

VTT Technical Research Centre of Finland

Sillan kunnan seuranta raskaan ajoneuvon avulla

Koski, Keijo; Fülöp, Ludovic; Mäkinen, Jukka

Published: 01/01/2019

Document Version
Publisher's final version

[Link to publication](#)

Please cite the original version:

Koski, K., Fülöp, L., & Mäkinen, J. (2019). *Sillan kunnan seuranta raskaan ajoneuvon avulla*. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Tutkimusraportti No. VTT-R-06970-18

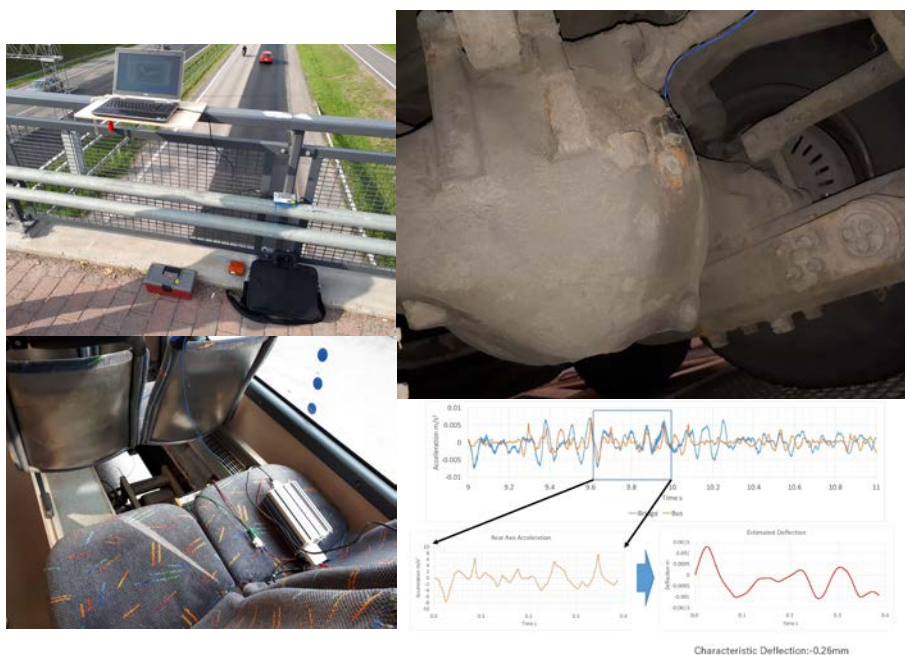


VTT
<http://www.vtt.fi>
P.O. box 1000FI-02044 VTT
Finland

By using VTT's Research Information Portal you are bound by the following Terms & Conditions.

I have read and I understand the following statement:




This document is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of this document is not permitted, except duplication for research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered for sale.



Sillan kunnan seuranta raskaan ajoneuvon avulla

Kirjoittajat: Keijo Koski, Ludovic Fülöp, Jukka Mäkinen

Luottamuksellisuus: julkinen

Raportin nimi Sillan kunnon seuranta raskaan ajoneuvon avulla		
Asiakkaan nimi, yhteystiedot Liikennevirasto Tieosasto Timo Tirkkonen PL 33 00521 Helsinki	Asiakkaan viite 013P8-0066782, 9.3.2018 LIVI/1828/02.01.09/2018	
Projektin nimi Sillan kunnon seuranta raskaan ajoneuvon avulla	Projektin numero/lyhytnimi 118951/SILKUNSE	
Raportin laatijat Keijo Koski, Ludovic Fülöp, Jukka Mäkinen	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 23/10	
Avainsanat Silta, monitorointi, kunto, värähtely, kiihtyvyys, siirtymä	Raportin numero VTT-R-06970-18	
Tiivistelmä <p>Japanissa on kehitetty ja kehitetään menetelmää lyhyiden ja keskipitkän jännevälän raudoitettujen/esijännitettujen betonisiltojen ylläpitoon - määräaikaistarkastusten ajoitukseen. Menetelmä perustuu yksinkertaiseen bussiin asennettavan monitorointijärjestelmän mittaamaan kiihtyvyyssvasteeseen. Kiihtyvyyssanturi asennetaan bussin taka-akseliin. Sillan ylityksestä syntyvästä kiihtyvyyssvasteesta lasketaan nk. karakteristinen taipuma, jota käytetään seurattavana pitkän aikavälin indeksinä. Indeksien muutos paljastaa sillan rakenteissa tapahtuvan muutoksen.</p> <p>Suomessa tavoitteena oli jatkaa kokein japanilaisten kehittämän menetelmän verifiointia ja ennen kaikkea alustavasti selvittää menetelmän soveltuvuus Suomen olosuhteisiin.</p> <p>Mittauksen alustana käytettiin dieselkäyttöistä kolmeakselista HSL:n bussia, joka toimi ainoastaan mittauksia varten menetelmän testausalustana - bussi ei ollut linjakäytössä.</p> <p>Tutkimuksen kohteena olivat Espoossa Piispankylässä/Matinkylässä sijaitsevat Olarin risteysilta ja Matinsilta. Sillat sijaitsevat tiellä Piispansilta ja ne ylittävät Kuitinmäentien ja Länsiväylän.</p> <p>Kiihtyvyyssvasteiden tulkintaa ja niiden kohdistamista sillan pisimmän jännevälän keskikohtaan saattaa vaikeuttaa monia asia mm. se, että tarkasteltavat sillat ovat moniakseisia ja niillä oli paljon rinnakkaista liikennettä. Lisäksi silloilla oli liikennevalot, jotka hidastivat ajoneuvojen ajonopeuksia vaikuttaen kiihtyvyyssvasteiden suuruuteen. Testibussissamme olevan kaksiakselisen takatelin arviointiin myös mahdollisesti aiheuttavan bussiin ja sillan sellaiset kiihtyvyyssvasteet, jotka vaikeuttavat niiden synkronointia. Nyt 25 mittaustuloksesta taipuma kyettiin laskemaan yhdeksälle tapaukselle. Vain yhdeksän lasketun karakteristisen siirtymän avulla ei voida tehdä pitkälle meneviä johtopäätöksiä sovelletun menetelmän toimivuudesta. Matinsillan osalta kuusi laskettua tulosta olivat samaa suuruusluokkaa mittauksesta toiseen, minkä voidaan ajatella merkitsevän, että siltarakenteessa ei tapahtunut muutoksia mittausten aikana. Mutta Olarin risteysillan kolmen lasketun tuloksen perusteella ei voitu valitettavasti päätellä mitään siltarakenteesta. Kuitenkin jo pelkästään Matinsillan tulosten perusteella sovellettu menetelmä vaikuttaa toteuttavalta, mutta vaatisi mittaustuloksia pidemmältä ajalta ja sillan pisimmän jännevälän keskikohdan luotettavaa ja automatisoitua identifiointia.</p>		
Luottamuksellisuus	Julkinen	
Espoo 31.1.2019 Laatija  Keijo Koski Erikoistutkija	Tarkastaja  Juha Kuutti Erikoistutkija	Hyväksyjä  Edgar Bohner Tiimipäällikkö
VTT:n yhteystiedot PL 1000, 02044 VTT (Käyntiosoite: Kemistintie 3, Espoo)		
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Väylävirasto, Timo Tirkkonen Väylävirasto, Mika Stenmark Kozo Keikaku Engineering Inc. (Japani), Akito Yabe Yamaguchi University (Japani), Ayaho Miyamoto Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy		
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.		

Alkusanat

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy sovelsi ja arvio Japanissa kehitettyä ja kehitettävää menetelmää lyhyiden ja keskipitkän jännevälän raudoitettujen/esijännitettyjen betonisiltojen ylläpidon arviointiin, määräaikaistarkastusten ajoitus, Suomessa paikallisissa olosuhteissa. Tutkimuksen kohteena olivat Espoossa sijaitsevat Piispankylässä/Matinkylässä sijaitsevat Olarin risteyssilta ja Matinsilta. Sovelletun menetelmä on yksinkertainen, helppo asennettava ja käyttää sillan kunnon seurantaan. Työ rahoitettiin Väyläviraston (31.12.2018 asti Liikennevirasto) Digitalisaatiohankkeesta 2016-2018.

Tekijät kiittävät Digitalisaatiohankkeen osahankkeen johtoryhmää, hankepäälliköitä Mika Stenmark (Väylävirasto) ja Timo Tirkkonen (Väylävirasto) hyvästä yhteistyöstä ja mielenkiintoisesta työstä.

Espoo 31.1.2019

Keijo Koski, Ludovic Fülöp, Jukka Mäkinen

Sisällysluettelo

Alkusanat	2
Sisällysluettelo	3
1. Johdanto.....	4
2. Tavoite.....	4
3. Kohteen kuvaus	5
3.1 Sillat.....	5
3.2 Monitorointijärjestelmän 1. asennus.....	6
3.3 Monitorointijärjestelmän 2. asennus.....	7
4. Rajaukset.....	8
5. Menetelmät.....	9
6. Tulokset.....	10
7. Johtopäätökset ja yhteenveto	12
Lähdeviitteet.....	13
Liite 1. Mitattuja GPS- ja kiihtyvyyshistorioita.....	14
Liite 2. Karakteristisen taipuman määrittäminen Olarin risteysillalle	16
Liite 3. Karakteristisen taipuman määrittäminen Matinsillalle	20

1. Johdanto

Japanissa on kehitetty ja kehitetään menetelmää lyhyiden ja keskipitkän jännevälän raudoitettujen/esijännitettyjen betonisiltojen ylläpitoon - määräaikaistarkastusten ajoitukseen. Menetelmä perustuu yksinkertaiseen bussiin asennettavan monitorointijärjestelmän kiihtyvyysovasteen pitkäaikaismittaukseen, jolla voidaan havaita rakenteessa tapahtuvat pitkän aikavälin turvallisuuteen ja toimivuuteen vaikuttavat muutokset. Menetelmässä asennetaan linja-auton taka-akseliin kiihtyvyyssanturi. Kiihtyvyyssanturin lisäksi järjestelmä sisältää tietokoneen, tiedonkeruulaitteen, ja paikannusanturin (GPS). Sillan ylittävistä kiihtyvyydestä lasketaan nk. karakteristinen taipuma, jota käytetään seurattavana pitkän aikavälin indeksinä. Indeksien muutos paljastaa sillan rakenteissa tapahtuvan muutoksen. Suoritettujen testien ja laskennallisten analyysien perusteella on havaittu indeksin olevan suhteellisen tunnetun dynaamisille häiriötekijöille kuten tienpinnan rosoisuudelle ja poikkeaville/harvinaisille rakenneratkaisuille.

Menetelmä on halpa ja yksinkertainen asentaa ja ajoneuvon reitistä riippuen sillä voidaan mitata useiden siltojen vasteet useita kertoja päivässä.

