

衝撃荷重を受けるPC・RC桁の破壊時挙動と変位照査法について
BEHAVIOUR OF PC AND RC BEAMS SUBJECTED TO IMPACT LOADS AND DISPLACEMENT CRITERIA

横山功一^{*}・大塚久哲^{**}・金子 学^{***}

By Koichi YOKOYAMA, Hisanori OTSUKA and Manabu KANEKO

This paper presents test results for simply supported PC and RC beams subjected to static and impact loads. This test clarifies the difference of the ultimate strength and plastic behaviour for static and impact loads. Impact absorbing energy of beams obtained by integrity of loads and displacements are compared to potential energy. Plastic displacement calculated using energy conservation rule agrees very well to test results. Therefore, displacement criteria may be adopted efficiently for the limit state design of the structures with huge impact loads such as falling rocks.

1. まえがき

落石覆工の設計は通常、落石対策便覧¹⁾にもとづき、許容応力度設計法が用いられている。しかし、落石のような荷重の場合、構造物のエネルギー吸収性能を設計に適切に考慮していくことが大切であろう。このような考え方に基づき終局限界状態を考えると、設計耐用期間中に稀に作用する荷重に対しては、大きなひび割れが生じないことや鉄筋が降伏しないことなどに関し、耐力面から照査をすることができよう。一方、設計耐用期間中に極めて稀に作用する非常に大きな荷重（以後、レベル1の荷重と呼ぶ）に対しては、覆工本体の局部的塑性化を認め、覆工のもつ靱性によってエネルギーを吸収することを考えて良いと思われる。このとき、覆工には永久変形を認めるものの、桁下空間の確保などの機能性を保証することが求められる。従って、レベル1の荷重に対する照査は、エネルギー吸収を的確に評価した塑性変位によって行うことが合理的であると言える。

本文は、単純PC・RC桁に対して行った静的載荷試験および衝撃試験結果から、静的耐力と衝撃耐力の比較を行い、桁の衝撃吸収エネルギー等に関する知見をまとめるとともに、エネルギー理論に基づいて提案した変位照査式の妥当性を検証するものである。

* 工修 建設省土木研究所 構造研究室長 (〒305つくば市大字旭1番地)

