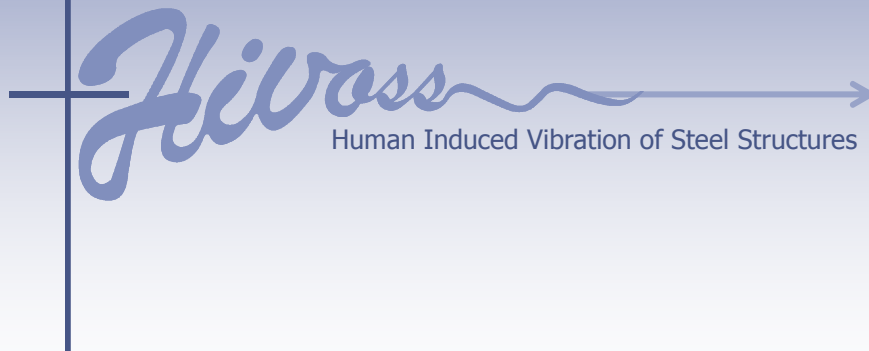


Bepaling van dyn. eigenschappen



12/10/2008

RFS2-CT-2007-00033

Dynamische eigenschappen

Technieken

- Niveau 1
Bepaling van modale parameters tbv
⇒ calibratie numerieke modellen
⇒ mogelijk calibratie van dempingsystemen
Van belang:
 - Natuurlijke frequenties
 - Trilvormen
 - Dampingverhouding
- Niveau 2
Meting van de dynamische responsie als gevolg van lopen tbv
beoordeling van comfort criteria en/of correlatie met numerieke
simulaties



Technieken

- Modale parameters
 - Gedwongen trilling
 - Achtergrondtrillingen
 - Vrije trilling



Figure 6-2: Electromagnetic shaker for civil engineering applications. Vertical mounting.

Hilvoos

RFS2-CT-2007-00033

3

Technieken

- Metingen van de responsie
 - Meting van de responsie op achtergrond trillingen tbv identificatie van kritische natuurlijke frequenties
 - Meting van demping bij kritische natuurlijke frequenties
 - Meting van de responsie door een enkele voetganger
 - Meting van de responsie door een groep voetgangers
 - Meting van de responsie door een continu stroom van voetgangers



Hilvoos

Technieken

- Meetapparaten
 - Sensoren, bijv. versnellingsopnemers
 - Krachtopnemers
- Grenswaarden voor voetgangercomfort zijn meestal in terneb van versnelling gedefinieerd
⇒ Gebruikelijke meetgrootte is de versnelling
- Voor de meest voorkomend voetgangersbruggen de frequenties van belang vallen in het bereik:
0,5 – 20 Hz
- Gebruikelijke specificatie voor versnellingsopnemers zijn:
 - Frequentiebereik (met 5% lineariteit): 0,1 – 50 Hz;
 - Minimale gevoeligheid: 10 mV/g
 - Bereik: $\pm 0,5$ g



Figure 6-1: Impact hammer for Civil Engineering applications

Hivoss

RFS2-CT-2007-00033

5



Maatregelen

Hivoss
Human Induced Vibration of Steel Structures

12/10/2008

RFS2-CT-2007-00033

Maatregelen

Verbetering van het dynamisch gedrag

- Aanpassing van de massa
 - Verhogen van de modale massa (b.v. zwaar betondek)
- Aanpassing eigenfrequentie
 - Frequentie is evenredig met de wortel uit de verhouding tussen stijfheid en massa
 - ⇒ Beperkte mogelijkheden
- Aanpassing van de demping
 - Door specifieke constructieve en/of niet constructieve onderdelen in het ontwerp bijv.
 - leuningen
 - draadhekwerk
 - elastomeren in opleggingen en wegdek
 - bout verbindingen ipv lasverbindingen
 - Toepassing van externe dempingsapparaten
 - ...

