

緩衝型コンクリート製プレキャストガードフェンスの模型実験に対する衝撃応答解析

IMPACT RESPONSE ANALYSIS FOR THE MODEL TEST OF THE
SHOCK SOFTENING TYPE PRECAST CONCRETE GUARDFENCE

小林一隆* 奥田将樹** 石川信隆*** 比留間豊****

By Kazutaka KOBAYASHI, Masaki OKUDA, Nobutaka ISHIKAWA and Yutaka HIRUMA

This paper presents an impact response analysis for the model test of the shock softening type precast concrete guardfence (so called PGF) by using the rigid body spring model. Firstly, the impact model tests have been performed by striking the weight which has modelled a car horizontally to the specimen of PGF. Secondly, the impact response analysis has been performed by using the rigid body spring model. As the results, it is confirmed that the displacements of the shock softening type PGF by the impact response analysis are relatively in good agreements with the ones measured by the model test. Therefore, it is found that these results will provide the useful data for the design of PGF.

Key Words: precast concrete guardfence, shock softening type, impact response analysis

1. 緒言

近年、交通量の増加に伴い、車両の路外および対向車線への逸脱による事故が増加している。このような事故に対処するには、剛性の高い防護柵が有効であり、欧米ではコンクリート製プレキャストガードフェンス（以下PGFと呼ぶ）が広く普及している¹⁾。一般に、ガードフェンスは固定型、緩衝型（非固定型）および半固定型と呼ばれるタイプがある。固定型が基礎コンクリートとアンカーで一体化し、車両の衝突に対してフェンスの移動を完全に制御したタイプであるのに対し、緩衝型は、フェンスが自由に移動できる構造にしておき、衝突した車両と共に移動することにより、衝撃力を和らげようとするタイプである。また、半固定型とは、フェンスと基礎とをボルトで固定せず、土中に埋め込むことにより、土圧によって移動量を制御するタイプである。このようなフェンスについては、海外において多くの施工実績が報告されているが、国内ではまだ基準等が確立されておらず、実験や試験施工の段階である。プレキャスト・コンクリート製防護柵の実車衝突実験において²⁾、固定型PGFおよび緩衝型PGFは、いずれもガードフェンスとして要求される性能を十分満足していることが確認された。また、同時に緩衝型PGFは、最終移動量が大きく、使用条件に制限を受けることも確認された。つまり、許容移動余裕幅の小さい中央分離帯では、移動したPGF

*	日本サミコン㈱技術部研究開発課	(〒102 東京都千代田区九段北4-1-14)
**	防衛大学校理工学研究科学生	(〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
***	工博 防衛大学校教授 土木工学科	(同 上)
****	プレキャストガードフェンス協会技術顧問	(〒100-88 東京都千代田区大手町1-4-2)

Fが対向車線を侵す可能性があることが明確になった。この結果を踏まえて、PGF協会では、緩衝型の移動量の制御を目的として、1/5モデル実験を平成4年に行った。しかし、PGFと車両の衝突を理論的に解析する手法がなかったために、緩衝型PGFの移動量の設定にあたっては、実験値から推定するしかなかった。

そこで本研究では、まず1/5モデルの緩衝型PGFに対する衝突実験の概要を説明し、次にフェンスと車両の衝突挙動をシミュレートするための衝撃応答解析を剛体ばねモデルを用いて行うものである。すなわち、解析においては、曲げばねと軸力ばねを考慮した一次元剛体ばねモデルに対する基本式を導き、車両による発生衝撃力（加速度）を算出するとともに、PGFの移動量および加速度をも算定できるような衝撃応答解析プログラムを開発した。これを用いて、緩衝型に対する模型実験をシミュレートして本法の妥当性を検討するとともに、半固定型に対して本法の応用性を試みたものである。

2. 実験の概要

(1) 供試体

PGF 1 個の模型供試体の寸法は、図-1 に示すように実物の1/5モデルで、高さ20cm、上幅5cm、下幅12cm、長さ1mである。PGF 同志の組立は、図-2 に示すように各供試体間を、φ5.2mmのPC鋼線を用いて横締めを行い脚部は連結金具で連結させた。次に、対象とする車両は、普通乗用車と大型貨物車の2種類としそれぞれの重量を2tfと20tfに設定し、重量を1/5³にスケールダウンした。すなわち、模型実験で使用した車両重量は次のとおりである。

$W_c(\text{普通乗用車}) = 2,000 \times 1 / 5^3 = 16 \text{ kg f}$

$W_c(\text{大型貨物車}) = 20,000 \times 1 / 5^3 = 160 \text{ kg f}$

ここで、車両のモデルとしては、写真-1 に示すようにボディの緩衝効果をモデル化したハニカムと車体部分のコンクリートを充填した鋼製枠によって構成した。なお、本実験については、重量のみ1/5³モデルとしたが、これは、実物車両の1/5³の衝撃力をエネルギー的に与えるという意味で、車両の寸法についてはモデル化を行っていない。

(2) 実験装置

実験は、図-3 に示すように振り子式衝撃载荷装置を用いて行った。すなわち、所定の振り高さに車

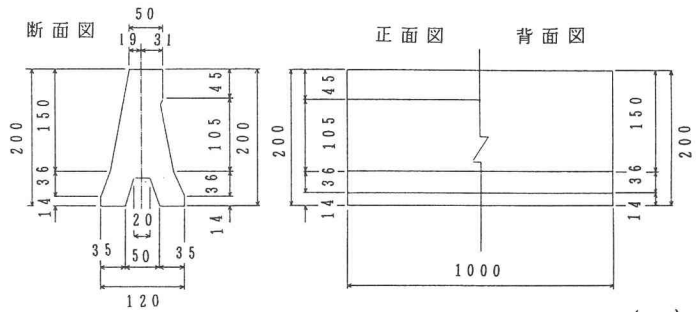


図-1 PGF 模型形状寸法 (mm)

