

(12) コンクリート製プレキャストガードフェンスの1/5モデル衝突実験 における理論解析について

プレキャストガードフェンス協会 ○小林一隆, 比留間豊
佐藤啓, 衣川直紀
松葉美晴
防衛大学校土木工学教室 石川信隆, 園田佳巨

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⁾。PGF協会では、固定型および緩衝型（移動型）PGFに対して、それぞれ実車実験および模型実験を行ってきたが、自らの移動で車両の衝撃力を緩和する、緩衝型（移動式）PGFの移動量について理論的に解明されていなかった。そこで、本研究では1/5モデルの衝突実験の結果を参考にしながら、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。

2. 剛体ばねモデルによる衝撃応答解析

(1) 解析モデル

解析に当たって、図-1(a), (b)のPGFを図-1(c), (d)のように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PGF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。

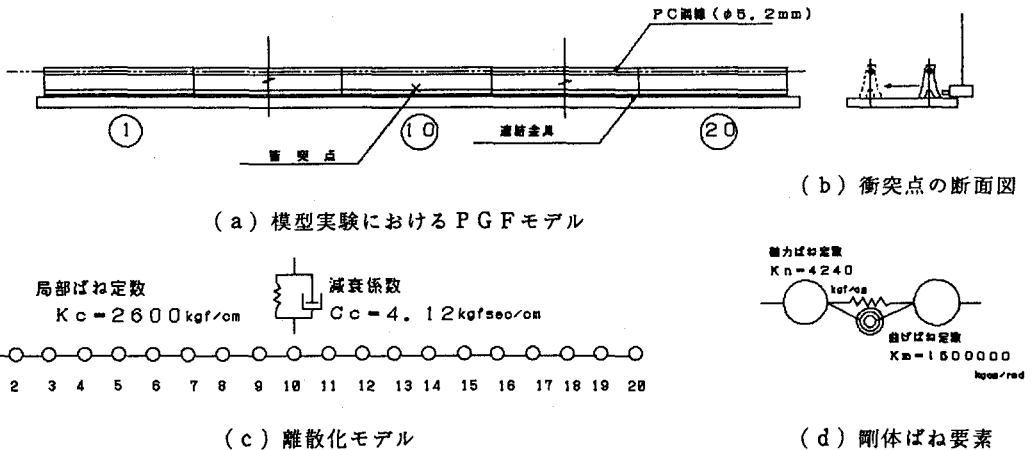


図-1 PGFと車両の解析用モデル

(2) 解析の基本式

図-1のようなモデル化したPGFに対する主な基本式は次のとおりである。すなわち、図-2のPGFの変形図を参照して、

①法線方向の相対変位

$$\Delta u_{n1} = (x_1 - x_j) \cos \theta_{1j} + (y_1 - y_j) \sin \theta_{1j} \quad \dots (1)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left((y_1 - y_h) / (x_1 - x_h) \right) - \tan^{-1} \left((y_j - y_i) / (x_j - x_i) \right) \quad \dots (2)$$

ただし、 Δu_n , θ_1 : i 質点と j 質点との相対変位
および回転角

- x_1, y_1 : 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

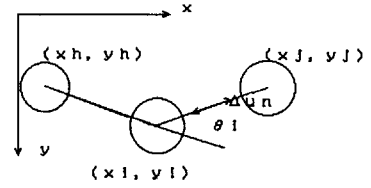


図-2 PGFの変形図

②法線方向の総作用力

$$N_1 = N_{1(t-\Delta t)} + K_n * \Delta u_{n1} \quad \dots (3)$$

$$M_1 = K_m * \theta_1 \quad \dots (4)$$

ただし、 N_1, M_1 : 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)

$$F_{x1} = -N_1 \cos \theta_{1j} \quad \dots (5)$$

$$F_{y1} = -N_1 \sin \theta_{1j} - (M_1 / l) \cos \theta_{1j} \quad \dots (6)$$

ただし、 F_{x1}, F_{y1} : i 質点に作用する x 方向および y 方向の合力

④ PGF と衝突車両の加速度, 速度, 移動量の基本式

$$a(t) = F(t) / m_1 \quad \dots (7)$$

$$V(t) = V(t-\Delta t) + a(t) * \Delta t \quad \dots (8)$$

$$d(t) = d(t-\Delta t) + ((V(t) + V(t-\Delta t)) / 2) * \Delta t \quad \dots (9)$$