Menetelmää on testattu Japanissa Uben kaupungin julkisen liikenteen vakioireittiä ajavassa bussissa liki neljän vuoden ajan. Karakteristisen taipuman tarkkuus on todennettu laskennallisilla menetelmin ja mittauksin käytöstä poistettavalla sillalla. Sillalla toteutettiin keinotekoinen rakenteen muutos (vaurio) poistamalla sillan betoniset kaiteet. Menetelmää on testattu myös Portugalissa Lissabonissa kahdessa sillassa.

Menetelmää testattiin myös Suomessa Espoossa Piispankylässä/Matinkylässä sijaitseville Olarin risteyssillalle ja Matinsillalle. Testialustana käytettiin ”Helsingin seudun liikenne” - kuntayhtymän (HSL) kolmiakselista dieselbussia. Bussimittausten lisäksi mitattiin kiihtyvyysovasteet testisiltojen reunalta testibussin ylittäessä sillat.

2. Tavoite

Projektin tavoitteena oli jatkaa kokein Japanilaisten kehittämän menetelmän verifiointia [6-9] ja ennen kaikkea alustavasti selvittää menetelmän soveltuvuus Suomen olosuhteisiin:

- ✓ vaikuttaako esimerkiksi Suomen liikenteen, siltojen ja sääolosuhteiden poikkeavuus Japanin vastaavista menetelmän soveltuvuuteen;
- ✓ mitä on otettava huomioon sovellettaessa menetelmää Suomessa.

Alkuperäisenä tavoitteena oli testata menetelmää HSL:n linjabussilla numero 23, jonka reitillä sijaitsee viisi siltaa. Asennettava monitorointijärjestelmä tuli Japanilaisilta yhteistyökumppaneiltamme¹. Järjestelmässä ilmennyt paikkasignaalin (GPS) tunnistamisongelma, rajoitetut asennusoikeudet bussiin ja bussin siirtyminen ulkomaille aiheutti sen, että menetelmän testaus suoritettiin vaihtoehtoisilla monitorointijärjestelmällä, bussilla ja silloilla. Vaihtoehtoisena bussina käytettiin myös HSL:n bussia, joka toimi ainoastaan menetelmän testausalustana - ei ollut linjakäytössä. Tämä monitorointijärjestelmä koottiin Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n (VTT) omista laitteista.

¹ Yamaguchi University, Ube, Japan
KOZO KEIKAKU Engineering Inc. Tokyo, Japan

3. Kohteen kuvaus

3.1 Sillat

Tutkimuksen kohteena olivat Piispankylässä/Matinkylässä sijaitsevat **Olarin risteyssilta** ja **Matinsilta** (ks. kuva 1). Sillat sijaitsevat tiellä Piispansilta ja ne ylittävät Kuitinmäentien ja Länsiväylän. Olarin risteyssilta on jännitetty betoninen jatkuva palkkisilta ja Matinsilta teräsbetoninen jatkuva laattasilta. Siltojen yleistiedot esitetään taulukoissa 1 ja 2.



Kuva 1. Olarin risteyssilta ja Matinsilta.

Taulukko 1. Olarin risteysillan perustiedot /10/.

jänneiden lkm.	3
jännemitat	17,5 m + 27 m + 17,5 m
kannen pituus	65 m
hyödyllinen minimileveys	38,05 m

Taulukko 2. Matinsillan perustiedot /10/.

jätteiden lkm.	4
jännemitat	11 m + 21 m + 19,99 m + 16 m
kannen pituus	69 m
hyödyllinen minimileveys	26,2 m

3.2 Monitorointijärjestelmän 1. asennus

Japanilaisten yhteistyökumppaneidemme monitorointijärjestelmä asennettiin HSL:n sähkölinja-autoon (linja nro 23, Rautatientori-Invalidisäätiö, Helsinki). Sähkölinja-auto oli Linkker yhtiön valmistama (ks. kuva 2) [1]. Kyseistä bussia käytetään Business Finlandin rahoittaman ”Living Lab Bus (LLB)”-hankkeen avoimena testialustana erilaisille yksityisten yritysten ja tutkimusorganisaatioiden kehitteillä oleville palveluille ja teknologioille [2].



Kuva 2. ”Helsingin seudun liikenne” -kuntayhtymässä (HSL) liikennöivä sähkölinja-auto (linja nro. 23, Rautatientori-Invalidisäätiö, Helsinki).

Monitorointijärjestelmä koostui tablettitietokoneesta HP Slate 2, Keyence’n tiedonkeruulaitteesta NR-500+NR-CA04, Fuji Ceramics’n kiihtyvyyssanturista SA11C ja ZMP’n GPS-anturi Position-Z 2. Monitorointijärjestelmän tarvitsema sähkö tuli bussin omasta sähköjärjestelmästä. Järjestelmien välissä käytettiin Intelligetin DC/AC 24V 300W invertteriä. Monitorointijärjestelmän suojana oli yhden bussin takapenkkiparin alle asennettu lukittava 47 l alumiininen säilytyslaatikko. Laatikko oli kiinnitetty bussin lattiaan tarraliuskoilla.

Linjalla nro 23 sijaitsee viisi siltaa, joista kolmen sillan vasteita haluttiin seurata. Sillat olivat Asemapäällikönkadun silta tai vaihtoehtoisesti Pasilansilta, Wallininkadun silta ja Hakamäentien silta.

Monitorointijärjestelmän paikkasignaalin (GPS) tunnistamisongelman ja bussiin myönnettyjen rajoitettujen asennusoikeuksien ja bussin siirtäminen ulkomaille aiheutti sen, että karakteristisen taipuman menetelmän testaus jouduttiin toteuttamaan alkuperäisestä suunnitelmasta poikkeavilla monitorointijärjestelmällä, bussilla ja silloilla.

3.3 Monitorointijärjestelmän 2. asennus

Uuden asennuksen alustana käytettiin nyt dieselkäyttöistä kolmeakselista HSL:n bussia, joka toimi ainoastaan mittauksia varten menetelmän testausalustana - ei ollut linjakäytössä (kuva 3). Bussin massa tyhjänä on 15 100 kg. Monitorointijärjestelmä koottiin VTT:n omista laitteista. Sillan mittauksissa käytetyt laitteet ja ohjelmat esitetään taulukoissa 3 ja 4. Mittauksessa laitteet toimivat akuilla.

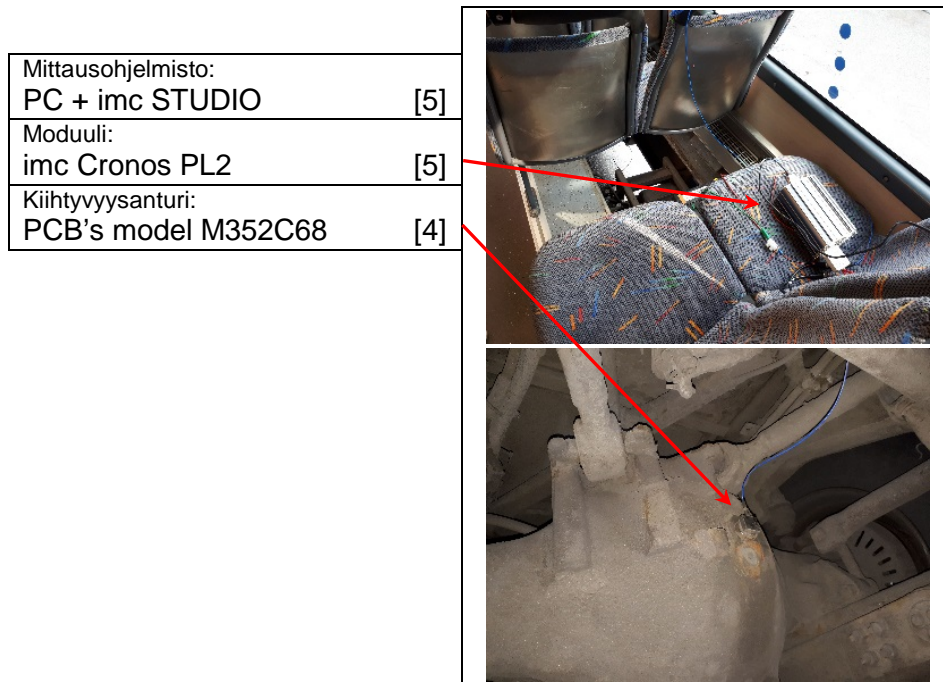


Kuva 3. Mittausalustana käytetty kolmiakselinen bussi.

Taulukko 3. Sillan mittauksissa käytetty laitteisto.

Mittausohjelmisto: PC + Labview-ohjelma	[3]	
Räkki: NI USB-9162	[3]	
Moduuli: NI 9234	[3]	
Kiihtyvyyssanturi: PCB's model M352C68	[4]	

Taulukko 4. Bussin akselin mittauksissa käytetty laitteisto.



4. Rajaukset

Mittaukset suoritettiin ajamalla tutkittavien siltojen yli bussilla kuvan 4 osoittamaa reittiä myötapäivään siten, että Olarin risteyssilta ylitettiin 12 kertaa ja Matinsilta 13 kertaa (taulukko 5). Bussilla monitorointi suoritettiin jatkuvana ja mittauksista poimittiin mittaustiedon supistamiseksi vain siltojen ylitykset sisältävät GPS- ja pystykiihtyvyyssiato GPS-tiedon perusteella. Bussimittausten lisäksi mitattiin erikseen sillan kokema kiihtyvyys sillan reunalta pisimmän jännevälän keskeltä, kun testibussi ylitti sillan. Kiihtyvyys mitattiin bussin käyttämän kaistan puolelta ja se mitattiin Olarin risteysillalta kolme kertaa ja Matinsillalta neljä kertaa (taulukko 5).



Kuva 4. Bussin ajoreitti: silmukka, jossa aina sama ajosuunta.

Taulukko 5. Mittaustiedostot bussista ja sillalta bussin ylittäessä koko sillan.