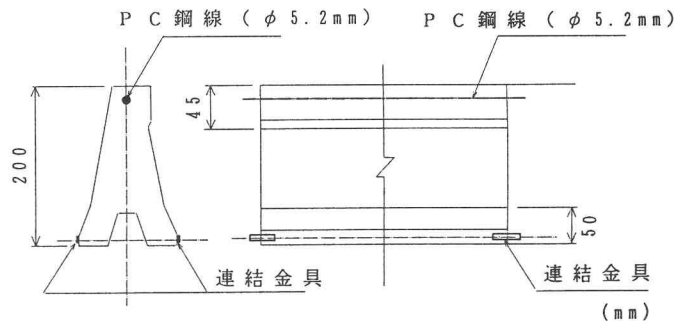


図-2 PGF 組立図 (mm)

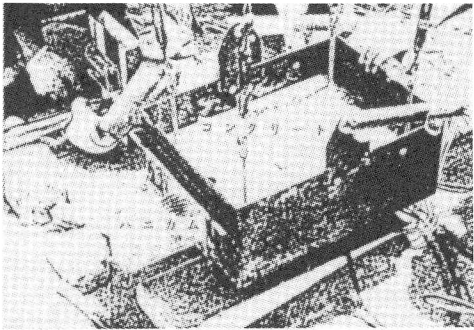


写真-1 モデル化された車両

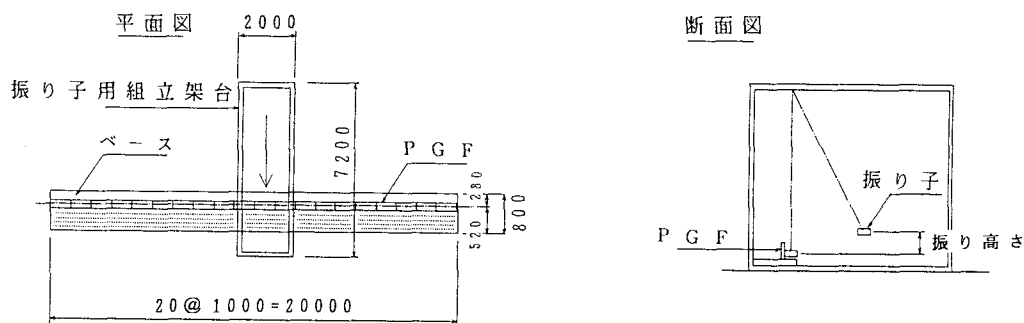


図 - 3 衝撃実験装置

両をモデル化した重錘を設定し、P G F を横一列に20個並べ、図-3の左から11番目のP G Fの上端から10cmの位置（車両のバンパーの平均的高さは、50cm程度であり、これの1/5の10cmをP G Fの高さ20cmから引くと、上端から10cmの位置となる。）に振り子を衝突させ、P G Fの移動量を測定しようとするものである。実験では、P G Fの移動量を制御することを目的として、以下の項目に着目してパラメータを変化させた。

表 - 1 実験条件一覧表

ケースNo.	自動車の種類	速度 (km/h)	P C鋼線の 緊張力	緩衝材の種類	備考
1	大型貨物車	80	3%	なし	
2	大型貨物車	80	30%	なし	
3	大型貨物車	80	70%	なし	
4	大型貨物車	80	3%	イタリー方式	
5	大型貨物車	80	3%	ストッパー方式	
6	大型貨物車	80	3%	砂	ストッパー有
7	大型貨物車	80	3%	軟アスモル	"
8	大型貨物車	80	3%	硬アスモル	"
9	普通乗用車	80	3%	軟アスモル	"
10	普通乗用車	80	3%	硬アスモル	"

- ① P C鋼線の緊張力の大小が移動量に与える影響
- ② P G Fの背面に敷く緩衝材（砂、アスモル等）が移動量に与える影響
- ③ P G Fの背面にストッパー鉄板（移動抑制板）を設置することによる影響

よって、実験条件は、表-1のようにまずP C鋼線の緊張力を許容引張応力度 $130.5\text{kg/mm}^2 \times 21.2\text{mm}^2 = 2767\text{kg}$ の3%、30%、70%の3種類に変化させた。次に、緩衝方法として

- ① イタリー方式 ② ストッパー方式 ③ 緩衝材を敷く方法、の3種類を考えた。その内容は以下のとおりである。

1) イタリー方式（図-4参照）：これは、イタリアで主に採用されている方法で、全ての部材の両端に定着用グリップを埋め込み、P C鋼線の緊張時に部材毎に定着する方法である。すなわち、P C鋼材の伸びを