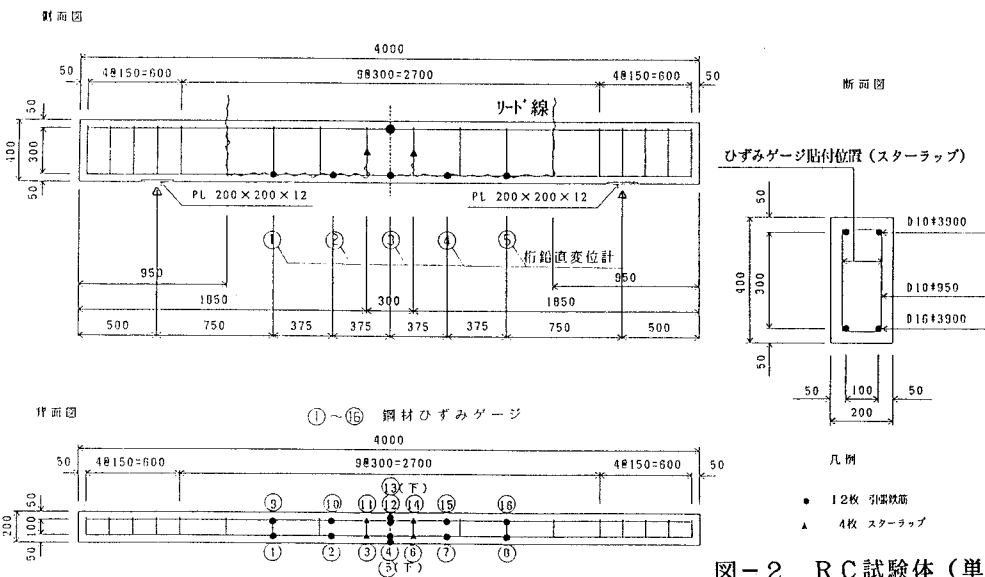
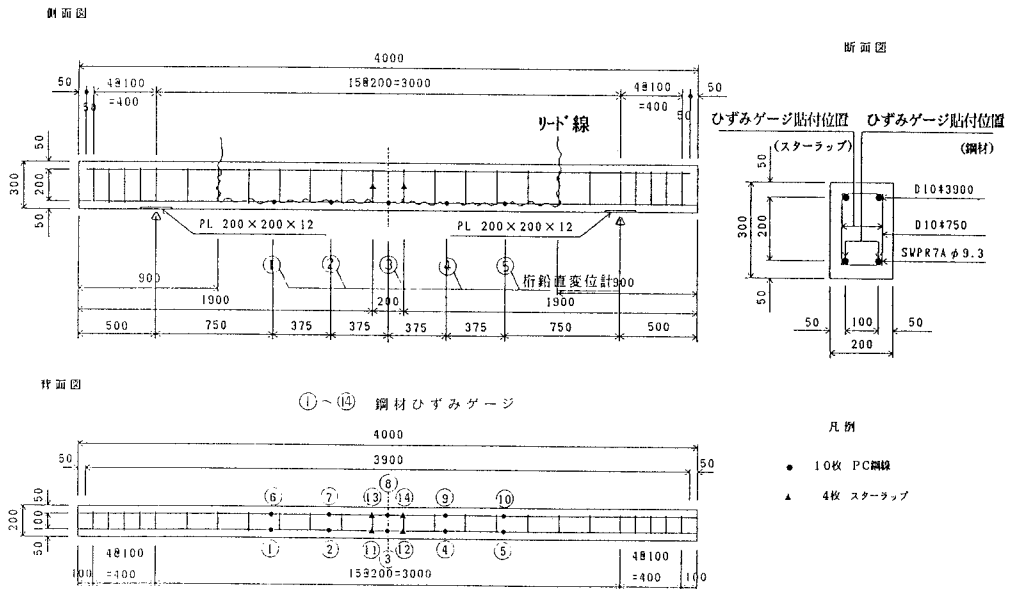
** 工博 建設省建築研究所 第二耐震工学室長 (〒305つくば市立原1番地)

*** 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室 (〒062札幌市豊平区平岸1条3丁目)

2. 試験桁の諸元と材料定数

図-1、2に示すような諸元を有するPC桁、RC桁を製作した。断面諸元、鉄筋量、PC鋼線量は両者の設計耐力（5.5tと設定）が一致するように決定した。すなわち、桁長4m（支間長3m）は共通であるが、断面はPC桁が200×300mm、RC桁が200×400mmである。PC桁ではφ9.3mmのPC鋼線を2本用い、組立鉄筋は引張側には配していない。導入プレストレスは5.64t/本で、有効プレストレスの計算値は4.5t/本である。RC桁の引張鉄筋はD16を2本用いた。

両桁とも4体ずつ製作し、内1体ずつを静的荷重試験（No.4）に、他の各3体を衝撃荷重試験に用いた。表-1にコンクリート供試体の圧縮試験結果を示す。



表－１　　コンクリート供試体圧縮強度試験結果
（３体ずつの平均値）

種類	桁番号	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性定数 ($\times 10^3$ kg/cm ²)
P C	N o . 1	490	3.29
	N o . 2	427	2.96
	N o . 3	456	2.92
	N o . 4	509	2.74
R C	N o . 1	401	2.59
	N o . 2	279	2.75
	N o . 3	358	2.61
	N o . 4	328	2.56

表－２　　鉄筋引張試験結果

鉄筋呼 び 径	桁番号	破断強度 (t/cm ²)	降伏強度 (t/cm ²)
D 1 0	No. 1	5.36	3.73
	No. 2	5.10	3.59
	No. 3	5.22	3.60
	平均値	5.23	3.65
D 1 6	No. 1	5.19	3.47
	No. 2	5.21	3.42
	No. 3	5.18	3.47
	平均値	5.19	3.45

