

ひずみ速度効果を考慮したP Cはり部材の動的曲げ耐力と変形性能

DYNAMIC FLEXURAL STRENGTH AND DEFORMABILITY OF PC BEAM
CONSIDERING THE STRAIN-RATE EFFECT

園田佳巨* 小林直行** 石川信隆*** 佐藤紘志***

By Yoshimi Sonoda, Naoyuki Kobayashi, Nobutaka Ishikawa, Hiroshi Satoh

This research is concerned with the dynamic flexural strength and deformability of Prestressed Concrete(PC) beam considering the strain-rate effect and the degree of prestressing. Firstly, the material tests of prestressing steel under high-speed loadings are performed in order to obtain the dynamic stress-strain curve. Secondly, the dynamic bending moment(M) curvature(ϕ) relationship of PC beam is calculated by using the section partition method. In the M~ ϕ curve, the influences of two parameters of PC beam(strain-rate effect and degree of prestressing) are investigated on the dynamic flexural strength and deformability of the PC beam. Finally, the impact response analysis of PC beam is illustrated as an example for the safety check of ultimate limit state.

1. 緒 言

近年、落石防護施設である落石覆工に対する安全性の検討が必要となり、研究が活発に進められている¹⁾。2)が、落石覆工の耐用期間内に発生する確率が非常に小さい大規模な落石に対しては、落石覆工の終局限界状態を想定した安全性の照査を行う必要があると考えられる。ところで、落石覆工の終局限界まで考慮する場合には、落石覆工上のサンドクッションによる衝撃緩衝効果についての研究³⁾・⁴⁾の他に、落石覆工自体の塑性域まで含めた耐衝撃性に関する研究も必要と思われる。

本研究は、落石覆工の終局限界状態に対する安全性照査を行うための基礎的段階として、従来あまり研究されていなかったP C (プレストレストコンクリート) はり部材の動的曲げ耐力および変形性能について解析的考察を行ったものである。すなわち、衝撃力が作用したときにひずみ速度およびP C鋼線の鋼材指数が、曲げ耐力および変形性能に対してどのような影響を及ぼすかを考察するものである。ここで、P Cはり部材を対象としたのは、施工の簡易性から、P Cの落石覆工が比較的多く採用される傾向にあるためと、RC部材に比し耐衝撃性能に関する研究があまりなされていないためである。

さて、構造部材を構成する各材料は、ひずみ速度の増大とともに降伏応力が上昇する特性⁵⁾があり、高速

* 工修 防衛大学校助手 土木工学科 (〒239 横須賀市走水 1-10-20)
 ** 防衛大学校研究科学生 土木工学科 (同 上)
 *** 工博 防衛大学校教授 土木工学科 (同 上)

変形時の材料の応力～ひずみ関係は、静的な載荷試験で得られるものとは一般に異なっている。したがって、衝撃荷重が作用したときの構造部材の耐衝撃性能を厳密に算定するには、ひずみ速度に対応した材料の応力～ひずみ関係を用いて解析を行わなければならない。そこで、本研究ではひずみ速度効果を考慮したPCはり部材の耐衝撃性を把握するため、まずPCはり部材を構成する各材料（PC鋼線、高強度コンクリート、鉄筋）の動的応力～ひずみ関係を導入した。特にPC鋼線に関しては、今回初めて高速引張試験を行って、動的応力～ひずみ関係を明らかにした。また、高強度コンクリートと鉄筋に関しては、過去の高橋らの研究⁶⁾による動的応力～ひずみ関係を用いることとした。次に、これらの動的応力～ひずみ関係を用いて、断面分割法によりPCはり部材の動的な曲げモーメント～曲率関係を算定した。その際、ひずみ速度の影響およびPC鋼線の鋼材指数が、PCはり部材の動的な曲げ耐力および変形性能に与える影響について調べ、耐衝撃性に強いPCはり断面を検討した。最後に、本解析で得られた動的曲げモーメント～曲率関係を用いて、衝撃荷重を受けるPCはり部材の弾塑性衝撃応答解析の一例を示した。

2. PC鋼線的高速引張試験

(1) PC鋼単線とより線の静的引張試験

本研究では、PC鋼線的高速引張試験を行う前に、まず写真-1に示すようなPC鋼単線（SWPR1 φ5mm）とより線（SWPR7A φ6.2mm）に対して破断に至るまで静的載荷による比較実験を行った。これはPC鋼より線の場合、中心のより線の方が、周囲の鋼線よりも先行して降伏し、PC鋼単線の場合とは異なった応力～ひずみ関係を示すと予想されたためである。図-1は、φ5mmの単線の試験結果とφ6.2mmのより線の試験結果を示したもので、単線の破断ひずみに相当するところ

（図中点A）までは双方の試験結果はあまり変わらないことが認められるが、PC鋼より線の方は、PC鋼線が1本ずつ破断していくため、点A以降、階段状に引張応力の値が低下していき、より線全てが破断するまでの伸び能力は単線の破断ひずみよりも大きい。しかし、実際に期待するじん性は、より線の場合も単線の破断ひずみ（図-1の点A）までとみなして差し支えないものと考えられる。

(2) PC鋼線的高速引張試験の概要

(1)の結果から、単線の破断ひずみまでは、より線でも同じ応力～ひずみ関係を示すと考えられるので、ここでは単線を対象とした高速引張試験を行った。すなわち、PC鋼線の動的応力～ひずみ関係を求めるために、写真-2に示すような高速載荷引張試験装置およびPC鋼単線（SWPR1 φ5mm、部材長200mm）の定着具を用いて載荷速度を変えながら行った。載荷速度は、高速載荷（ 10^0 /sec程度）、低速載荷（ 10^{-2} /sec程度）および静的載荷（ 10^{-5} /sec程度）の3種類とした。なお、静的載荷試験についてはアムスラー型試験機を用いた。荷重は、ひずみゲージ式荷重変換器（引張圧縮両用ロード・セル）により計測し、PC鋼線のひずみについては、PC鋼線中央部に貼付した箔ひずみゲージと渦電流式非接触変位計による引張変位量の計測値からの換算の2通りで行った。

(3) PC鋼線の動的応力～ひずみ関係

図-2は低速載荷（ 10^{-2} /sec）および高速載荷（ 10^0 /sec）の試験結果を示したもので、横軸のひずみは試験片が破断するまでの伸び（変位計で計測）を試験前の長さで除した値である。なお、ここではPC鋼線が破断するまで行ったので、ひずみゲージによる計測値は用いなかった。これより、高速載荷の場合には低速

