述べる。

コンクリートの  $\sigma$ - $\epsilon$  関係は六車・渡辺らのモデルを用い、かぶり部分（プレーンコンクリート）と肋筋に囲まれた部分（拘束コンクリート）の材料特性の違いも考慮する [3]。なお、 $\sigma$ - $\epsilon$  モデルの諸定数は、文献 [4] と同様に、材料試験結果を参考に補正する。コンクリートの引張強度は、圧着目地部を除き、 $1.8\sqrt{\sigma_B}$  ( $\sigma_B$ :コンクリートの圧縮強度) とし、圧着目地のモルタルとコンクリートの付着応力は、プレストレストコンクリート設計施工規準に示される範囲内 ( $8\sim 14\text{kgf/cm}^2$ ) の値として  $10\text{kgf/cm}^2$  とする。鉄筋およびPC鋼材の  $\sigma$ - $\epsilon$  関係は、完全弾塑性型である。梁の鉄筋は接合部に定着されていないので、塑性ヒンジ要素では無視し、それ以外の要素では有効に働くとする。

2.2 PC鋼より線の付着性状および接合部内からの抜け出し

プレキャストPC造も含め、PC造建物では、緊張材としてPC鋼より線を用いることが多い。しかし、PC鋼より線とグラウト材の付着性状に関する研究資料はほとんどなく、より線の付着機構、柱梁接合部内からの抜け出し量に関しては、未だ解明されていない。一般的に、終局時の梁塑性ヒンジ領域および接合部内では、付着劣化がかなり進行していると言われていたが、横節を持つ異形鉄筋や異形PC鋼棒の付着性能とどの程度の差異があるかは意見がわかれるところである。



\*1 大成建設(株)技術研究所 構造研究グループ

PC鋼より線は、図2に示すように、公称径に対する付着面積は異形鉄筋より大きく、鉄筋のような横筋がない代わりに、複数の鋼線が捩れてPC鋼より線を構成している。したがって、PC鋼より線の付着性能は、グラウト材がシースによって拘束されていることなども考慮すると、少なくとも丸鋼より異形鉄筋に近いが、同等以上とも考えられる。

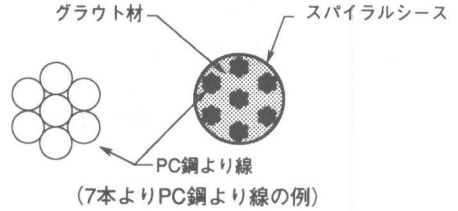


図2 PC鋼より線の断面形状

接合部内からのPC鋼材の抜け出し量は、接合部内での鋼材のひずみ分布によって決まる。異形鉄筋では通常0.15~0.2%のひずみで降伏し、その後、引張力はほとんど増加しない。

それに対し、図3に示すように、通常的设计で用いられるPC鋼材のひずみは、有効プレストレスから規格降伏点までの範囲で0.2~0.5%程度であり、実降伏点に達するには少なくとも0.5%以上鋼材が伸びる必要があり、伸びひずみの増加とともに、鋼材の引張力も増大する。したがって、接合部内でのPC鋼材の応力伝達長さは、鋼材断面積とヤング係数が同じなら、異形鉄筋よりも長くなり、接合部からの抜け出し量も多い。既往の実験でも、抜け出し量は多く、この抜け出しによる付加回転が梁の変形の大部分を占めることが指摘されている<sup>[1]</sup>。著者らは、この付加回転の増大が、PC鋼材が降伏しない大きな要因のひとつと考える。

