

(19) 剛体ばねモデルによる硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリート 合成はり部材の衝撃応答解析

㈱宮地鐵工所 技術開発課 ○太田貞次 防衛大学校 土木工学科 山本恭嗣
 防衛大学校 土木工学科 園田佳巨 防衛大学校 土木工学科 石川信隆

1. 緒言

近年、死荷重の軽減、施工の簡易性等の観点から、部材の引張域断面をコンクリートから発泡性硬質ウレタンに置き換えた鋼・コンクリート合成型枠橋等の開発研究¹⁾が進められており、既に実橋へも適用されている。このウレタンを充填した合成はり部材（以下、UCはり部材という）は、はりの下面が鋼板で覆われているため、コンクリートの裏面剥離が防止されており、ロックシェッドの構成部材として使用できるのではないかと期待がもたれている。そのため、著者らは先に衝撃載荷実験^{2)~5)}を行い、その耐衝撃性について検討した結果、コンクリートとH型鋼と硬質ウレタンとを合成したUCはり部材（図-1のEタイプ）が軽量でかつ耐衝撃性に優れていることが明らかとなった。そこで本研究は、このUCはり部材（図-1のEタイプ）および静的曲げ耐力の等しいRCはり部材（図-1のAタイプ）に対する衝撃応答解析を試み、その解析法の妥当性と有用性について検討したものである。すなわち、合成部材であるUCはり部材（Eタイプ）とRCはり部材（Aタイプ）に対する、多層化した剛体ばねモデルを用いた衝撃応答解析手法の開発を行ったものである。

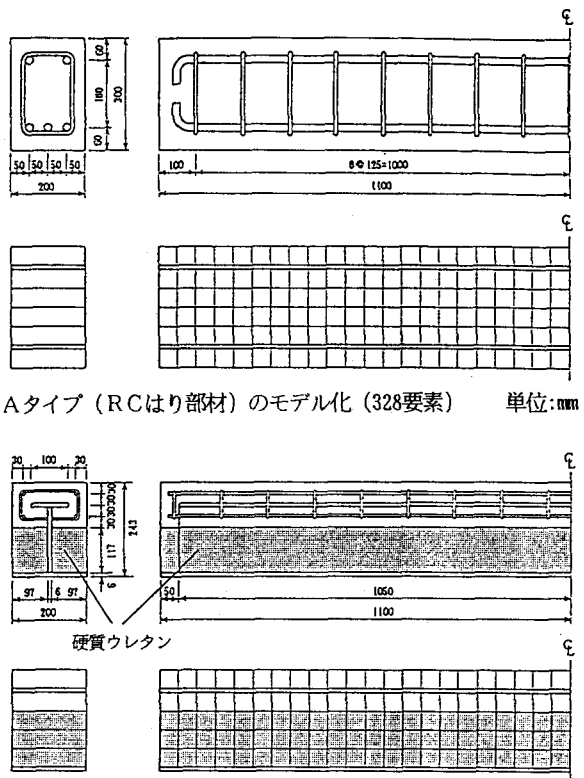
2. 剛体ばねモデルを用いた衝撃応答解析

2.1 解析手法の概要

(1) モデル化

RCはり部材であるAタイプおよび耐衝撃性に優れたUCはり部材であるEタイプを、図-1に示すようにそれぞれ多層化したブロック要素に分割した。ここで、各供試体の材料諸元を表-1に示す。また、その隣接する要素*i*、*j*間が鉛直方向の軸ばね*K_n*と接線方向のせん断ばね*K_s*で連結されているものとして、図-2のようなモデル化を行った。ここで、*K_n*、*K_s*は次式のように表されるものとする。また、本解析においては局部ばね定数についても式(1)により求めることとした。

$$K_n = E \cdot A / l \quad (1)$$



Aタイプ（RCはり部材）のモデル化（328要素） 単位:mm

Eタイプ（UCはり部材）のモデル化（287要素） 単位:mm

図-1 各はり部材のモデル化

$$K_s = G \cdot A / \ell \quad \left(G = \frac{E}{2(1+\nu)} \right)$$

ここに、A:境界面の面積、 ℓ :重心間距離、
E:弾性係数、 ν :ポアソン比、
G:せん断弾性係数。

(2) 基本式

図-3に示すように、隣接する2要素i、jのみで考えた場合、その位置関係によって軸方向およびせん断方向の相対変位増分が次式によって求められる。

$$\Delta U_n = (\Delta x_i - \Delta x_j) \cos \theta_{ij} + (\Delta y_i - \Delta y_j) \sin \theta_{ij} \quad (2)$$

$$\Delta U_s = -(\Delta x_i - \Delta x_j) \sin \theta_{ij} + (\Delta y_i - \Delta y_j) \cos \theta_{ij}$$