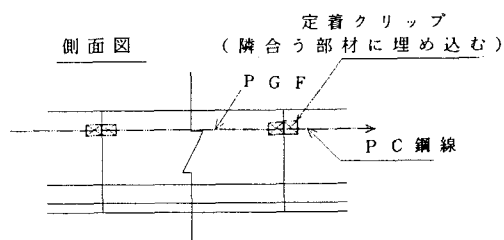


図 - 4 イタリー方式

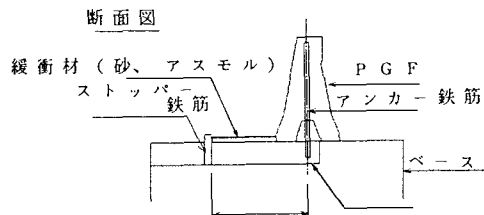


図 - 5 緩衝材方式

部材間の部分に限定することによって、P C 鋼線の伸びを小さくすることにより、P G F の移動量を抑制しようとする方法である。

2) ストッパー方式(図-5で緩衝材がない場合)：これは、各部材間に挿入されたアンカー鉄筋と、ベースにあらかじめ掘られたガイド溝に設置したストッパー用鉄板が、接触することによって、P G F の移動を制御しようという方法である。移動量はストッパーを任意の位置に設置することによって、調整が可能であると思われるが、今回は3m分離帯を対象として、移動量を24cmと設定した。 $((3-0.6(PGF下幅))/2 \times 1/5=0.24m)$

3) 緩衝材方式：図-5でストッパー鉄筋を設置するとともに、砂、軟アスモル、硬アスモルなどの緩衝材を敷く方法で、緩衝材は前述のストッパー鉄板とP G F の隙間に、充填させるものとした。今回用いたアスモルの安定度は、硬軟それぞれ402kgf、304kgfであった。また敷き均し厚は15mmとした。

(3) 車両の衝突速度

実車実験では、衝突速度を80km/hで行ったので、模型実験でもこれに準ずるものとした。つまり、衝突速度とは、車両が 20° の入射角度で衝突する瞬間の速度であり、模型実験ではP G F に対して直角方向の成分で再現するものとした。ここで、速度のスケールファクターとしては、次のように車両の運動エネルギーがすべてP G F の剛体運動による吸収エネルギーに変換されるものと考え、 $1/\sqrt{S}$ (S ：長さのスケールファクター)を採用した。その根拠を以下に述べる。

いま、実物実験および模型実験における車両側の運動エネルギーをそれぞれ

$$E_0 = 1/2 \times m_0 V_0^2, \quad E = 1/2 \times m V^2 \quad \text{とする。}$$

ただし、 m_0 、 m ：実物車両および模型車両の質量

V_0 、 V ：実物車両および模型車両の速度

次に、実物実験および模型実験におけるP G F 側の移動による吸収エネルギーをそれぞれ U_0 、 U とすると次式で表される。

$$U_0 = F_0 \delta_0, \quad U = F \delta$$

ただし、 F_0 、 F ：実物および模型P G F の摩擦力

δ_0 、 δ ：実物および模型P G F の移動量

ここで、 $F_0 = m_0 g_0 \mu_0$ 、 $F = m g \mu$ で表され、重力加速度 $g = g_0$ 、摩擦係数 $\mu = \mu_0$ であるが、質量は体積に依存するので $m = 1/S^3 \times m_0$ となる。また、移動量 $\delta = 1/S \times \delta_0$ となるので結局吸収エネルギー U は次式となる。

$$U = (1/S^3) m_0 g_0 \mu_0 (1/S) \delta_0 = (1/S^4) U_0$$

一方、実物の外力エネルギー E_0 はすべて内力エネルギー U_0 に変換されるとすると次式が成立する。

$$U_0 = E_0$$

よって、模型実験における吸収エネルギーは

$$U = 1/S^4 \times U_0 = 1/S^4 \times E_0$$

さらに、模型の外力エネルギー E もすべて内力エネルギー U に変換されるとすると、次式が成立する。

$$U = 1/S^4 \times E_0 = E = 1/2 \times 1/S^3 m_0 V^2$$

ここで、 $E_0 = 1/2 \times m_0 V_0^2$ であるので、結局、模型の速度 V は次式となる。

$$V = (1/\sqrt{S}) V_0$$

以上より、本模型実験でP G F に対し直角に衝突させる車両の衝突速度は、次の値となる。

$$V = (80 \times 10^5 / 3600) \times \sin 20^{\circ} \times 1/\sqrt{5} = 340 \text{ cm/sec}$$

これに相当する振り高さ H は、

$$H = V^2 / 2g \text{ より}$$

$$H = 0.59 \text{ m となる。}$$

(4) 測定項目と測定方法

測定項目と測定方法を表-2に示す。また、測定器具の取付状況を図-6に示す。

(5) 実験結果および考察

実験結果の一覧を表-3に示す。

今回の実験結果より、緩衝型P G Fの移動量の制御について次のようなことが明らかになった。

①No.1で最大移動量が約40cm(実物換算で約2.0m)生じたが、実車実験で最大約1.8m移動したのとはほぼ一致している。

②No.3の横締め用のP C鋼線の緊張力を70%としても、あまり移動量に影響がなかった。逆に70%程度の緊張力を与えた場合、P C鋼線の最大引張応力が 122kg/mm^2 となり、降伏点に近づいた。つまり、大きな緊張力を導入すると、車両衝突時にP C鋼線が切断される危険性があることが確認された。

③No.4のイタリー方式での移動量は33cm(実物換算で約1.66mに相当)もあり、制御効果はさほど期待できないことが判明した。イタリーにおける実験でも移動量は1.62mと報告されており¹⁾、今回の実験結果とよく合致していると思われる。

④No.5のストッパー方式は今回の実験では最も有効な方法で、移動量を任意に調整できることが確認された。今回はアンカー鉄筋とストッパー用鉄板という組み合わせであったが、コンクリートブロック等の他の工法も可能である。