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
 $F(t) = \sqrt{(\sum F_{x1})^2 + (\sum F_{y1})^2}$
 m_1 : i 質点の質量

⑤衝突車両によって発生する衝撃力

$$P_x = C_c * (V_{x(CAR)} - V_{x(PGF)}) + K_c * (d_{x(CAR)} - d_{x(PGF)}) \quad \dots (10)$$

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

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

(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。図-3 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(φ5.2)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。

$$K_n = A_p * E_p / L \dots\dots (12)$$

ここに、 K_n : P G Fの軸力ばね定数(kgf/cm)

A_p : PC鋼材の断面積 (cm²)

E_p : PC鋼材の弾性係数 (kgf/cm²)

L : 要素間距離 (cm)

よって、

$$K_n = 0.212 * 2.0 \times 10^6 / 100$$

$$= 4,240 \text{ kgf/cm}$$

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-4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載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-5に示す。

図中の式が今回の解析に用いた値である。

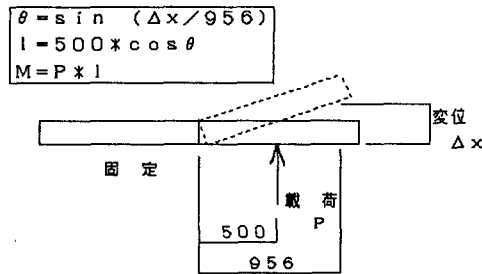


図-4 曲げばね定数決定のための実験

③ 摩擦係数 (μ)

P G Fと床版との間の摩擦係数は、図-6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、 $\mu = \tan \alpha \dots\dots (13)$

④ 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-7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。