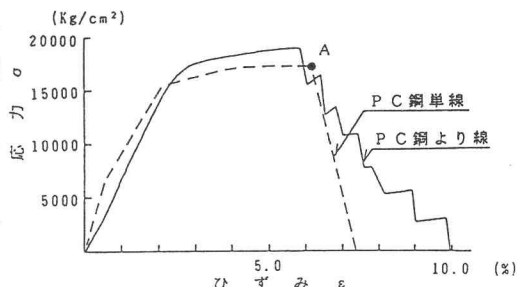
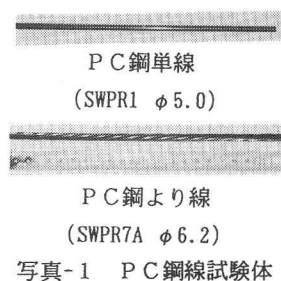
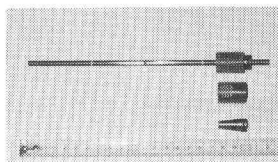
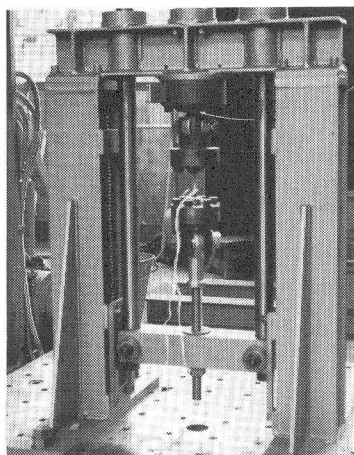


図-1 PC鋼線の静的引張試験結果



PC鋼線定着具

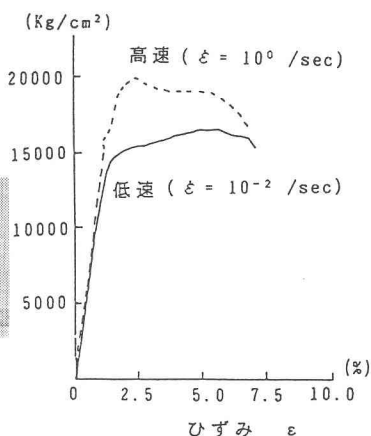


図-2 PC鋼線の引張試験結果

写真-2 高速荷重引張試験装置およびPC鋼線定着具

載荷の場合と比較して、PC鋼線の降伏耐力が約10～20%程度上昇しているが、破断ひずみに関してはあまり変化していないことがわかる。

3. PCはり部材を構成する各材料の動的応力～ひずみ関係

ここでは、以後の計算で必要となるPCはり部材を構成する各材料（PC鋼線、高強度コンクリート、鉄筋）の動的応力～ひずみ関係の定式化を行う。

(1) PC鋼線の動的応力～ひずみ関係の定式化

前記のPC鋼線の引張試験結果を、図-3および表-1のように近似的にモデル化したうえで破断に至るまでの動的応力～ひずみ関係の定式化を行った。すなわち、PC鋼線の降伏応力および引張強度の変化率は、ひずみ速度の対数値の関数として次式のような2次式として表わされる。

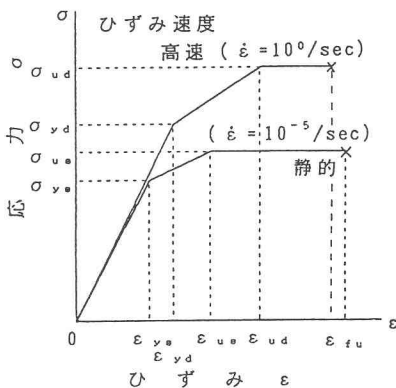


図-3 PC鋼線の動的 $\sigma \sim \epsilon$ 関係のモデル化

$$\frac{\sigma_{yd}}{\sigma_{ys}} = 1.155 + 0.082 \times \log_{10} \dot{\epsilon} + 0.009 \times (\log_{10} \dot{\epsilon})^2 \quad (1)$$

表-1 PC鋼線の $\sigma \sim \epsilon$ 関係の諸定数

$$\frac{\sigma_{ud}}{\sigma_{us}} = 1.141 + 0.084 \times \log_{10} \dot{\epsilon} + 0.011 \times (\log_{10} \dot{\epsilon})^2$$

	$\dot{\epsilon}$	σ_y	σ_u	ϵ_y	ϵ_u	ϵ_{fu}
静的	10^{-5}	15500.0	16500.0	0.002	0.020	0.060
動的	10^0	18000.0	19000.0	0.006	0.040	0.058

ただし、 σ_{yd} ：PC鋼線の動的降伏応力 (Kg/cm²)、

σ_{ys} ：PC鋼線の静的降伏応力 (Kg/cm²)、

σ_{ud} ：PC鋼線の動的引張強度 (Kg/cm²)、 ϵ_y ：降伏ひずみ、 ϵ_u ：引張強度に対するひずみ

σ_{us} ：PC鋼線の静的引張強度 (Kg/cm²)、 ϵ_{fu} ：破断ひずみ

なお、式(1)の各係数は、数種類のひずみ速度に対する実験データをもとに、最小2乗法を用いて決定した。

(2) コンクリートおよび鉄筋の動的応力～ひずみ関係の定式化

(a) コンクリートの動的応力～ひずみ関係式

コンクリートの応力～ひずみ特性に関しては、古くから多くの研究が行われている^{7), 8)}が、高橋らは、普通強度コンクリートの応力～ひずみ関係にはパラボラ式が適しており、高強度コンクリートの場合にはPopovics式の方が妥当であることを指摘したうえで、Popovics式にひずみ速度効果を導入したコンクリートの応力～ひずみ関係式を導いている。PC部材は、プレストレスを導入するために、通常、高強度コンクリートを使用することになっているので、ここでは高橋らが提案した図-4および次の動的応力～ひずみ関係式を

