

空気浮上重錘衝突実験装置を用いた鋼管内充填コンクリートの 抵抗力特性に関する実験的研究

Experimental study on the resistance characteristics of filled concrete in CFT using an air floating collision test device

白石博文*, 梶田幸秀**, 香月 智***

Hirobumi SHIRAISHI, Yukihide KAJITA, Satoshi KATSUKI

*修士(工学) 防衛大学校理工学研究科後期課程学生 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

** 博士(工学) 防衛大学校助手, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*** 工博 防衛大学校教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

This paper presents an experimental study on resistance characteristics of confined concrete using an air floating collision test device. The confined concrete is placed between two floating weights which are about one meter apart, initial velocity is given to one side of the floating weight and the weight collides with a section of the confined concrete. Checking the kinetic energy loss, absorption energy and elastic energy, the reliable test results are selected. The rate effect is investigated from the load-deformation curve which is compared with the static experimental result.

Key Words: Air-floating experiment, absorption energy, load-deformation relationship

キーワード: 空気浮上重錘衝突実験, 吸収エネルギー, 荷重～変形関係

1. 緒 言

鋼管内に充填されたコンクリートは、鋼管による拘束を受けることにより静的圧縮強度が増加することが報告されている^{1)~5)}。このため、その力学特性を利用したコンクリート充填鋼管部材(Concrete Filled Steel Tubular Member, 以後 CFT という)が、構造物の鉛直部材・橋脚として多くの土木建築構造物に用いられている^{6)~8)}。

拘束されたコンクリートの動的挙動に関する研究は、その拘束形式の能動性・受動性により 2 種類に大別される。能動的拘束とは三軸実験装置などにより任意に拘束力を設定できる拘束形式である。例えば、上林ら^{9),10)}は 3 軸圧縮応力下におけるコンクリートの軸方向挙動および横方向の軟化挙動に及ぼす載荷速度の影響について明らかにしている。また、受動的拘束とは鋼管がコンクリートの体積膨張を抑制するために発生する拘束形式で、実構造物中に存在する実際の応力状態とされる。この形式での動的挙動に関する研究例として、黒木ら^{11),12)}が充填コンクリートの応力～ひずみ関係に及ぼすひずみ速度効果ならびに鋼管の拘束効果を明らかにするために、円形または角型鋼管内充填コンクリートの高速載荷実験を行っている。その結果、鋼管内充填コンクリートのひずみ速度効果による最大応力度

の増加割合は鋼管拘束が大きいほど小さくなることを示している。

このような基礎研究を踏まえて、南出ら¹³⁾は合成ロックシェッドの柱部材としての耐衝撃性能を明らかにしている。また、伊藤ら^{14),15)}または著者ら^{16),17)}は、鋼製砂防ダムの柱部材への適用について研究を行い高速変形下での曲げ耐力および巨礫衝突後の変形性能を明らかにしている。

ところで、巨礫衝突を受ける CFT 部材の応答では、衝突局部や大変形領域では $10^{-1} \sim 10^0 (1/\text{sec})$ 程度のひずみ速度が発生すると考えられる¹⁸⁾が、鋼管内充填コンクリートの変形挙動については未だ不明な点が多く研究成果報告が充分とはいえない。特に、応答を推定するために必要なその材料が有するエネルギー伝達能力は、全く言及されていない。

そこで、本研究は CFT の衝突局部応答を介した衝突と被衝突物体の衝突前後の運動量変化に焦点をあて、被衝突体の境界面が移動する条件下で衝突荷重を受ける鋼管内充填コンクリートのエネルギー伝達について考察したうえで、その荷重～変形関係を明らかにするために、空気浮上重錘衝突実験装置を用いて二つの重錘の衝突実験を行い、得られた荷重～変形関係を静的実験結果と比較したものである。

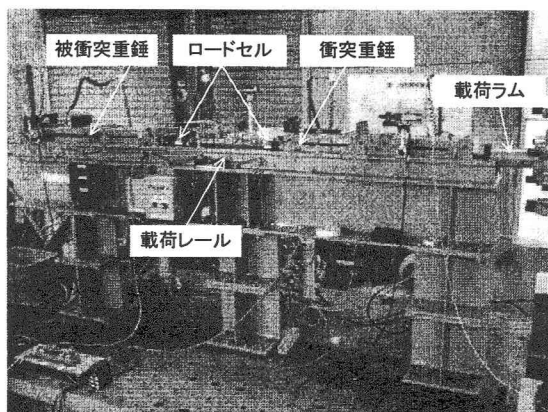


写真-1 空気浮上重錘衝突実験装置

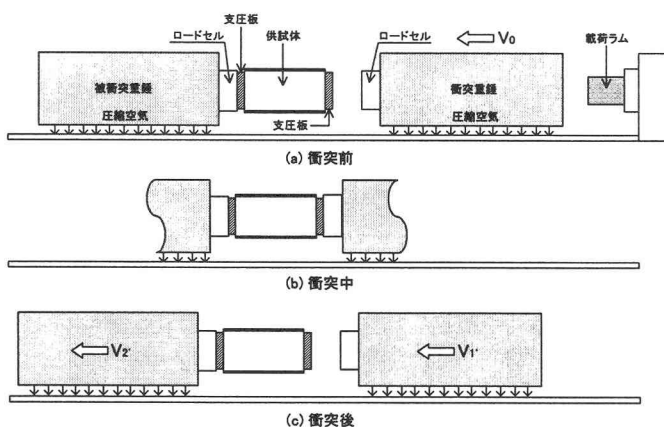


図-2 実験装置概要

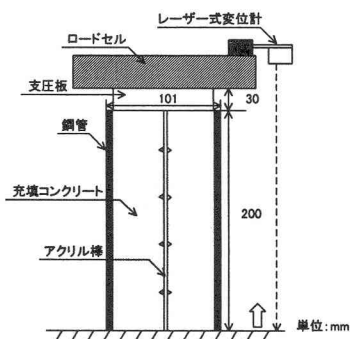


図-3 静的载荷実験要領

2. 実験の概要

2.1 空気浮上重錘衝突実験装置

写真-1に空気浮上重錘実験装置の外観および図-1に本体部の主要諸元を示す。空気浮上重錘衝突実験装置は重錘を底面からの圧縮空気を噴出して浮上させ、载荷レールとの間にほとんど摩擦力が生じない状態で重錘を運動させることができる装置¹⁹⁾である。これに水平高速载荷装置を組み合わせて、離間した二つの浮上重錘の片方を押し出し、他方の静止した重錘に衝突させるものである。本研究では、押し出された重錘を衝突重錘、静止している重錘を被衝突重錘と呼ぶ。本装置は、衝突時間中に2つの衝突重錘と供試体以外には、ひずみエネルギーや運動エネルギーが伝達されること