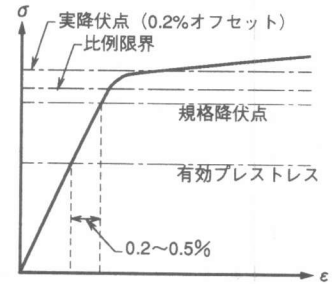


図3 PC鋼材の応力-ひずみ関係

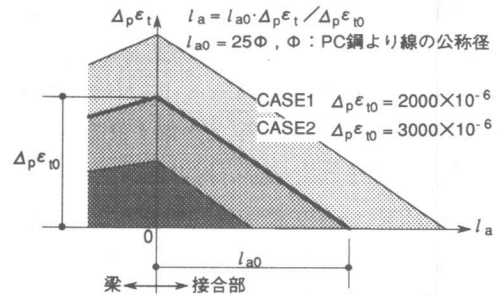


図4 PC鋼より線の接合部内での伸びひずみ分布

本解析では、文献[4]での提案を参考に、図4に示すように、危険断面の引張側PC鋼材の伸びひずみ ( $\Delta_p \epsilon_t$ ) に比例して応力伝達長さ ( $l_a$ ) が変化し、接合部内ではPC鋼材の付着応力度は一定と仮定した。なお、この抜け出し量に影響するPC鋼材の伸びひずみは、対向側梁の圧縮部まで進展するが、ここでは、接合部は限りなく大きいと仮定し、その影響は無視する。したがって、正負繰り返し荷重での逆方向荷重による鋼材の付着劣化の影響も考慮していない。

### 2.3 塑性ヒンジ領域

本解析では、抜け出しによる付加回転の増大により、PC鋼材が降伏する前に圧縮側コンクリートが限界ひずみに達する場合を想定する。はじめに、抜け出しによる回転変形が梁危険断面近傍の塑性ヒンジ領域に吸収されると仮定する。塑性ヒンジ領域は、図5に示す山田らの提案<sup>[5]</sup>を採用し、圧縮側では接合部内も含め  $2x_n$  とし、引張側では梁部の  $(D - x_n)$  とした。

ここに、 $x_n$ : 梁危険断面における中立軸高さ、 $D$ : 梁の全せい。

解析上、図1に示すように、ヒンジ領域を、圧縮側のみヒンジ化する接合部内ヒンジ (幅:  $x_n$ )、圧縮・引張側ともヒンジ化する梁第1ヒンジ (幅:  $x_n$ )、引張側のみヒンジ化する梁第2ヒンジ (幅:  $D - 2x_n$ ) の3要素に分ける。計算では、図6に示すように、まず、梁危険断面 (圧着目地部) で任意の圧縮縁ひずみに対して応力計算を行ない、引張側PC鋼材のひずみ値をもとに

抜け出し量 ( $s_p$ ) を計算する。また、危険断面の中立軸高さ ( $x_n$ ) により、3つのヒンジ要素の長さを決定する。次に、その抜け出し量を、接合部内ヒンジと第1ヒンジに吸収させ ( $\epsilon_s = s_p / (2x_n)$ )、PC鋼材の引張力は変えないで、再度断面の軸方向の釣り合い計算を行ない、抜け出し回転の中心位置 ( $x_n'$ ) と梁危険断面における抵抗モーメントを求める。さらに、梁のモーメント勾配から、ヒンジ要素以外の部分を塑性要素と弾性要素に分割する。

圧着接合の梁の既実施実験では、圧縮側コンクリートが圧壊し始めると、危険断面近傍(危険断面から梁せい程度の範囲)のひび割れは閉じ、圧着目地の開きのみが拡大する [1], [2]。

したがって、本解析では、梁の

第1および第2ヒンジ要素の引張側PC鋼材位置コンクリートのひずみ ( $\epsilon_{11}$ ,  $\epsilon_{12}$ ) は、すべて圧着目地に集中し、ヒンジ要素内では目地部以外でひび割れは発生しないと考える。すなわち、梁ヒンジ領域内からもPC鋼材が抜け出すと仮定しており、2つのヒンジ要素の平均曲率は、図6に示す  $\phi_1$  と  $\phi_2$  となる。

### 3. 解析対象試験体

図7、図8に解析対象試験体 [1], [2] の圧着部配筋詳細を示し、図9、図10にそれぞれの加力方法を示す。これらの試験体は、すべて、鉛直荷重と水平荷重を組み合わせた実験を行なっている。2章で述べたように、解析では、片持ち梁形式の解析を想定しているが、以下の考え方により、実験と解析が等価な載荷条件であると判断できる。