３．静的載荷時の挙動（図－３）

（１）P C 桁

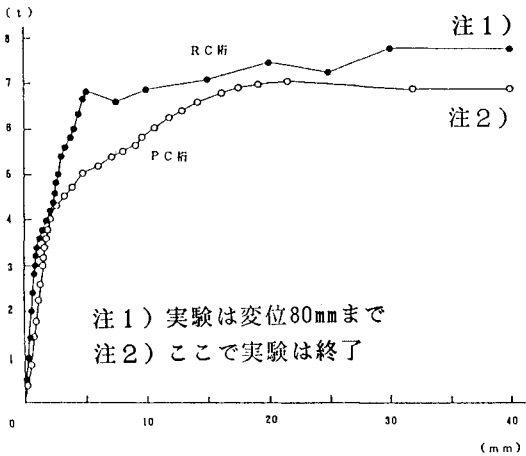
荷重4.0 tまでは弾性的な挙動を示し、最初のひび割れが4.2 tで生じた後、剛性の低下が見られた。5.0 t以降、一段と剛性が低下し、最大荷重は7.1 tであった。このときの桁中央変位は22 mmで、その後40 mmまで変位制御により載荷したがP C鋼線の破断は生じなかった。また、載荷板付近のコンクリートの圧壊は、最後まで生じなかった。

圧縮試験データに基づいて理論値を計算すると、ひびわれ荷重4.3 t、降伏荷重4.9 t、破壊荷重5.6 tであった。

（２）R C 桁

荷重2.8 tで最初のひび割れが発生し、荷重4.1 tで桁上面近くまで達した。荷重3.5 tまでは弾性的な挙動を示し、以後は剛性が低下しながら6.8 tまで荷重が上昇した。以後荷重の増加と共に急激に変位が増大し、桁中央変位70 mmで最大荷重7.9 tを示した。その後80 mmまで変位制御により載荷したが鉄筋の破断は認められなかった。ただし、載荷板付近のコンクリートは圧壊した。

圧縮試験データに基づく理論値は、降伏荷重5.9 t、破壊荷重6.4 tと計算された。

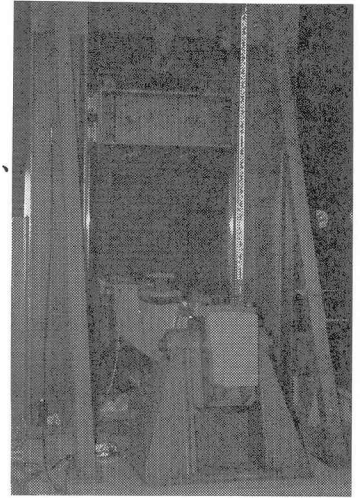


図－３　静的載荷時の荷重－変位曲線
（供試体No.4）

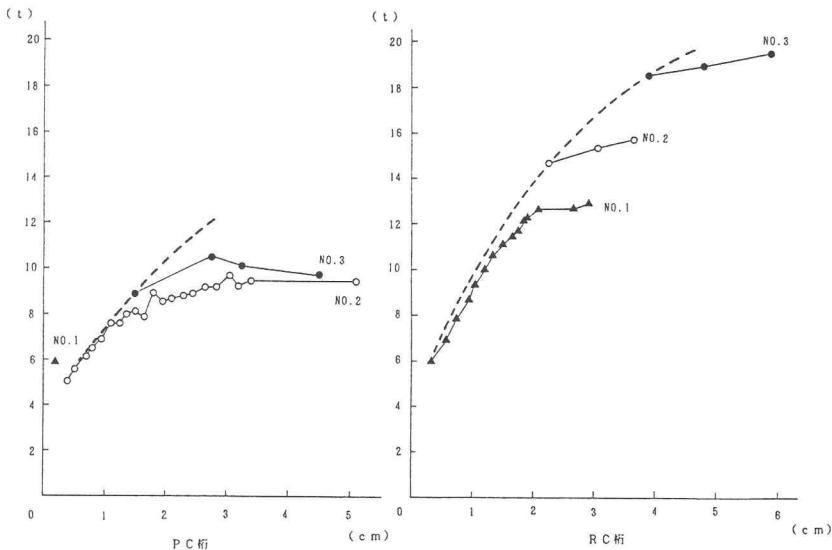
４．衝撃耐力

本実験のために製作した衝撃載荷装置を写真－１に示す。重錘は電磁石で釣り上げ、所定の高さから自由落下させた。重錘下面とロードセル下面には橋梁用簡易ゴム支承材（日本道路公団B種規格品）を挟み、緩衝材とした。ロードセルは桁側にバンドで装着した。