Tiedosto	Kiihtyvyys (bussi) [m/s ²]				Kiihtyvyys (silta) [g]				Tiedosto	
	Minimi	Maksimi	Keskiarvo	Keski-hajonta	Minimi	Maksimi	Keskiarvo	Keski-hajonta		
1 Matinsilta_1023286_(103.6s)	-8,43277	11,57932	0,02052	2,95008						
2 Matinsilta_1031414_(596.4s)	-11,13880	14,53708	0,02488	3,41395						
3 Matinsilta_1040564_(1151.4s)	-8,99915	12,71208	0,04744	2,34515	-0,01072	-0,01072	-0,00119	0,00187	Matinsilta_18-09-06_1037	2
4 Matinsilta_1049116_(1646.6s)	-8,49570	16,67674	0,03466	2,01809	-0,00910	-0,00910	-0,00002	0,00322	Matinsilta_18-09-06_1046	3
5 Matinsilta_1058204_(2195.4s)	-8,62156	15,35519	0,06565	2,76570	-0,00764	-0,00764	-0,00100	0,00217	Matinsilta_18-09-06_1054	4
6 Matinsilta_1107450_(2760.0s)	-10,82415	13,46725	0,04183	3,08466						
7 Matinsilta_1118130_(3388.0s)	-11,70518	16,36208	0,02926	1,62673						
8 Matinsilta_1131032_(4158.2s)	-13,08967	20,20088	0,04324	3,00192						
9 Matinsilta_1140360_(4731.0s)	-7,55173	7,67759	0,03619	1,52515						
10 Matinsilta_1152064_(5421.4s)	-7,30001	9,06208	0,01830	2,14908						
11 Matinsilta_1201336_(5988.6s)	-11,57932	13,08967	0,02583	2,43275						
12 Matinsilta_1213154_(6690.4s)	-7,61466	9,62846	0,00603	2,07449						
13 Matinsilta_1224456_(7380.6s)	-7,86639	11,01294	0,00787	2,31695						
1 Olarin_risteysilta_1031040_(559.0s)	-6,41897	12,64915	0,01876	1,06231						
2 Olarin_risteysilta_1040138_(1108.8s)	-4,90862	7,11121	0,00269	1,19374						
3 Olarin_risteysilta_1048354_(1610.4s)	-5,03449	9,31380	0,01417	1,20440						
4 Olarin_risteysilta_1057494_(2164.4s)	-4,65690	6,41897	0,01598	0,78657						
5 Olarin_risteysilta_1107076_(2722.6s)	-5,97845	8,55863	0,02952	1,83226						
6 Olarin_risteysilta_1117272_(3342.2s)	-15,04053	12,64915	0,03357	2,16328	-0,01409	0,01043	-0,00124	0,00212	Olarin_risteysilta_18-09-06_1113	1
7 Olarin_risteysilta_1128172_(3992.2s)	-6,60776	7,99225	0,04365	1,39423	-0,00777	0,00766	-0,00129	0,00157	Olarin_risteysilta_18-09-06_1124	2
8 Olarin_risteysilta_1140022_(4697.2s)	-4,90862	5,16035	0,02507	0,90149	-0,01527	0,01041	-0,00313	0,00277	Olarin_risteysilta_18-09-06_1136	3
9 Olarin_risteysilta_1150126_(5307.6s)	-4,15345	4,34225	-0,00222	0,75941						
10 Olarin_risteysilta_1200592_(5954.2s)	-9,31380	9,50259	-0,00661	1,36587						
11 Olarin_risteysilta_1212354_(6650.4s)	-4,21638	3,96466	0,00259	0,69753						
12 Olarin_risteysilta_1224042_(7339.2s)	-3,46121	3,83880	0,00700	0,85826						

5. Menetelmät

Japanissa on kehitetty menetelmää betonisiltojen kunnonvalvontaan, joka perustuu yksinkertaiseen bussiin asennettavaan monitorointijärjestelmän tuottamaan kiihtyvyyssdataan, jolla voidaan tulkita sillassa tapahtuvat pitkän aikavälin turvallisuuteen ja toimivuuteen vaikuttavat rakennemuutokset. Menetelmässä asennetaan bussin taka-akseliin kiihtyvyyssanturi. Bussin ylittäessä sillan mitatusta pystykiihtyvyydestä nk. karakteristinen

taipuma, jota käytetään seurattavana pitkän aikavälin indeksinä. Indeksien muutos paljastaa sillan rakenteissa tapahtuvan muutoksen. Suoritettujen testien ja laskennallisten analyysien perusteella on havaittu indeksin olevan suhteellisen tunnoton dynaamisille häiriötekijöille kuten tienpinnan epätasaisuus.

Tarvittava taipuma lasketaan mitatusta pystykiihtyvyydestä integroimalla se kahdesti. Laskettava taipuma, pystysiirtymä, on summa

- 1) staattisesta siirtymästä, joka riippuu sillan jäykkyydestä ja linja-auton massasta;
- 2) epästationaarisesta värähtelykomponentista aiheutuen tien epätasaisuudesta;
- 3) sillan ja linja-auton muodostamista liikeyhtälöiden mukaisista värähtelykomponenteista;
- 4) ulkoisista häiriötekijöistä, jotka syntyvät mm. bussin operoinnista ja laskentamenetelmistä.

Alla kuvataan yleisluonteisesti, miten karakteristinen taipuma määritetään. Yksityiskohtaisempi kuvaus menetelmästä löytyy mm. lähteistä [6-9].

- 1) Poimitaan pystykiihtyvyydestä se osa, kun bussi ylittää sillan hyödyntäen GPS- ja aikatietoa.
- 2) Arvioidaan ajankohta, kun linja-auto ylittää sillan jännevälin keskikohdan. Arvioinnissa voidaan hyödyntää sillasta mitattua pystykiihtyvyyden- ja GPS-tietoa.
- 3) Poimitaan mitattu keskijänteen pystykiihtyvyys. Poimittavan signaalin osuus voi olla ~1 s. Karakteristisen taipuman laskennan kannalta on tärkeää, että poimittavan signaalin pituus, muoto ja sen sisältämien aaltojen lukumäärät olisivat samankaltaisia samalle mittauskohdalle.
- 4) Integroidaan poimittu pystykiihtyvyyssignaali kahdesti, jotta saadaan taipumasignaali.
- 5) Keskiarvoistetaan laskettu taipumasignaali, jotta saadaan ”karakteristinen taipuma”.

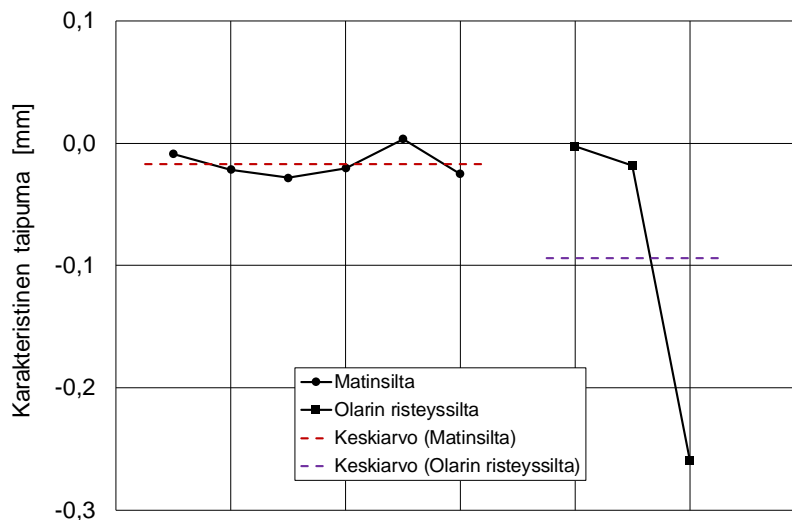
Liitteissä 2 ja 3 esitetään edellä kuvattu lähestymistapa yhdelle sekä Olarin risteysillan että Matinsillan ylityksille.

6. Tulokset

Siltojen ylityksiä vastaavista mittaustiedoista esitetään muutamia tilastollisia tietoja luvun 4 taulukossa 5. Liitteessä 1 esitetään esimerkinomaisesti yhden mittausaikahistoriat siltojen ylityksille. Bussin sillan ylityksistä lasketut karakteristiset taipumat esitetään taulukossa 6 ja kuvassa 5. Käytetyillä menetelmillä kyettiin laskemaan 25 mittaustuloksesta yhdeksän taipumatulosta.

Taulukko 6. Siltojen ylityksiä vastaavia tilastollisia lukuja ja karakteristinen taipuma.

Tiedosto	Kiihtyvyyden (bussi) [m/s ²] Minimi	[m/s ²] Maksimi	[m/s ²] Keskiarvo	[m/s ²] Keskihajonta	[mm] Karakteristinen taipuma	
1	Matinsilta_1023286_(103.6s)	-8,43277	11,57932	0,02052	2,95008	—
2	Matinsilta_1031414_(596.4s)	-11,13880	14,53708	0,02488	3,41395	—
3	Matinsilta_1040564_(1151.4s)	-8,99915	12,71208	0,04744	2,34515	-0,0088
4	Matinsilta_1049116_(1646.6s)	-8,49570	16,67674	0,03466	2,01809	-0,0216
5	Matinsilta_1058204_(2195.4s)	-8,62156	15,35519	0,06565	2,76570	-0,0283
6	Matinsilta_1107450_(2760.0s)	-10,82415	13,46725	0,04183	3,08466	—
7	Matinsilta_1118130_(3388.0s)	-11,70518	16,36208	0,02926	1,62673	-0,0204
8	Matinsilta_1131032_(4158.2s)	-13,08967	20,20088	0,04324	3,00192	—
9	Matinsilta_1140360_(4731.0s)	-7,55173	7,67759	0,03619	1,52515	0,0033
10	Matinsilta_1152064_(5421.4s)	-7,30001	9,06208	0,01830	2,14908	—
11	Matinsilta_1201336_(5988.6s)	-11,57932	13,08967	0,02583	2,43275	-0,0251
12	Matinsilta_1213154_(6690.4s)	-7,61466	9,62846	0,00603	2,07449	—
13	Matinsilta_1224456_(7380.6s)	-7,86639	11,01294	0,00787	2,31695	—
Keskiarvo					-0,0168	
1	Olarin_risteysilta_1031040_(559.0s)	-6,41897	12,64915	0,01876	1,06231	—
2	Olarin_risteysilta_1040138_(1108.8s)	-4,90862	7,11121	0,00269	1,19374	—
3	Olarin_risteysilta_1048354_(1610.4s)	-5,03449	9,31380	0,01417	1,20440	-0,0028
4	Olarin_risteysilta_1057494_(2164.4s)	-4,65690	6,41897	0,01598	0,78657	—
5	Olarin_risteysilta_1107076_(2722.6s)	-5,97845	8,55863	0,02952	1,83226	-0,0184
6	Olarin_risteysilta_1117272_(3342.2s)	-15,04053	12,64915	0,03357	2,16328	-0,2599
7	Olarin_risteysilta_1128172_(3992.2s)	-6,60776	7,99225	0,04365	1,39423	—
8	Olarin_risteysilta_1140022_(4697.2s)	-4,90862	5,16035	0,02507	0,90149	—
9	Olarin_risteysilta_1150126_(5307.6s)	-4,15345	4,34225	-0,00222	0,75941	—
10	Olarin_risteysilta_1200592_(5954.2s)	-9,31380	9,50259	-0,00661	1,36587	—
11	Olarin_risteysilta_1212354_(6650.4s)	-4,21638	3,96466	0,00259	0,69753	—
12	Olarin_risteysilta_1224042_(7339.2s)	-3,46121	3,83880	0,00700	0,85826	—
Keskiarvo					-0,0937	



Kuva 5. Karakteristinen taipuma.