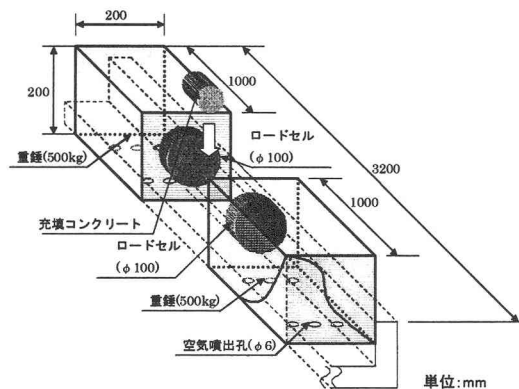


図-1 実験装置諸元

表-1 実験パラメータ

鋼管厚(mm)	実験種類	設定速度(m/s)	供試体本数(本)
3.0	静的 衝突	1.0	3
		2.0	3
		3.0	3
		3.0	3
4.0	静的 衝突	1.0	3
		2.0	3
		3.0	3
		3.0	3
5.0	静的 衝突	1.0	3
		2.0	3
		3.0	3
		3.0	3

表-2 設定速度と実速度

設定速度(m/s)	実速度(m/s)
1.0	1.6~1.7
2.0	2.5~2.7
3.0	3.3~3.7

がないので、衝突・被衝突重錘の衝突前後速度を計測することにより、衝突により逸散した運動エネルギー量から計測された供試体の荷重～変形関係によるエネルギー量についてエネルギーの保存則の観点に立って考察できる。実験は、図-2に示すように浮上して静止した被衝突重錘に充填コンクリート端部を接触させた状態で静止させ、衝突重錘を载荷ラムにより設定速度に加速させ、自由走行状態になった後、コンクリート断面のみに衝突面を設け衝突させた。

2.2 実験パラメータ

本実験のパラメータは表-1に示すように鋼管厚、設定衝突速度の2つである。供試体は、鋼管径一定(101mm)とし、径圧比の影響を明らかにするため、鋼管厚を $t_s=3.0(D/t_s=34)$, $4.0(D/t_s=25)$, $5.0(D/t_s=20)$ mmの3種類とした。衝突速度は、本装置での最大設定速度が3.0m/sであることから、3.0m/s, 2.0m/s および 1.0m/sとした。ただし、実際に生じた衝突速度は表-2に示すようにばらつきがある。なお、実験結果の比較のために静的実験を行うが、その際、図-3の要領でコンクリート断面のみを変形量約20mmまで載荷した。

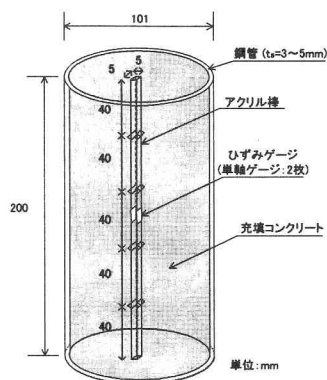
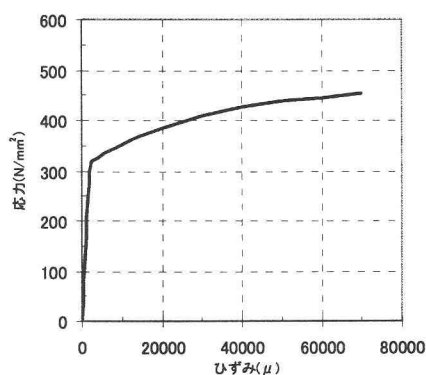
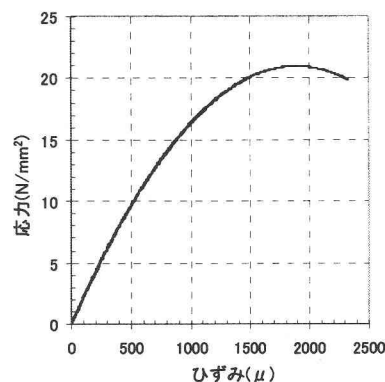


図-4 供試体



(a) 鋼管



(b) コンクリート

図-5 各材料試験結果

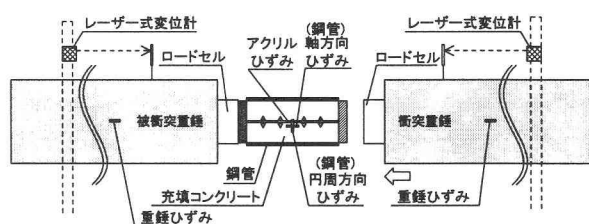


図-6 計測要領

表-3 材料諸元

種類	項目	定数
鋼管	ヤング係数(N/mm ²)	2.1×10^5
	降伏応力(N/mm ²)	320
	降伏ひずみ(μ)	1520
ブレン コンクリート	ヤング係数(N/mm ²)	2.0×10^4
	圧縮強度(N/mm ²)	20
	最大圧縮ひずみ(μ)	1900

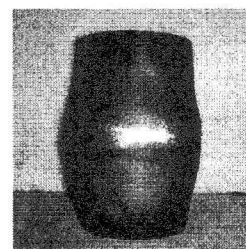


写真-2 静的実験後の供試体

2.3 供試体

供試体には、市販鋼管(GIS G3444 材質 STK400)を用い、図-4 に示すように直径約 100mm 高さ 200mm とした。また、鋼管内部に充填されたコンクリート供試体の変形量を計測するため、図のようにコンクリートとの付着強化のため異形加工したアクリル棒にひずみゲージ(ゲージ長 2mm)を 2 枚貼付したものを埋め込んである。アクリル棒の弾性係数は、 3.3×10^3 (N/mm²) でありコンクリートと比較して 1/10 程度と小さく、充填コンクリートの変形の拘束は小さい。そのうえで、貼付されたひずみゲージから得られた計測値の平均に供試体長を乗じて供試体の全体変形を計測する方法を採用した²⁰⁾。なお、本手法による供試体変形量の計測方法の信頼性については、後に示すエネルギー収支検定を行い、その信頼性を検定する。表-3 に充填したコンクリートおよび鋼管の材料諸元を示し、図-5 にそれぞれの材料試験結果を示す。なお、コンクリートと鋼管の摩擦を少なくするため^{4),12)}に、鋼管と充填コンクリートの間には剥離剤を塗布している。

2.4 計測項目

本実験での計測要領を図-6 に示す。計測項目は、充填コンクリート供試体に作用する衝突・被衝突荷重、供試体内部に埋設した 2 枚のひずみゲージによる軸方向ひずみ、鋼管の軸方向・円周方向ひずみ(各 2 枚)、弾性エネルギー計測を目的とした衝突重錘・被衝突重錘のひずみおよび衝突前後の速度とした。用いた両ロードセルは(株)前川試験機製の LC-300 であり、定格容量は 3000kN である。なお、速度は両重錘の衝突前後の変位を図-6 の要領で計測し、得られた変位を時間で微分