⑤緩衝材を施工した場合、No.6の砂についてはあまり効果がなかった。しかし、

No.7,8のアスモルの場合

はNo.5のストッパーのみの場合よりも移動量は、小さくなった。今回、硬軟2種類を使ったが、移動量は約22cm~13cm(1.09~0.65mに相当)まで変化しており、ある程度の強度を持った材料であれば、任意の移動量にコントロールできることが確認された。

⑥No.8のように移動量が小さくなると、車両の減速加速度(最大19.1g)が大きくなる傾向が確認された。

表-2 測定項目と測定方法一覧表

	測定項目	測定方法	備 考
車	衝突加速度	加速度計	AS-20HB(1軸)、容量20G、株式会社電業製
	衝突速度	加速度計、ビデオカメラ	AS-20HB(1軸)、容量20G、株式会社電業製
両	ハニカムの変位	スケール	
	ハニカムの接触時間	ひずみゲージ	
P G F	変位	大変位計、スケール	DLT-A.B、インダクティブ式、株式会社電業製
	衝突加速度	加速度計	AS-20HB(3軸)、容量20G、株式会社電業製
	P C鋼線の軸力	ひずみゲージ	
	連結金具の軸力	ひずみゲージ	

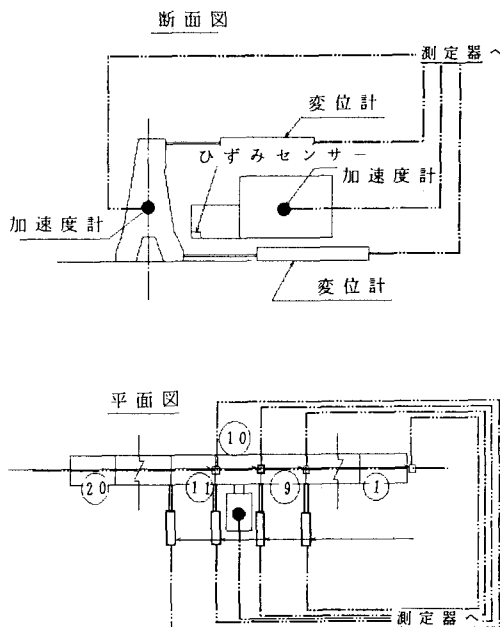


図-6 計測器の取付状況

表-3 実験結果の一覧表

実験No	最大移動量 (cm)		停止移動距離 (cm)		P C鋼線軸力 (kg/mm ²)		車両加速度	
	実験結果	実物換算値	実験結果	実物換算値	最大	残留	最大	50msAV
1	39.66	198.30	38.59	193.00	63.7	23.9	15.9	1.9
2	33.75	168.75	33.22	166.10	49.3	48.9	23.2	2.1
3	35.25	176.25	34.72	173.60	122.0	108.9	19.1	2.1
4	33.27	166.35	30.09	150.45	16.7	3.7	16.5	2.2
5	23.90	119.50	22.04	110.20	16.9	12.4	14.4	2.2
6	24.12	120.60	21.12	105.60	48.6	8.2	21.5	2.6
7	21.74	108.70	17.67	88.35	36.0	9.7	15.6	2.6
8	12.99	64.95	9.12	45.60	40.4	5.5	19.1	4.5
9	0.54	2.70	0.33	1.65	----	----	12.9	9.0
10	1.12	5.60	0.85	4.25	----	----	13.1	8.8

※ 50msAVとは、50ms間の平均加速度を示す

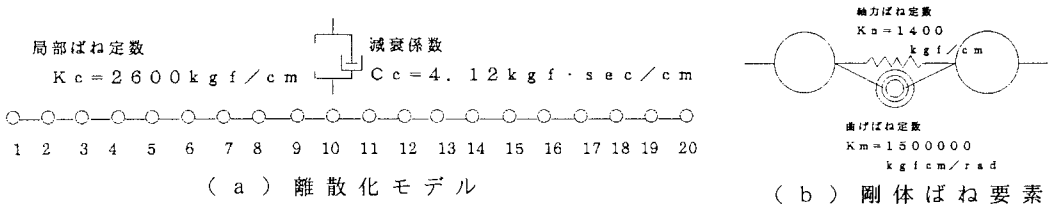
しかし、大型貨物車においては50ms間の平均加速度が1.9g～4.5gの範囲であり、これはアメリカの推奨値である12g（2点シートベルト）に比べ非常に小さい値であった^{3)・4)}。一方、乗用車の場合はその重量がP G Fに対して小さく、フェンスがほとんど移動しないために、逆に車両加速度が50ms平均で9.0gと大きくなっている。

今回の実験で得られた、以上のような結果を基に、緩衝型P G Fの移動制御の方法を若干考察してみる。P G Fにとって、ストッパー（移動抑制板）位置が最大移動量の値であり、この値は中央分離帯の幅や余裕等の要因で決まってくる。ある程度移動量があり、背面緩衝材が柔らかい方が乗員に与える加速度が小さくなるので、この範囲で移動が終結する構造物が理想的と思われる。一方、事故によって移動したP G Fには、原型復旧という問題が発生する。また、繰り返し衝突された場合の安全性も問題になる。つまり、P G Fは使用される環境の諸条件によって、許容移動量を最小に抑える必要がある場合は、P G Fの背面をできるだけ柔らかいもので埋め戻して、瞬間的に衝撃力を吸収するが、移動量は少ない構造にするのが、好ましいと思われる。今回の実験では、No. 8の（ストッパー＋硬アスモル）がその条件に当てはまるが、更にきびしい条件が設定された場合には、土中に基礎部分を埋める構造等が有効であろうと思われる。このような可能性を検証するために、剛体ばねモデルによる理論解析を行うこととした。以下に理論解析の方法と計算結果について述べる。