衝撃载荷試験では重錘（0.5 t、P C 桁No.1のみ 1t）を落下させたが、桁が破壊しない場合には破壊するまで落下高さを増して载荷を繰り返した。次の桁の初期落下高さは、前の桁の最終落下高さを参考にして決定した。ロードセルの読みを桁への衝撃力とみなし（実際には緩衝用ゴム材の存在により若干値が異なるものと思われるが、その影響は無視する）、衝撃力と最大鉛直変位の関係を図示すれば図－4を得る。ここで変位は各荷重段階で生じた残留変位を差し引いており、各重錘作用時の鉛直変位を示している。確認された最大衝撃耐力はP C 桁が10.5 t、R C 桁が19.5 tであった。処女载荷時の点（各供試体の最初の実験値）を結んだ包絡線（破線で示す）が健全な桁に初めて衝撃力が作用するときの荷重－変位関係を示すと思われる。これらの曲線と図－3に示した静的载荷時の荷重－変位曲線とを比べると、P C 桁、R C 桁ともにより大きな衝撃耐力およびエネルギー吸収性能を有していることがわかる。



写真－1 衝撃载荷装置



図－4 衝撃载荷時の荷重変位曲線

5. ひび割れ図の比較（図－5）

P C 桁とR C 桁とを比較した場合、R C 桁の方がひび割れ本数が多く、桁軸方向へのひび割れ分布も広い範囲にわたっているが、両桁とも曲げ破壊であると言えよう。静的载荷と衝撃载荷とを比較すると、P C 桁では衝撃载荷の方がひび割れ本数が多く、ひび割れ分布も広がっているが、R C 桁の場合には両者に明確な差異がない結果となった。

6. 重錘及び桁の衝撃時の挙動

重錘が落下して桁と衝突するとき、重錘は数回にわたってリバウンドを繰り返し、桁はリバウンドごとに自由減衰運動を繰り返した。

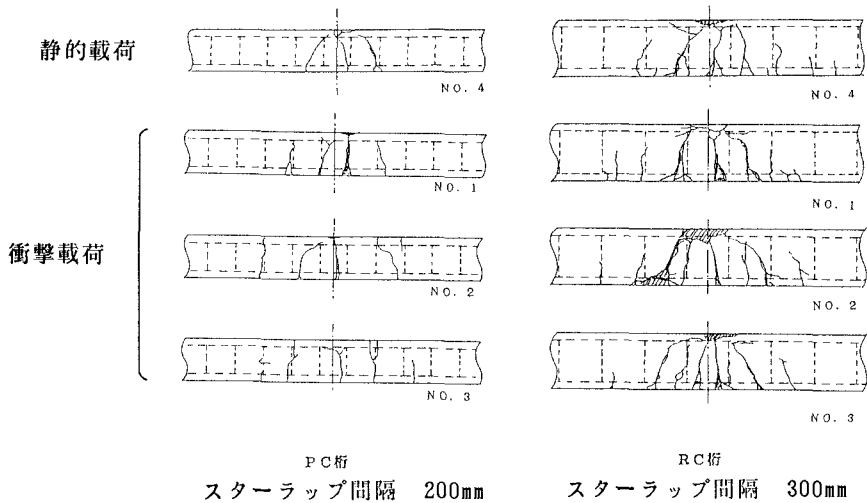


図-5 ひび割れ図(破線は鉄筋、P C鋼線の位置を示す)