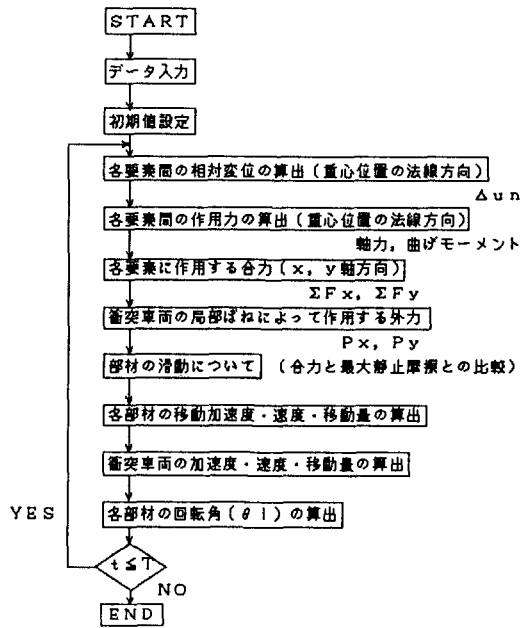


図-3 解析のフロー図

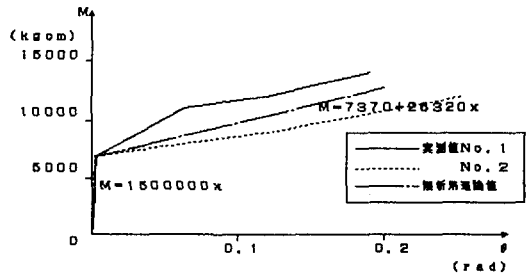


図-5 モーメントと回転角の関係

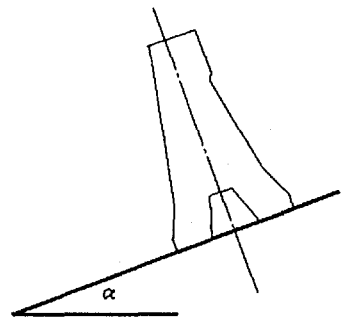


図-6 摩擦係数決定のための実験

⑤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減衰係数は、ばね定数を用いて次の式から算出した。

$$Cc = 2 h \sqrt{m K c} \quad \dots \dots (14)$$

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、

$$Cc = 2 * 0.1 * \sqrt{(180 / 980) * 2600}$$

$$= 4.12 \text{ kgf} \cdot \text{sec} / \text{cm}$$

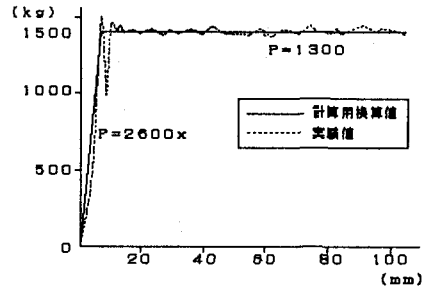


図-7 ハニカムの荷重と変位の関係

3. 数値計算例

(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。なお、車両(トラック)に関する入力条件は、表-1のとおりとした。また、今回計算した条件は、模型実験のときと同じ状態である。図-8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的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良く合っている。しかし、載荷点以外のPGFの移動量はあまり合っていない。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。
- 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。

表-1 車両の入力条件

項目	入力値	算出根拠
重量	160kgf	$20,000 \text{kgf} * (1/5)^3$
衝突角度	90°	(実車の衝突角度は20度)
速度	50cm/sec	$8,000,000 \text{cm/sec} / 3600 \text{sec} * \sin 20^\circ / \sqrt{5}$

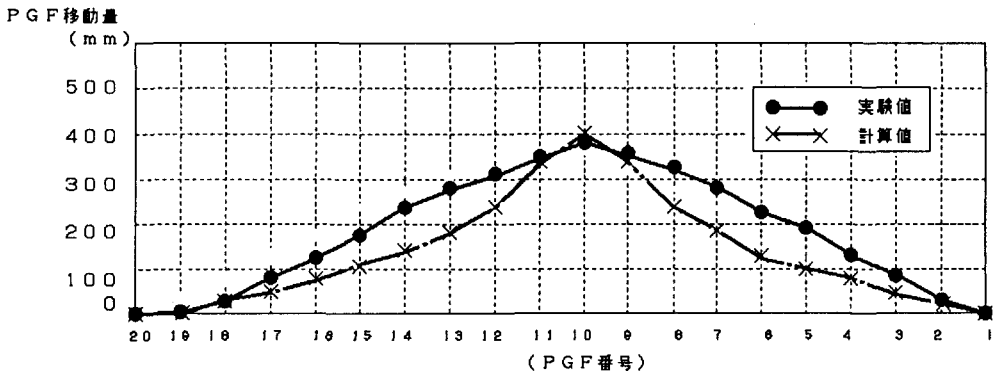


図-8 最終移動量に関する実験値と解析値の比較 (W = 160kgf, V = 50cm/sec)

③ばね定数や摩擦係数が、静的実験から求められた値にも拘らず、かなり実験値をうまくシミュレートできたが、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、動的影響も考慮しなければならないと思われる。

次に、図-9および図-10にそれぞれ車両と衝突点のPGFの加速度を示す。これらの加速度応答も計算値は比較的良く実験値をシミュレートしていることが認められる。

(2) PGFの移動量制御に関する検討

上記の解析を基に、PGFの移動量制御について検討を加える。一般に、PGFを中央分離帯に設置する場合、車両の衝突時に移動したPGFは、対向車線を犯さないことが第一条件となる。従って、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、②背面にストッパーを設置する、③連結用PC鋼材によって、横締めをの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認されているので、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-11のように土中に40cm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⁾。

$$Kd = k_{ho} (B_H / 30)^{-(3/4)} A \dots (15)$$

ここに、 Kd : 土の軸力ばね定数 (kgf/cm)

$$k_{ho} : 1 / 30 * \alpha E_o$$

$$E_o : 28 * N$$

N : 標準貫入試験のN値 (表土程度の柔らかい土と考えて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、

$$Kd = (1 / 30 * 1 * 28 * 5 [1.5]) * (8 / 30)^{-(3/4)} * 800 = 10,061 [30,183] \approx 10,000 [30,000]$$

(N値を15とした結果を【】内に網掛けで示す。)