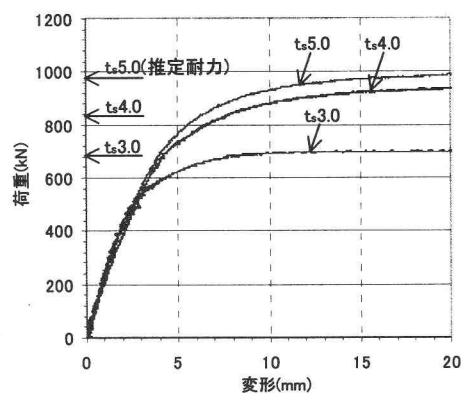


図-7 荷重～変形関係

することにより算定した。

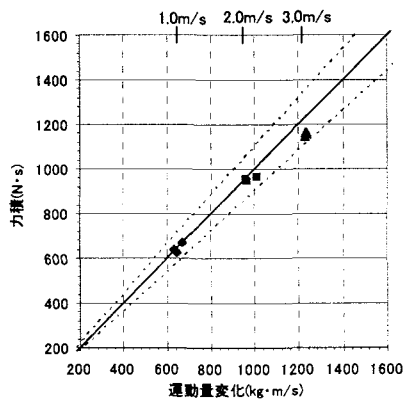
3. 実験結果と考察

3.1 静的圧縮実験

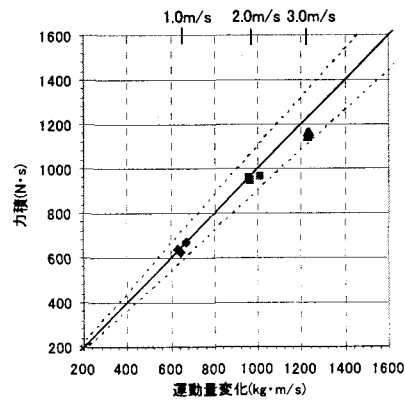
写真-2 に鋼管厚 3mm 供試体に 20mm まで載荷した後の変形形状を示す。コンクリートの変形に伴い供試体中央部が側方に膨らむ CFT 特有の破壊モードが現れている。図-7 に荷重～変形関係を示す。図中には式(1)に示す H.K.Sen²¹⁾や H.J.Gardner²²⁾による推定耐力に各コンクリート断面積を乗じて得られる推定最大耐力を矢印で示す。

$$f_c = \sigma_B + 4 \cdot \frac{2t_{ss}\sigma_y}{D} \quad (1)$$

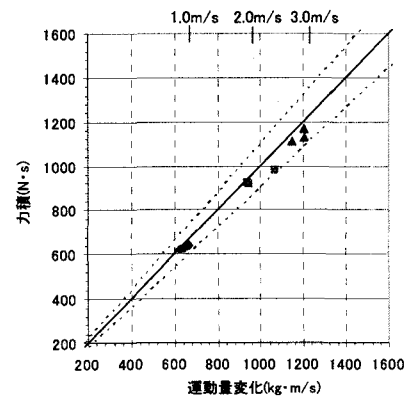
ここで、 f_c :最大耐力(N/mm²)、 t_s :鋼管厚(mm)、 σ_B :ブレンコンクリート強度(N/mm²)、 σ_y :鋼管の降伏



(a) 鋼管厚：3.0mm

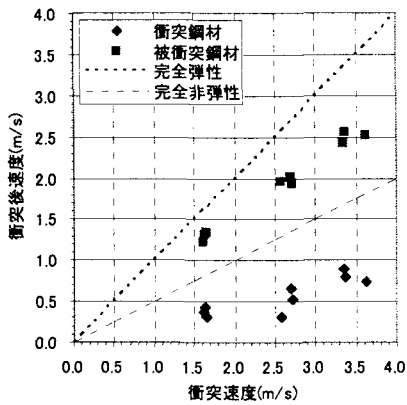


(b) 鋼管厚：4.0mm

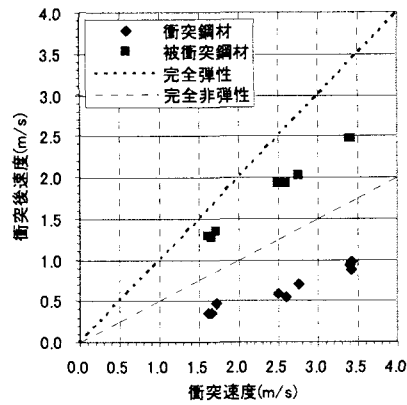


(c) 鋼管厚：5.0mm

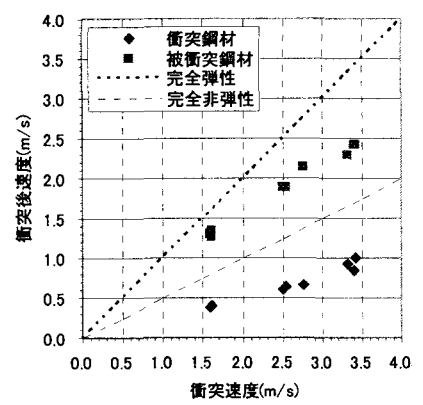
図-8 力積～運動量変化関係



(a) 鋼管厚：3.0mm

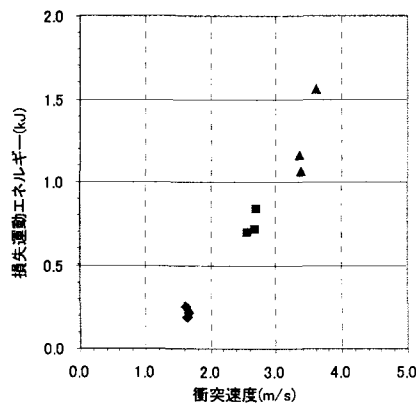


(b) 鋼管厚：4.0mm

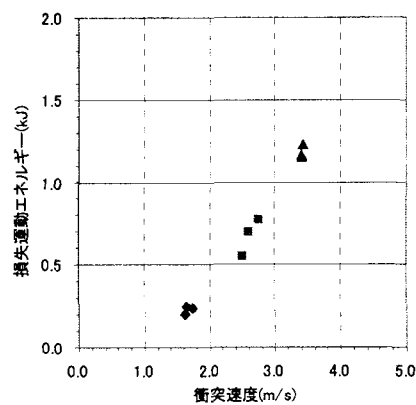


(c) 鋼管厚：5.0mm

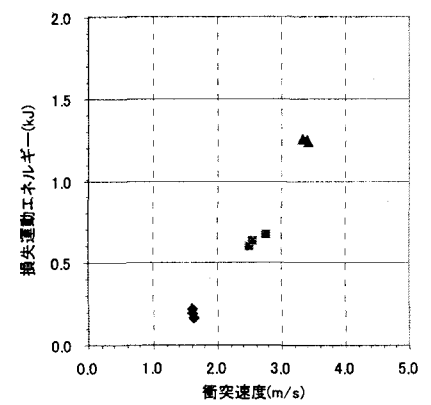
図-9 衝突重錘および被衝突重錘の衝突速度



(a) 鋼管厚：3.0mm



(b) 鋼管厚：4.0mm



(c) 鋼管厚：5.0mm

図-10 損失運動エネルギー～衝突速度関係

応力(N/mm²), D : 鋼管直径(mm).

本実験結果は推定耐力とほぼ一致している. 荷重～変形関係は, 変形量 5mm 以降に鋼管厚の差による拘束効果の違いが現れはじめ, 最大耐力に向かって漸近する硬化型の充填コンクリート特有の弾塑性挙動となった. ただし, 弾性勾配には鋼管厚による差異は見られない.