用いることとした。

$$s\varepsilon_c = 4.29 \times 10^{-4} \times \sqrt{s\sigma_c} \quad , \quad N_c = 0.57 \times 10^{-2} \times s\sigma_c + 1.0$$

$$\frac{d\varepsilon_c}{s\varepsilon_c} = 1.240 + 0.053 \times (\log_{10} \dot{\varepsilon})$$

$$\frac{\varepsilon}{s\varepsilon_c} \leq 1 \text{ のとき, } \sigma_c = s\sigma_c \times \frac{\varepsilon}{s\varepsilon_c} \times \frac{N_c}{(N_c - 1) + \left(\frac{\varepsilon}{s\varepsilon_c}\right)^{N_c}} \quad (2)$$

$$\frac{\varepsilon}{s\varepsilon_c} \geq 1 + \frac{1}{K_c} \text{ のとき, } \sigma_c = s\sigma_c \times \left\{ 1 + K_c \times \left(1 - \frac{\varepsilon}{s\varepsilon_c} \right) \right\}$$

$$\frac{1}{K_c} = (25.0 - 32.0 \times \log_{10} \dot{\varepsilon}) \times P_w + (2.76 + 1.55 \times \log_{10} \dot{\varepsilon})$$

ここに、 $s\sigma_c$: 静的圧縮強度、 $1/K_c$: 応力下降勾配係数、

P_w : 拘束筋体積比、 $s\varepsilon_c$: 動的最大応力ひずみ

(b) 鉄筋の動的応力～ひずみ関係式

鉄筋の応力～ひずみ関係についても、過去に数多くの実験的研究^{9), 10)}が行われており、高速変形時の鉄筋の応力～ひずみ関係についても明らかにされている。ここでも、高橋ら⁶⁾が提案した図-5および次のひずみ速度効果を考慮した鉄筋の動的応力～ひずみ関係式を採用することとした。

$$\frac{d\sigma_{yu}}{s\sigma_y} = 10^\alpha + 0.993 \quad , \quad \alpha = 0.3796 \times \log_{10} \dot{\varepsilon} - 0.2579$$

$$\frac{d\sigma_{yl}}{s\sigma_y} = 1.202 + 0.04 \times \log_{10} \dot{\varepsilon} \quad ,$$

$$\frac{d\varepsilon_{fl}}{s\varepsilon_{fl}} = 1.044 + 0.013 \times \log_{10} \dot{\varepsilon} \quad (3)$$

$$\frac{d\sigma_u}{s\sigma_u} = 1.172 + 0.037 \times \log_{10} \dot{\varepsilon}$$

ここで、 $d\sigma_{yl}$: 動的下降伏点、 $d\sigma_{yu}$: 動的上昇伏点、

$s\sigma_y$: 静的降伏点、 $s\sigma_u$: 静的引張強度、

$s\varepsilon_{fl}$: 静的破断ひずみ、 $d\varepsilon_{fl}$: 動的破断ひずみ

すなわち、(3)式でひずみ速度による降伏強度、破断ひずみ等の変化を計算し、図-5に示すような線形補間された $\sigma \sim \varepsilon$ 関係を求めたうえで、ひずみに対する動的応力を計算することとした。

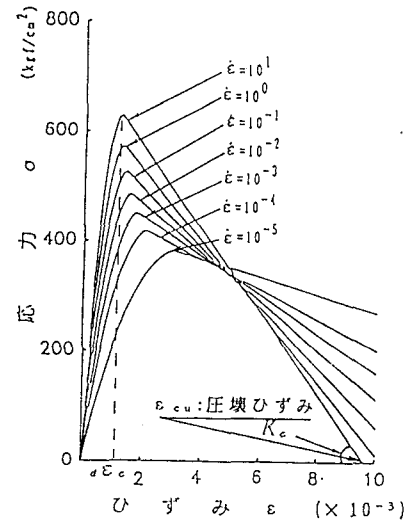


図-4 コンクリートの動的 $\sigma \sim \varepsilon$ 関係

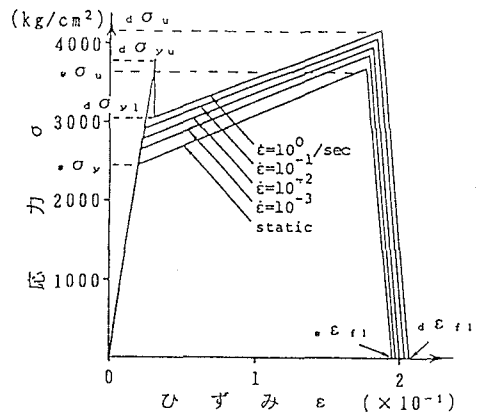


図-5 鉄筋の動的 $\sigma \sim \varepsilon$ 関係

4. PCはり部材の動的曲げモーメント(M)～曲率

(ϕ)の算定

3.で示した各材料の動的な応力～ひずみ関係式を用いて、PCはり部材の動的M～ ϕ 関係を算定する。すなわち、まずPCはり部材の初期プレストレスの影響を考慮するために、プレストレスによる部材断面の初期応力状態を算定したうえで、次に任意のひずみ速度(ただし、PCはり断面の上縁位置を基準とした)に対するPCはり部材の動的M～ ϕ 関係を算定することとする。

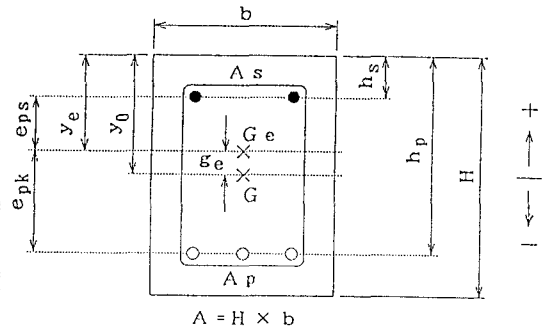


図-6 PCはり部材断面

(1) プレストレスによる初期応力度の算定

PCはり部材の換算断面の諸元は図-6を参照して以下の式によって計算される¹¹⁾。

$$\begin{aligned} A_e &= A + (k_g - 1) \cdot A_g + (k_p - 1) \cdot A_p \cdot y_e = y_0 - g_e \\ g_e &= (1/A) \cdot \{ (k_g - 1) \cdot \Sigma A_{gk} \cdot e_{gk} + (k_p - 1) \cdot \Sigma A_{pk} \cdot e_{pk} \} \\ I_e &= I + A \cdot g_e^2 + (k_g - 1) \cdot \Sigma A_{gk} \cdot (e_{gk} + g_e)^2 + (k_p - 1) \cdot \Sigma A_{pk} \cdot (e_{pk} + g_e)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 A_e ：換算断面積， g_e ：PC鋼線を無視したときの重心位置と換算断面における重心位置とのズレ
 y_e ：換算断面の重心位置， I_e ：換算断面2次モーメント、

k_g ：コンクリートと鉄筋のヤング係数比， k_p ：コンクリートとPC鋼線のヤング係数比

e_{pk} ： y_e から k 段目のPC鋼線までの距離、また、 A 、 I 、 y_0 はそれぞれPC鋼線の存在を無視したときの断面積、断面2次モーメント、上縁から重心までの距離を表すものとする。