1) 文献 [1] の NO.2 の実験は、鉛直荷重の載荷点と水平荷重の支持点が一一致しており、実験で得られた梁の変形も鉛直荷重載荷直前をゼロとしているので、問題はない。

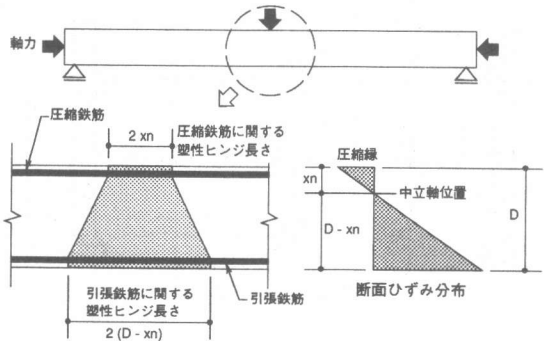


図5 山田らの塑性ヒンジ

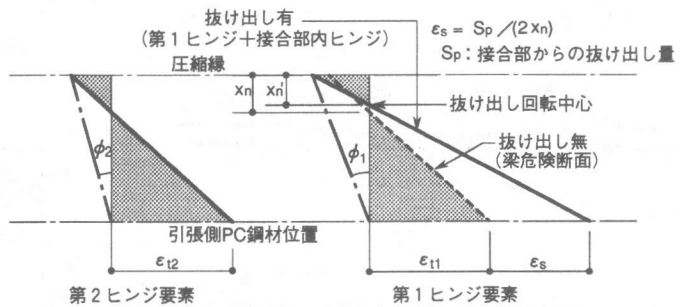


図6 塑性ヒンジ内の断面ひずみ分布

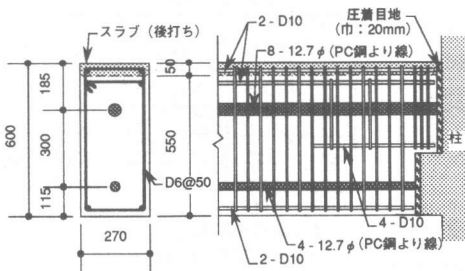


図7 NO.2 圧着部配筋

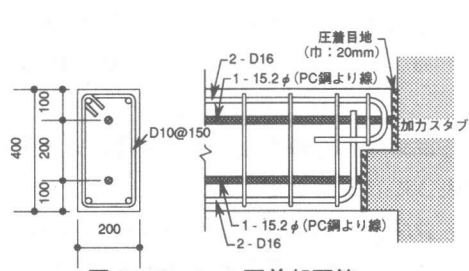


図8 B-1, 2 圧着部配筋

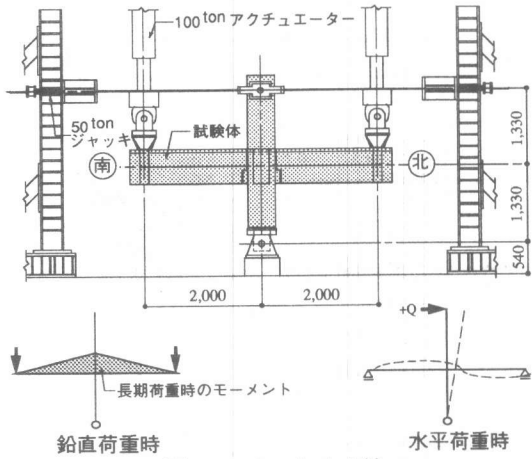


図9 NO.2 加力方法

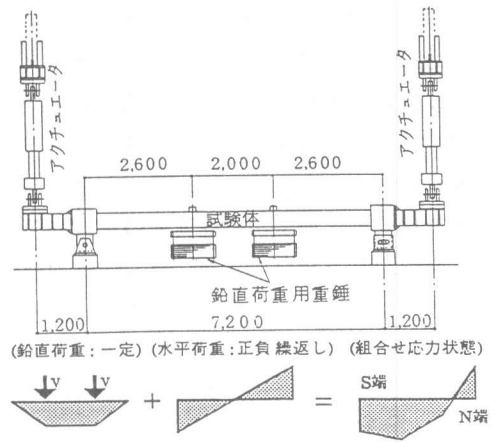


図10 B-1, 2 加力方法

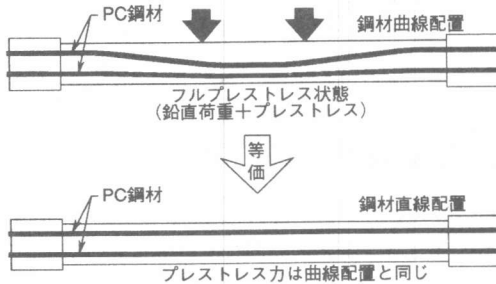


図11 PC鋼材配置の考え方

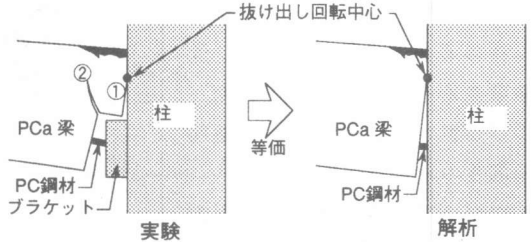


図12 圧着部破壊状況の模式図

2) 文献 [2] のB-1およびB-2の実験は、鉛直荷重による曲げ応力をほぼ相殺するようにPC鋼材が曲線配置されており（フルプレストレスシング）、図11に示すように、PC鋼材が直線配置された梁と等価と考える。

図7、図8に示すように、3体の試験体すべて柱圧着部にプレキャスト梁を取付けるためのブラケットが存在する。図12は、圧着部破壊状況の模式図であるが、ブラケット隅角部から生じるひび割れ②は、終局時では目地部のひび割れ①（目地部の開き）に比べて小さいため、ここではブラケットがない状態として解析した。

各試験体の材料特性および有効プレストレスは、表1と表2に示す通りである。

各試験体とも解析は2ケース行なった。解析パラメータは、応力伝達長さが、図4に示す $l_{a0}$ （ $=25\Phi$ ,  $\Phi$ : PC鋼より線の公称径）になる時のより線の伸びひずみ量

表1 試験体の材料特性

| 試験体  | コンクリート     |          |              |            | 目地モルタル | グラウト | PC鋼より線     |          | 主筋         |          |
|------|------------|----------|--------------|------------|--------|------|------------|----------|------------|----------|
|      | $\sigma_B$ | $E/10^5$ | $\epsilon_B$ | $\sigma_t$ |        |      | $\sigma_y$ | $E/10^6$ | $\sigma_y$ | $E/10^6$ |
| NO.2 | 上(スラブ)     | 333      | 2.47         | 0.20       | 678    | 453  | 18800*     | 1.95*    | 4040 (D10) | 1.96     |