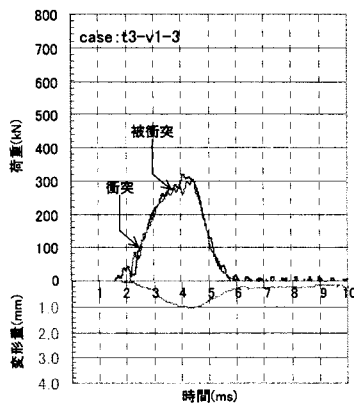
3.2 空気浮上重錘衝突実験

計測データの信頼性を検証するため, ①力積～運動

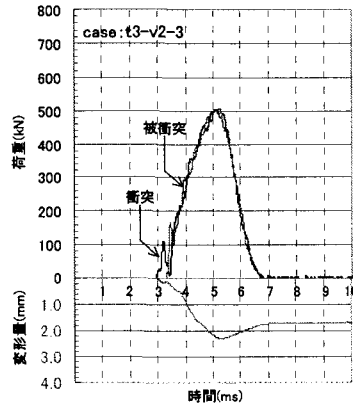
量関係, ②エネルギー収支関係の成立状況の確認を考察する.

(1) 力積～運動量変化関係

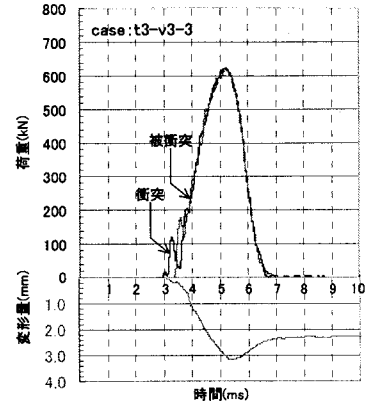
衝突による物体の運動量の変化量は衝突時に物体が受けた力積に等しくなければならない. 図-8 に被衝突重錘の荷重～時間関係から得られる力積および衝突後の被衝突重錘速度から得られる運動量変化関係を示す. いずれの場合も誤差が 1 割以内で力積保存が成立している. これより, 被衝突重錘の衝突前後の速度, 衝突



(a) $V_0 \div 1.0\text{m/s}$

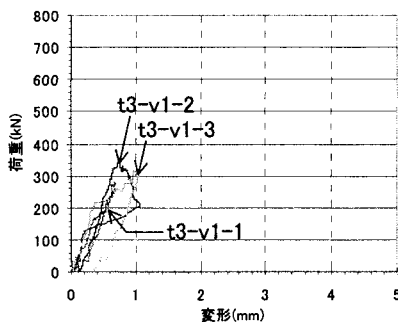


(b) $V_0 \div 2.0\text{m/s}$

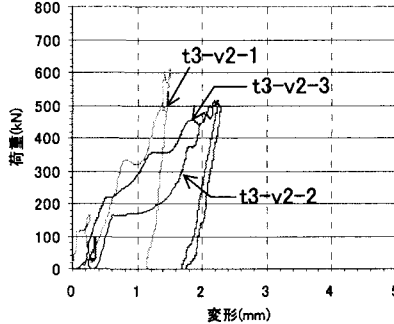


(c) $V_0 \div 3.0\text{m/s}$

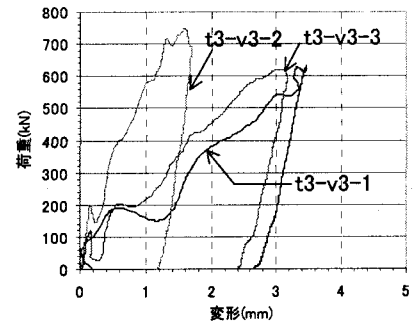
図-11 荷重・変形量～時間関係



(a) $V_0 \div 1.0\text{m/s}$



(b) $V_0 \div 2.0\text{m/s}$



(c) $V_0 \div 3.0\text{m/s}$

図-12 荷重～変形関係(鋼管厚：3.0mm)

／被衝突荷重関係だけから見ると、本実験データは概ね信頼できるものとなる。ただし、後述するようにエネルギー収支から再検定される。

(2) 衝突後の損失運動エネルギー量

図-9 に実験より得られた衝突前後の衝突重錘および被衝突重錘のそれぞれの速度を示す。一般に、運動量は保存されても、物体の運動エネルギーは衝突後に物体内部に残存しているひずみエネルギーや衝突の際に発生した熱エネルギー、音（空気の振動）エネルギーなどに変換されるものと考えられ、実験データからエネルギー保存を証明するのは困難である。そこで、本実験での運動エネルギーの損失量を次式(2)より求め、衝突速度との関係を得た。

$$E_d = \frac{1}{2}m_1v_1^2 - \frac{1}{2}m_1v_1'^2 - \frac{1}{2}m_2v_2'^2 \quad (2)$$

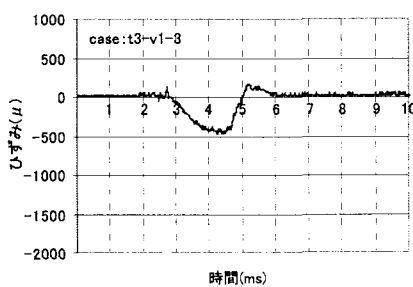
ここで、 E_d ：損失運動エネルギー(kJ)， m_1 ：衝突重錘の質量(kg)， m_2 ：被衝突重錘の質量(kg)， v_1 ：衝突重錘の衝突前速度(m/s)， v_1' ：衝突重錘の衝突後速度(m/s)， v_2' ：被衝突重錘の衝突後速度(m/s)。

図-10 に各鋼管厚における損失運動エネルギー～衝突速度関係を示す。各鋼管厚において、衝突速度の増大に伴って損失運動エネルギーが増大している。この損失運動エネルギーは、重錘間に設置した拘束を受け

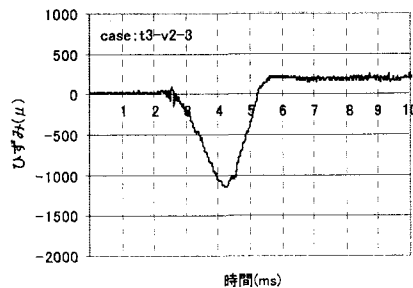
るコンクリートの変形量が弾性域を超えた場合、その大部分を荷重～変形関係に吸収されたと考えられる。また、その他にもエネルギー損失要因に外側鋼管のひずみエネルギーや被衝突重錘のひずみエネルギーが挙げられる。実験結果の信頼性を考察するために、式(3)に示すエネルギー収支が成立すると仮定してエネルギー収支検定を行い、理論値から過度に逸脱するものについて、棄却するものとした。ここでは後のエネルギー収支検定結果と計測された荷重～変形関係の確認のために全ケースを掲載することとする。

$$\begin{aligned} E_d &= E_a \quad (3) \\ &= E_c + E_{sa} + E_{sr} + E_w \\ &= \int P_c d\delta_c + \frac{1}{2}P_{sa}\delta_s + \frac{1}{2}P_{sr}\delta_r + \frac{1}{2}P_c\delta_w \end{aligned}$$