次に、i、j要素間の作用力は式(1)のばね定数 K_n 、 K_s を用いて次式のように表される。

$$\Delta N = K_n \cdot \Delta U_n \quad (3)$$

$$\Delta S = K_s \cdot \Delta U_s$$

したがって、i要素に加わるX軸方向およびY軸方向の作用力を次式のように求めることができる。

$$F_{xi} = -N_{ij} \cos \theta_{ij} + S_{ij} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta_{ij} \right) \\ = -N_{ij} \cos \theta_{ij} + S_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (4)$$

$$F_{yi} = -N_{ij} \sin \theta_{ij} - S_{ij} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_{ij} \right) \\ = -N_{ij} \sin \theta_{ij} - S_{ij} \cos \theta_{ij}$$

ここに、j:i要素と隣接している要素番号、

θ_{ij} :i、j要素間の軸方向に対する角度。

以上の解析手法を、各要素について隣接する全要素との作用合力を求めたうえで、図-4に示すフローチャートにしたがって、各要素の重心加速度を求め、次の時刻における速度・変位の計算を行う。

(3) ばね定数の決定法

本研究では、硬質ウレタンを充填した合成構造部材を対象としているため、異なる材料間(コンクリート、鋼材、硬質ウレタン)に設定するばね定数の決定法が問題となってくる。そこで、以下のような考え方に基づくものとした。すなわち、外力Pが作用したときの異種要素間の伸びをそれぞれ $\ell_1 = \varepsilon_1 L_1$ 、 $\ell_2 = \varepsilon_2 L_2$ と置くと全体の伸びは、次式のようになる。

$$L = \ell_1 + \ell_2 = \frac{P}{K} \left(\frac{L_1}{E_1} + \frac{L_2}{E_2} \right) \quad (5)$$

したがって、異種要素間の換算ばね定数Kは、次式

表-1 材料諸元

TYPE	引張鉄筋	圧縮鉄筋	その他
A	D22×3	D19×2	スタースラップ間隔 125mm スタースラップ幅 8mm 圧縮鉄筋量は引張鉄筋量の約1/2 コンクリート圧縮強度 300kgf/cm ² 鋼材の規格 S440
E	発泡性硬質ウレタン充填 片型アルファエポキシ(8mm)		ウレタンの圧縮強度 2.2kgf/cm ² ウレタンの比重 0.03tf/m ³