PC鋼線が数段にわたって存在する場合は、各段のPC鋼線のプレストレスが相互に及ぼし合う影響を考慮しなければならない。したがって、次式によって各段のPC鋼線間の影響係数を計算する。

$$\alpha_{j,k} = k_p \cdot (A_{pk}/A_e) \cdot (1 + e_{pk} \cdot e_{pj} \cdot A_e / I_e) \quad (5)$$

ここに、 $\alpha_{j,k}$ は、第 k 段目のPC鋼線の単位応力度による第 j 段目のPC鋼線応力度を表す。

以上の諸値を用いると、各段のPC鋼線に任意のプレストレスを導入したときに発生する、PC鋼線位置のコンクリートの応力度が次式で算定される。

$$\sigma_{c,j,i} = (1/k_p) \cdot \sigma_0 \cdot (\alpha_{j,1} + \alpha_{j,2} + \cdots + \alpha_{j,n}) \quad (6)$$

上式を用いて、PC鋼線各段の位置におけるコンクリート応力度を計算したうえで、直線補間を行うことにより、プレストレスを考慮した部材断面の任意の位置におけるコンクリート応力度分布を算定できることになる。

(2) PCはり部材の断面分割法による動的M～ ϕ 関係の算定手順

上記の方法によりプレストレスによる初期応力状態を求め、部材断面の各位置における初期ひずみを算定する。また、外力荷重の作用による変形量は断面の曲率によって与えることとする。そこで、中立軸を仮定したうえで、設定した曲率によるひずみを計算し、先の初期ひずみと部材断面各位置で足し合わせる。得られた全ひずみに対して、各材料毎にひずみ速度を考慮（上縁のコンクリートのひずみ速度を設定ひずみ速度とし、断面内の各位置のひずみ速度をひずみ分布から算定）したうえで応力を求める。その後、断面レベルでの圧縮合力と引張合力とのつり合いが成立するように中立軸の位置を繰り返し計算により求める。正確な中立軸が算定された後に、再度、断面内の各位置のひずみおよびひずみ速度を計算することで、設定曲率に対する部材の曲げモーメントが求められ、これを圧縮側コンクリートかPC鋼線の破壊ひずみに達するまで繰り返すこととなる。なお、本計算法はせん断力の影響を考慮していないため、曲げ破壊に対してのみ適用可能と考えられる。以上の手順をまとめると図-7のようになる。

(3) 動的M～ ϕ 関係の計算結果

(a) 本計算法の妥当性の検討

従来、PCはり部材の動的な実験結果があまり報告されていないので、ここでは静的な曲げ耐力の算定式と比較する。すなわち、図

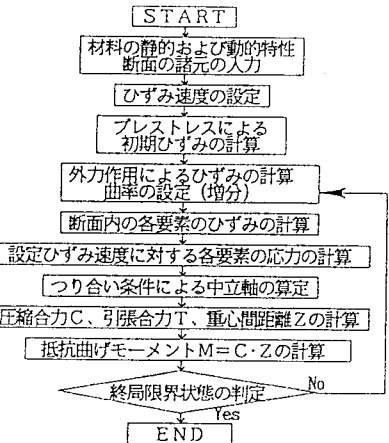


図-7 動的M～ ϕ 関係の算定手順

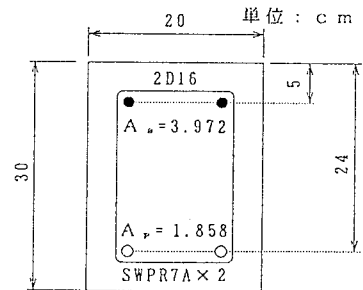


図-8 PCはり断面

—8に示すようなPCはり断面に対し、本法の断面分割法による静的な曲げモーメント～曲率関係を算定し

たうで、その曲げ耐力の結果と次式に示すような通常の設計計算に使用する破壊曲げモーメント算定式¹⁾ (引張側のPC鋼線が降伏したものと仮定)による値とを比較検討する。

$$M_u = A_p \cdot \sigma_p (d_p - k_2 x) \quad (7)$$

ただし、 A_p : (=1.858cm², PC鋼線の断面積), σ_p : (=0.84 σ_{pu} , σ_{pu} はPC鋼線の破壊計算用引張強度であり、17500kg/cm²とする), d_p : (=24.0cm, 上縁からPC鋼線図心までの距離), k_2 : (=0.40, 応力ブロック係数), x : 上縁から中立軸までの距離であり、ここでは計算の結果 $x=5.919$ cmとなる。

図-9は本法の断面分割法による静的 $M \sim \phi$ 関係を示したもので、図中の点Aは、上縁のコンクリートが最大応力に達したときに相当し、点Bは引張側のPC鋼線が降伏し始めたことに相当している。一方、式(7)による破壊曲げモーメントの計算値は $M_u=6.029$ (t・m)となり、図-9の点Bに対応してほぼよく一致しており、本計算法の妥当性が静的曲げ耐力によって確かめられた。

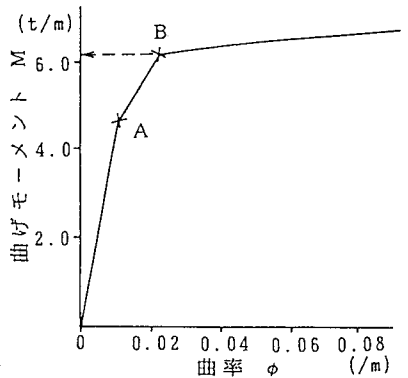


図-9 静的曲げ耐力による検討

(b) PCはりの鋼材指数による破壊の定義とその影響

PC部材は、一般にPC鋼線の配置や鋼材量によって破壊形態が異なると言われている。よって、ここでは鋼材指数 q の値を目安として、破壊形態を以下のように分類する。まず、鋼材指数 q は次式で定義される。

$$q = p_p (\sigma_p / \sigma_{ck}) \quad (8)$$

ただし、 σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度、 p_p : PC鋼材比、 σ_p : PC鋼線の設計強度、次に、破壊形態は q の値が比較的に小さい場合 (一般に $q \leq 0.3$ と言われている) は、