Hilvoos

RFS2-CT-2007-00033

7

Maatregelen

Verbetering van het dynamisch gedrag

- Viskeuze dempers:
 - Energie dissipatie door middel van vervorming van een viskeuze vloeistof of een vaste stof



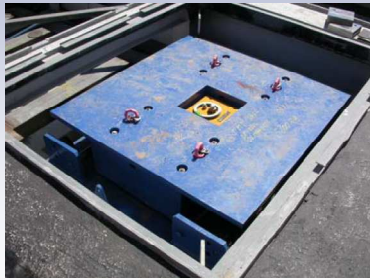
Hilvoos

RFS2-CT-2007-00033

8

Verbetering van het dynamisch gedrag

- Tuned Mass Dampers (TMDs):
 - TMD's bestaan uit een of meer geconcentreerde massa's die in verbinding zijn met de constructie door veren en dempers
 - Apparaat is zodanig ontworpen dat er twee nieuwe frequenties ontstaan (een onder en een boven de oorspronkelijke frequentie)
 - Relatieve beweging tussen constructie en TMD zorgt voor energiedissipatie



Maatregelen

Hilvoos

RFS2-CT-2007-00033

9

Verbetering van het dynamisch gedrag

- Tuned Mass Dampers (TMDs):

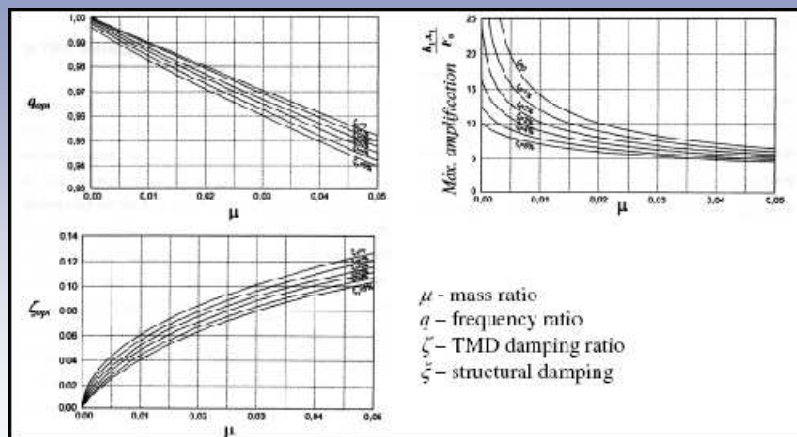


Figure 5-2: Design curves of TMDs

Maatregelen

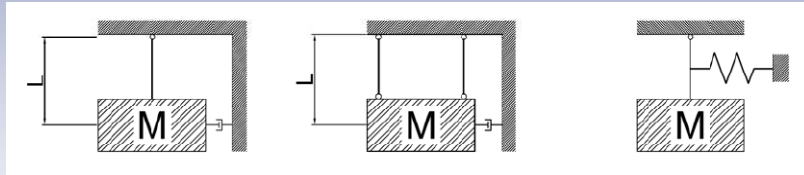
Hilvoos

RFS2-CT-2007-00033

10

Verbetering van het dynamisch gedrag

- Pendulum dampers:
 - Specifieke type TMD, ten behoeve van horizontale trillingen
 - In de meeste gevallen zonder gebruik van veren (behalve voor frequenties > 1 Hz)



Maatregelen

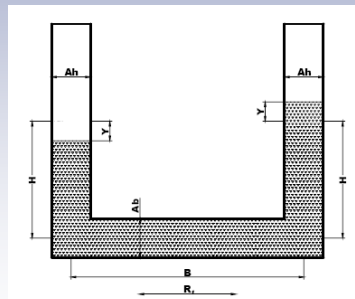
Hilvoos

RFS2-CT-2007-00033

11

Verbetering van het dynamisch gedrag

- Tuned liquid column dampers:
 - U-vormige pijp, gevuld met vloeistof (meestal water),
 - Beweging van het vloeistof genereert krachten die de horizontale beweging van de constructie tegengaat
 - Voordelen ten opzicht van andere dempingsystemen
 - eenvoudige calibratie van frequentie en demping,
 - eenvoudige toepassing,
 - eenvoudige constructie en
 - bijna geen onderhoudskosten
 - Optimale demping door middel van tests op TLCD prototypes