3. 解析の概要

(1) 解析用モデル

前述したように、解析は剛体ばねモデルを用いて行うものとし、解析用モデルは図－7のように設定した。つまり、P G Fを各要素間に軸力ばねと曲げばねを有する剛体質点の離散化モデルに置換し、車両とP G Fの間は局部ばねと局部ダッシュポットで置き換えるものとした。



図－7 P G Fと車両の解析用モデル

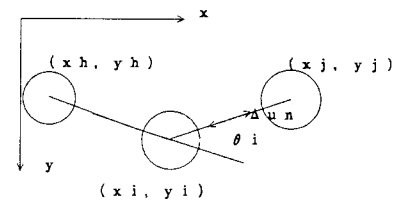
(2) 解析の基本式

図－7のようなモデル化したP G Fに対する主な基本式は次のとおりである。すなわち、図－8のP G Fの変形図を参照して、以下の式が導かれる。

①法線方向の相対変位

$$\Delta u_{ni} = (x_i - x_j) \cos \theta_{ij} + (y_i - y_j) \sin \theta_{ij} \quad \dots (1)$$

$$\begin{aligned} \theta_i = & \tan^{-1} \left((y_i - y_h) / (x_i - x_h) \right) \\ & - \tan^{-1} \left((y_j - y_i) / (x_j - x_i) \right) \quad \dots (2) \end{aligned}$$



図－8 P G Fの変形図

ただし、 Δu_n , θ_i : i質点とj質点との相対変位および回転角

- x_i, y_i : i質点のx座標, y座標
- x_j, y_j : j質点のx座標, y座標
- x_h, y_h : h質点のx座標, y座標

②法線方向の総作用力

$$N_i = N_i(t - \Delta t) + K_n * \Delta u_{ni} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$M_i = K_m * \theta_i \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 N_i 、 M_i ： i 質点に作用する軸力および曲げモーメント

K_n 、 K_m ：軸力ばねおよび曲げばね

③各要素間に作用する合力（ x 、 y 軸について）

$$F_{xi} = -N_i \cos \theta_{ij} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$F_{yi} = -N_i \sin \theta_{ij} - (M_i / L) \cos \theta_{ij} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 F_{xi} 、 F_{yi} ： i 質点に作用する x 方向および y 方向の合力、 L ： i j 要素間の距離

④滑動についての判定

$$F_i(t) = \sqrt{(F_{xi})^2 + (F_{yi})^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$F_i(t) > F_a$ のとき、 PGF は移動を開始する。

ただし、 F_a ：最大静止摩擦係力（ $= W_f * \mu$ ）

W_f ： PGF の重量

μ ：最大静止摩擦係数

⑤ PGF と衝突車両の加速度、速度、移動量の基本式

$$a(t) = F(t) / m_i \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$V(t) = V(t - \Delta t) + a(t) * \Delta t \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$d(t) = d(t - \Delta t) + ((V(t) + V(t - \Delta t)) / 2) * \Delta t \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 $a(t)$ 、 $V(t)$ 、 $d(t)$ 、 $F(t)$ ： t 時刻における加速度、速度、移動量および作用力

m_i ： i 質点の質量

⑥衝突車両によって発生する衝撃力

$$P_x = C_c * (V_{x(CAR)} - V_{x(PGF)}) + K_c * (d_{x(CAR)} - d_{x(PGF)}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$P_y = C_c * (V_{y(CAR)} - V_{y(PGF)}) + K_c * (d_{y(CAR)} - d_{y(PGF)}) \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 P_x 、 P_y ：衝撃力の x 方向および y 方向の成分

$V_{x(CAR)}$ 、 $V_{y(CAR)}$ ：車両の x 方向および y 方向の速度成分

$V_{x(PGF)}$ 、 $V_{y(PGF)}$ ： PGF の x 方向および y 方向の速度成分

$d_{x(CAR)}$ 、 $d_{y(CAR)}$ ：車両の x 方向および y 方向の移動量成分

$d_{x(PGF)}$ 、 $d_{y(PGF)}$ ： PGF の x 方向および y 方向の移動量成分

K_c 、 C_c ：車両の局部ばね定数と局部減衰係数

（３）解析方法

計算は、微小時間の変化を繰り返し加算するオイラー法によるものとした。すなわち、 Δt 間の変化を $t - \Delta t$ の値に加え、それを t の値とし、次の Δt を計算するという操作を最終時間 T まで行った。オイラー法においては、時間の刻みを幾つにするかが、ポイントとなる。今回は 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} 、 10^{-6} 秒について計算を行い、 10^{-5} 秒と 10^{-6} 秒との誤差が小さかったので、計算時間短縮のために 10^{-5} 秒とした。図－９に解法のフローを示す。

（４）インプットデータの決定法

① PGF の軸力ばね定数（ K_n ）

軸力は連結用の PC 鋼材（ $\phi 5.2$ ）を介して各要素間で伝達されるものとし、軸力ばね定数は次の式より算出した。

$$K_n = A_p \cdot E_p / L \cdots \cdots (13)$$

ここに、 K_n : P G Fの軸力ばね定数(kgf/cm)

A_p : P C鋼材の断面積 (cm²)

E_p : P C鋼材の弾性係数 (kgf/cm²)

L : 要素間距離 (cm)

よって、

$$K_n = 0.212 \times 2.0 \times 10^6 / 100 = 4,240 \text{ kgf/cm}$$

② P G Fの曲げばね定数 (K_m)