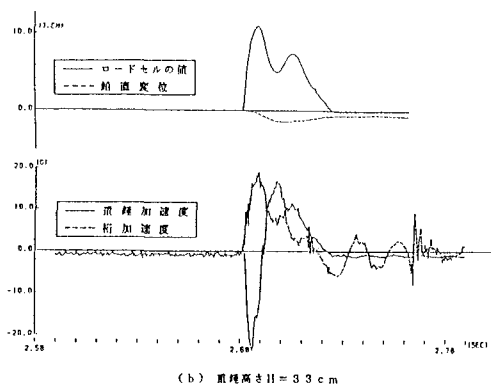
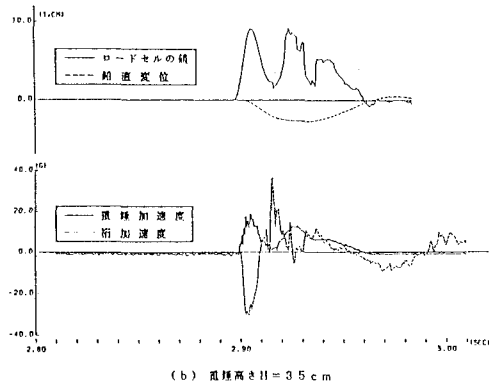
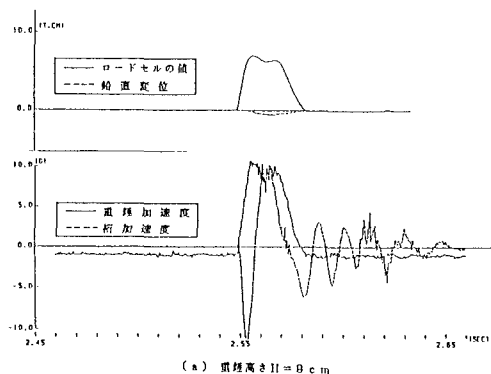
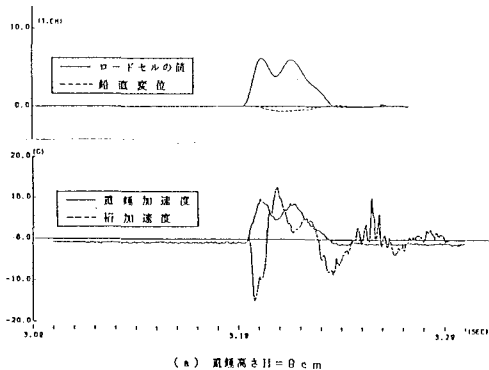


図-6 P C 桁の衝撃時挙動

図-7 R C 桁の衝撃時挙動

図-6、7はPC桁、RC桁における荷重、桁変位、重錘と桁の加速度の経時変化(重錘が1Gで落下し、桁に衝突してリバウンドし、再び1Gで落下するまで)を、2種類の落下高さに対し示したものである。これらの図から、重錘加速度とロードセルの経時変化はほぼ対応しているが、桁加速度の経時変化はそれらと大きく異なり、重錘加速度が1Gから再び1Gに戻るまでの間に、桁の加速度は1.5サイクル程度変動することが知られる。一方、この間の桁の変位は単調であり、半周期(波)を示している。

7. 桁の衝撃吸収エネルギー

質量と加速度の積を時間に関して積分して求められる力積を重錘と桁に関して比較すると図-8を得る。このとき積分は最初の半波によって求め、桁の質量は支間長の半分とした。この図から桁の力積は重錘の力積に比べて著しく小さく評価される。したがって、本実験のように重錘と桁の加速度波形が大きく異なる場合には、両者のエネルギー伝達を力積によって的確に評価することはできないといえよう。