Maatregelen

Hilvoos

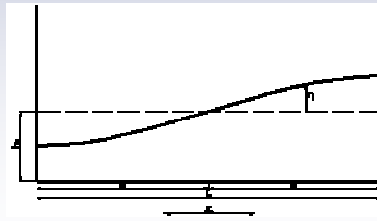
RFS2-CT-2007-00033

12

Verbetering van het dynamisch gedrag

- Tuned liquid dampers:
 - Passieve dempingsysteem bestaande uit starre container met daarin een vloeistof
 - Tbv onderdrukking van zowel horizontale als verticale trillingen
 - Voordelen:
 - lage kosten
 - zeer lage aanzetniveau
 - eenvoudige aanpassing van de natuurlijke frequentie
 - eenvoudige installatie (op bestaande constructie)
 - Echter: beweging vloeistof kan een zeer niet-lineair gedrag vertonen (bij hoge trillingsamplitudes).

Maatregelen



Hivoss

RFS2-CT-2007-00033

13



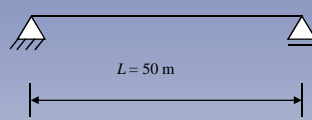
Rekenvoorbeelden

Hivoss
Human Induced Vibration of Steel Structures

12/10/2008

RFS2-CT-2007-00033

1^{ste} voorbeeld – 50m Voetgangersbrug



Breedte dek $b = 3 \text{ m}$
 Lengte overspanning $L = 50 \text{ m}$
 Massa $m = 2,5 \times 10^3 \text{ kg/m}$
 Stijfheid $EI_{vert} = 2,05 \times 10^7 \text{ kNm}^2$
 $EI_{lat} = 2,53 \times 10^5 \text{ kNm}^2$
 Damping $\xi = 1,5 \%$

- Eigenaar eis:
- middel comfort bij weinig verkeer ($d = 0,2 \text{ P/m}^2$)
 - minimaal comfort in verticale richt. bij zeer zwaar verkeer ($d = 1,0 \text{ P/m}^2$)
 - vermijden interactie tussen voetganger en brug bij zijdelingse trilling

Ontwerpsituatie	Eis
$d = 0,2 \text{ P/m}^2$ $n = 50 \times 3 \times 0,2 = 30$	$\underline{a}_{limit,vert} \leq 1,0 \text{ m/s}^2$ $\underline{a}_{limit,hor} \leq 0,1 \text{ m/s}^2$
$d = 1,0 \text{ P/m}^2$ $n = 50 \times 3 \times 1,0 = 150$	$\underline{a}_{limit,vert} \leq 2,5 \text{ m/s}^2$ $\underline{a}_{limit,hor} \leq 0,1 \text{ m/s}^2$

Hilvoos

1^{ste} voorbeeld – 50m Voetgangersbrug

1. Bepaling van natuurlijke frequentie en modale massa's

$$f_{1,vert} = \frac{1}{2\pi} \frac{9,869}{L^2} \sqrt{\frac{EI_{vert}}{m}} = 1,8 \text{ Hz}$$

$$f_{2,vert} = \frac{1}{2\pi} \frac{39,478}{L^2} \sqrt{\frac{EI_{vert}}{m}} = 7,2 \text{ Hz}$$

$$f_{1,lat} = \frac{1}{2\pi} \frac{9,869}{L^2} \sqrt{\frac{EI_{lat}}{m}} = 0,2 \text{ Hz}$$

$$f_{2,lat} = \frac{1}{2\pi} \frac{39,478}{L^2} \sqrt{\frac{EI_{lat}}{m}} = 0,8 \text{ Hz}$$

$$M = \frac{1}{2} m L = 62,5 \times 10^3 \text{ kg}$$

Hilvoos

1^{ste} voorbeeld – 50m Voetgangersbrug

2. Bepaling van de karakteristieke maximale versnelling

2.1 voor $d = 0,2 \text{ P/m}^2$

$$a_{\max, \text{vert}} = k_{a,95\%} \sqrt{\frac{C \sigma_F^2}{M_i^2}} k_1 \xi^{k_2} = 0,58 \text{ m/s}^2,$$

$$a_{d, \text{vert}} = \psi_1 \times a_{\max, \text{vert}} = 0,4 \times 0,58 = 0,23 < 1,0 \text{ m/s}^2 \quad \checkmark$$