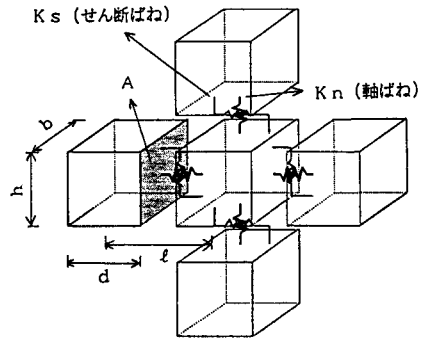


図-2 i要素に隣接する要素と各ばね(K_n , K_s)との関係

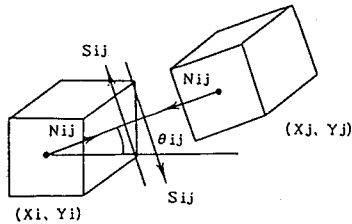


図-3 要素間の作用力

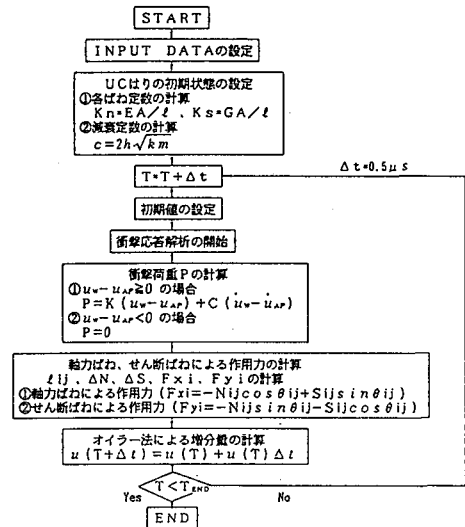


図-4 衝撃応答解析フローチャート

のようになる。

$$K = \frac{AE_1E_2}{E_1L_2 + E_2L_1} \quad (6)$$

また、重心位置からの距離として考えた場合には、
 $L_1 = 2h_1$ 、 $L_2 = 2h_2$ とおくと求めるばね定数

Kは次式のように表すことができる。

$$K = \frac{AE_1E_2}{2(E_1h_2 + E_2h_1)} \quad (7)$$

(4) 破壊の判定条件

各はり要素間に設定した換算ばね (K_n :軸力ばね、 K_s :せん断ばね) について、その降伏判定基準をEタイプの上フランジ部分を例にとって説明する。まず、上フランジ部分(コンクリートと鋼材が混在する部分)は、各材料の変形が進展して行く過程において、最初にある材料が降伏するまでは、以下に誘導するばね (K_n 、 K_s) で外力に抵抗するものとした。変形条件として、各材料の伸びは皆等しくなるので、 σ_c 、 E_c をコンクリートの応力とヤング係数、 σ_s 、 E_s を鋼材の応力とヤング係数、また各材料のひずみを ϵ 、コンクリート部分面積を A_c 、鋼材部分面積を A_s とすれば、外力Pと内力の関係は、次式のように表される。

$$P = 2\sigma_c A_c + \sigma_s A_s = 2\epsilon \sigma_c A_c + \epsilon \sigma_s A_s = \epsilon \left(2A_c \frac{E_s}{E_c} + A_s \right) E_c \quad (8)$$

したがって、上フランジ部分全体の伸び Δ は次式のようになる。

$$\Delta = \epsilon L = \frac{PL}{E_c} = \frac{PL}{\left(2A_c \frac{E_s}{E_c} + A_s \right) E_c} \quad (9)$$

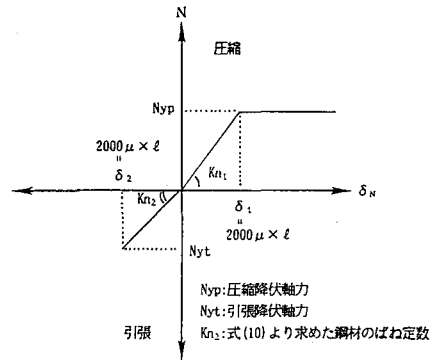
したがって、上フランジ部分の軸ばね定数 K_{n1} (圧縮側) K_{n2} (引張側) は次式のように表すことができる。

$$K_{n1} = \frac{P}{\Delta} = \frac{1}{L} \left(2A_c \frac{E_s}{E_c} + A_s \right) E_c \quad (10a)$$

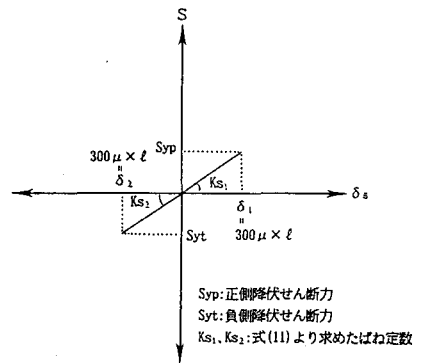
$$K_{n2} = \frac{1}{L} \left(0 + \frac{E_s}{E_c} A_s \right) E_c \quad (10b)$$

また、上フランジ部分のせん断ばね K_{s1} (正側)、 K_{s2} (負側) も以下のようになる。

$$K_{s1} = K_{s2} = \frac{1}{L} \left(2A_c \frac{G_s}{G_c} + A_s \right) G_c \quad (11)$$



(a) 軸力ばね



(b) せん断ばね

図-5 コンクリートと鋼材が混在する場合の降伏判定

表-2 落錘式衝撃実験・実験ケース

応答レベル	多	入力エネルギー			出力データ	
		W	V	E	荷重 tf	上変位 mm
弾性域	A	150	2	3.1	16~21	2~3
	D				12~13	3~5
	E				13~15	2~4
塑性域(1)	A	150	4	12.2	35~39	5~7
	D				27~31	8~10
	E				32~34	6~8
塑性域(2)	A	150	6	27.6	45~60	10~12
	D				30~40	1.8~2.5
	E				45~55	10~20
塑性域(3)	A	400	6	73.5	70~95	-----
	D				35~45	-----
	E				50~60	-----
塑性域(4)	A	400	8	130.6	70~100	35~45
	D				40~60	-----
	E				50~70	50~60