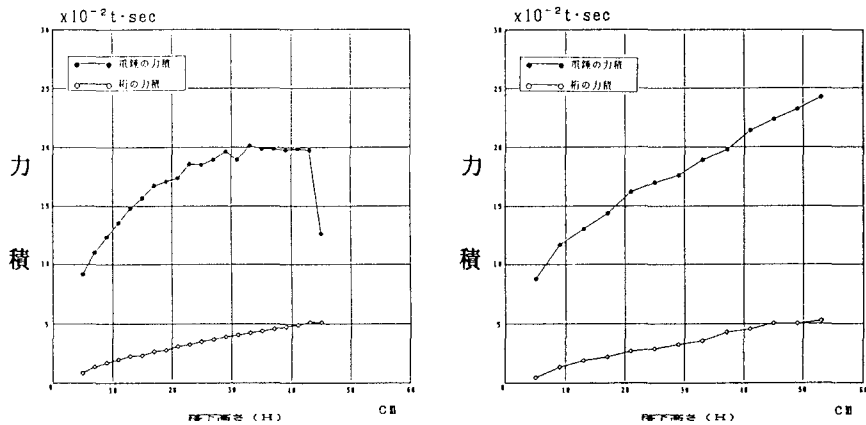
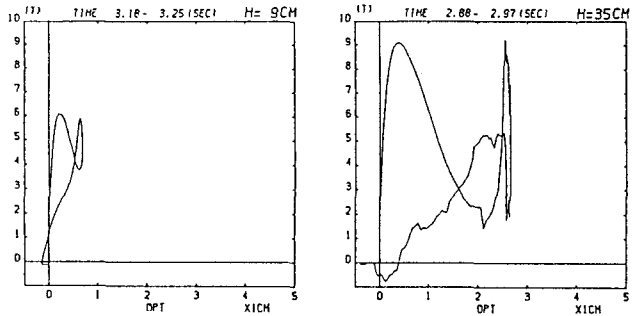
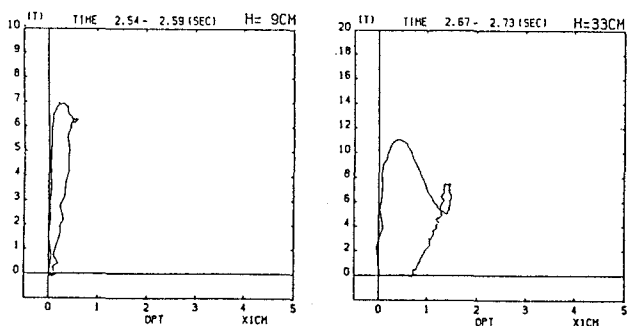


図-8 重錘と桁の力積比較

次に、ロードセルの読み(荷重)を変位に関して積分すると仕事量が算定できるが、これは桁の衝撃吸収エネルギーと考えられる。衝撃時の荷重-変位曲線は図-9に示すように桁のひび割れ発生等の破壊状況に応じて複雑な曲線となる。ここで、積分は、桁が完全に破壊しない間は最大変位まで行い、桁が完全に破壊した場合には荷重が零となるまでの変位に対して行うこととした。これらの積分値と重錘のもつ位置エネルギー(重さ×落下高さH)とを比較して示したものが図-10、11(下段の図)である。図には最大荷重と最大変位の積の2分の1を略算値として併記している。また、両図の上段には、積分値と略算値の位置エネルギーに対する比率を、中段には積分値に対する略算値の比率を示している。これらの図から、まずPC桁の積分値は位置エネルギーの66~84%、略算値は38~107%となり、落下高さの増加



(a) PC 桁 No. 2 (左: H=9cm, 右: H=35cm)



(b) RC 桁 No. 1 (左: H=9cm, 右: H=33cm)

図-9 衝撃力作用時の荷重-変位曲線

に伴い吸収エネルギーの比率は若干増加することが知られる。また、略算値の精度も落下高さの増加に伴い上昇する。一方、RC桁の積分値は位置エネルギーの62~76%、略算値は41~61%となり、落下高さの増加に伴う比率の変化には明確な傾向は認められなかった。また、略算値の精度は落下高さの増加に伴い若干上昇した。

これらの結果から2つのことを指摘できよう。まず、図9に示すように荷重と変位の関係は複雑であり、衝撃载荷に対しては略算値の精度は満足できるものにはならないであろう。次に、積分値は桁の衝撃吸収エネルギーを的確に把握していると考えて良いと思われる。したがって、この衝撃吸収エネルギーを利用して塑性変形を求めることを次章以降で議論する。

ところで、位置エネルギーに対する比率は衝撃吸収材の材質（本実験ではゴム材）、構造材料・構造系等によって大きく変わることが予想され、ここでの値が、実構造物のエネルギー吸収率を示しているわけではない。しかしながら、実構造物における覆工本体の吸収エネルギーの算定に関しては現在各方面で研究²⁾、³⁾が行われており、早い時期に算定可能となると思われる。したがって、次章以降の議論は衝撃吸収エネルギーが既知であることを前提として進める。

