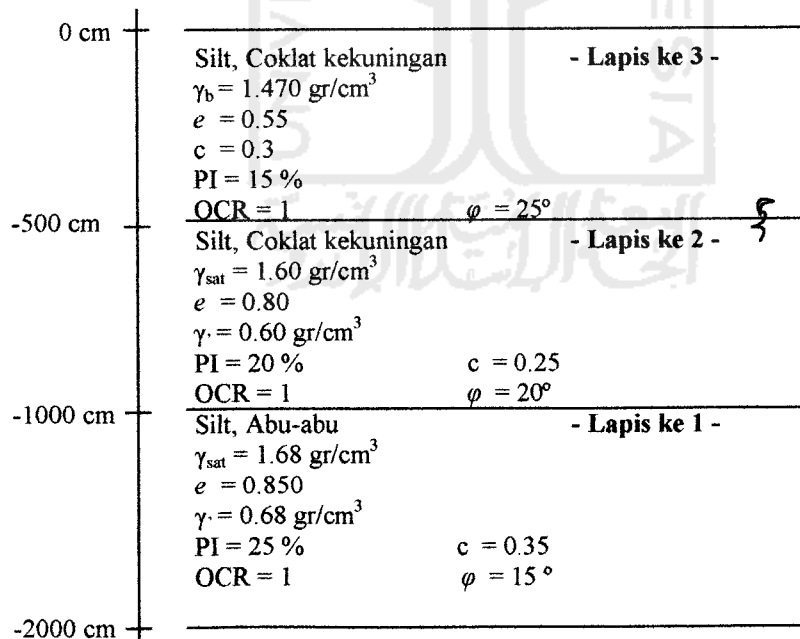


BAB V

ANALISIS VALIDITAS PROGRAM

5.1. Validitas Program

Sebelum program ini menjadi program siap pakai maka perlu di uji validitasnya (keabsahannya). Untuk menguji validitasnya, maka akan digunakan struktur tanah yang sebelumnya telah dianalisis secara manual kemudian hasilnya dibandingkan dengan hasil dari program ini. Dari pengujian secara sederhana ini diharap diperoleh keabsahan dan tingkat keakuratan hitungan dengan program komputer.



Gambar 5.1. Data Tanah Endapan Tiga Lapis

Data tanah endapan seperti pada Gambar 5.1, dengan data percepatan tanah diambil dari Gempa El Centro dengan Magnitude Gempa $M = 7,1$ dan $g = 980 \text{ cm/dt}^2$. Perhitungan dengan cara manual adalah seperti berikut ini.

5.1.1. Iterasi (putaran) pertama

- a. Koefisien tekanan tanah horizontal k_o (Pers. 3.11 s/d 3.14)

Untuk tanah lempung *normally consolidated* dengan PI antara 0 s/d 40 %.

$$k_{o3} = 0,40 + 0,007 (PI) = 0,40 + 0,007 \times 15 = 0,505$$

$$k_{o2} = 0,40 + 0,007 (PI) = 0,40 + 0,007 \times 20 = 0,540$$

$$k_{o1} = 0,40 + 0,007 (PI) = 0,40 + 0,007 \times 25 = 0,575$$

- b. Koefisien tanah k_t , berdasarkan Tabel 3.1, dengan nilai PI antara 20 s/d 40 %.

Untuk $PI = 25$ didapat $k_t = 0,135$.

Untuk $PI = 20$ didapat $k_t = 0,180$.

Untuk $PI = 15$ didapat $k_t = 0,210$.

- c. Tegangan efektif vertikal, $\bar{\sigma}_1 = (\text{berat volume tanah, } \gamma_t \text{ (berupa } \gamma_b \text{ atau } \gamma') \times \text{tebal lapis}) + \text{tegangan vertikal atasnya. (Pers. 3.9)}$

$$\bar{\sigma}_1 \text{ untuk lapis 3} = (1,470 \times 500)/1000 = 0,735 \text{ kg/cm}^2$$

$$\bar{\sigma}_1 \text{ untuk lapis 2} = (0,60 \times 500)/1000 + 0,735 = 1,035 \text{ kg/cm}^2$$

$$\bar{\sigma}_1 \text{ untuk lapis 1} = (0,68 \times 1000)/1000 + 1,035 = 1,715 \text{ kg/cm}^2$$