W: 重錘重量(kgf) V: 衝突速度(m/s) E: 重錘エネルギー(tf·cm)

表-3 インプットデータ

ヤング率	コンクリート	3.0 × 10 ⁵ kgf/cm ²
	ウレタン	5.0 × 10 kgf/cm ²
	鋼材	2.1 × 10 ⁶ kgf/cm ²
引張限界		0.002
圧縮限界		0.002
せん断限界		0.0003
減衰定数		0.1
局部ばね定数		1.85 × 10 ⁵
時間増分 Δt		0.5 μs

同様に、ウレタンと鋼材が混在する部分の軸ばね定数 Kn_2 は、ウレタン断面に発生する内力を $A_U \sigma_U$ 、ヤング係数を E_U として、次式のように表される。

$$Kn_2 = \frac{1}{L} \left(2A_U + \frac{E_S}{E_U} A_S \right) E_U \quad (12)$$

次に、圧縮については $\delta = \delta_1$ においてコンクリートが先に圧縮し、じ後は鋼材のみで外力に抵抗するものとして考え、引張については当初からコンクリートの引張応力を0として鋼材のみで抵抗するものとした。また、コンクリート、鋼材ともそのひずみ限界を 2000μ として計算を行った。

また、せん断ばね定数 K_S の降伏判定についても、式(1)により得られたばね定数を用いて、そのひずみ限界を 300μ として降伏の判定を行った。以上の考え方により、UCはり部材の上フランジ部分を例にとり、異種材料が混在する部分要素における降伏基準の設定を行ったが(図-5参照)、その他の異種材料の混在要素も同様に設定を行った。

2.2 解析結果および考察

比較のための実験結果は、表-2に示す弾性域から塑性域(4)までの5ケースとし、入力エネルギー(重錘の運動エネルギー)を徐々に増した際の各供試体の応答について比較検討したものである。ここでは解析例として、弾性域および塑性域(1)における実験結果と本解析手法による解析結果とを比較検討し、解析手法の妥当性およびUCはり部材の破壊のメカニズムについて検討した。なお、計算に用いたインプットデータを表-3に

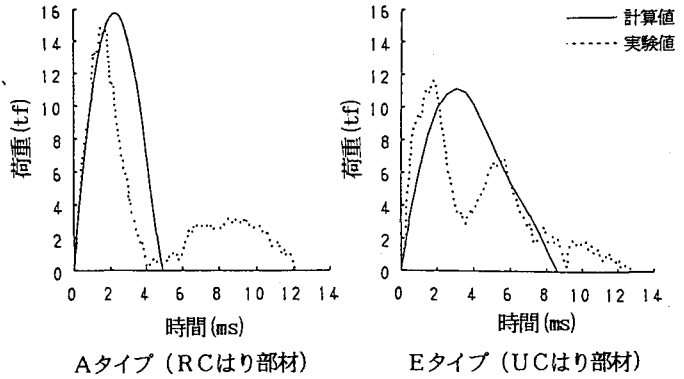


図-6 荷重～時間関係 (弾性域) ($W=150\text{kgf}$, $V=2\text{m/s}$)

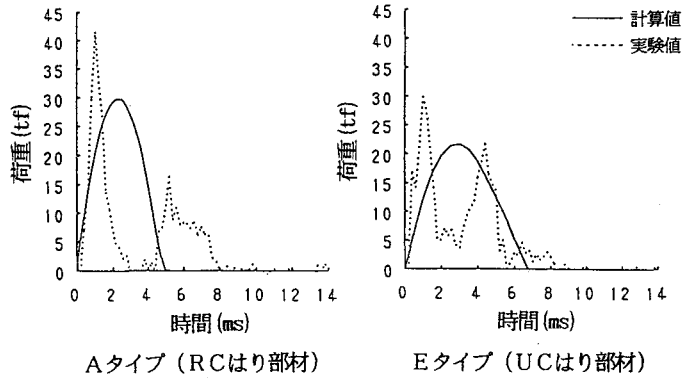


図-7 荷重～時間関係 (塑性域1) ($W=150\text{kgf}$, $V=4\text{m/s}$)