7. Johtopäätökset ja yhteenveto

Mittaukset bussista ja sillasta onnistuivat hyvin. Jos ollaan kiinnostuneita vain siltojen kunnosta ja ei esimerkiksi haluta selvittää tienpinnan kuntoa tai liukkaita mittauksien perusteella, niin silloin mittausjärjestelmään on järkevää suunnitella paikkatietoon perustava liipaisin, jolla mittauslaitteisto mittaa vain siltojen läheisyydessä ja näin voidaan vähentää mittauksien määrää.

Kiihtyvyyssvasteiden tulkinta vaatii kokemusta ennen kuin siitä voi tulkita sillan ylityksen eri vaiheet - sillalle tulo, ylitys (tuet, kannet), sillalta poistuminen. Tässä esiteltävissä karakteristisen taipuman laskemiseen tarvittavaan sillan pisimmän jänteen keskikohdan määrittämiseen on käytetty apuna bussin ylityksen aiheuttamaa sillan kiihtyvyyssvasteita. Japanilaisista yhteistyökumppaneistamme, KOZO KEIKAKU Engineering Inc., paikansi sillan pisimmän jänteen keskikohdan tekemällä ns. skalogrammit Wavelet-muunnoksella sekä bussista että sillasta mitatuille kiihtyvyyksille, kun sillan ja bussin akselin taajuuksista oli käsitys (ks. esim. liite 2, kuvat 4 ja 5). Tämän jälkeen, kun jollekin bussin kiihtyvyyssignaaleista on selvitetty sen sillan pisimmän jänteen keskikohtaa edustava osa, niin tätä osaa he käyttivät muille mittausignaaleille tunnistena (ks. liite 2 kuva 8). Käytetty lähestymistapa vaikuttaa työläältä sillan pisimmän jänteen keskikohtaa edustavan mittausignaalin määrittämiseen.

Kiihtyvyyssvasteiden tulkintaa ja niiden kohdistamista sillan pisimmän jänteen keskikohtaan saattaa vaikeuttaa monia asioita mm. se, että tarkasteltavat sillat ovat monikaistaisia ja niillä on paljon rinnakkaista liikennettä. Lisäksi silloilla on liikennevalot, jotka hidastivat ajoneuvojen ajonopeuksia, mikä taas pienentää kiihtyvyyssvasteita. Testibussissamme olevan kaksiakselisen takatelin arviointiin myös mahdollisesti aiheuttavan bussiin ja siltaan sellaiset kiihtyvyyssvasteet, jotka vaikeuttavat niiden synkronointia. (Liite 3, kuva 8)

Edellä mainitut tulkintaan mahdollisesti vaikuttavat tekijät voivat olla eräs syy, että 25 mittauksien tuloksesta taipuma kyettiin laskemaan vain yhdeksälle tapaukselle. Nyt vain yhdeksän lasketun karakteristisen siirtymän avulla ei voida tehdä pitkälle meneviä johtopäätöksiä sovelletun menetelmän toimivuudesta. Matinsillan osalta kuusi laskettua tulosta olivat samaa suuruusluokkaa mittauksesta toiseen (kuva 5), minkä voidaan ajatella merkitsevän, että siltarakenteessa ei tapahtunut muutoksia mittauksien aikana. Mutta Olarin risteyssillan kolmen lasketun tuloksen perusteella ei voida valitettavasti päätellä mitään siltarakenteesta (ks. kuva 5). Karakteristinen taipuma on myös samaa suuruusluokkaa staattisen taipuman kanssa.

Projektin toissijaista tavoitetta, tien pinnan laadun tarkastelu mitatun kiihtyvyyssvasteiden avulla, ei kyetty toteuttamaan resurssipulan vuoksi. Samasta syystä jäi myös mahdollisen tien pinnan liukkauden huomiointi mittausdatasta toteutumatta, koska sen todentamisen vaatimaa mittauksien toistoa talvella ja/tai sateella ei voitu toistaa.

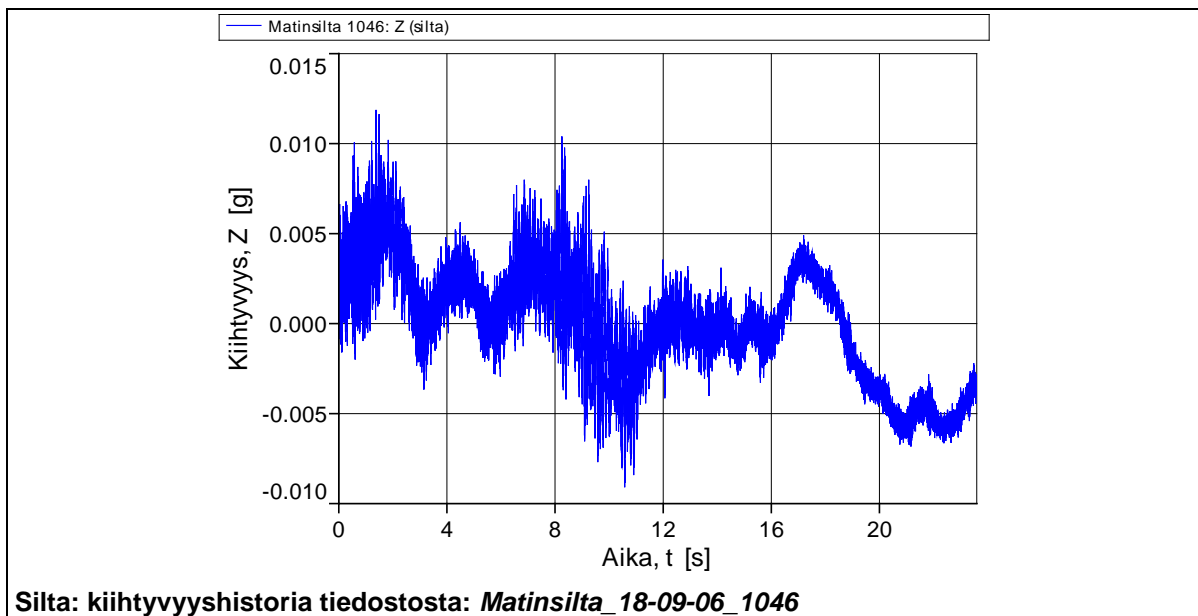
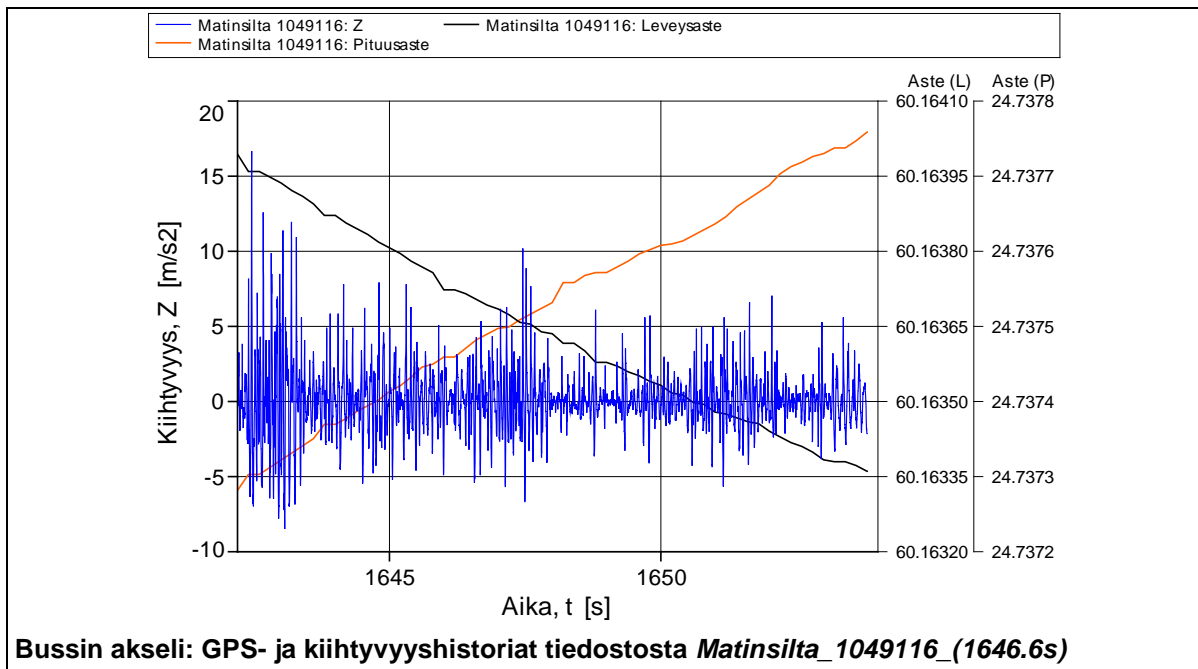
Nyt olisi ensisijaisen tärkeää selvittää, miksi 16 mittausignaalista ei voitu paikantaa sillan jänteen keskikohtaa liitteen 2 kuvan 8 mukaisesti ja laskea karakteristista taipumaa. Kuitenkin jo pelkästään Matinsillan tulosten perusteella sovellettu menetelmä vaikuttaa toteuttavalta, mutta vaatisi mittauksia pidemmältä ajalta ja sillan pisimmän jännevälän keskikohdan luotettavaa identifiointia ja sovelletun lähestymistavan automatisointia.

Muista menetelmän jatkoselvitys ja -kehityskohteista voidaan ilmentuneiden kokemusten ja tulosten perusteella todeta, että menetelmän mittausjärjestelmässä pitää olla liipaisin turhan mittauksien tallentamisen välttämiseksi ellei haluta selvittää myös tien kunnosta tai liukkaita (jää, lumi, vesi). Mittausjärjestelmä on myös kykyvä jaoneuvon sähköjärjestelmään.