met $C = 2,95, \sigma_F^2 = 1,2 \times 10^{-2} \times 30 = 0,36 \text{ kN}^2, k_{a,95\%} = 3,92$
 $k_1 = -0,07 \times 1,8^2 + 0,6 \times 1,8 + 0,075 = 0,9282$
 $k_2 = 0,003 \times 1,8^2 - 0,04 \times 1,8 - 1 = -1,06228$

$$a_{\max, \text{lat}} = k_{a,95\%} \sqrt{\frac{C \sigma_F^2}{M_i^2}} k_1 \xi^{k_2} = 0,087 \text{ m/s}^2 < 0,1 \text{ m/s}^2 \quad \checkmark$$

met $C = 6,8 \sigma_F^2 = 2,85 \times 10^{-4} \times 30 = 8,55 \times 10^{-3} \text{ kN}^2, k_{a,95\%} = 3,77$
 $k_1 = -0,08 \times 0,8^2 + 0,5 \times 0,8 + 0,085 = 0,5362$
 $k_2 = 0,005 \times 0,8^2 - 0,06 \times 0,8 - 1,005 = -1,0498$

Hivras

1^{ste} voorbeeld – 50m Voetgangersbrug

2. Bepaling van de karakteristieke maximale versnelling

2.2 voor $d = 1,0 \text{ P/m}^2$

$$a_{\max, \text{vert}} = k_{a,95\%} \sqrt{\frac{C \sigma_F^2}{M_i^2}} k_1 \xi^{k_2} = 1,05 \text{ m/s}^2$$

$$a_{d, \text{vert}} = \psi_1 \times a_{\max, \text{vert}} = 0,4 \times 1,05 = 0,42 < 2,5 \text{ m/s}^2 \quad \checkmark$$

met $C = 3,7 \sigma_F^2 = 7,0 \times 10^{-3} \times 150 = 1,05 \text{ kN}^2, k_{a,95\%} = 3,80$
 $k_1 = -0,07 \times 1,8^2 + 0,56 \times 1,8 + 0,084 = 0,8652$
 $k_2 = 0,004 \times 1,8^2 - 0,045 \times 1,8 - 1 = -1,06804$

$$a_{\max, \text{lat}} = k_{a,95\%} \sqrt{\frac{C \sigma_F^2}{M_i^2}} k_1 \xi^{k_2} = 0,20 \text{ m/s}^2 > 0,1 \text{ m/s}^2 \quad \times$$

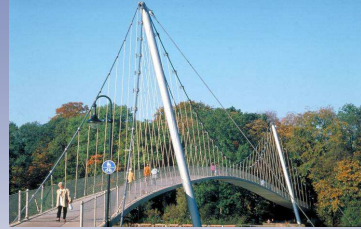
met $C = 7,9 \sigma_F^2 = 2,85 \times 10^{-4} \times 150 = 4,275 \times 10^{-2} \text{ kN}^2, k_{a,95\%} = 3,73$
 $k_1 = -0,08 \times 0,8^2 + 0,44 \times 0,8 + 0,096 = 0,4992$
 $k_2 = 0,007 \times 0,8^2 - 0,071 \times 0,8 - 1 = -1,05232$

Hivras

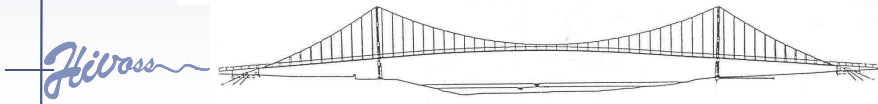
Risico interactie tussen brug en voetganger!