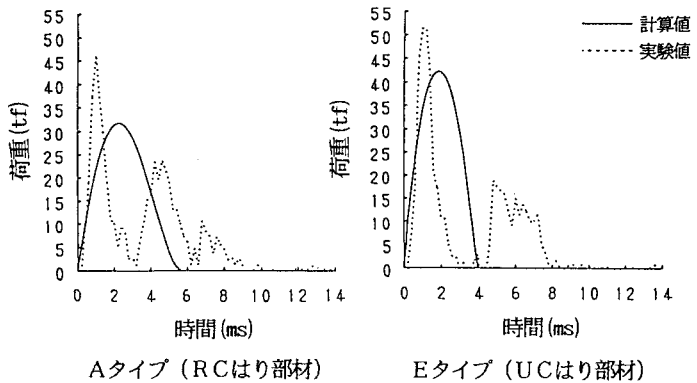


図-8 荷重～時間関係 (塑性域2) ($W=150\text{kgf}$, $V=6\text{m/s}$)

示す。

(1) 荷重～時間関係

図-6、7、8にそれぞれ弾性域、塑性域(1)、塑性域(2)における荷重～時間関係を示した。これより、解析値はA、Eタイプともに各実験ケースを通じて、実験値の定性的傾向を概略把握しているものと考えられる。

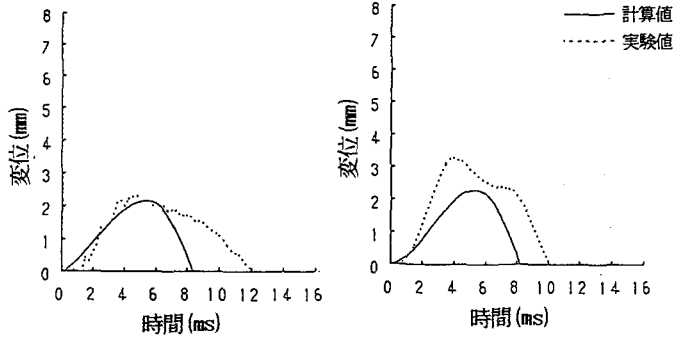
(2) 変位～時間関係

図-9に弾性域における全体変位(衝突点変位)～時間関係、また図-10、11には塑性域(1)および塑性域(2)における全体変位(衝突点変位)～時間関係と局部めり込み(衝突点要素変位と衝突点下縁要素変位との差)～時間関係を併記したものである。これより、解析値は最大発生変位、応答周期ともに実験値を概ねシミュレートしていることが確認された。

また、塑性域の局部めり込みについて着目すると、解析値は実験値に比べ小さくなるものの、同一重錘条件下における全体変位に対する局部めり込みの比が、UCはり部材の方がRCはり部材より大きくなっており、各はり部材の応答の特徴をシミュレートしているものと考えられる。

(3) 破壊状況

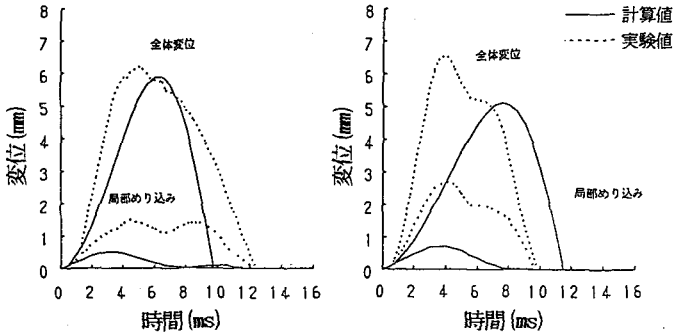
各はり部材の破壊状況について検討するため、塑性域(4)で衝突させた際の時間経過に伴う各バネの降伏状況について検討した。まず、図-12より、RCはり部材では部材下側の引張破壊が先行しているものと考えられるのに対し、UCはり部材であるEタイプは、図-13より衝突点およびその近傍の圧縮破壊が多く発生して行く様子が確認された。これらの結果は、著者ら



Aタイプ (RCはり部材)

Eタイプ (UCはり部材)