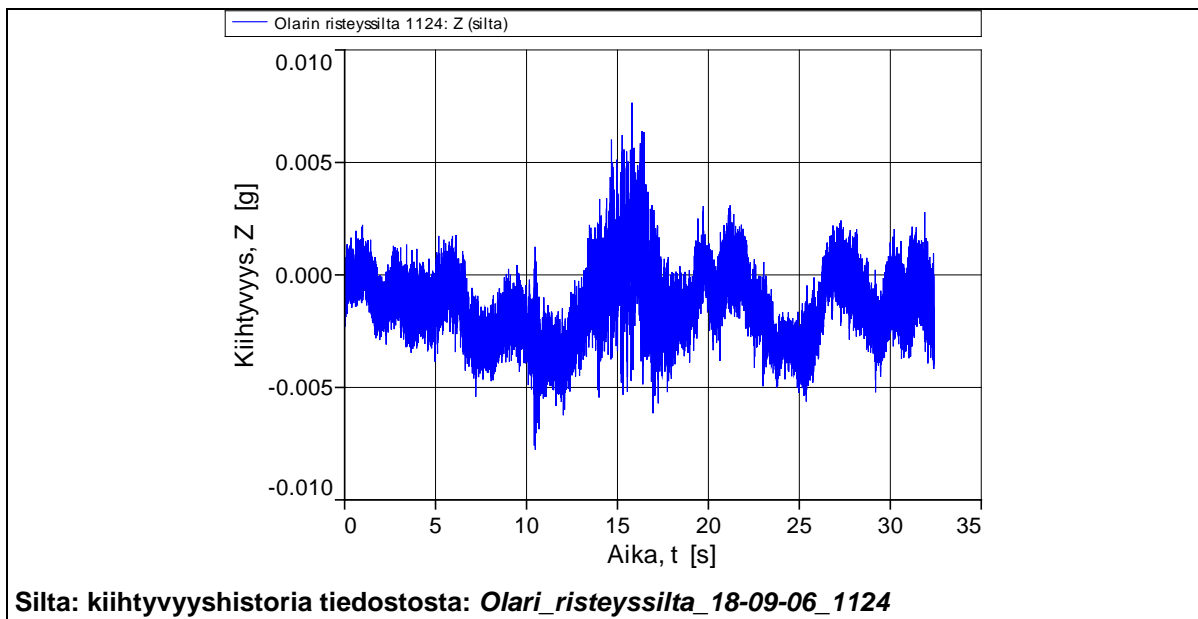
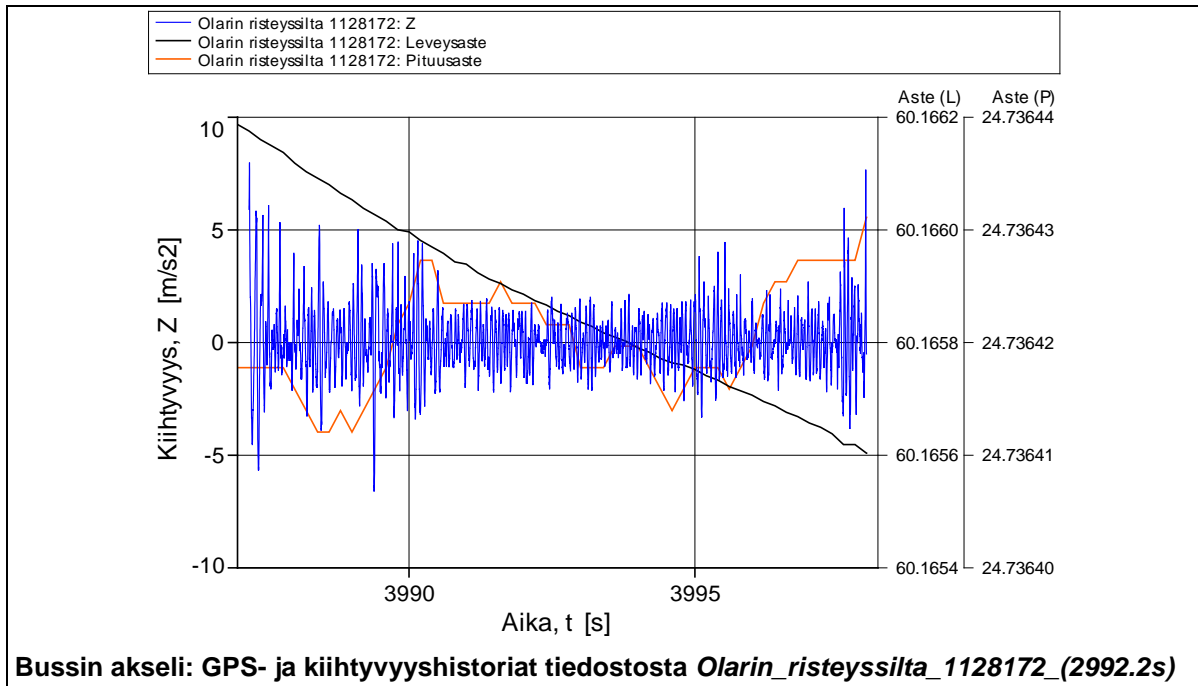
Lähdeviitteet

1. Linkker, <http://www.linkkerbus.com/>
2. Living Lab Bus, <http://livinglabbus.fi/>
3. National Instruments, <http://www.ni.com>
4. PCB PIEZOTRONICS Inc., MTS SYSTEMS CORPORATION, <https://www.pcb.com/>
5. imc Test & Measurement GmbH, <https://www.imc-tm.com/>
6. Miyamoto, A., Yabe, A. 2011. Bridge Condition Assessment based on Vibration Responses of Passenger Vehicle. *Journal of Physics: Conference Series* 305 (2011) 012103
7. Miyamoto, A., Lúcio, V.J.G., Emoto, H., Tanaka, H. 2015. Long term application of bus monitoring system to short and medium span bridges and damage detection. *Journal of Physics: Conference Series* 628 (2015) 012037, IOP Publishing, 1-14.
8. Miyamoto, A., Yabe, A., Lúcio, V.J.G. 2017. Damage Detection Sensitivity of a Vehicle-based Bridge Health Monitoring System. *Journal of Physics: Conference Series* 842 (2017) 012032, IOP Publishing, 1-12.
9. Miyamoto, A., Puttonen, J., Yabe, A. Long Term Application of a Vehicle-Based Health Monitoring System to Short and Medium Span Bridges and Damage Detection Sensitivity. *Engineering* 9(2017)2, Scientific Research Publishing Inc., 68-122.
10. Väylävirasto. Taitorakennerekisteri.