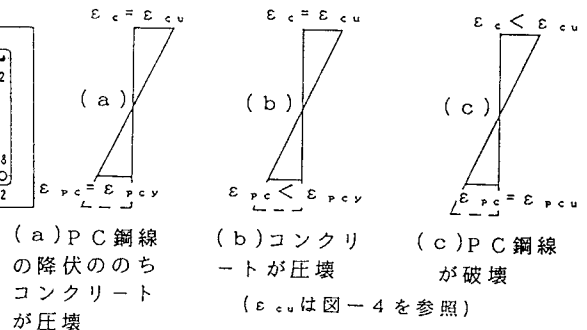
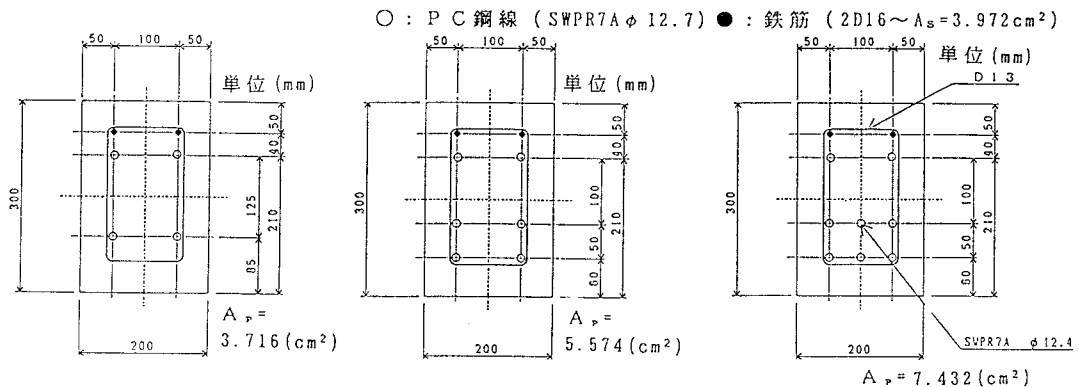


図-10 PCはりの破壊形態

① PC鋼線の降伏が先行して ($\epsilon_{pc} = \epsilon_{pcy}$)、部材の曲率が充分生じた後で圧縮側コンクリートが圧壊する ($\epsilon_c = \epsilon_{cu}$)。逆に q の値が大きい場合 (一般に $q > 0.3$) には② PC鋼線が降伏する前に圧縮側コンクリートが圧壊する ($\epsilon_c = \epsilon_{cu}$)。また特殊なケースとして③ コンクリートが圧壊する前にPC鋼材が破断する ($\epsilon_{pc} = \epsilon_{pcu}$)。



(a) 鋼材指数 $q=0.189$ (b) 鋼材指数 $q=0.284$ (c) 鋼材指数 $q=0.378$

図-11 鋼材指数をパラメータとしたPCはり断面

ϵ_{pcu} 場合も想定し、図-10のような3つの破壊形態に分け、圧縮側コンクリートのひずみ ϵ_c または PC 鋼線のひずみ ϵ_{pc} のいずれかが破壊ひずみ $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ (コンクリートの圧壊ひずみ) または $\epsilon_{pc} = \epsilon_{pcu}$ (PC 鋼線の破断ひずみ) に達したときをもって破壊と定義した。なお、ここでは鋼材指数の影響を定性的に検討するため、引張鉄筋の無い PC はり断面のみを対象とした。いま図-11(a)に示した断面 (鋼材指数 $q=0.189$) を用いて、ひずみ速度 ($\dot{\epsilon} = 10^{-2}$ の場合) を考慮して破壊するまでの曲げモーメント～曲率関係を断面分割法により計算すると、図-12のような結果が得られる。この例では、点Aにおいて PC 鋼線が降伏し始め、点Bにおいて圧縮側コンクリートが圧壊する①のパターンを示している。鋼材指数がさらに大きくなると②の破壊パターンに移行するものと考えられる。

(c) PC 鋼線の鋼材指数による影響

図-11に示す3種類の断面の PC はりについて、鋼材指数による影響を調べた。図-13は動的 $M \sim \phi$ 関係 ($\dot{\epsilon} = 10^{-2}$ /sec の場合) を示したもので、これより、鋼材指数 q が大きくなるにつれて曲げ耐力は増加するが、一般に変形性能は低下することが認められる。これは、鋼材指数 q が大きいほど、PC 鋼線に比べてじん性の小さいコンクリートが圧壊する②の破壊形態が早まるためである。したがって、鋼材指数が $q=0.189$ から $q=0.378$ へと2倍になると、曲げ耐力は約1.7倍に上昇するが、変形性能は約40%低下することが認められる。なお、本計算例では、 $q=0.189$ および 0.284 の場合は①の破壊パターン、 $q=0.378$ の場合は②の破壊パターンを示し、③の破壊パターンは生じなかった。以上より、耐衝撃性のよい鋼材指数としては、耐力と変形性能の両方とも比較的に大きい $q=0.284$ が良いことがわかった ($M \sim \phi$ 曲線の面積の大きさで評価した場合、 $q=0.189$ のときを1とすると、 $q=0.284$ の場合1.04、 $q=0.378$ の場合1.02であった)。

(d) ひずみ速度効果による影響

次に、図-11(b)の PC はり断面 (鋼材指数 $q=0.284$) について上縁のひずみ速度をパラメータとして与えることにより ($\dot{\epsilon} = 10^0, 10^{-2}, 10^{-5}$ /sec の3通りについて行った)、ひずみ速度が曲げ耐力と変形性能に与える影響を調べた。図-14はその動的 $M \sim \phi$ 関係の結果を示したもので、これより、ひずみ速度が大きくなるにつれて PC はりの曲げ耐力は増加することが明らかであるが、変形性能は逆に低下していることが認められる。

(e) 鋼材指数とひずみ速度効果が曲率じん性率に与える影響

前節までの動的 $M \sim \phi$ 関係は、断面の完全な破壊 (コンクリートか PC 鋼線のどちらかが破壊ひずみに達する) までの変形性能に対して考察を行ったが、ここでは、最大曲げモーメントに対応する曲率じん性率 μ を定義し、鋼材指数とひずみ速度効果がこの μ に与える影響を調べた。すなわち、曲率