Rekenvoorbeelden

2^e Voorbeeld Weser brug (Minden)



Totale lengte	$L = 180 \text{ m}$
Dek breedte	$B = 3,0 \text{ m}$
Beschouwde trilvorm	11 ^{de} mode shape
Beschrijving	verticale trilling - 8 hale golven
Frequentie	$f = 1,42 \text{ Hz}$
Belaste oppervlakte	$S = L \times B = 540 \text{ m}^2$
Modale massa	$m^*(f) = 80,5 \text{ t}$
Demping (log. decrement)	$\delta = 0,085$



Hilvoos

Rekenvoorbeelden

2^e Voorbeeld

1. Stap: Vastleggen ontwerpsituatie:

- TC 2 (weinig verkeer) in combinatie met CL 1 (Maximale Comfort) $\Rightarrow a_{v\text{-limit}} = 0.5 \text{ m/s}^2$

2. Step: Bepaling van systeemeigenschappen

- 6 trilvormen in het kritische gebied – in dit voorbeeld: Mode 11 ($f = 1.47 \text{ Hz}$; $M = 80.5 \text{ t}$)

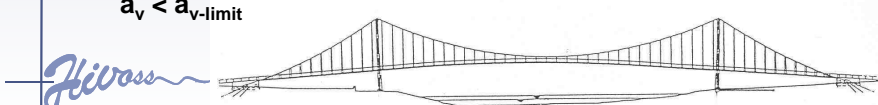
3. Step: Bepaling versnelling

Spectral Method:
 $a_v = 0,5 \text{ m/s}^2$

FE-Method:
 $a_v = 0,4 \text{ m/s}^2$

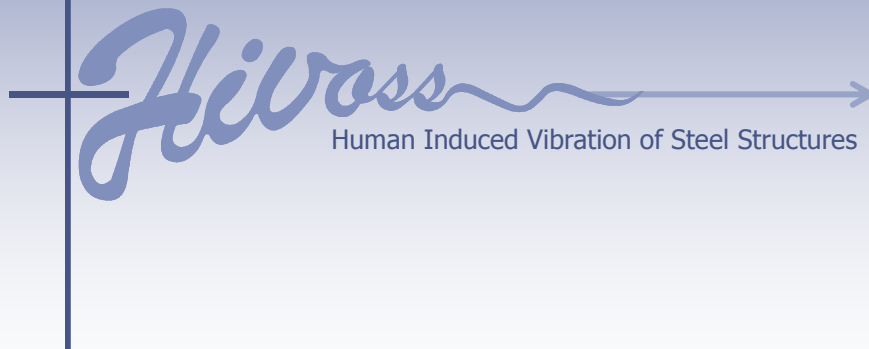
4. Step: Design check

$$a_v < a_{v\text{-limit}}$$



Hilvoos

Conclusie



12/10/2008

RFS2-CT-2007-00033

Ontwerprichtlijn en aanbevelingen voor trilling van voetgangersbruggen door lopen

- Conclusie
- Een nieuwe richtlijn is opgesteld door een int. onderzoeksteam op basis van:
 - Bestaande richtlijnen, normen en aanbevelingen
 - Metingen met name voor lock-in effect
 - Metingen op bestaande bruggen
 - Numerieke studies
 - Richtlijn geeft aan hoe men ontwerpeisen kan vastleggen
 - Richtlijn omvat zowel eenvoudige als geavanceerde methoden
 - Richtlijnen downloaden door:

Googlen naar RFCS-project "HIVOSS"

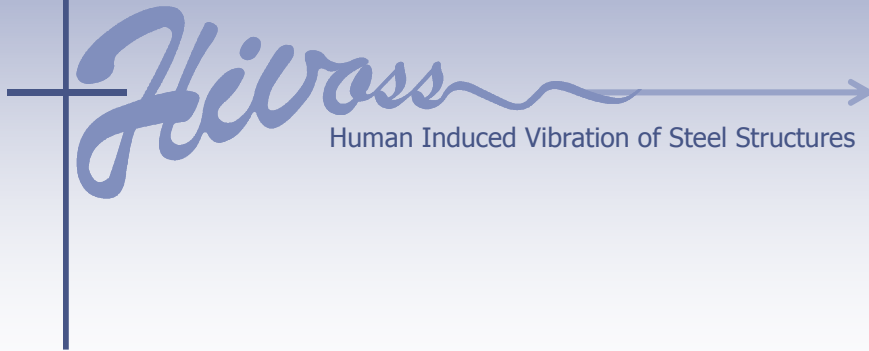


RFS2-CT-2007-00033

22



Vragen



12/10/2008

RFS2-CT-2007-00033