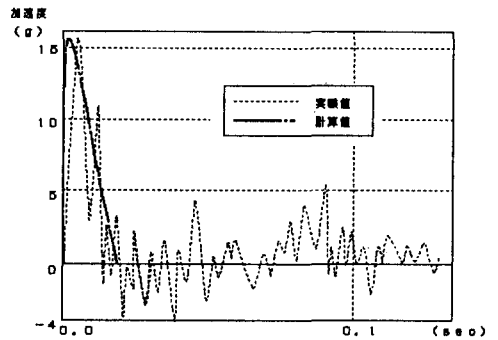


図-9 車両の加速度 (W=160kgf, V=50cm/sec)

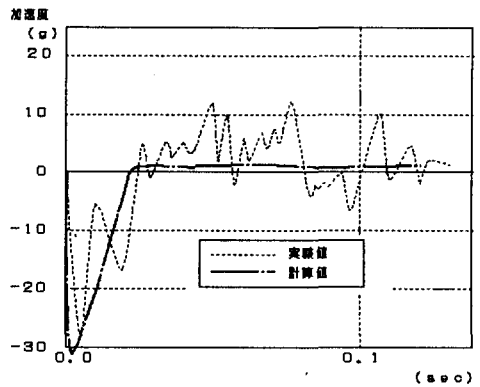


図-10 PGFの加速度 (W=160kgf, V=50cm/sec)

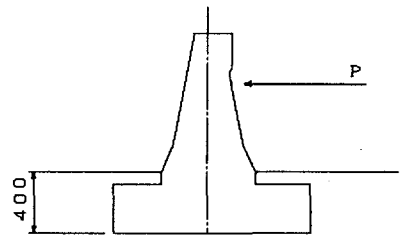


図-11 PGFを土中に埋め込んだ場合

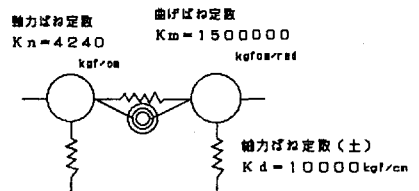


図-12 PGFを土中に埋め込んだ場合の解析モデル

この条件の解析モデルを図-12に示す。

上記の方法①、②について計算した結果（PGFの移動量）を図-13に示す。この図より、曲げ剛性を増大させることよりも、PGF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、一様な静的地盤反力係数（N値=5 or 15）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のではないと思われる。

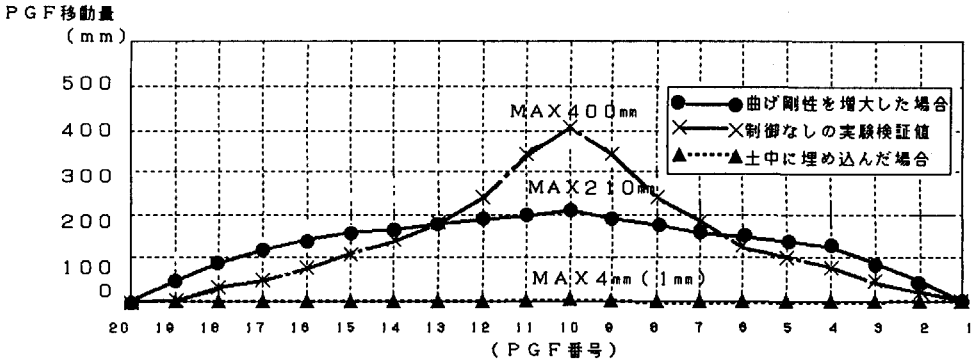


図-13 PGFを制御したときの最終移動量の比較

4. 結論

緩衝型PGFの移動量について理論的解析を行ったが、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。その結果、今回の解析ケースでは、比較的良好に実験結果を再現できたと思われる。また、PGF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PGF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PGFの移動量との関係について、定量的に把握していく必要があるものと思われる。

参考文献

- 1) "剛性防護柵に関する研究調査報告書(案)" (財)土木研究センター, 剛性防護柵検討委員会
平成3年3月
- 2) "道路橋示方書・同解説 IV下部構造編" (社)日本道路協会, 平成2年2月