Liite 1

Liite 1. Mitattuja GPS- ja kiihtyvyyshistorioita


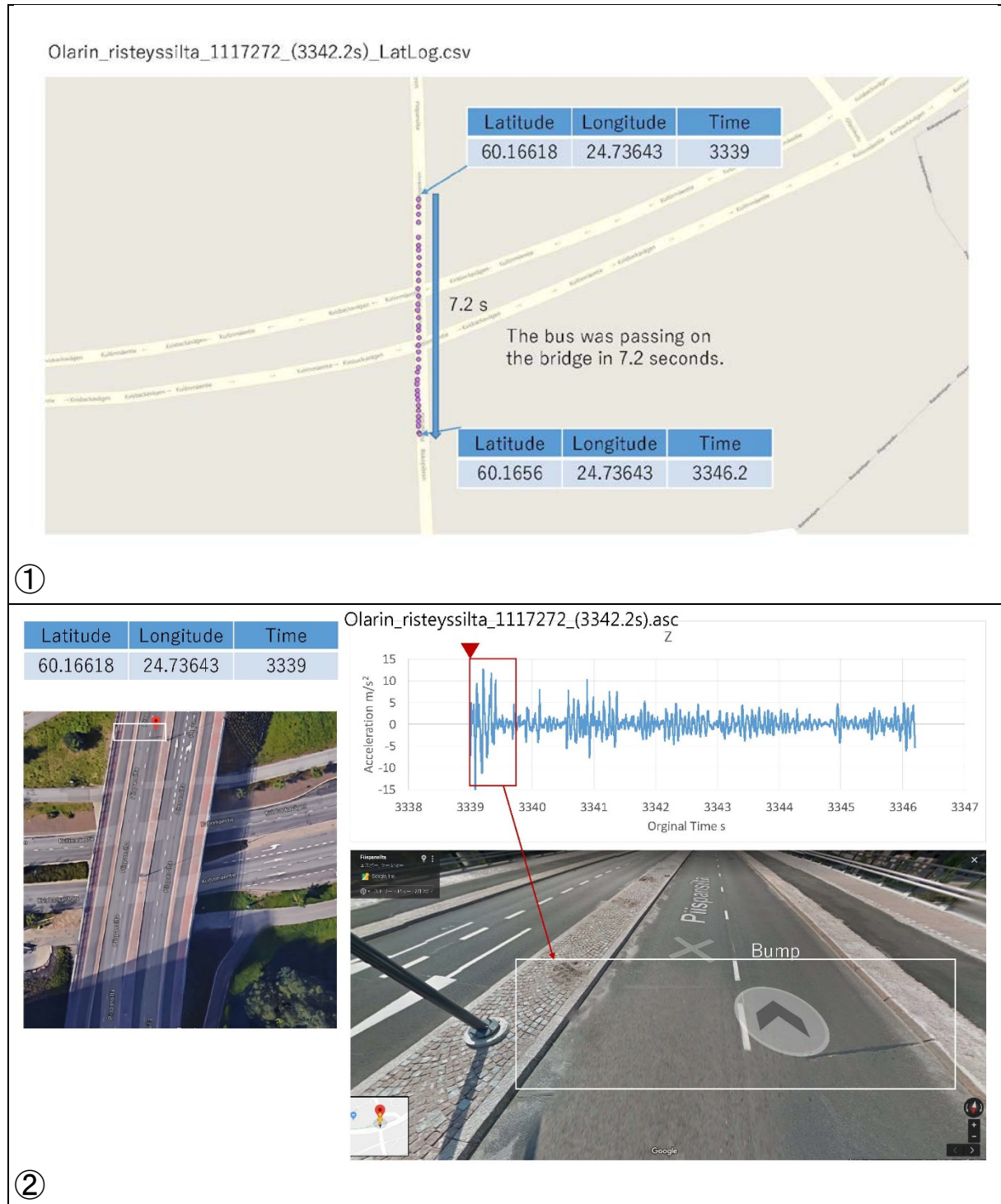
Liite 1



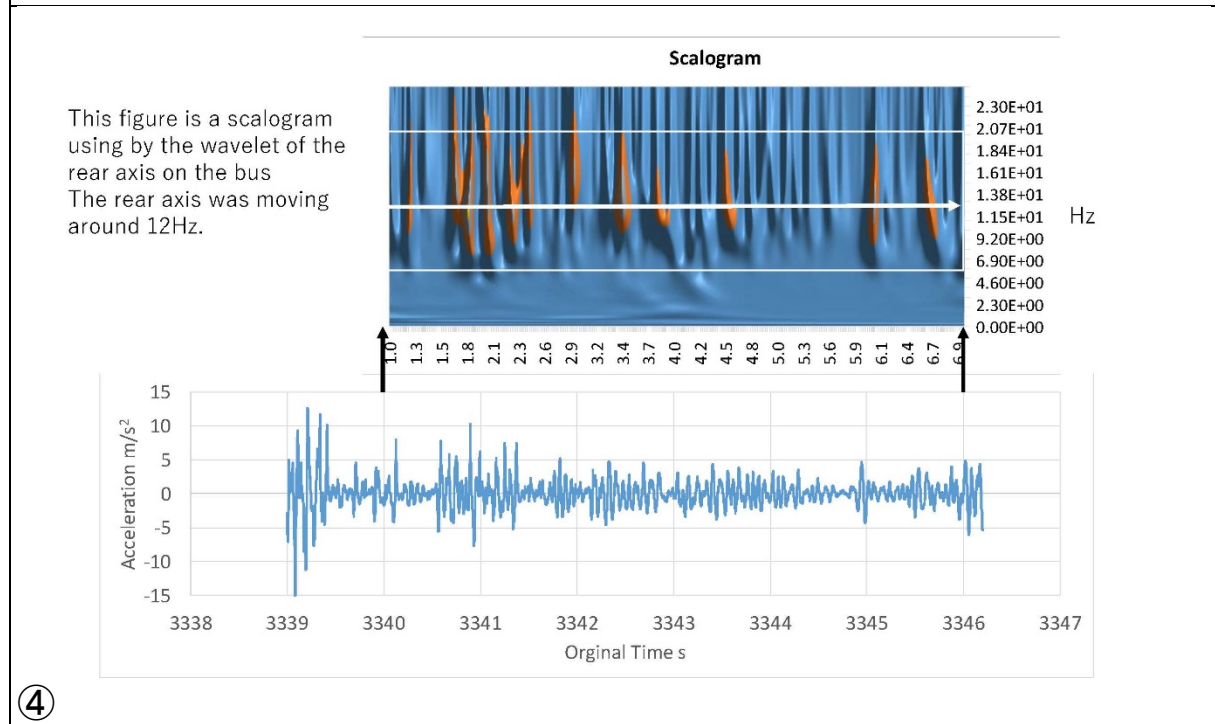
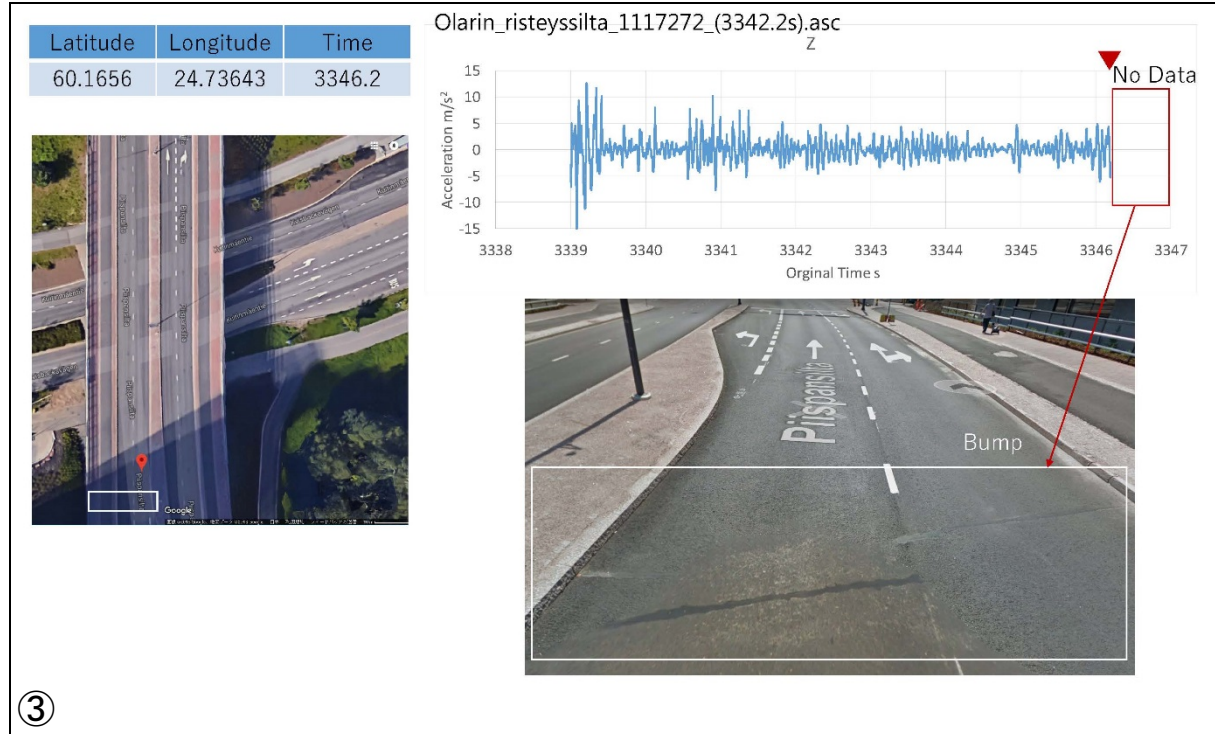
Liite 2

Liite 2. Karakteristisen taipuman määrittäminen Olarin risteysillalle

By courtesy Akito Yabe, Seismic Engineering Dept., KOZO KEIKAKU Engineering Inc. Tokyo, Japan

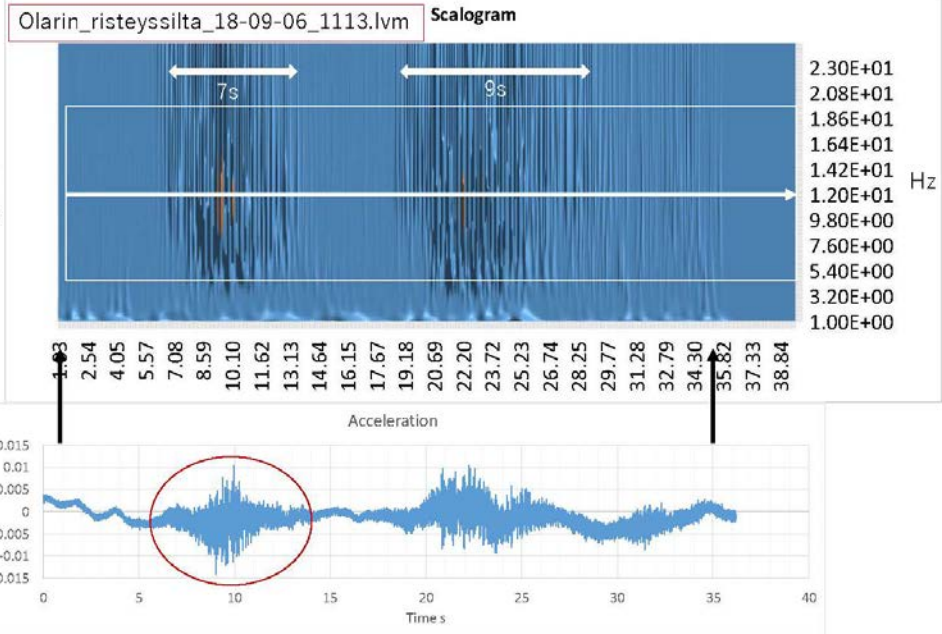


Liite 2

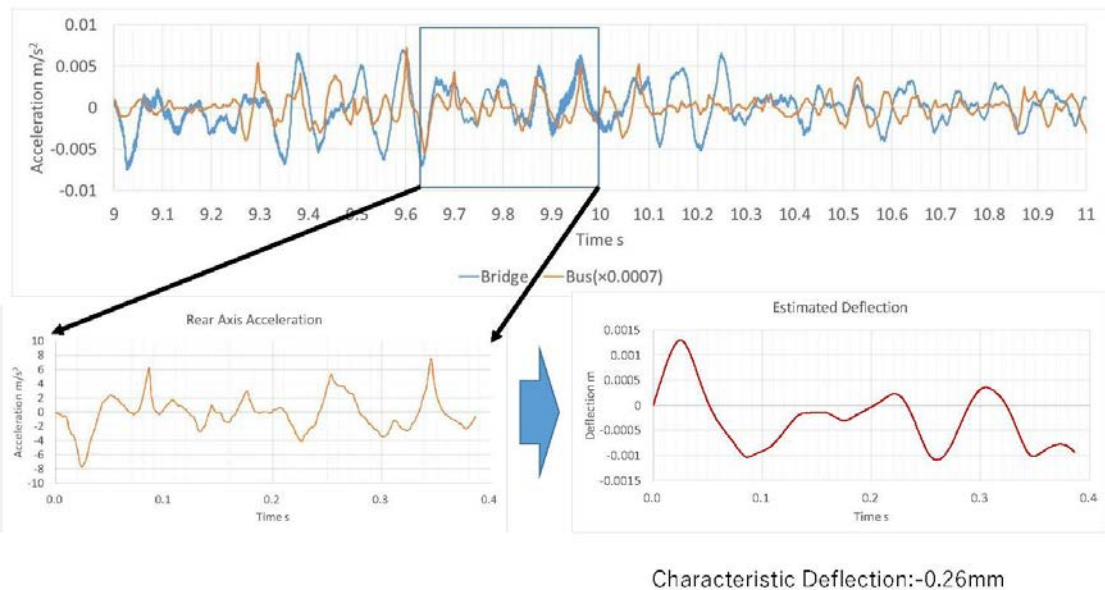


Liite 2

This figure is a scalogram using by the wavelet of the bridge. While the bus had been passing on the bridge, the bridge had around 12Hz vibration. In this data at the first around 12Hz moving time length is 7 seconds, next is 9seconds. So It was estimated that the bus had been passing at red circle time on the figure.