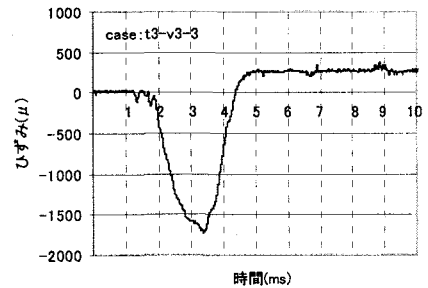
ここで、 E_d ：損失運動エネルギー， E_a ：総吸収エネルギー， E_c ：充填コンクリートの吸収エネルギー(kJ)， E_{sa} ：鋼管の軸ひずみエネルギー(kJ)， E_{sr} ：鋼管の円周方向ひずみエネルギー(kJ)， E_w ：被衝突重錘のひずみエネルギー(kJ)， P_c ：被衝突重錘の荷重(kN)， δ_c ：充填コンクリートの変形量(mm)， P_{sa} ：鋼管に作用する軸方向荷重(kN)， δ_s ：鋼管の軸方向変形量(mm)， P_{sr} ：鋼管に作用する円周方向荷重， δ_r ：鋼管の円周方向変形量， δ_w ：



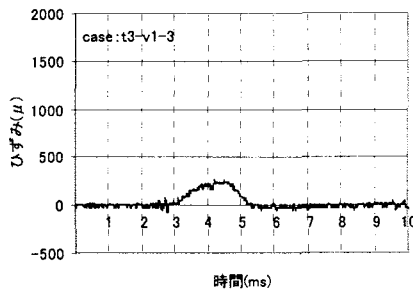
(a) 軸ひずみ($V_0 \div 1.0\text{m/s}$)



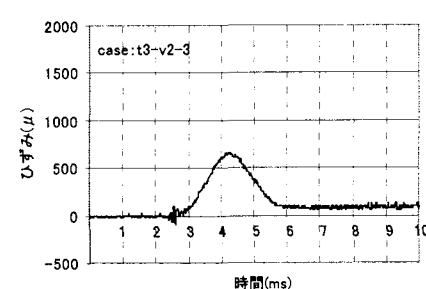
(b) 軸ひずみ($V_0 \div 2.0\text{m/s}$)



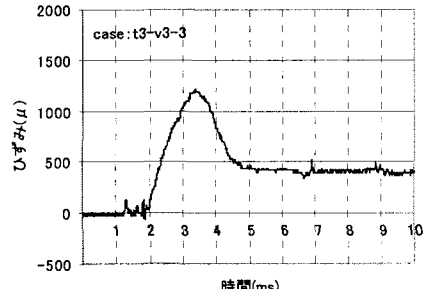
(c) 軸ひずみ($V_0 \div 3.0\text{m/s}$)



(d) 円周方向ひずみ($V_0 \div 1.0\text{m/s}$)

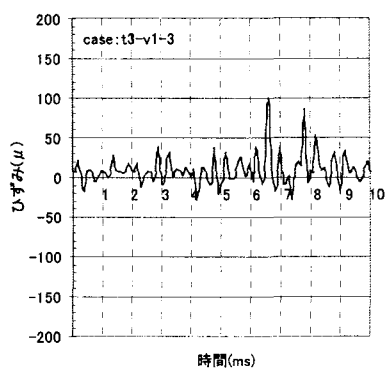


(e) 円周方向ひずみ($V_0 \div 2.0\text{m/s}$)

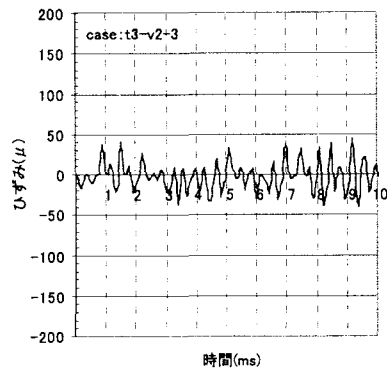


(f) 円周方向ひずみ($V_0 \div 3.0\text{m/s}$)

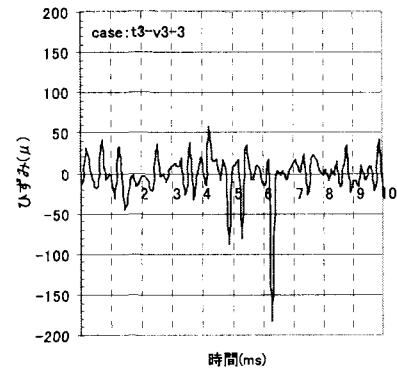
図-13 鋼管ひずみ～時間関係(鋼管厚：3.0mm)



(a) $V_0 \div 1.0\text{m/s}$



(b) $V_0 \div 2.0\text{m/s}$



(c) $V_0 \div 3.0\text{m/s}$

図-14 重錘ひずみ～時間関係(鋼管厚：3.0mm)

被衝突重錘の変形量(mm).

(3) 鋼管内充填コンクリートの荷重～変形量関係

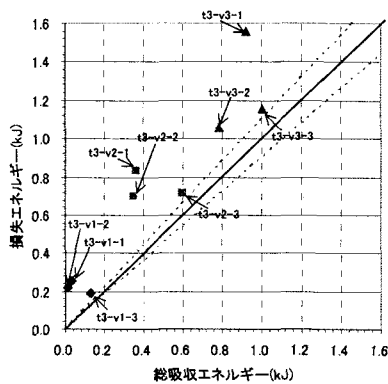
図-11に鋼管厚3mm 供試体の各衝突速度における荷重・変形～時間関係を示す. 図より, 両荷重は衝突面側に衝突荷重発生後 0.5ms 程度まで異なった応答をしているがその後は一致している. これは, この時間内で供試体内での応力波の反射が卓越していることによるものと考えられるが, 変形量にすると 0.3mm 以下の応答に相当するので供試体の吸収エネルギーとしては小さな領域である. 図-12に時間軸を消去した荷重～変形関係を示す. 衝突速度 $V_0 \div 1.0\text{m/s}$ では3体とも弾性的な挙動を示し, あまり多くのエネルギーは吸収されていない. 一方, 衝突速度 $V_0 \div 2.0\text{m/s}$ では変形量データにややばらつきがあるものの, 残留変形量の発生によりエネルギー吸収が生じ, 衝突速度 $V_0 \div 3.0\text{m/s}$ ではさらにエネルギー吸収量が増大している. なお, 他の鋼管厚についても同様の傾向が得られた.

(4) 鋼管および被衝突重錘の弾性エネルギー

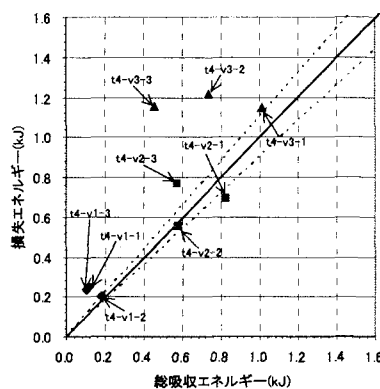
図-13に鋼管厚3mm 供試体における衝突速度ごとの軸方向ひずみ～時間, 円周方向ひずみ～時間関係を示す. 衝突速度の増加に伴い軸方向・円周方向のひずみも増加するが, 衝突速度が最大となる $V_0 \div 3.0\text{m/s}$ においても両ひずみは 1500 μ 程度となっており, これは表-3に示す降伏応力のひずみ($\epsilon_y = 1520 \mu$)より小さいので弾性応答している. また, 図-14は衝突間の被衝突重錘の軸方向ひずみを示すが, 衝突速度に応じて約 $\pm 50 \sim 100 \mu$ 程度のひずみ振動が連続して現れ, 重錘内に弾性ひずみエネルギーが伝播していることがわかる.