曲げモーメントは、連結金具を介して各要素間で伝達されるものとし、曲げばね定数を次のような実験から算出した。図-10のように、2個配置した供試体の片方を固定し、他方をジャッキを用いて载荷した際の荷重と変位を測定し、得られたモーメント-回転角曲線からばね定数を定めた。実験は2回行い、解析に用いる値としては、平均値を一次直線で近似した。その結果を図-11に示す。図中の式が今回の解析に用いた値である。

③ せん断ばね定数 (K_s)

せん断力は、各要素間に挿入したせん断キー(丸鋼)を介して伝達される。しかし、今回の実験ではせん断力に対して、十分剛であると思われるので、せん断ばねは無視するものとした。

④ 摩擦係数 (μ)

P G Fと床版との間の摩擦係数は、図-12に示すように、斜めにした床版上のP G Fが滑り始めるときの床版の角度 $\tan \alpha$ を以て決定した。

すなわち、 $\mu = \tan \alpha \cdots (14)$

実験結果より $\mu = 0.5665$ が得られた。

⑤ 車両の局部ばね定数 (K_c)

車両の衝撃吸収能力はハニカムを用いてモデル化した。すなわち、車両とP G F間の局部ばね定数は、圧縮試験機でハニカムの破壊試験を行い、荷重と変位の曲線から算出した。実験結果を図-13に示す。図より明らかなようにハニカムは変位が0.5cmまでは弾性変形するが、それ以上の変位に対しては完全塑性変形を起こす。図中の式が今回の解析に用いた値である。

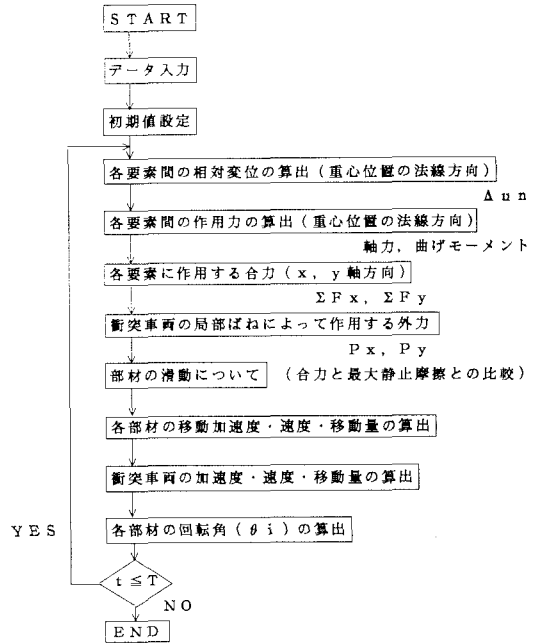


図-9 解析のフロー

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} (\Delta x / 956) \\ \ell &= 500 \\ M &= P \cdot \ell \end{aligned}$$

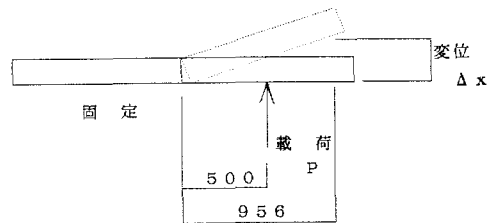


図-10 曲げばね定数決定のための実験

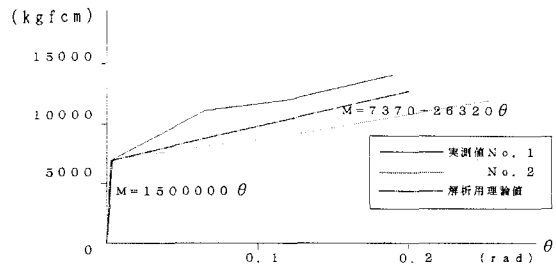


図-11 モーメントと回転角の関係

⑥車両のダッシュポットの減衰係数（Cc）

車両のダッシュポットの係数は、ばね定数を用いて次の式から算出した。

$$Cc = 2h \sqrt{mKc} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ただし、Cc：減衰係数

h = 0.1

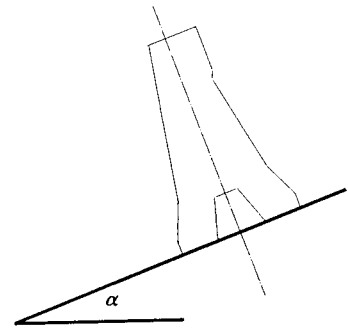
m：車両の質量

Kc：局部ばね定数

よって、

$$Cc = 2 \times 0.1 \times (180/980) \times 2600 = 4.12 \text{ kgf} \cdot \text{sec/cm}$$

図 - 12 摩擦係数決定のための実験



⑦フェンス重量

実物のフェンス重量は3750kgfである。したがって、模型の

PGFの重量は車両と同様に1/5³して

$$W_f = 3750 \times 1/5^3 = 30 \text{ kgf}$$

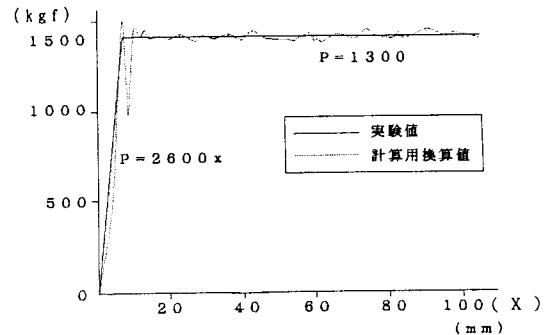


図 - 13 ハニカムの荷重と変位の関係

4. 解析結果と考察

(1) 本法の妥当性の検討

以上のプログラムおよび入力データを用いて、本法の妥当性を検討した結果を以下に述べる。すなわち、今回の計算は、模型実験のケースNo.1をシミュレーションしたものである。図-14に車両がPGFに衝突し、図-14に車両がPGFに衝突した後の最終移動量を示す。これより、計算値は比較的