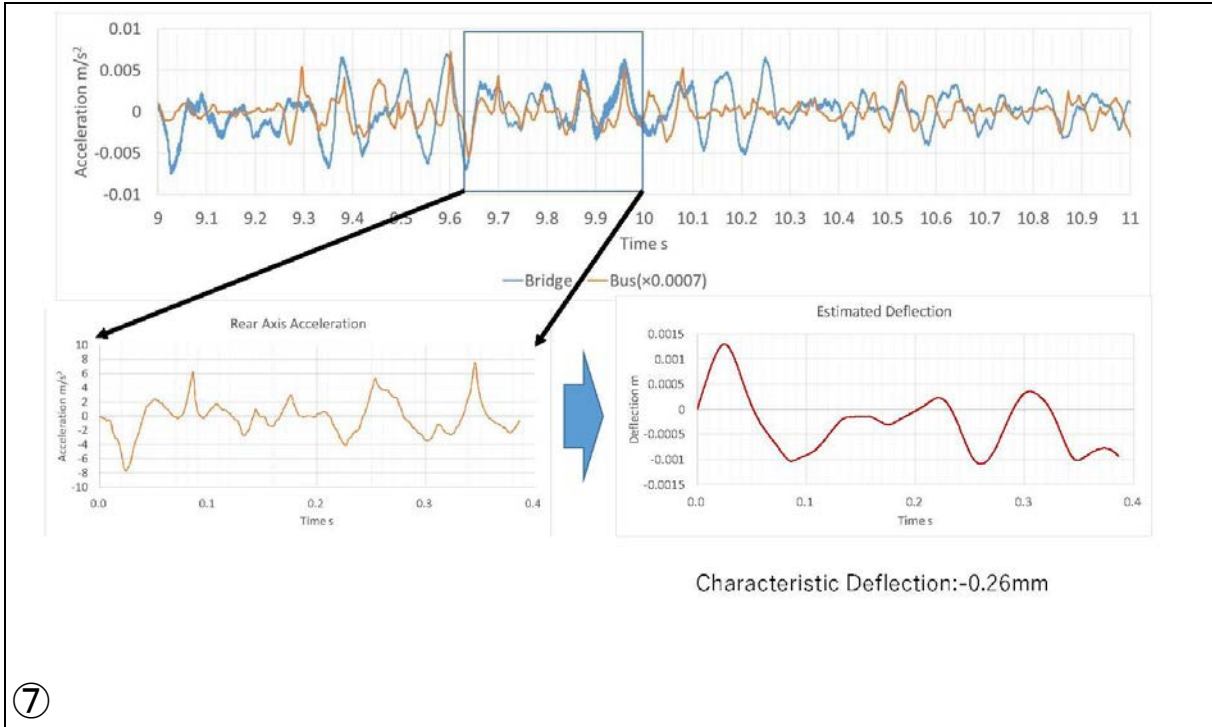


⑤

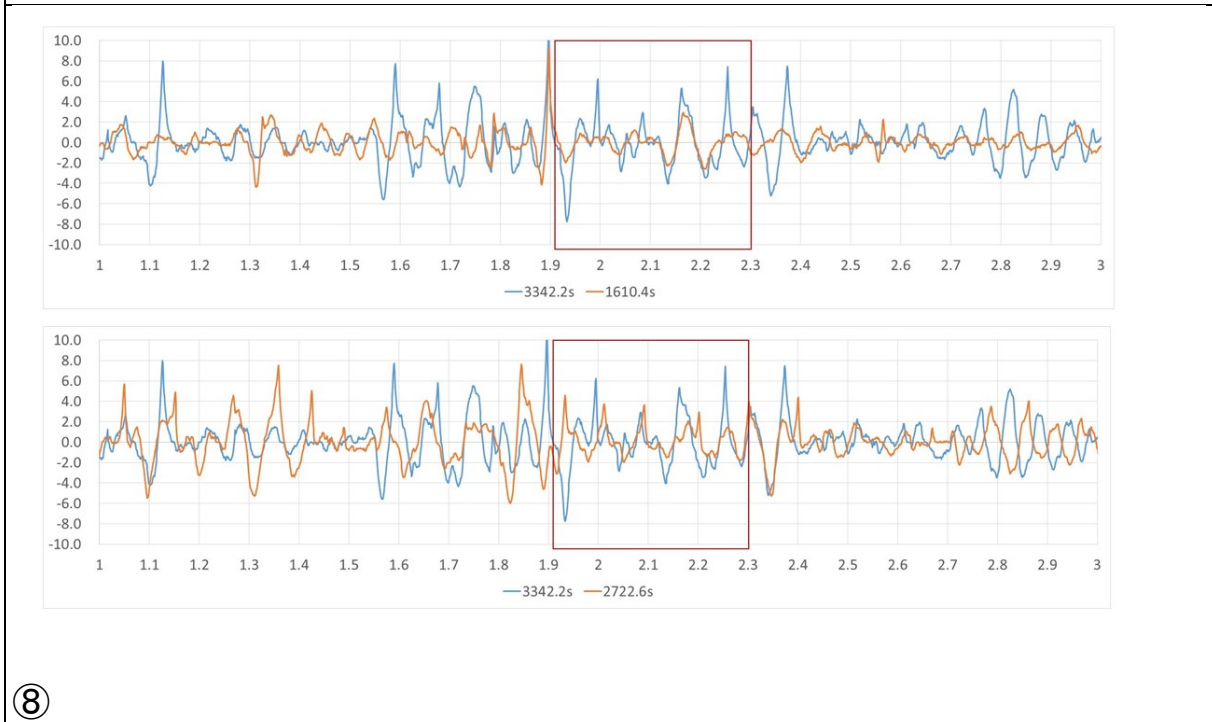


⑥

Liite 2



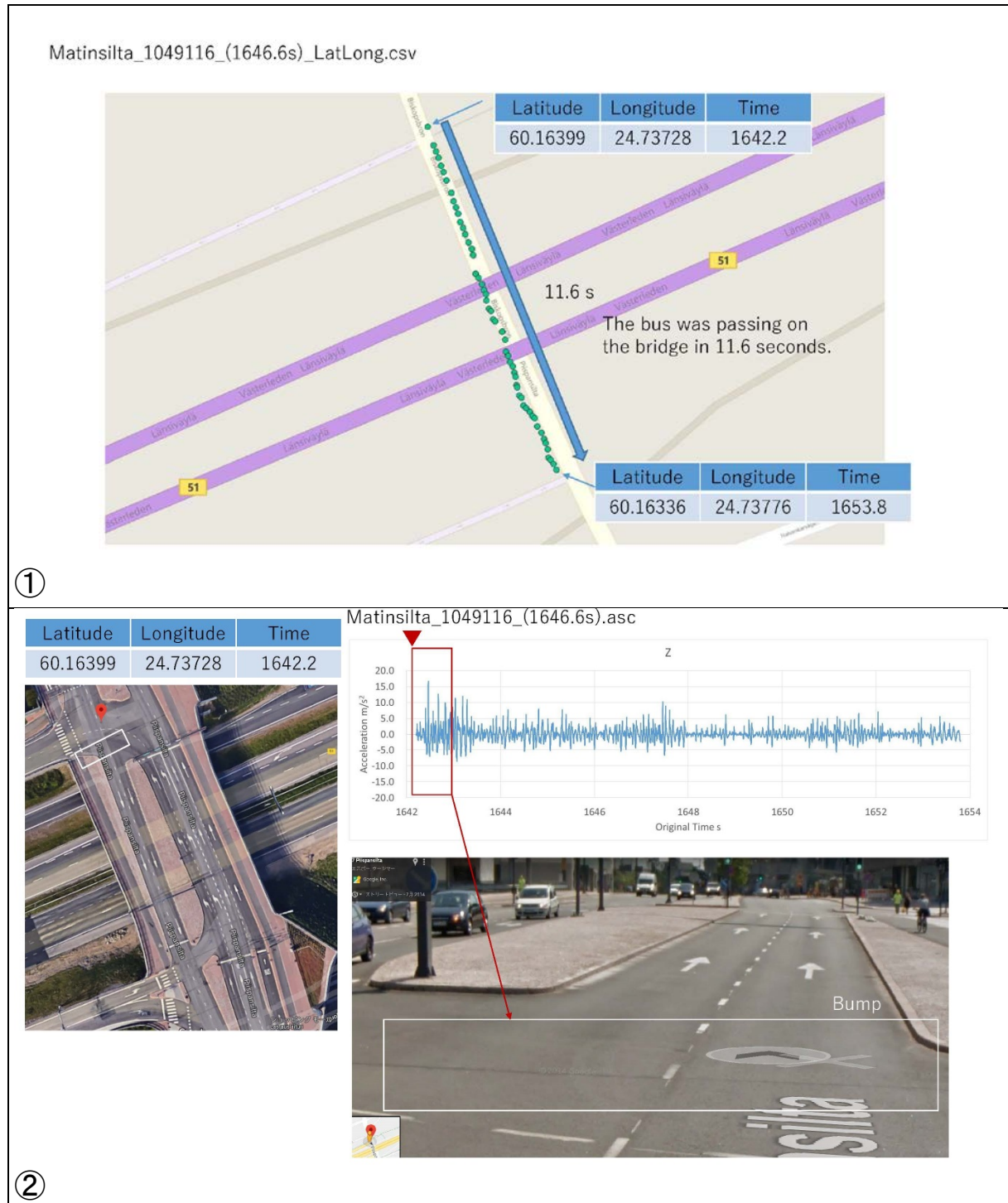
⑦



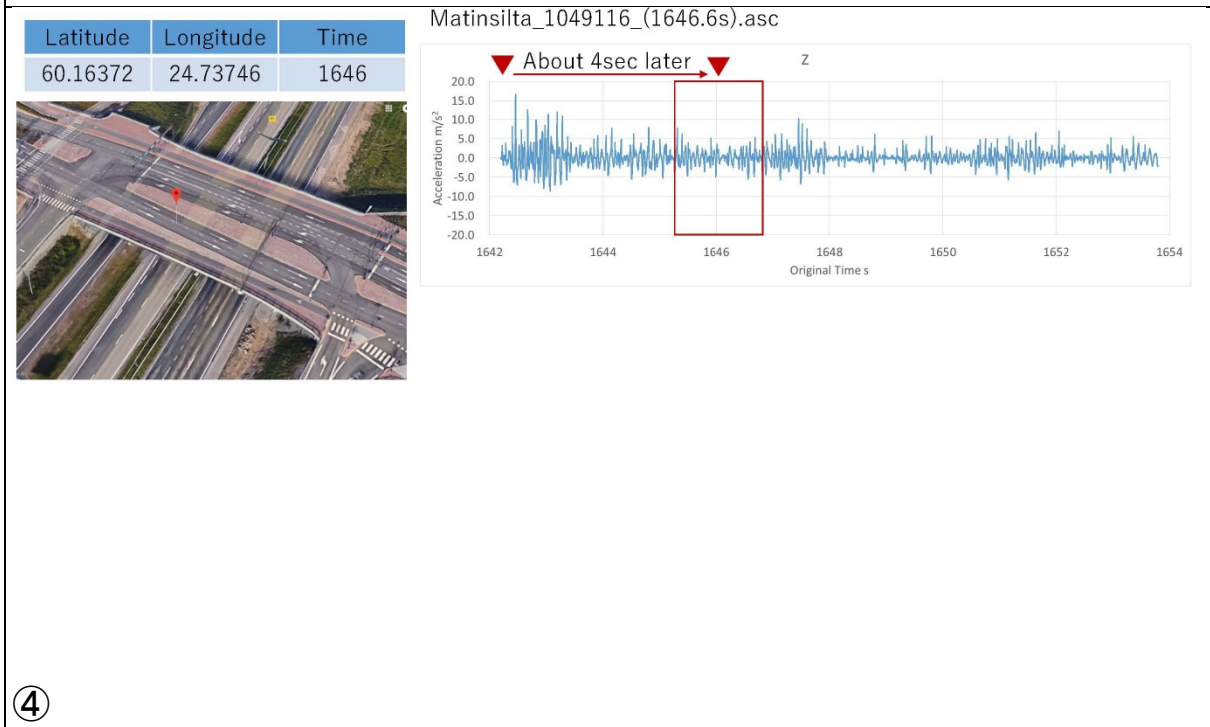
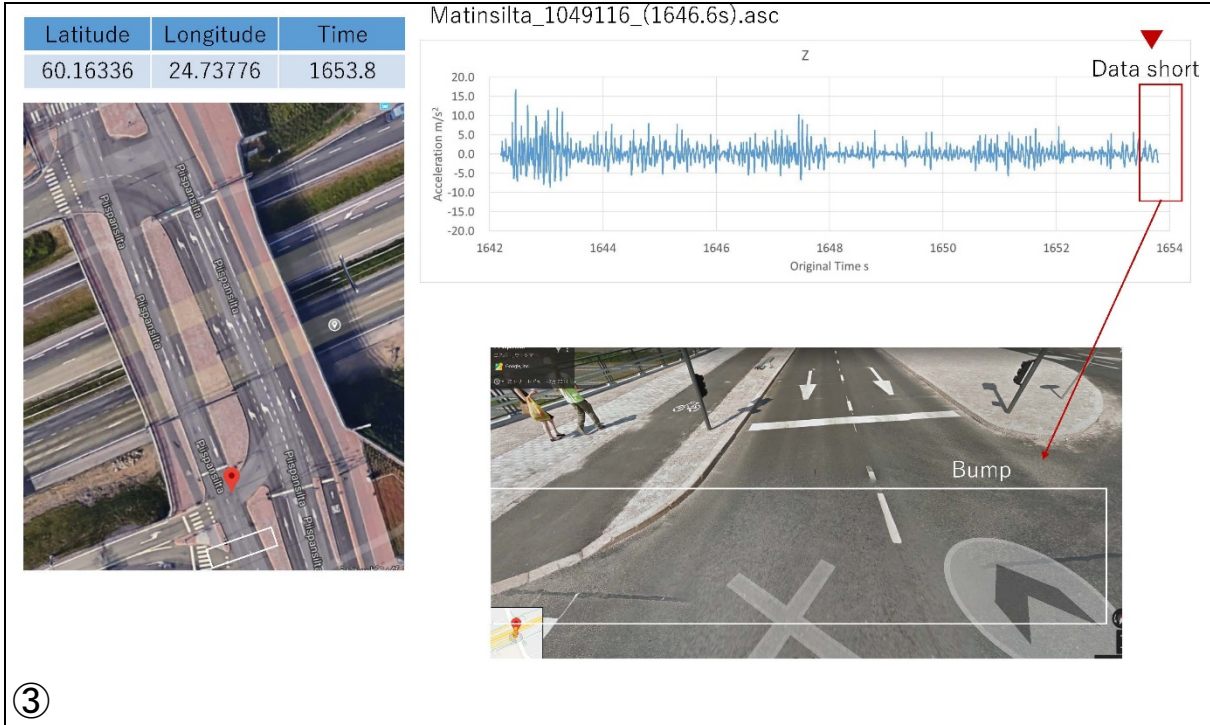
⑧