これら軸方向および円周方向のひずみから弾性エネルギーを算定し, 以降のエネルギー収支検定の際, 鋼管材料に伝達されたエネルギーに加算する.

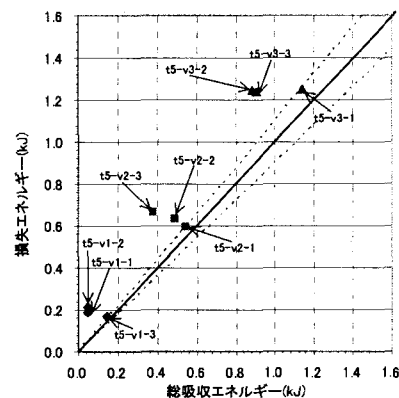
$$E_{sa} = \frac{1}{2} P_{sa} \delta_s \quad (4)$$



(a) 鋼管厚：3.0mm



(b) 鋼管厚：4.0mm



(c) 鋼管厚：5.0mm

図-15 エネルギー収支検定

$$= \frac{1}{2} A_s E_s \varepsilon_s^2$$

ここで、 E_{sa} :鋼管の軸ひずみエネルギー(kJ)， P_{sa} :鋼管に作用する軸方向荷重(kN)， δ_s :鋼管の軸方向変形量， A_s :鋼管断面積(mm²)， E :鋼材の弾性係数(N/mm²)， l_s :供試体長(mm)， ε_s :鋼管の最大圧縮ひずみ(μ)。

$$\begin{aligned} E_{sr} &= \frac{1}{2} P_{sr} \delta_r \\ &= \frac{1}{2} A_s' E \pi D \varepsilon_{sr}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 E_{sr} :鋼管の円周方向のひずみエネルギー(kJ)， P_{sr} :鋼管に作用する円周方向荷重， δ_r :鋼管の円周方向変形量， A_s' :鋼管面積(mm²)， E :鋼材の弾性係数(N/mm²)， D :鋼管直径(mm)， ε_{sr} :鋼管の円周方向最大引張ひずみ(μ)。

$$\begin{aligned} E_w &= \frac{1}{2} P_c \delta_w \\ &= \frac{1}{2} A_w E_l \varepsilon_w^2 \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 E_w :被衝突重錘のひずみエネルギー(kJ)， δ_w :被衝突重錘の変形量(mm)， A_w :被衝突重錘の断面積(mm²)， E :被衝突重錘の弾性係数(N/mm²)， l_w :被衝突重錘の重錘長(mm)， ε_w :被衝突重錘の最大圧縮ひずみ(μ)。

(5) エネルギー収支の検定

図-15に損失運動エネルギーを縦軸に、鋼管内充填コンクリートの吸収エネルギーと鋼管および被衝突重錘の軸方向ひずみから算定される弾性エネルギーの総和を総吸収エネルギーとして横軸にとり、両者の相関関係を示す。実線はエネルギー収支が完全に成立することを意味し、破線は10%誤差範囲を示す。ここでは、破線内に収まればエネルギー収支は成立するものとす

る。図より、鋼管厚3mmの場合、 $V_0 \div 1.0\text{m/s}$ では損失運動エネルギーは3体とも約0.2kJなのに対し、吸収エネルギーは2ケースについてほとんど0であるため、収支成立範囲から大きくずれている。これは図-12(a)の荷重～変形量関係に見られるように $V_0 \div 1.0\text{m/s}$ の2ケースの残留変形量が0となり吸収エネルギーが小さかったことと対応している。しかし、t3-v1-3は概ね10%誤差ライン上にあるのでこれを残し、その他を棄却することにした。

また、衝突速度 $V_0 \div 2.0\text{m/s}$ においても、総吸収エネルギーが損失運動エネルギーよりも小さい傾向にあるものの、t3-v2-3においてはほぼエネルギー収支は成立している。改めて図-12(b)に示すt3-v2-3の荷重～変形量関係をみると、上に凸型の弾性形状であり、良好な履歴が得られている。

さらに衝突速度 $V_0 \div 3.0\text{m/s}$ では、やはり総吸収エネルギーが小さい傾向であるがt3-v3-3はほぼ誤差10%となり、考察の対象として選定した。鋼管厚4mm、5mmについても同様な検定を行い、10%誤差内に収まる実験ケースについて荷重～変形量関係を選出し以後の考察対象とした。

このように多くの棄却データを生じたのは、鋼管の拘束効果により、コンクリートの剛性と強度が増したため変形が小さく、計測が困難なためである。しかし、エネルギー収支がほぼ成立するデータも得られており、以下に考察する選択された実験ケースの変形量データは信頼性が高いものとする。

(6) 荷重～変形関係の静的実験との比較

図-16にエネルギー収支検定により選定された荷重～変形関係を示す。弾性勾配はいずれの衝突速度においても静的の約1.2倍の弾性勾配となっている。ただし、鋼管厚による差はあまり大きくない。また、最大荷重は鋼管厚にかかわらず衝突速度 $V_0 \div 1.0\text{m/s}$ で約300kN、 $V_0 \div 2.0\text{m/s}$ で約500kN、 $V_0 \div 3.0\text{m/s}$ で約600kNとなり、それぞれ静的の同変形量における荷重の約1.1～1.2倍となっている。これら弾性勾配および荷重の増加において鋼管厚の影響がほとんど無いのは、静的実験においても荷重～変形関係に鋼管厚が影響を