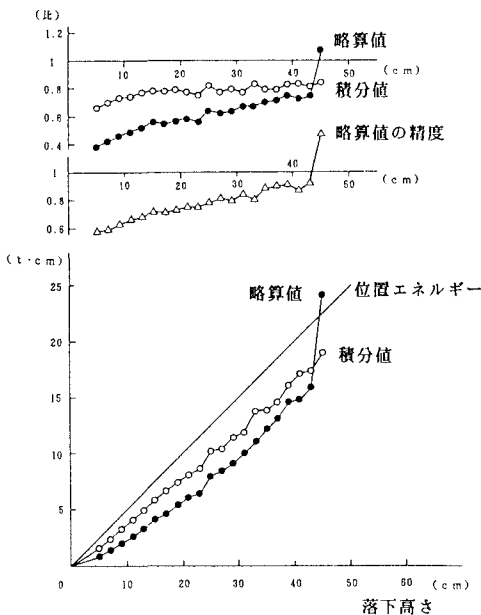


図-10 位置エネルギーと桁の衝撃吸収エネルギーの比較 (PC桁 No.2)

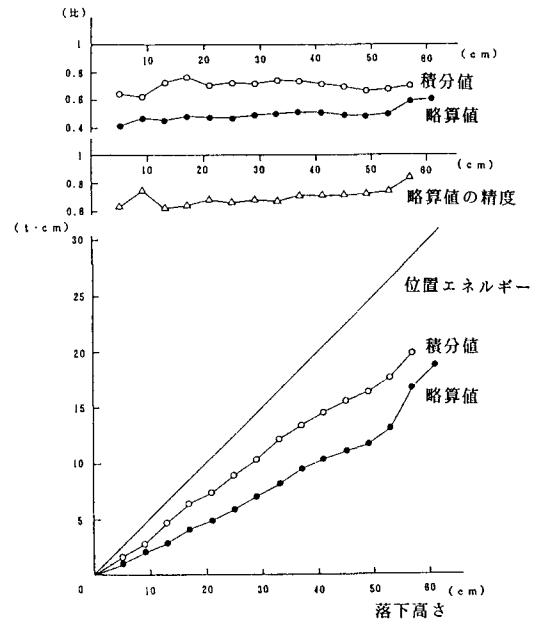


図-11 位置エネルギーと桁の衝撃吸収エネルギーの比較 (RC桁 No.1)

8. エネルギー理論より求めた変位算定式

衝突後の物体のもつ運動エネルギーおよび重錘による外力仕事の和と、弾性限界時まで蓄えられる歪エネルギーおよび塑性ヒンジで吸収されたエネルギーの和を等置することにより、塑性変形量を次のように求めることができる⁴⁾。

$$(1/2)m_{ef}v^2\gamma_0 + m_{ef}g(y_v + y_p) = (1/2)P_y y_p + M_y \theta_p \quad (1)$$

ここに、

$m_{ef} = m_w + \beta(m_b + m_{sd})$ 、 m_w : 重錘の質量、 m_b : 桁の質量、 m_{sd} : 衝撃緩衝材の質量

β : 重錘と一体化して運動する質量比 (ここでは0.5とする)

v : 衝突後の速度 $= (m_w / m_{ef}) v_0$

v_0 : 重錘の衝突時の速度 $= (2 g H)^{1/2}$ 、 g : 重力加速度

H : 重錘の落下高さ

γ_0 : 桁の分担エネルギー

y_v : 降伏時の鉛直変位 $= P_v L^3 / 48 E I$

P_v : 降伏時の荷重 $= 4 M_v / L$

M_v : 降伏時のモーメント、 L : 桁の支間長

θ_p 、 y_p : 塑性ヒンジの回転量とそれによる鉛直変位、 $\theta_p = 4 y_p / L$

上式を変形して、 y_p を求めると、

$$y_p = A (W \alpha \gamma_0 H + B) \quad (2)$$

ここに、

$\alpha : m_w / m_{ef}$

$W : m_w g$

$A = 1 / [4 M_v / L - m_{ef} g]$

$B = (W L / \alpha - 2 M_v) M_v L / 12 E I$

9. 変位の比較

重錘の落下高さと最大衝撃変位の関係について、衝撃試験の結果と理論値を比較すると図-12、13を得る。ここで理論値は、7章で求めた桁のエネルギー吸収率に応じた γ_0 を用いて計算している。変位は上で述べた $(y_v + y_p)$ 、すなわち全変位量を示している。これらの図から実験値と理論値は概ね一致していると言え、エネルギー理論によって衝突後の変位をほぼ正確に推定し得ることが分かる。