- d. Tegangan kekang vertikal, $\bar{\sigma}_o$. (Pers. 3.6)

$$\text{Untuk lapis 3, } \bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3 = k_o \times \bar{\sigma}_1 = 0,505 \times 0,735 = 0,371 \text{ kg/cm}^2$$

$$\bar{\sigma}_o = \frac{(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3)}{3} = \frac{(0,735 + 0,371 + 0,371)}{3} = 0,492 \text{ kg/cm}^2$$

Untuk lapis 2, $\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3 = k_o \times \bar{\sigma}_1 = 0,540 \times 1,035 = 0,5589 \text{ kg/cm}^2$

$$\bar{\sigma}_o = \frac{(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3)}{3} = \frac{(1,035 + 0,5589 + 0,5589)}{3} = 0,7176 \text{ kg/cm}^2$$

Untuk lapis 1, $\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3 = k_o \times \bar{\sigma}_1 = 0,575 \times 1,715 = 0,9861 \text{ kg/cm}^2$

$$\bar{\sigma}_o = \frac{(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3)}{3} = \frac{(1,715 + 0,9861 + 0,9861)}{3} = 1,2291 \text{ kg/cm}^2$$

e. Nilai G_{max} untuk tanah lempung (Pers. 3.3 s/d 3.5) (kg/cm^2)

$$G_{max} = 331 OCR^k \frac{(2,973 - e)^2}{1 + e} \bar{\sigma}_o^{0,5}$$

$$\text{Untuk lapis 3, } G_{max} = 331 \cdot 1^{0,135} \frac{(2,973 - 0,55)^2}{1 + 0,55} 0,4924^{0,5} = 879,7558 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Untuk lapis 2, } G_{max} = 331 \cdot 1^{0,180} \frac{(2,973 - 0,80)^2}{1 + 0,80} 0,7176^{0,5} = 735,5567 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Untuk lapis 1, } G_{max} = 331 \cdot 1^{0,210} \frac{(2,973 - 0,85)^2}{1 + 0,85} 1,2291^{0,5} = 894,0254 \text{ kg/cm}^2$$

f. Damping rasio awal untuk iterasi pertama dianggap sangat kecil jadi diperkirakan sebesar 0,5 %.

g. Untuk nilai modulus geser maka pada iterasi awal menggunakan $G = G_{max}$.

h. Kekakuan tanah. (Pers. 3.31 dan 3.80)

$$\text{Kekakuan lapis 3, } k_3 = \frac{879,7558 \times 100 \times 100}{500} = 17595,116 \text{ kg/cm}$$

$$\text{Kekakuan lapis 2, } k_2 = \frac{735,5567 \times 100 \times 100}{500} = 14711,134 \text{ kg/cm}$$

$$\text{Kekakuan lapis 1, } k_1 = \frac{894,0254 \times 100 \times 100}{1000} = 8940,254 \text{ kg/cm}$$

i. Massa tiap lapis tanah. (Pers. 3.30)

$$m_3 = \frac{\gamma_{t3} h_3}{g} = \frac{1,47 \times 250 \times 10^4}{980 \times 10^3} = 3,75 \text{ kg dt}^2/\text{cm}$$

$$m_2 = \frac{\gamma_{t3} h_3 + \gamma_{sat2} h_2}{g} = \frac{1,47 \times 250 \times 10^4 + 1,60 \times 250 \times 10^4}{980 \times 10^3} = 7,83163 \text{ kg dt}^2/\text{cm}$$

$$m_1 = \frac{\gamma_{sat2} h_2 + \gamma_{sat1} h_1}{g} = \frac{1,60 \times 250 \times 10^4 + 1,68 \times 500 \times 10^4}{980 \times 10^3} = 12,653 \text{ kg dt}^2/\text{cm}$$

j. Mencari *mode shape* (Pers 4.41 s/d 3.48)