|      | 下(PCa梁)    | 500      | 2.82         | 0.26       |        |      |            |          |            |          |
| B-1  |            | 489      | 2.82         | 0.22       | 666    | 384  | 19000*     | 1.95*    | 3670 (D16) | 1.90     |
| B-2  |            |          |              |            |        |      |            |          |            |          |

注)  $\sigma_B$ : 圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $E$ : ヤング係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $\epsilon_B$ : 圧縮強度時ひずみ (%)  
 $\sigma_t$ : 割裂強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $\sigma_y$ : 降伏点 (kgf/cm<sup>2</sup>)、\*鋼材メーカーによる試験結果

表2 試験体の有効プレストレス力

| 試験体  | PC鋼材位置 | $P_0$ (tonf) | $P_0/P_y$ | $\sigma_0$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|------|--------|--------------|-----------|-----------------------------------|
| NO.2 | 上端     | 56.8         | 0.38      | 52.1                              |
|      | 下端     | 28.7         | 0.39      |                                   |
| B-1  | 上端     | 7.80 (7.88)  | 0.30      | 19.7                              |
|      | 下端     | 7.95 (7.88)  |           |                                   |
| B-2  | 上端     | 15.1 (15.5)  | 0.59      | 38.6                              |
|      | 下端     | 15.8 (15.5)  |           |                                   |