良好に模型実験値をシミュレートできたと思われる。特に最大移動量は実験値と約95%合っている。しかし、載荷点以外のPGFの移動量は約60%しか合っていない。この原因としては、次のような事項が考えられる。

①曲げおよび軸力ばね定数を、計算や静的実験から一意的に設定したが、現実には動的要因によって複雑に構成されている係数であるため、両者に差が生じていると思われる。

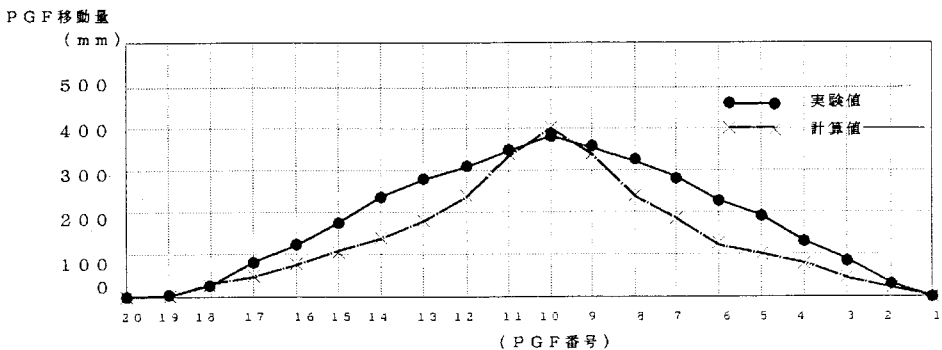


図 - 14 最終移動量に関する実験値と解析値の比較

(W=160kgf、V=340cm/sec)

②せん断ばね定数を今回は無視したが、現実には部材間のせん断キー（凹凸のかみあわせ）のまわりで、ずれ等の現象が発生していると思われる。したがって、せん断ばね定数についても検討する必要がある。
 ③ばね定数や摩擦係数を、静的実験によって求めたにもかかわらず、これを用いることにより実験結果をかなりうまくシミュレートすることができたが、これは衝突速度が比較的遅いことに起因しており、さらに衝突速度が速くなれば、ひずみ速度効果などの動的影響も考慮しなければならないと思われる。

次に、図-15および図-16にそれぞれ車両と衝突点のP G Fの加速度を示す。これらの加速度応答も、高周波成分はうまくシミュレートできていないが、平均的な実験値の曲線を比較的良くシミュレートしていることが認められる。

(2) P G Fの移動量制御に関する検討

上記の解析を基に、P G Fの移動量制御について検討を加える。一般に、P G Fを中央分離帯に設置する場合、車両の衝突時に移動したP G Fは、対向車線を犯さないことが第一条件となる。したがって、移動量はできるだけ小さく設定しておく必要がある。ここで、移動量を制限する手段としては、①曲げ剛性を高める、②P G Fを土中に埋め込む、③連結用P C鋼材によって、横締めプレストレスを導入する等の方法が考えられる。しかし、これらの方法の内、③の方法については模型実験で効果がないことが確されているので、検討しないものとした。①の方法については、連結金具の剛性を高めることにより、計算では曲げばね定数を5倍に設定するものとした。②の方法については、図-17のように土中に40 cm程度埋め込み、土の反力で抵抗させるものとした。土のばね定数は次式によって算出した²⁾。

$$K d = k_{h0} \cdot (B_H / 30)^{-(3/4)} \cdot A \cdots (16)$$

ここに、K d：土の軸力ばね定数 (kgf/cm)

$$k_{h0} : 1 / 30 \cdot \alpha E_0$$

$$E_0 : 28 \cdot N$$

N：標準貫入試験のN値（表土程度の柔らかい土と考えると5としたケースと、アスファルト舗装表層等を考慮にいれ、15としたケースを設定した）

B_H：埋め込み深さ

A：水平方向の載荷面積

よって、

$$\begin{aligned} K d &= (1 / 30 \cdot 1 \cdot 28 \cdot 5 \text{【15】}) \\ &\quad \cdot (8 / 30)^{-(3/4)} \cdot 800 \\ &= 10,061 \text{【30,183】} \\ &\approx 10,000 \text{【30,000】} \end{aligned}$$

(N値を15とした結果を【】内に網掛けで示す。)

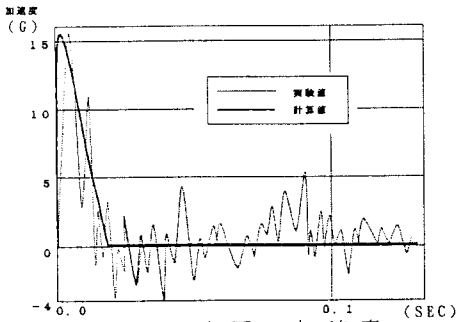


図 - 15 車両の加速度

(W = 160 kgf、V = 340 cm/sec)