Jika dipakai unit massa $m = 3,75 \text{ kg dt}^2/\text{cm}$ dan unit kekakuan $k = 8940,254 \text{ kg/cm}$, maka matriks massa :

$$[M] = \begin{bmatrix} 3,37413m & 0 & 0 \\ 0 & 2,08843m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}, \text{ dan matriks kekakuannya :}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 2,64549k & -1,64549k & 0 \\ -1,64549k & 3,61357k & -1,96808k \\ 0 & -1,96808k & 1,96808k \end{bmatrix},$$

dengan demikian dapat disusun persamaan *eigen-problem* sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} 2,64549k - 3,37413\omega^2 m & -1,64549k & 0 \\ -1,64549k & 3,61357k - 2,08843\omega^2 m & -1,96808k \\ 0 & -1,96808k & 1,96808k - \omega^2 m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_3 \\ \phi_2 \\ \phi_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

kemudian dapat ditulis menjadi :

$$\begin{bmatrix} 2,64549 - \frac{3,37413\omega^2}{k/m} & -1,64549 & 0 \\ -1,64549 & 3,61357 - \frac{2,08843\omega^2}{k/m} & -1,96808 \\ 0 & -1,96808 & 1,96808 - \frac{\omega^2}{k/m} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

apabila diambil notasi (*initial eigen-value*) $\lambda = \frac{\omega^2}{k/m}$,

maka menjadi,

$$\begin{bmatrix} 2,64549 - 3,37413\lambda & -1,64549 & 0 \\ -1,64549 & 3,61357 - 2,08843\lambda & -1,96808 \\ 0 & -1,96808 & 1,96808 - \lambda \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

kemudian persamaan tersebut disederhanakan, maka akan diperoleh,

$$(2,64549 - 3,37413\lambda)\phi_1 - 1,64549\phi_2 = 0$$

$$-1,64549\phi_1 + (3,61357 - 2,08843\lambda)\phi_2 - 1,96808\phi_3 = 0$$

$$-1,96808\phi_2 + (1,96808 - \lambda)\phi_3 = 0$$

Penyelesaian persamaan simultan homogen tidaklah memberikan nilai-nilai yang pasti/definitif, tetapi hasil-hasil yang diperoleh hanya merupakan perbandingan antara yang satu dengan yang lain. Oleh karena itu dengan mengambil nilai,

$$\phi_1 = 1$$

dan dengan substitusi kedalam baris pertama pada persamaan diatas maka,

$$\phi_2 = (1,60772 - 2,05053\lambda)$$

kemudian disubstitusi ke persamaan pada baris kedua,

$$\Phi_3 = 2,11583 - 5,47099\lambda + 2,17592\lambda^2$$

selanjutnya disubstitusi ke persamaan pada baris ketiga sehingga bila disusun akan mendapatkan persamaan polynomial berikut ini,

$$\lambda^3 - 4,48241\lambda^2 + 4,06613\lambda - 0,45958 = 0$$

berdasarkan persamaan tersebut akar-akarnya dapat dicari kemudian menghitung percepatan sudutnya yaitu,

$$\lambda_1 = 0,13154, \text{ maka } \omega_1 = \sqrt{0,13154 \frac{8940,254}{3,75}} = 17,70876 \text{ rad/dt}$$

$$\lambda_2 = 1,06246, \text{ maka } \omega_2 = \sqrt{1,06246 \frac{8940,254}{3,75}} = 50,32869 \text{ rad/dt}$$

$$\lambda_3 = 3,28841, \text{ maka } \omega_3 = \sqrt{3,28841 \frac{8940,254}{3,75}} = 88,5426 \text{ rad/dt}$$

Dengan demikian nilai ordinat tiap pola/ragam *mode shape* Φ_i dapat diperoleh sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1. Nilai Ordinat Tiap Pola/Ragam Mode

No.	Fungsi Φ_i	Nilai Φ_i		
		Mode ke-1	Mode ke-2	Mode ke-3
		$\lambda_1 = 0,13154$	$\lambda_2 = 1,06246$	$\lambda_3 = 3,28841$
1.	$\Phi_1 = 1$	$\Phi_{11} = 1$	$\Phi_{12} = 1$	$\Phi_{13} = 1$
2.	$\Phi_2 = (1,60772 - 2,05053\lambda)$	$\Phi_{21} = 1,33799$	$\Phi_{22} = -0,57089$	$\Phi_{23} = -5,13526$
3.	$\Phi_3 = 2,11583 - 5,47099\lambda + 2,17592\lambda^2$	$\Phi_{31} = 1,43383$	$\Phi_{32} = -1,24065$	$\Phi_{33} = 7,65459$

k. Kontrol dengan kondisi Orthogonal. (Pers 3.49 s/d 3.55).

$$[\phi] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1,33799 & -0,57089 & -5,13526 \\ 1,43383 & -1,24066 & 7,65463 \end{bmatrix}$$