注)  $P_0$ : 有効プレストレス力  
 $P_y$ : 実降伏点荷重  
 $\sigma_0$ : 断面平均プレストレス  
 ・B-1, 2の有効プレストレス力は、対称性を考慮して( )内の値(上下平均値)とした。

( $\Delta_p \epsilon_{10}$ )である。ケース1は、より線が異形鉄筋と同程度の付着性能を持つ場合を想定した $\Delta_p \epsilon_{10} = 0.2\%$ とし、ケース2は、それ以上の性能を想定した $\Delta_p \epsilon_{10} = 0.3\%$ である。なお、解析は、圧縮縁コンクリートのひずみを0.05%ずつ増加させ、最大耐力に達した時点で計算を終了させた。

#### 4. 解析結果

図13、図14に変形解析結果を示す。各図中には、抜け出しの影響を考慮していない断面解析結果も示す。各試験体とも、実験における梁の変形状を解析で概ね表現できている。また、 $\Delta_p \epsilon_{10}$ の異なる2ケース間で結果の大きな相違は認められないが、NO.2ではケース2 ( $\Delta_p \epsilon_{10} = 0.3\%$ )、B-1, 2ではケース1 ( $\Delta_p \epsilon_{10} = 0.2\%$ )の方が、実験結果に近い。これは、NO.2のグラウトの強度が、B-1, 2より高いためと考えられる。断面解析結果との比較から、NO.2の梁下端引張時とB-2では、実験時にPC鋼材がほぼ降伏していると推察できる。解析上も、これ等の場合には、PC鋼材は降伏している (NO.2下端引張時では、ケース2のみ降伏)。結果として、PC鋼材が降伏する場合もしない場合も、解析で概ね実験結果を模擬できていると言えよう。

図15に解析における抜け出し回転が梁全体変形に占める割合 (NO.2 上端引張時)を示す。解析では最大耐力時に、抜け出しによる回転変形が、梁全体変形の70%を占めている。文献 [1]の実験では、終局時に圧着目地部の変形 (すなわち、抜け出しによる回転変形) が80~90%占めており、解析で目地部に変形を集中させたにもかかわらず、実験と解析で若干の相違がみられる。

図16に、解析における梁各要素の領域を、実験における破壊状況と比較して示す。ひび割れが発生する領域は、実験および解析とも上端引張時が長く、その領域の長さも解析で実験を概ね表現で