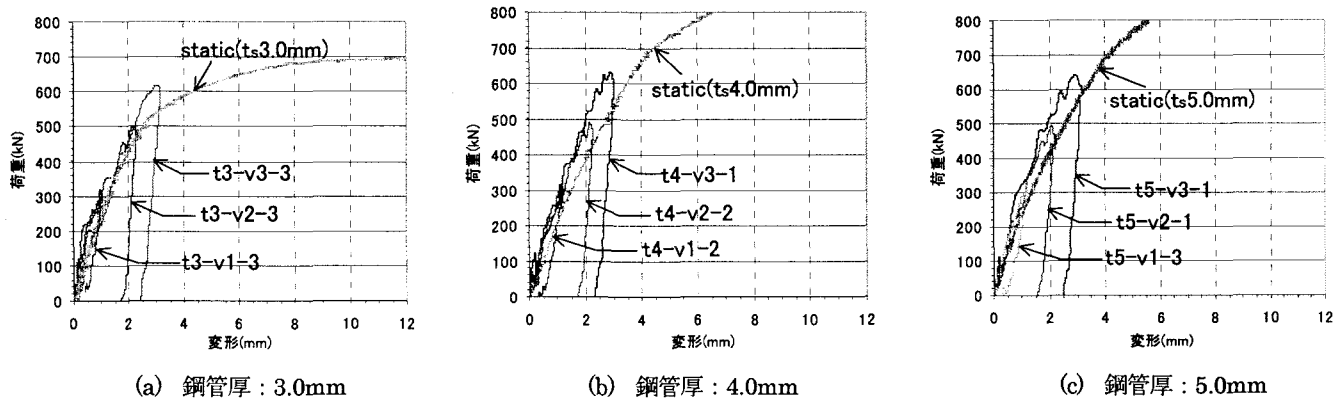


図-16 荷重～変形関係に及ぼす鋼管厚の影響

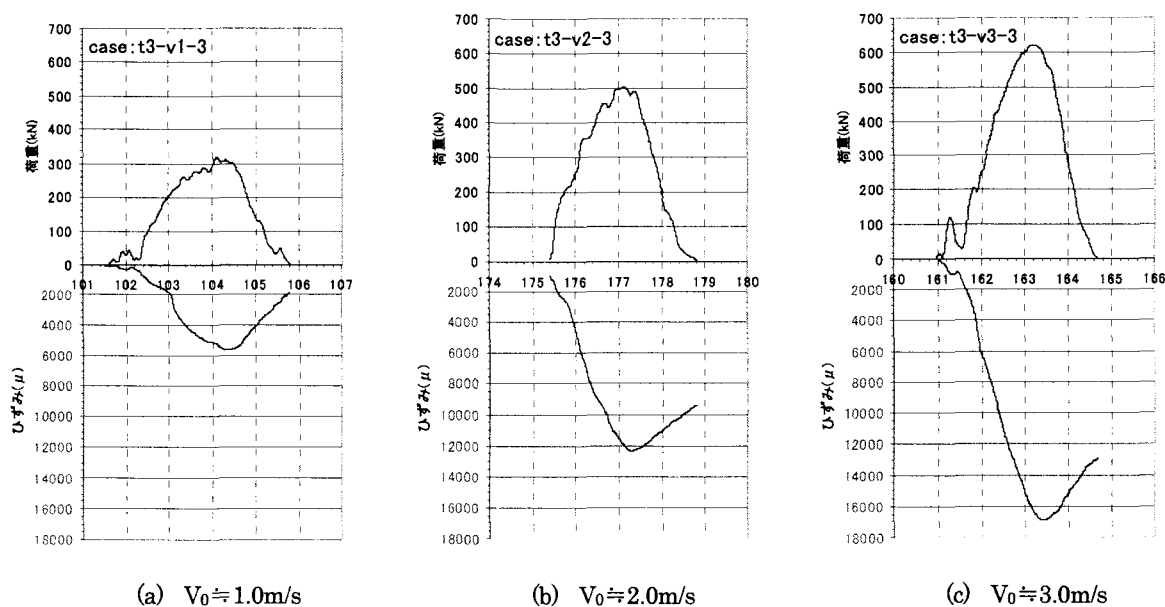


図-17 荷重およびひずみ～時間関係($t=3.0\text{mm}$)

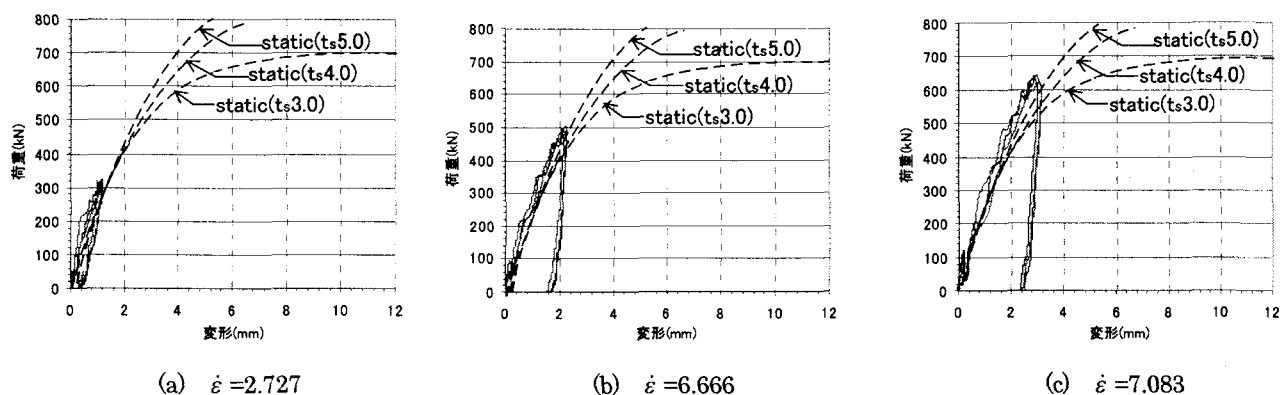


図-18 荷重～変形関係に及ぼすひずみ速度の影響

与え始めるのは変形量 5mm 以降であるため、衝突実験で差が現れなかったものと考えられる。

図-17 に選定された実験ケース(鋼管厚 3mm)における荷重およびひずみの時刻歴応答を示す。図-17 をもとに最大荷重に達する時間までの平均ひずみ速度を求めると、 $V_0 \div 1.0\text{m/s}$, 2.0m/s , 3.0m/s の順に $\dot{\epsilon} = 2.727(1/\text{s})$, $6.666(1/\text{s})$, $7.083(1/\text{s})$ となる。その他の鋼管厚においても各衝突速度で同程度のひずみ速度が得られた。図

-18 には分類されたひずみ速度ごとの空気浮上重錘実験による荷重～変形関係を静的実験と比較して示す。各ひずみ速度における荷重～変形関係は鋼管の鋼管厚にかかわらずほぼ一致しており、静的なものより若干大きな荷重が得られている。

黒木ら^{11,12)}は、CFT 内部のコンクリートの応力～ひずみ関係についてのひずみ速度効果を次式によって推定することを提案している。

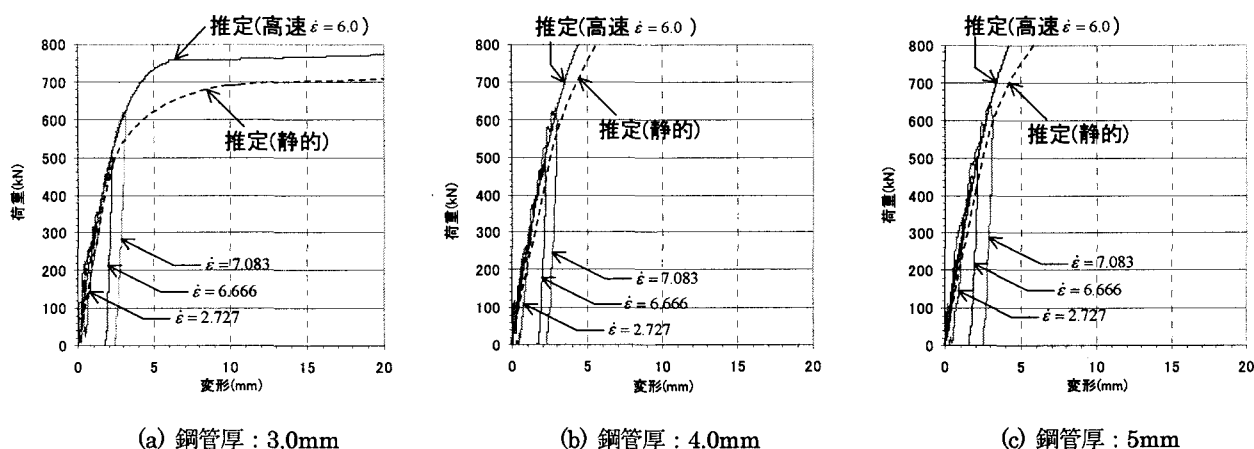


図-19 荷重～変形関係の空気浮上重錘衝突実験と推定値の比較

$$C_s = 1.12 + 0.024 \log(\dot{\epsilon}) \quad (6)$$

ここで、 $C_s = \frac{f'_{dc}}{f'_{sc}}$ 、 C_s ：強度増加率、 $\dot{\epsilon}$ ：ひずみ速度(1/sec)、