Karena *matriks massa* merupakan *matriks diagonal*, dan *matriks kekakuan* adalah *matriks yang simetri* maka dapat diselesaikan sebagai berikut,

1) Untuk mode ke-1

$$\{\phi\}_1^T [M] \{\phi\}_1 = \{1 \quad 1,33799 \quad 1,43383\} \begin{bmatrix} 12,653 & 0 & 0 \\ 0 & 7,83163 & 0 \\ 0 & 0 & 3,75 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1,33799 \\ 1,43383 \end{Bmatrix} = 34,38287$$

2) Untuk mode ke-2

$$\{\phi\}_1^T [M] \{\phi\}_2 = \{1 \quad 1,33799 \quad 1,43383\} \begin{bmatrix} 12,653 & 0 & 0 \\ 0 & 7,83163 & 0 \\ 0 & 0 & 3,75 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ -0,57089 \\ -1,24066 \end{Bmatrix} = -0,0900$$

3) Untuk mode ke-3

$$\{\phi\}_1^T [M] \{\phi\}_3 = \{1 \quad 1,33799 \quad 1,43383\} \begin{bmatrix} 12,653 & 0 & 0 \\ 0 & 7,83163 & 0 \\ 0 & 0 & 3,75 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ -5,13526 \\ 7,65463 \end{Bmatrix} = -0,08967$$

Dari hasil tersebut terbukti bahwa indeks mode i tidak sama dengan j maka hubungan orthogonal terpenuhi, *memenuhi syarat*.

1. Partisipasi Mode, dimana $P_i^* = \{\phi\}_i^T [M] \{I\}$ dan $M_i^* = \{\phi\}_i^T [M] \{I\}$

1) Untuk mode ke-1

$$P_1^* = \{1 \quad 1,33799 \quad 1,43383\} \begin{bmatrix} 12,653 & 0 & 0 \\ 0 & 7,83163 & 0 \\ 0 & 0 & 3,75 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = 28,50852 \text{ kg dt}^2/\text{cm}$$

$$M_1^* = \{1 \quad 1,33799 \quad 1,43383\} \begin{bmatrix} 12,653 & 0 & 0 \\ 0 & 7,83163 & 0 \\ 0 & 0 & 3,75 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1,33799 \\ 1,43383 \end{bmatrix}$$

$$= 34,38287 \text{ kg dt}^2/\text{cm}$$

Partisipasi mode ke-1, $\Gamma_1 = \frac{P_1^*}{M_1^*} = \frac{28,50852}{34,38287} = 0,82915 = 82,915 \%$

2) Untuk mode ke-2

$$P_2^* = \{1 \quad -0,57089 \quad -1,24066\} \begin{bmatrix} 12,653 & 0 & 0 \\ 0 & 7,83163 & 0 \\ 0 & 0 & 3,75 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = 3,5295 \text{ kgdt}^2/\text{cm}$$

$$M_2^* = \{1 \quad -0,57089 \quad -1,24066\} \begin{bmatrix} 12,653 & 0 & 0 \\ 0 & 7,83163 & 0 \\ 0 & 0 & 3,75 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -0,57089 \\ -1,24066 \end{bmatrix}$$

$$= 20,97758 \text{ kg dt}^2/\text{cm}$$

Partisipasi mode ke-2, $\Gamma_2 = \frac{P_2^*}{M_2^*} = \frac{3,52952}{20,97758} = 0,16825 = 16,825 \%$

3) Untuk mode ke-3

$$P_3^* = \{1 \quad -5,13526 \quad 7,65463\} \begin{bmatrix} 12,653 & 0 & 0 \\ 0 & 7,83163 & 0 \\ 0 & 0 & 3,75 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = 1,14043 \text{ kg dt}^2/\text{cm}$$

$$M_3^* = \{1 \quad -5,13526 \quad 7,65463\} \begin{bmatrix} 12,653 & 0 & 0 \\ 0 & 7,83163 & 0 \\ 0 & 0 & 3,75 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -5,13526 \\ 7,65463 \end{bmatrix}$$

$$= 430,90488 \text{ kg dt}^2/\text{cm}$$

Partisipasi mode ke-3, $\Gamma_3 = \frac{P_3^*}{M_3^*} = \frac{1,14043}{430,90488} = 0,0026 = 0,26 \%$