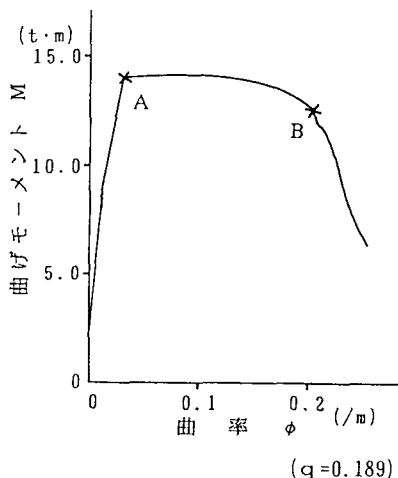


図-12 PC はり部材の破壊の定義

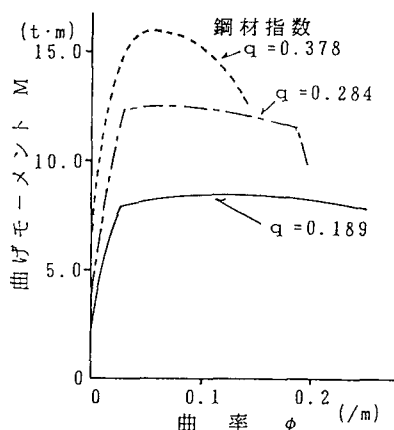


図-13 動的 $M \sim \phi$ 関係 ($\dot{\epsilon} = 10^{-2}$ /sec)

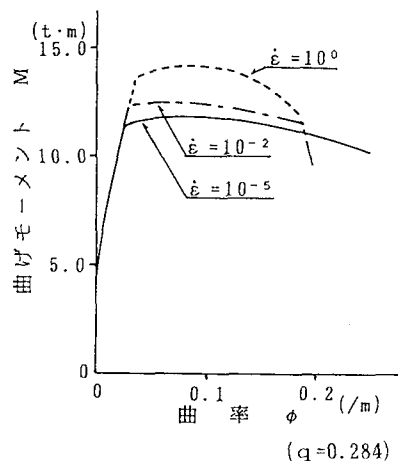


図-14 ひずみ速度効果による $M \sim \phi$ 関係

じん性率 μ とは、図-15に示すような定義¹⁾にしたがうものとし、次式で表される。

$$\mu = \phi_u / \phi_y \tag{9}$$

ここに、 ϕ_u ：M $\sim\phi$ 関係で、最大曲げモーメントに対応する曲率で限界曲率とする、

ϕ_y ：初期の接線剛性と最大曲げモーメントとの交点における曲率で降伏曲率とする、

図-16は横軸に鋼材指数をとったときの曲率じん性率の値を、3種類のひずみ速度のケースについて示したものである。この図より、鋼材指数が大きいくほど、ひずみ速度に関わらず曲率じん性率は低下する。また鋼材指数が大きいくほど、曲率じん性率のひずみ速度による変動範囲が小さくなり、ひずみ速度の影響をあまり受けていないことがわかる。

5. PCはり部材の衝撃曲げ応答解析

ここでは、4.で求めた動的M $\sim\phi$ 関係を用いて、PCはり部材を多質点系の離散化モデルに置換して、重錘落下を想定した衝撃曲げ応答解析の計算例を示す。

(1) 動的M $\sim\phi$ 関係の近似モデル式

4.(3)で示したように同じ部材断面でも、ひずみ速度が変われば異なったM $\sim\phi$ 関係を示すので、ここでは計算によりPCはり部材の数種類のひずみ速度に対するM $\sim\phi$ 関係を求めたうえで、図-17のような近似M $\sim\phi$ 関係にモデル化することを試みる。このモデル化にあたって以下のような仮定を設ける。

- ① 曲げ剛性はひずみ速度に関わらず一定である。
- ② 曲げ剛性が低下する時の曲率の値は、ひずみ速度とともに変わる。
- ③ 剛性の変化点となる曲率について、動的な場合の値と静的な場合の値との比を曲率変化率と呼び、ひずみ速度の対数値の2次関数で定義する。

すなわち、近似M $\sim\phi$ 関係に対するひずみ速度の効果について、ここでは剛性の変化点となる曲率の値の相違のみで表現することとした。

以上の仮定に従い、図-11(a)のPCはり（鋼材指数 $q=0.189$ ）について得られた動的曲げモーメント $\sim$ 曲率関係式を示せば次式のようなになる。

$$\begin{aligned} \phi_{1vd} / \phi_{1ve} &= 2.0352 + 0.5352 \times \log_{10} \dot{\epsilon} + 0.0656 \times (\log_{10} \dot{\epsilon})^2 \\ \phi_{2vd} / \phi_{2ve} &= 1.4672 + 0.0162 \times \log_{10} \dot{\epsilon} - 0.0154 \times (\log_{10} \dot{\epsilon})^2 \\ \phi_{3vd} / \phi_{3ve} &= 0.8867 + 0.0398 \times \log_{10} \dot{\epsilon} + 0.0125 \times (\log_{10} \dot{\epsilon})^2 \end{aligned} \tag{10}$$