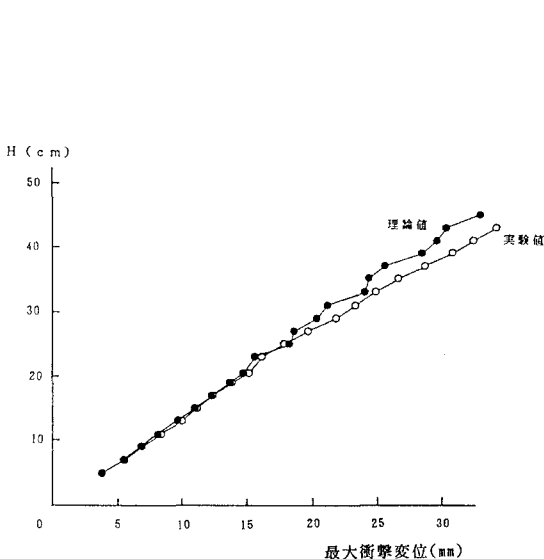


図-12 荷下高さと最大衝撃変位
(PC桁 No.2)

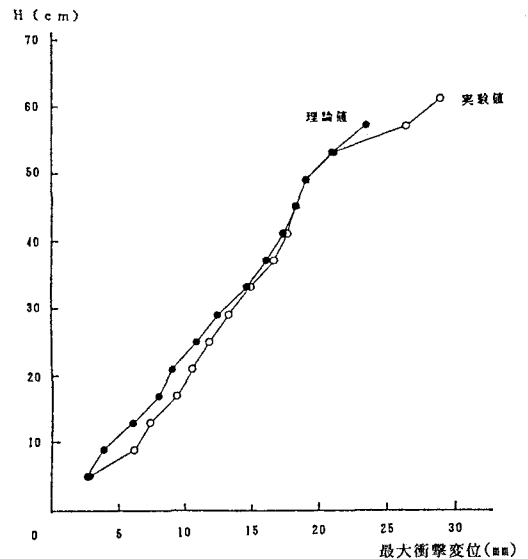


図-13 落下高さと最大衝撃変位
(RC桁 No.1)

10. 変位照査法

変位照査式は次式のように書くことができる。

$$y_{total} = y_y + y_p \leq y_{cr} \quad (3)$$

ここに、 y_{cr} は鉄筋やPC鋼線が完全に破断して桁が大きく落下することのないような範囲で許容し得る限界のたわみ量（塑性回転量）であり、各構造物に対して合理的な値が与えられる必要がある。それには、完全に破壊するときの変位から、あるいは逆に降伏時などの変位から適切な安全率を見込んで y_{cr} を求めてやればよい。

本例の場合、PC桁、RC桁共に静的載荷時の降伏変位は4.2mm程度であり（図-3）、仮に限界変位をこれの5倍とすると21mmとなるが、図-12、13から明らかなように、このときの桁は塑性変形をしているもののまだまだ靱性を有しており、直ちに耐荷力を失って落下することはない。

11. あとがき

落石覆工の設計において、設計耐用期間中に極めて稀に作用するような非常に大きな荷重に対しては、桁下空間の確保などの機能性が満足されれば、覆工の永久変形によるエネルギー吸収性能を考慮しても良いと思われる。本文は、エネルギー理論に基づけば衝撃による塑性変位を精度良く推定し得ることを単純PC・RC桁に関し、示した。したがって、レベル1の荷重に対する照査を、変位によって合理的に行い得るといえよう。

ただし、このためには構造体の衝撃吸収エネルギーの正確な把握、及び適切な限界変位量の決定が必要であり、これに関する研究の速やかな進展が望まれるところである。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧、1983.7.
- 2) 園田佳巨他：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 1991.3、pp.119-122
- 3) 栢谷 浩他：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、1991.3、pp.1627-1636.
- 4) 園田恵一郎：限界状態設計法とロックシェッドの設計、北陸道路研究会35周年記念シンポジウム論文集、1988.10、pp.22-34.

(1991年9月30日受付)