Sebagai kontrol partisipasi mode harus sama dengan satu maka,

$$\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 = 0,82915 + 0,16825 + 0,0026 = 1,0000 \approx \text{memenuhi syarat}$$

m. Modal Amplitudo, Z_j dan Modal Displacement Y_{ij} , (Pers.3.62 s/d 3.65)

Rumus yang digunakan :

$$g_{j+1} = \frac{-\ddot{y}_t - ag_j - bg_{j-1}}{\hat{k}} \quad Z = g_j \times \Gamma_j \quad y = [\phi] \times \{Z\}$$

dengan :

$$a = \left[\omega_j^2 - \frac{2}{(\Delta t)^2} \right], \quad b = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} - \frac{2c_j \omega_j}{2 \Delta t} \right], \quad \hat{k} = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} + \frac{2c_j \omega_j}{2 \Delta t} \right]$$

n. Nilai a , b , dan \hat{k}

Untuk lapis 1,

$$a = \left[21,88623^2 - \frac{2}{(0,01)^2} \right] = -19686,39982$$

$$b = \left[\frac{1}{(0,01)^2} - \frac{2,0,005 \cdot 21,88623}{2,0,01} \right] = 9991,14562$$

$$\hat{k} = \left[\frac{1}{(0,01)^2} + \frac{2,0,005 \cdot 21,88623}{2,0,01} \right] = 10008,8544$$

Untuk lapis 2, analog dengan lapis 1, didapat

$$a = -17467,02296 \quad b = 9974,83566 \quad \hat{k} = 10025,1644$$

Untuk lapis 3, analog dengan lapis 1, didapat

$$a = -12160,20799 \quad b = 9955,7287 \quad \hat{k} = 10044,2713$$

o. Selanjutnya nilai g_j

$$g_{j(1)} = \frac{(-3,955392) - (-19686,3998).(0) - 9991,145.(0)}{10008,8544} = -3,95189.10^{-4}$$

$$g_{j(2)} = \frac{(-3,955392) - (-17467,023).(0) - 9974,83566.(0)}{10025,1644} = -3,94546.10^{-4}$$

$$g_{j(3)} = \frac{(-3,955392) - (-12160,20799).(0) - 9955,729.(0)}{10044,2713} = -3,93796.10^{-4}$$

p. Selanjutnya nilai Z

$$Z_{(1)} = -3,95189.10^{-4} \times 0,82915 = -3,27671.10^{-4}$$

$$Z_{(2)} = -3,94546.10^{-4} \times 0,16825 = -6,63824.10^{-5}$$

$$Z_{(3)} = -3,93796.10^{-4} \times 0,0026 = -1,02387.10^{-6}$$

q. Selanjutnya y (simpangan)

$$y_{(1)} = (-3,27671.10^{-4} \times 1) + (-6,63824.10^{-5} \times 1) + (-1,02387.10^{-6} \times 1) = -5,95077.10^{-4} \text{ cm}$$

$$y_{(2)} = (-3,27671.10^{-4} \times 1,33799) + (-6,63824.10^{-5} \times -0,57089) + (-1,02387.10^{-6} \times -5,13526) = -3,952656.10^{-4} \text{ cm}$$

$$y_{(3)} = (-3,27671.10^{-4} \times 1,43383) + (-6,63824.10^{-5} \times -1,24066) + (-1,02387.10^{-6} \times 7,65463) = -4,61686.10^{-4} \text{ cm}$$

5.1.2. Iterasi (putaran) kedua dan seterusnya

Setelah didapatkan nilai simpangan pada tiap lapis dari iterasi pertama maka untuk dilanjutkan mencari regangan geser dan modulus geser baru tiap lapis tanah, yaitu :

- a. Mencari regangan geser seperti pada Persamaan 3.75.

$$\gamma_{lap1}^s = \frac{5,95077 \cdot 10^{-4} - 0}{1000} = 5,95077 \cdot 10^{-7}$$

$$\gamma_{lap2}^s = \frac{3,952656 \cdot 10^{-4} - 5,95077 \cdot 10^{-4}}{500} = 3,996228 \cdot 10^{-7}$$

$$\gamma_{lap3}^s = \frac{4,61686 \cdot 10^{-4} - 3,952656 \cdot 10^{-4}}{500} = 1,32841 \cdot 10^{-7}$$

- b. Selanjutnya mencari nilai G yang baru (sesuai Persamaan 3.15 atau 3.76) , dan nilai k , γ_h , dan α ada pada Tabel 3.2.

$$G_{lapis1} = \frac{I}{1 + 0,95 \left\{ \frac{(5,95077 \cdot 10^{-7})^{0,95}}{0,12} \right\}} \times 894,7558 = 894,74717 \text{ kg/cm}^2$$

$$G_{lapis2} = 735,551839 \text{ kg/cm}^2 \quad ; \quad G_{lapis3} = 897,7541305 \text{ kg/cm}^2$$

Selanjutnya dapat mencari nilai kekakuan tanah kembali, dan perhitungan seterusnya sama untuk iterasi-iterasi berikutnya.