ただし、 $\phi_{3vd} = \phi_{ud}$ 、 $\phi_{3ve} = \phi_{ue}$

(2) 衝撃曲げ応答解析法

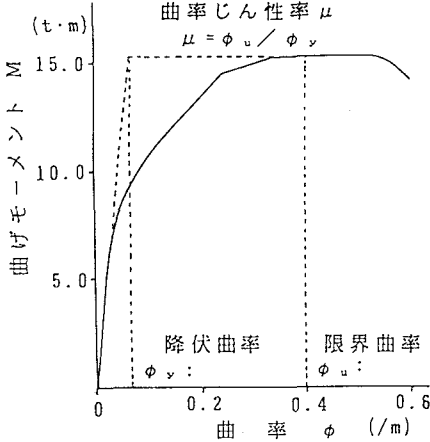


図-15 曲率じん性率の定義

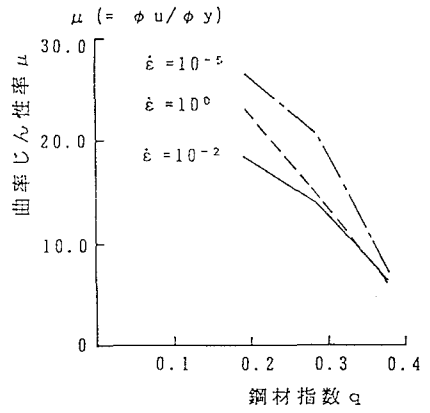


図-16 鋼材指数と曲率じん性率の関係

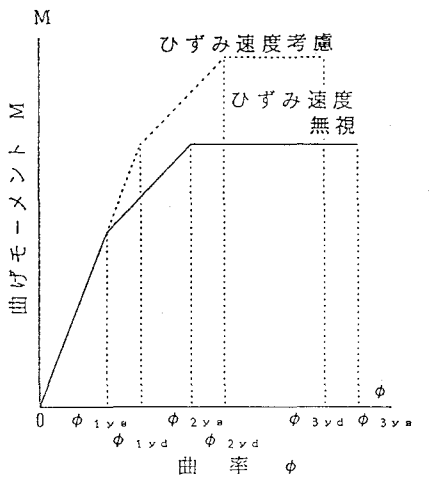


図-17 動的M $\sim\phi$ 関係モデル

ここでは、PCはり部材を図-18に示すような多質点系剛体バネモデル¹²⁾に置換して衝撃応答解析を行う。すなわち、各分割要素の剛性行列および質量行列は、それぞれ式(11)、式(12)を用いることとし、減衰行列はRaileigh減衰を仮定したうえで、式(13)により求めた。

$$[K] = k_i \begin{bmatrix} \frac{1}{l_{i-1}^2} & -\frac{1}{l_{i-1}}\left(\frac{1}{l_i} + \frac{1}{l_{i-1}}\right) & \frac{1}{l_{i-1}l_i} \\ -\frac{1}{l_{i-1}}\left(\frac{1}{l_i} + \frac{1}{l_{i-1}}\right) & \left(\frac{1}{l_i} + \frac{1}{l_{i-1}}\right)^2 & -\frac{1}{l_i}\left(\frac{1}{l_i} + \frac{1}{l_{i-1}}\right) \\ \frac{1}{l_{i-1}l_i} & -\frac{1}{l_i}\left(\frac{1}{l_i} + \frac{1}{l_{i-1}}\right) & \frac{1}{l_i^2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{ただし、} k_i = \frac{EI}{1/2(l_{i-1} + l_i)}$$

$$[M] = \frac{\rho A}{6} \begin{bmatrix} 2l_{i-1} & l_{i-1} & 0 \\ l_{i-1} & 2(l_{i-1} + l_i) & l_i \\ 0 & l_i & 2l_i \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (13)$$

ただし、 $\alpha = \beta = 0.01$

ただし、式(11)中の曲げ剛性EIについては、応答計算の各時刻で要素毎にひずみ速度を求め、式(10)による動的M- ϕ 関係の勾配によって与えるものとした。式(11)～(13)を用いた多自由度の運動方程式の解法には線形加速度法を用い、時間増分は $\Delta t = 10^{-5}$ secに設定して陽解法により行った。計算の手順をまとめると図-19のようになる。なお、本解析法におけるPCはりの破壊は、応答曲率 ϕ が限界曲率 ϕ_u に達したときと定義した。

(3) 重錘落下衝撃を受けるPCはり部材の応答計算例

図-11(a)および(c)の断面のPCはり部材($q=0.189$ および $q=0.378$)の中央部に図-20(要素分割数は10とした)に示すように重錘が落下した時の変位応答量をひずみ速度の影響を考慮したうえで計算する。ただし、重錘とPCはりとは完全塑性的な衝突と考え、PCはりとしては最も伝達されるエネルギーが大きくなる場合を想定している。したがって、初期条件として衝突位置の質点に次式の初速度を与えることとした。

$$V_{10} = m_r \cdot v_0 / (m_r + m_s) \quad (14)$$

ここに、 m_r : 重錘の質量、 v_0 : 重錘の衝突速度、 m_s : PCはり部材の有効質量(初速度の計算でのみ用いる値として、簡易的にはりの全質量の17/35倍とした)、図-21(a)は、図-11(a)の断面のPCはりに $W=0.6t$ の重量の重錘が衝突したときの変位～時間曲線を示したものであり、図-21(b)は、図-11(c)のPCはりに $W=3.0t$ の重錘が衝突したときの変位～時間曲線である。なお、衝突速度はどちらも $v_0=10.0m/s$ とした。図中の実線および破線は、それぞれひずみ速度効果を無視した場合と考慮した場合の計算結果を示す。2つの図から、図-21(a)の場合はひずみ速度効果を考慮した場合にPCはりが破壊する結果を得ているが、図-21(b)の場合は逆にひずみ速度効果を無視した場合にPCはりが破壊する結果が得ている。ところで、ひずみ速度

による影響としては、① 降伏耐力を上昇させ、応答変位量を小さくする、② じん性の低下を招き破壊ひず

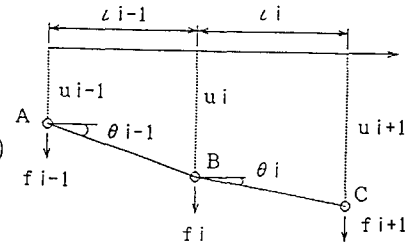


図-18 剛体バネモデル

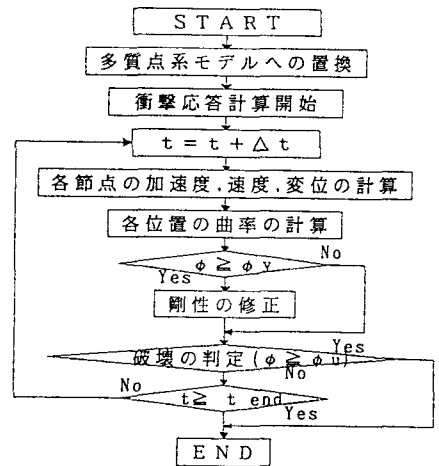
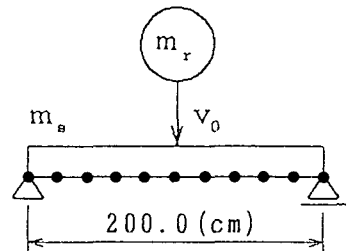