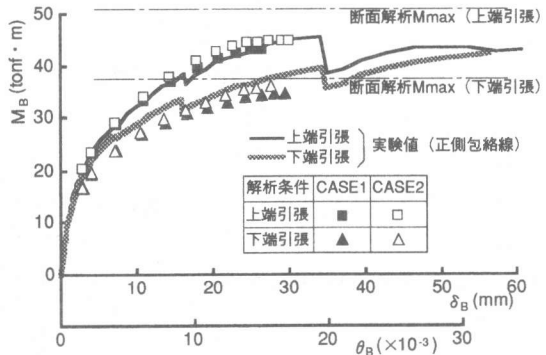


図13 NO.2 解析結果

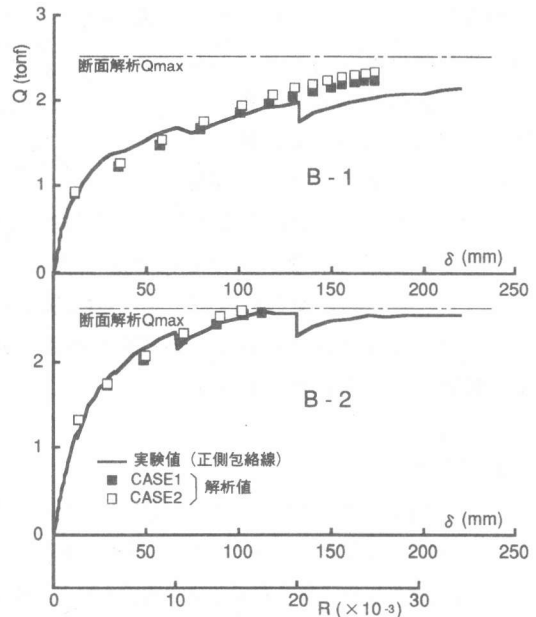


図14 B-1, 2 解析結果

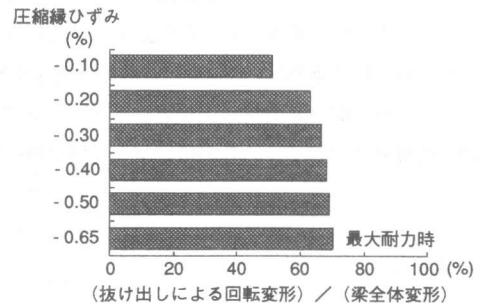


図15 梁全体変形に占める抜け出しによる回転変形の割合 (NO.2 上端引張時)

きている。また、上端引張時、下端引張時とも、解析における梁第1ヒンジ要素（圧縮・引張側ともヒンジ化）が、実験での圧壊領域とほぼ対応しており、鉄筋コンクリート柱における圧縮側ヒンジ長さの考え方<sup>[5]</sup>が、プレキャストPC梁にも適用できそうである。

### 5. まとめ

PC鋼材の抜け出し量の増大を、終局時にPC鋼材が降伏しない大きな要因のひとつと考え、既往の研究を参考とし、抜け出し回転変形等の塑性変形の評価

法を提案した。この解析手法により、既実施実験の解析を行ない、PC鋼材が降伏するしないにかかわらず、解析で実験における梁の変形状・ひび割れ性状を概ね模擬できることが確認できた。なお、実建物と模型試験体で用いるPC鋼より線が同じものであることを考慮すると、実大レベルではPC鋼より線の抜け出しの影響は小さいと言える。この点も含め、今後、実験と解析両面から検討していく必要がある。

### 参考文献

- [1] 後藤寿之ほか：プレキャスト圧着工法を用いた建物の構造性能（その1）～（その5）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1085～1094、1992年8月
- [2] 是永健好ほか：鉛直荷重と水平荷重を同時に受けるPCPCa大梁の実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1025～1026、1991年9月
- [3] 六車 照ほか：横拘束筋によるプレストレストコンクリート梁の曲げ靱性改善に関する研究、第2回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.377～380、1980年5月
- [4] 最上達雄・是永健好：逆対称曲げを受けるアンボンドPC梁の耐力・変形評価（アンボンドPC部材の構造特性に関する研究 その1）、日本建築学会構造系論文報告集、第411号、pp.29～38、1990年5月
- [5] 山田 稔・武貞健二：鉄筋コンクリート柱の弾塑性曲げ変形状に関する研究（プラスチックヒンジの生成機構について）、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.57～60、昭和43年5月

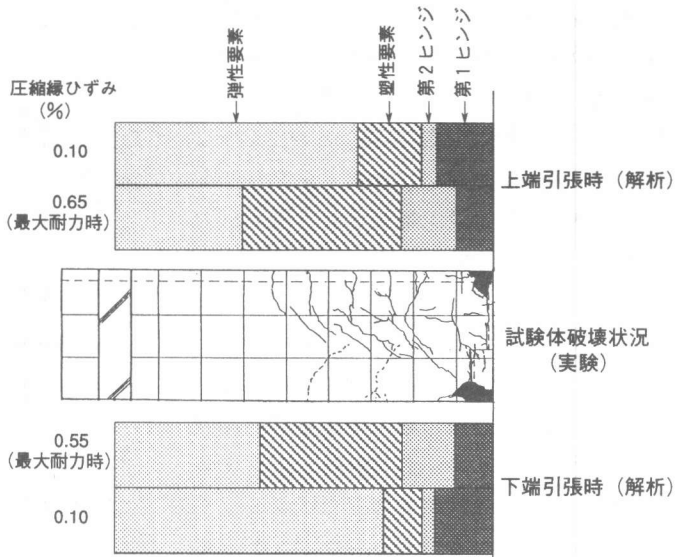


図16 梁における各要素領域 (NO.2)