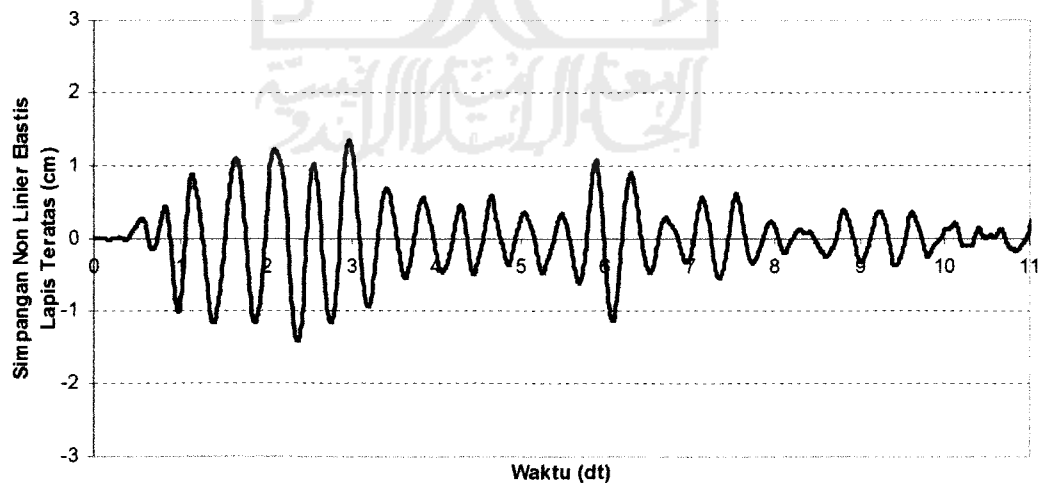
5.2. Perbandingan Hasil Validitas Program dengan Manual

Perbandingan antara hasil manual dan dengan hasil program dinamik lapisan tanah menunjukkan selisih yang relatif kecil yaitu sebesar 2,044 %, sebagaimana tercantum pada Tabel 5.2 yang membandingkan respon maksimum antara hasil manual dan program, kesalahan ini dapat diakibatkan oleh adanya pembulatan angka dibelakang koma. Disamping itu respon maksimum juga terjadi pada periode waktu yang sama yaitu pada periode waktu 1,11 detik untuk percepatan, periode waktu 2,47 detik untuk kecepatan, dan pada periode waktu 2,99 detik untuk simpangan pada lapis teratas.

Tabel 5.2. Selisih Respon Nonlinier Elastis antara Manual dengan Program

Respon	Lapis	Periode Waktu	Manual	Program	Selisih (%)
Simpangan	1	2.99	0.922655644	0.922338339	0.03173
	2	2.99	1.256548648	1.259058486	0.25098
	3	2.99	1.316987864	1.31379389	0.3194
Kecepatan	1	2.47	13.75549453	13.75144009	0.4054
	2	2.47	20.41164365	20.41932367	0.768
	3	2.47	22.10565945	22.10807825	0.24188
Percepatan	1	1.11	-261.602154	-261.602102	0.0052
	2	1.11	-384.982336	-384.982332	0.0004
	3	1.11	-418.133654	-418.133864	0.021
Selisih rata-rata (%)					2,04404

Kesalahan dapat diijinkan asal lebih kecil atau sama dengan 5 % (Widodo, 2001). Dengan demikian faktor kesalahan program ini adalah 2,04404 % < 5 % maka hasil analisis program dapat dianggap valid. Perbandingan simpangan untuk nonlinier elastis antara hasil analisis program dan hasil analisis manual dapat dilihat pada Gambar 5.2, dimana hasil program dinamik dengan hasil manual saling berimpit.

**Gambar 5.2.** Perbandingan Simpangan antara Hasil Program dengan Manual