図-19 衝撃応答解析法



m_r : 重錘の質量
 m_s : PCはり部材の有効質量
 v_0 : 重錘の衝突速度

図-20 衝撃応答計算例

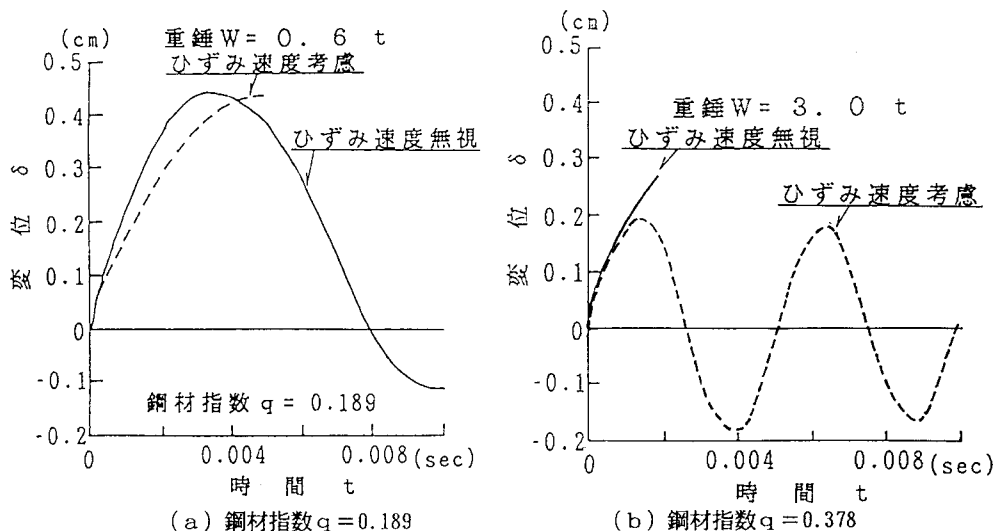


図-21 重錘落下を受けるPCはり部材の変位応答

みを小さくする、という2つの点が考えられる。図-21(a)の場合は、ひずみ速度効果によるじん性の低下が著しいため(図-16で $q=0.189$ のとき μ が約30%低下)、ひずみ速度効果により破壊が早められたものと思われる。一方、図-21(b)のPCはりの場合、ひずみ速度効果によるじん性の低下が少なく(図-16で $q=0.378$ のとき μ が約10%低下)、したがって、①の要因の方が大きく作用したために逆の傾向が得られたものと考えられる。以上のことから、ひずみ速度効果を考慮することが構造部材の安全性の評価に対して、安全側の評価となるか、危険側の評価となるかは、一概に結論づけられない。しかし、PCはり部材の場合に鋼材指数が小さい部材ほど②のじん性の低下による影響が顕著となることが認められた。

6. 結 論

本研究は、主としてひずみ速度効果を考慮したPCはり部材の曲げ耐力と変形性能について考察したもので、本研究で得られた成果を示すと以下の通りである。

- (1) PC鋼線の高速引張試験の結果から、PC鋼線に関する動的応力～ひずみ関係を定式化することができた。
- (2) プレストレスの影響を考慮した断面分割法を用いることにより、PCはり部材の動的曲げモーメント～曲率関係を得ることができた。
- (3) PCはり部材の動的曲げモーメント～曲率関係から、ひずみ速度が大きくなるほど曲げ耐力は上昇するが、変形性能は低下することが認められた。
- (4) PCはり部材の鋼材指数をパラメータとした解析により、鋼材指数が大きいほど曲げ耐力は上昇するが、逆に変形性能は低下する傾向となり、また破壊パターンとしては圧縮側コンクリートが圧壊する②のパターンが支配的となった。
- (5) 鋼材指数が大きいPCはりほど、曲率じん性率は一般に低下し、またひずみ速度の影響は小さくなることが明らかとなった。
- (6) 本計算で用いたPCはりの場合、曲げ耐力と変形性能の両方が大きい鋼材指数 $q = 0.284$ が耐衝撃性に適したPC鋼材量であると考えられる。
- (7) 断面分割法より得られた曲げモーメント～曲率関係を近似的にモデル化することにより、PCはり部材の衝撃弾塑性応答解析を行うことができた。
- (8) 鋼材指数が小さいPCはりほど、ひずみ速度効果によるじん性の低下が顕著となることが認められ、PC

はり部材の破壊が早まる結果となった。

以上、本研究は衝撃荷重を受ける矩形断面をもつPCはり部材の動的曲げ耐力と変形性能について、基礎的かつ解析的考察を行ったもので、今後さらに衝撃実験を実施することにより、本法の定量的な妥当性の検証を行う予定である。

謝 辞 本研究における数値計算の一部は、防衛施設庁研修生 田畑貴英氏の御協力を頂いた。また、数値計算には防衛大学校共同利用電子計算室のHITAC M-680Hを使用した。ここに付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 吉田博、右城猛、柴田健次：落石覆工の現状と合理的設計へアプローチ，土木学会論文集，No.421，pp.213-222，1990年9月
- 2) 中野修、今野久志、岸徳光：EPSを用いた落石覆道の緩衝材構造について，落石等による衝撃問題に関するシンポジウム，pp.65-68，1991年3月
- 3) 榎谷浩、御嶽譲、梶川康男：鋼製ロックシェッド上への落石衝突実験とエネルギー分担に関する一考察，構造工学論文集，Vol.37A，pp.1627-1636，1991年3月
- 4) 園田佳巨、佐藤紘志、石川信隆：落石覆工のエネルギー分担率に関する一考察，落石等による衝撃問題に関するシンポジウム，pp.119-122，1991年3月
- 5) 林卓夫、田中吉之助：衝撃工学，日刊工業新聞社，昭和63年
- 6) 高橋芳彦、大野友則、太田俊昭、日野伸一：衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼす材料のひずみ速度効果，構造工学論文集，Vol.37A，pp.1567-1580，1991年3月
- 7) 竹田仁一、立川博之：高速圧縮荷重をうけるコンクリートの力学的諸性質とその基本的関係式（構造物および構造材料の高速荷重に対する力学的性質の研究その4），日本建築学会論文報告集，第78号，pp.1-6，昭和37年10月
- 8) Dilger, W.H., R.Koch, and R.Kowalczyk, : Ductility of Plain and Confined Concrete Under Different Strain Rates, ACI Journal, Vol.81, No.1, pp.73-81, Jan-Feb, 1984
- 9) 岩井・吉田・中村・若林：構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究 その1 コンクリートと鋼材の応力-歪関係に及ぼす歪速度の影響，日本建築学会論文報告集，第314号，pp.102-111，1982年4月
- 10) ACI Committee 439: Effect of Steel Strength and of Reinforced Ratio on The Mode of Failure and Strain Energy Capacity of Reinforced Concrete Beams, ACI Journal pp.165-172, 1969
- 11) 渡辺明、藤井学、小林和夫：プレストレストコンクリートの力学，技報堂出版，昭和56年
- 12) 川井忠彦：離散化極限解析法概論，培風館，1991年

(1991年9月30日受付)