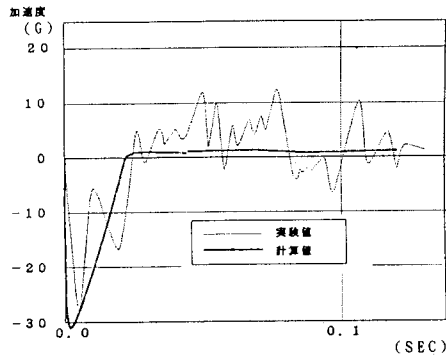


図 - 16 P G Fの加速度

(W = 160 kgf、V = 340 cm/sec)

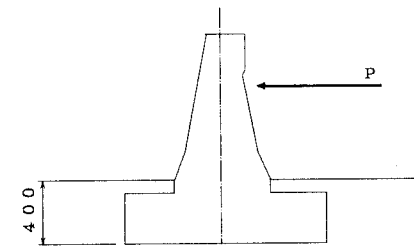


図 - 17 P G Fを土中に埋め込んだ場合

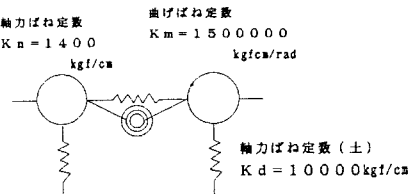


図 - 18 P G Fを土中に埋め込んだ場合の解析モデル

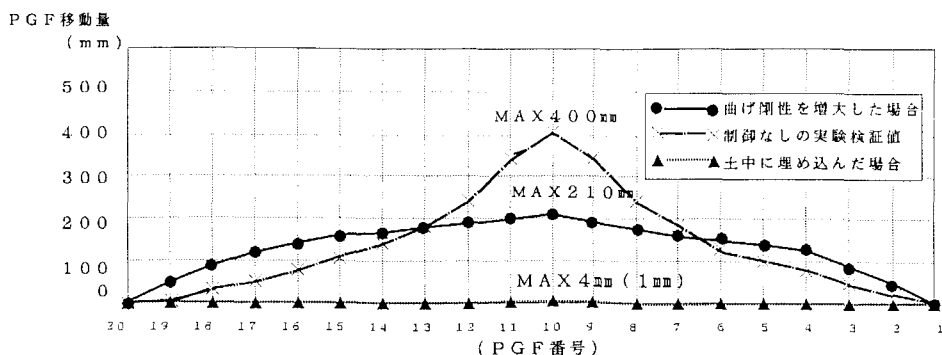


図 - 19 P G F を制御したときの最終移動量の比較

($W=160\text{kgf}$ 、 $V=340\text{cm/sec}$)

※土中の () 内は、 $N=15$ における最大変位を示す

この条件の解析モデルを図-18に示す。上記の方法①、②について計算した結果（P G Fの移動量）を図-19に示す。この図より、曲げ剛性を増大させることよりも、P G Fを土中に埋め込んだ場合の方が、移動量の制御効果があることがわかる。ただし、計算上の土のばね定数としては、一般的な静的地盤反力係数（ N 値=5or15）を用いているため、実際の値とは異なってくるが、制御の傾向は把握できたものと思われる。

5. 結論

本研究は、1/5モデルの衝突実験を行うとともに、フェンスと車両の衝突挙動をシミュレートするための衝撃応答解析を剛体ばねモデルを用いて行ったものである。本研究の成果を要約すると以下になる。

（1）モデル実験より、緩衝型P G Fの移動量制御のためにはストッパー制御が有効な方法であり、背面緩衝材の設置により、移動量を任意にコントロールできることが確認された。

（2）1/5モデル実験は、車両の代わりに先端にハニカムをつけた振り子を用い、衝撃応答を準静的応答とみなしてエネルギーを等しくおくことにより衝突速度を設定した。これは模型実験の最大移動量が実車実験の値の1/5になっており、ほぼ相似則にかなっていると考えられる⁵⁾。すなわち、移動式P G Fの最大移動量を模型実験によって、ほぼ推定できることが認められる。

（3）今回の解析は、剛体ばねモデルと要素別のパラメータ決定のための実験（局部ばね、曲げばね、摩擦係数）により緩衝型P G Fの移動量について簡単な応答解析を行ったが、その解析結果を模型実験結果と照らし合わせて検討した結果、最大移動量では約95%、それ以外では約60%と比較的良好に実験結果を再現できたと思われる。また、P G Fを土中に埋め込んだ場合や、連結金具の剛性増加によって曲げ剛度を増大させた場合について、理論上は移動量を任意の値に制御できることも確認できた。しかし、あくまでもP G Fは車両の衝突に対する安全設備であるから、乗員の安全性を第一に考えていかなければならない。したがって、今後は車両に作用する加速度等の値とP G Fの移動量との関係について、F E M等の衝突接触解析を駆使して定量的に把握していく必要があるものと思われる。

謝辞：本研究を行うに当たり、P G F協会の関係各位に多大の援助を受けた。ここに、謝意を表すものである。

参考文献

- 1) (財)土木研究センター：剛性防護柵に関する研究調査報告書（案）、剛性防護柵検討委員会

平成3年3月

- 2) 瀬尾卓也・酒井洋一ほか：プレキャスト・コンクリート製防護柵の実車衝突実験について、第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp. 65～70、平成5年6月
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編、平成2年2月
- 4) 佐藤 武：自動車の衝突と乗員の安全対策、日本機械学会誌、Vol. 71、No. 594、昭和43年
- 5) 松野 正徳：衝突に対する人間の生存限界、日本機械学会誌、Vol. 82、No. 726、昭和54年
- 6) 江守 一郎：模型実験の理論と応用、技報堂出版、昭和63年

(1993年9月16日受付)