f'_{dc} ：充填コンクリートの動的最大圧縮強度、 f'_{sc} ：充填コンクリートの静的最大圧縮強度。

この式より、本実験ではコンクリート強度が約 1.13～1.14 倍増加することになる。図-19 には、黒木らの研究¹²⁾で提案している Popovics 式によって静的実験をフィッティングした後に式(6)による強度増加を考慮した場合の推定値を実験値と比較して示す。これより、本実験におけるひずみ速度効果は黒木らの研究とほぼ一致することがわかる。

4. 結 言

本研究は、被衝突体の境界面が移動する条件下で衝突荷重を受ける鋼管内充填コンクリートのエネルギー伝達について考察したうえで、鋼管内充填コンクリートの荷重～変形関係を実験的に考察したものである。すなわち、損失エネルギーがほとんど生じない空気浮上重錘実験から得られた荷重～変形関係は、静的実験結果と比較して弾性勾配が約 1.2 倍、荷重は約 1.1～1.2 倍となり、ひずみ速度効果は従来の研究^{11),12)}とほぼ同じとなることがわかった。これより、これまでエネルギー伝達の観点から研究報告されてなかったひずみ速度が鋼管内コンクリートの荷重～変形関係におよぼす影響を明らかにすることができた。また、その効果は本実験で与えた衝突エネルギーの範囲では鋼管厚の影響がほとんどないことが認められた。ちなみに、鋼管による拘束が無い場合は、局所的な破壊によって、荷重～変形関係が異なったものとなることが明らかにされており²³⁾、鋼管拘束が荷重～変形関係に及ぼす応力波の影響を緩和する効果があるものと思われる。

謝辞：本研究を行うにあたり JFE 建材株式会社美野輪俊彦氏のご支援を得た。ここに記して謝辞とする。

参考文献

- 1) Richart F.E. : A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses, Bul.185, University of Illinois, 1928.
- 2) 畑中重光, 服部宏己, 近藤洋右, 谷川恭雄 : 3 軸圧縮下の普通・高強度コンクリートの応力～ひずみモデル, コンクリート工学年次論文報告集, 13-2, pp.31-36, 1991.
- 3) Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. : Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Proceedings ASCE, Vol.114, No.ST8, Aug.1988.
- 4) 加藤勉 : コンクリート充填鋼管短柱の圧縮強さ, 変形能力(コンクリート充填鋼管柱の耐力, 変形能力の研究, I), 日本建築学会構造系論文報告集, 第 468 号, pp.183～191, 1995.2.
- 5) 佐藤孝典 : 円形断面の充填コンクリート構造におけるコンファインド効果のメカニズムとそのモデル化, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 452 号, pp.149～158, 1993.10.
- 6) 例えばハウジング協会, CFT 構造技術指針・同解説, 1998.6.
- 7) 園田恵一郎 : 土木分野における剛性形状の構造と話題, 鋼構造協会誌, Vol.10, pp.2-14, 1993.
- 8) 中井博, 吉川紀 : コンクリートを充てんした鋼製橋脚の耐荷性に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 344 号/I-1, pp.195-204, 1984.4.
- 9) 上林勝敏, 藤掛一典, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤 : 高ひずみ速度・三軸圧縮応力下におけるコンクリートの動的軟化特性とそのモデル化, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.135-148, 2001.2.
- 10) 上林勝敏, 藤掛一典, 大野友則, 彦坂熙 : 三軸圧縮応力下のコンクリート軸方向および横方向軟化特性を考慮した動的鋼製モデル, 土木学会論文集, No.725/V-58, pp.43-55, 2003.2.
- 11) 黒木勇人, 太田貞次, 香月智, 石川信隆 : 鋼管内に充填されたコンクリートの高速圧縮強度実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol21, No2,

- pp.589-594, 1999.
- 12) 香月智, 黒木勇人, 石川信隆, 太田貞次: 高速載荷を受けるコンクリート充填鋼管はりの動的弾塑性挙動に関する一考察, 土木学会論文集 No.696/I-58, pp.61-76, 2002.1.
 - 13) 南出賢司, 温泉重司, 今野久志, 岸徳光: 鋼・コンクリート合成の衝撃耐荷性状, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, I-A329, pp.1-2, 2002.9.
 - 14) 伊藤一雄, 石川信隆, 香月智, 鈴木宏: コンクリート充填鋼管はりの衝撃限界吸収エネルギーに関する解析的考察, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.1553-1563, 1992.3.
 - 15) 伊藤一雄, 石川信隆, 川嶋幾夫, 鈴木宏: モルタル充填鋼管はりの衝撃限界吸収エネルギーに関する実験的考察, 構造工学論文集, Vol37A, pp.1581-1589, 1991.3.
 - 16) 白石博文, 梶田幸秀, 香月智, 石川信隆, 松村和樹: 損傷を受けたコンクリート充填鋼管の曲げじん性推定法, 構造工学論文集, Vol49A, pp.1259-1266, 2003.3.
 - 17) 白石博文, 梶田幸秀, 香月智, 石川信隆, 松村和樹, 嶋丈示: 礫衝突による損傷を受けたコンクリート充填鋼管の残存耐力に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.85-95, 2003.7.
 - 18) 土木学会構造工学委員会: 構造工学シリーズ 6 建造物の衝撃挙動と設計法, pp.59-61, 平成 6 年 1 月.
 - 19) 梶田幸秀, 北原武嗣, 西本安志, 香月智: エアーフローティング装置を用いたゴム製緩衝材の桁間衝突実験, 土木学会地震工学論文集, No.316, pp.1-8, 2003.12.
 - 20) 藤掛一典, 篠崎敬一, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: 急速一軸圧縮載荷を受けるコンクリートのポストピーク挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.627/V-44, pp.37-54, 1999.8.
 - 21) H.K.Sen : Triaxial Effects in Concrete-Filled Tubular Steel Columns, Ph.D., Thesis University of London, 1969.
 - 22) N.J.Gardner : Triaxial Behavior of Concrete, ACI Journal, Feb.1969.
 - 23) 白石博文, 角田正昭, 香月智: 空気浮上重錘衝突実験装置によるコンクリート供試体の圧縮破壊実験, 土木学会論文集(投稿中).

(2004 年 9 月 17 日受付)