Liite 3

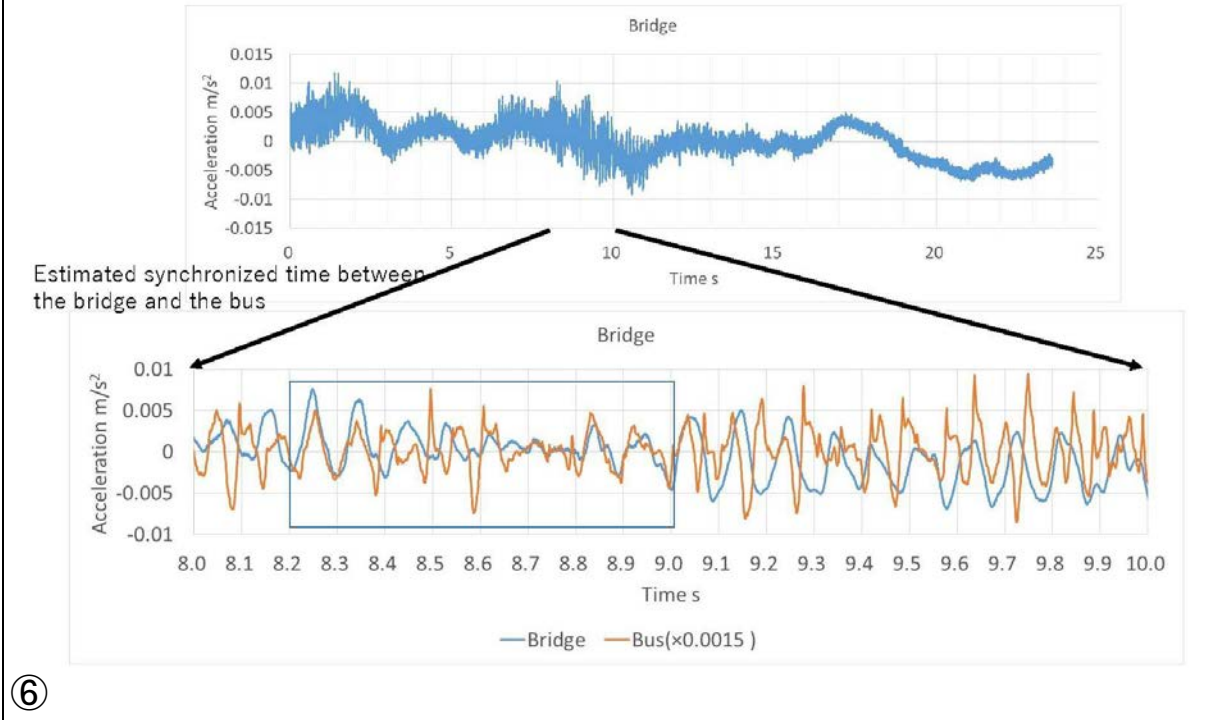
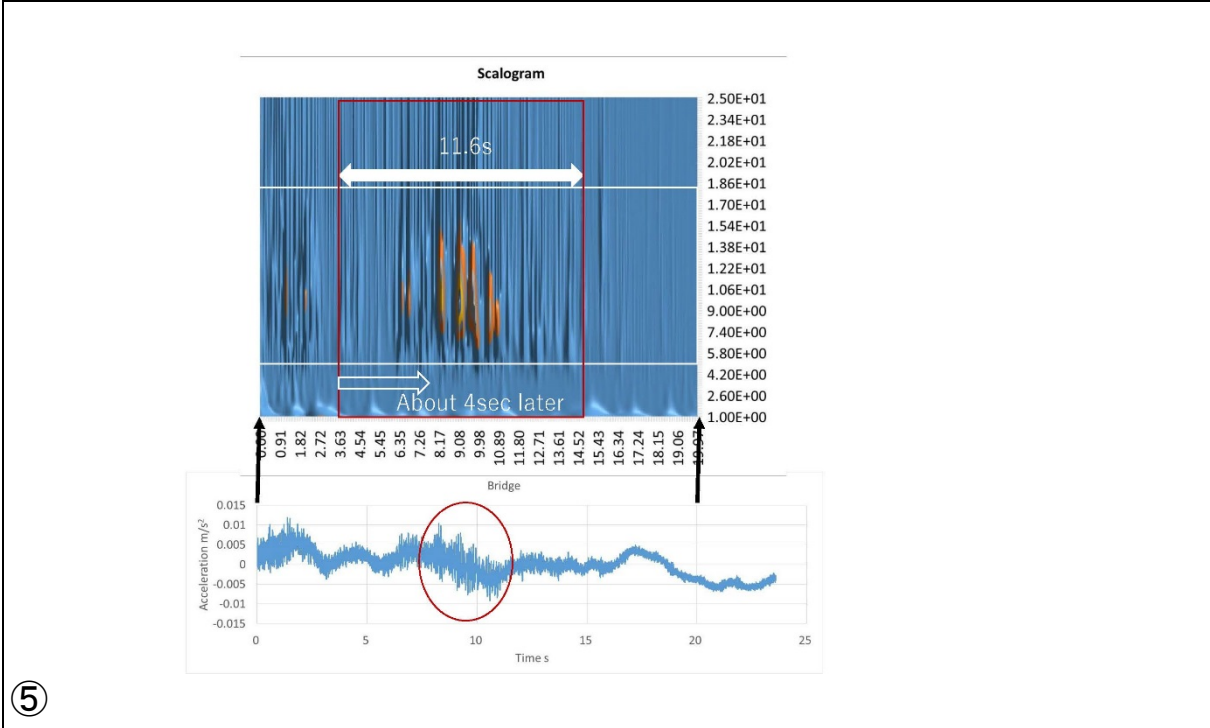
Liite 3. Karakteristisen taipuman määrittäminen Matinsillalle



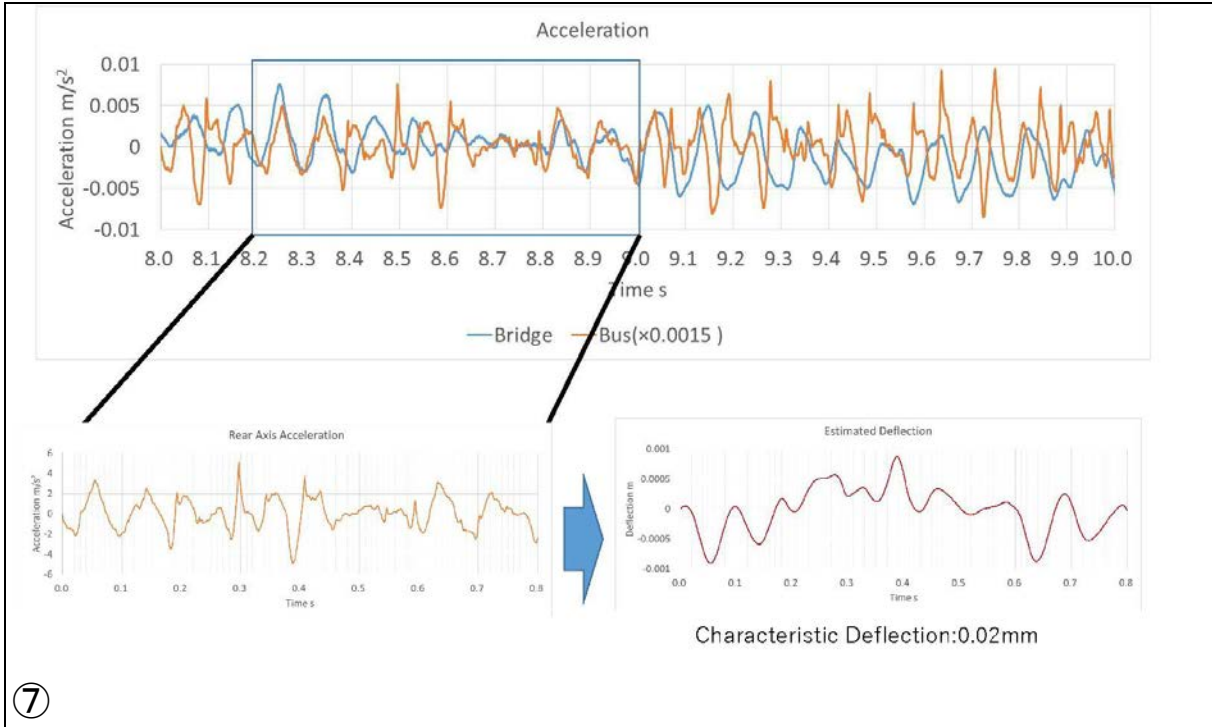
Liite 3



Liite 3



Liite 3



The bridge and the bus had synchronized two time. And the time of between them is weak synchronization. This vehicle is tandem rear axis. I think that It influence to the rear axis and the bridge response.