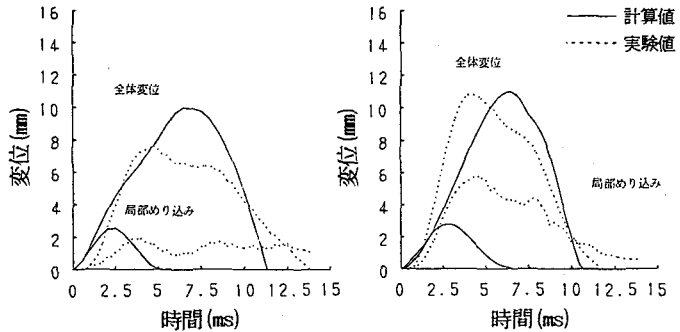
図-9 変位～時間関係(弾性域) (W=150kgf, V=2m/s)



Aタイプ (RCはり部材)

Eタイプ (UCはり部材)

図-10 変位～時間関係(塑性域1) (W=150kgf, V=4m/s)



Aタイプ (RCはり部材)

Eタイプ (UCはり部材)

図-11 変位～時間関係(塑性域2) (W=150kgf, V=6m/s)

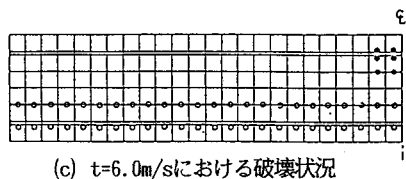
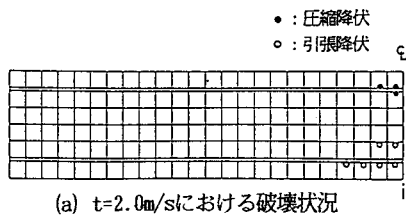


図-12 Aタイプの破壊状況 (塑性域4)
($W=400\text{kgf}$, $V=8\text{m/s}$)

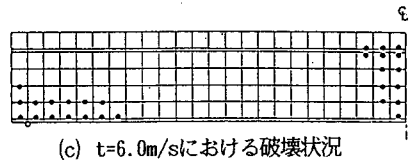
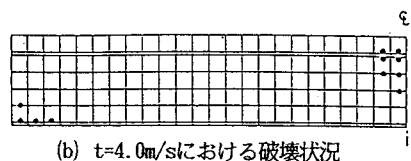
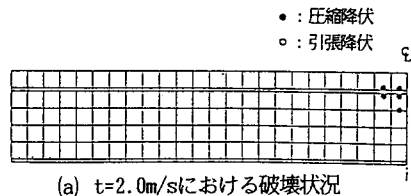


図-13 Eタイプの破壊状況 (塑性域4)
($W=400\text{kgf}$, $V=8\text{m/s}$)

の行った実験結果とほぼ同様な傾向を得ることができ、本解析手法の妥当性が確認された。

3. 結 言

本研究の成果を要約すると以下のとおりである。①多層化した剛体ばねモデルを用いることによって、合成構造部材であるUCはり部材の局所めり込みの状況も含めて、応答の特徴を概略シミュレートできることが確認された。②解析的に各はり部材の破壊の状況をシミュレートした結果、UCはり部材は主に軸ばねの圧縮破壊により、RCはり部材は、部材下側の引張破壊 (曲げ破壊) により破壊が進展して行くものと考えられる。

参考文献

- 1) 太田貞次、山田信一、具志保武、宮坂睦夫：軽量充填材を使用した合成型枠橋の開発、土木学会第45回年次学術講演会概要集、I-246、pp.522~523、1990.9
- 2) 片淵文隆、太田俊昭、石川信隆、千々岩浩巳：軽量充填材を充填した合成構造部材の耐衝撃性に関する研究、土木学会西部支部技術研究発表会講演概要集、pp.92~93、1992.3
- 3) 山本恭嗣、園田佳巨、石川信隆、清水功：硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリート合成梁の衝撃実験に関する一考察、土木学会第19回関東支部技術研究発表会講演概要集、I-15、pp.30~31、1992.3
- 4) 山本恭嗣、園田佳巨、石川信隆、太田俊昭、太田貞次：硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリート合成梁の衝撃吸収エネルギーについて、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集、I-479、pp.1132~1133、1992.3
- 5) Teiji Ohta, Yoshimi Sonoda, Kyoji Yamamoto, Nobutaka Ishikawa: On the Impact Behavior of Composite Beam Filled with Hard Urethane, Proc. of International Symposium on Impact Engineering, Vol. II, pp.634~639、1992.11