



Effetto di amplificazione degli edifici sulle vibrazioni superficiali indotte dalla metropolitana in esercizio

Magnification effect of buildings on surface vibrations induced by metro trains operation

Qian XIA^(*)
Wenjun QU^(**)
Yiqing LI^(***)
Jin ZHAO^(***)

Riassunto - Questo documento si propone di esporre la causa dell'amplificazione delle vibrazioni in superficie indotte dall'esercizio del treno in un sistema "rapid transit". La vibrazione della superficie è stata misurata sul posto ed è stato stabilito un modello 2D a elementi finiti per verificare se l'edificio limitrofo influisce sulla propagazione delle vibrazioni. Basato su questo modello, sono stati discussi gli impatti sul processo di propagazione della posizione e del numero di edifici. Si è concluso che la fondazione dell'edificio ha un effetto di amplificazione sulla vibrazione in superficie; l'effetto è più evidente orizzontalmente che verticalmente, l'amplificazione delle vibrazioni avviene principalmente nella banda delle basse frequenze; la fondazione dell'edificio ha una portata limitata di impatto sulla vibrazione della superficie e l'ambito verticale è maggiore di quello orizzontale. In un ambiente aperto, la vibrazione di superficie è inferiore alla vibrazione della fondazione: nella posizione dell'edificio è l'opposto.

I risultati della ricerca rappresentano una solida base per la previsione delle vibrazioni indotte da esercizi metropolitani e forniscono approfondimenti sulla progettazione delle misure di controllo delle vibrazioni.

Parole chiave: zona di amplificazione delle vibrazioni; vibrazione di superficie; la posizione degli edifici; il numero di edifici.

Summary - This paper aims to disclose the cause of amplification of surface vibration induced by train operation in rapid transit system. The surface vibration was measured on site, and a 2D finite-element model was established to see if the surface building affects the vibration propagation. Based on this model, discussed the impacts of the location and number of buildings on the propagation process. And concluded that the building foundation has an amplification effect on the surface vibration, the effect is more obvious horizontally than vertically; the vibration amplification mainly happens in the low-frequency band; the building foundation has a limited scope of impact on surface vibration, and the vertical scope is greater than the horizontal scope; on an open field, the surface vibration is smaller than the foundation vibration; at the position of the building it is opposite.

The research findings lay a solid basis for the prediction of subway-induced vibration, and provide insights into the design of vibration control measures.

Keywords: vibration amplification zone; surface vibration; the location of buildings; the number of buildings.

1. Introduction

In a rapid transit system, the vibration induced by metro train operation is transmitted to surface buildings through the rail system, tunnel and the soil layer. The vibration often

^(*) Scuola di Ingegneria Civile e Architettura, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Cina.

^(**) College di Ingegneria Civile, Tongji University, Shanghai 200092, Cina.

^(***) Shaanxi JDWG Quality Testing Technology Co., Ltd., Xi'an 710061, Cina.

^(*) School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China.

^(**) College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China.

^(***) Shaanxi JDWG Quality Testing Technology Co., Ltd., Xi'an 710061, China.

1. Introduzione

In un sistema di trasporto veloce, la vibrazione indotta dall'esercizio della metropolitana è trasmessa agli edifici di superficie attraverso il sistema di binari, il tunnel e lo strato di terreno. La vibrazione spesso si attenua nel terreno a causa dello smorzamento delle caratteristiche di smorzamento del materiale. Tuttavia, esiste una zona di amplificazione delle vibrazioni oltre una certa distanza dall'asse del tunnel e la distanza dipende dalle condizioni stratigrafiche e dalla profondità del tunnel [1], [2], [3]. Gli edifici in questa zona sono particolarmente inclini alle vibrazioni del treno. L'esistenza della zona di amplificazione delle vibrazioni è stata dimostrata ripetutamente dai ricercatori [4], [5], [6], [7], [8].

Finora, non vi è ancora un consenso sulle cause dell'amplificazione delle vibrazioni sulla superficie. XIA e WANG [2], [9], hanno sostenuto che l'area di amplificazione locale si presenta quando la vibrazione si attenua sotto ripetute riflessioni e rifrazioni dell'onda elastica, che si propaga nel terreno soffice tra il substrato roccioso e la superficie. YAN et al. [10], hanno attribuito l'amplificazione delle vibrazioni alle condizioni stratigrafiche e alla profondità sotto terra del tunnel. LI [6], ha sottolineato la correlazione tra questo fenomeno e i picchi delle direzioni delle onde di vibrazione propaganti e le condizioni geologiche locali nei punti di indagine. THOMPSON [11], nella interpretazione dell'area di amplificazione, tiene conto dell'effetto bloccante della cavità sotterranea del tunnel sulla trasmissione dell'onda elastica. T. FUJIKAKE [12], ritiene che la presenza dell'area di amplificazione della vibrazione del terreno sia probabilmente causata dalla risonanza dovuta alla frequenza della sorgente di vibrazione che è simile alla frequenza naturale dello strato di terreno. Ciò è coerente con WANG [13], che conclude che vi è un grande fenomeno di riflessione nella banda di frequenza in prossimità della frequenza predominante di vibrazione del terreno. Inoltre, YAN et al. [14], hanno creato una formula di previsione empirica del livello di vibrazione nella direzione Z, che considera la zona di amplificazione delle vibrazioni del transito ferroviario elevato utilizzando il metodo della funzione combinata. Tali studi forniscono preziosi riferimenti alla previsione delle vibrazioni del sistema di trasporto rapido considerando la zona di amplificazione delle vibrazioni.

La ricerca precedente ha dimostrato che l'amplificazione delle vibrazioni obbedisce a leggi diverse a frequenze diverse. LI et al. [15], hanno esplorato le caratteristiche dell'amplificazione a frequenze diverse. YAN et al. [10], hanno analizzato i segnali di vibrazione misurati a frequenze diverse e hanno concluso che la zona di amplificazione è principalmente influenzata dai segnali a bassa frequenza (<20 Hz) piuttosto che dai segnali a media o alta frequenza. MA [16], [17] e WANG [18], attraverso test di vibrazione "a goccia" e analisi numerica, hanno rilevato che tutte le onde di vibrazione della frequenza del segnale si attenuano in maniera non monotona in forma d'onda sulla distanza e che la frequenza è negativamente

attenuates in the soil due to radiation damping and material damping. However, there exists a vibration amplification zone beyond a certain distance from the axis of the tunnel, and the distance depends on the stratigraphic conditions and the depth of the tunnel [1], [2], [3]. The buildings in this zone are particularly prone to vibration of the train. The existence of the vibration amplification zone has been proved repeatedly by researchers [4], [5], [6], [7], [8].

So far, there is not yet a consensus on the causes of vibration amplification on the surface. XIA and WANG [2], [9], held that the local amplification area appears when the vibration attenuates under repeated reflection and refraction of the elastic wave, which propagates in the soft soil between the bedrock and the surface. YAN et al. [10], attributed the vibration amplification to stratigraphic conditions and buried depth of the tunnel. LI [6], pointed out the correlation between this phenomenon and the peaks and troughs of propagating vibration waves and the local geological conditions at the survey points. THOMPSON [11], interpretation of the amplification area takes into account the blocking effect of the underground tunnel cavity on the transmission of elastic wave. T. FUJIKAKE [12], believes that occurrence of the ground vibration amplification area is likely to be caused by resonance due to the frequency of the vibration source is similar to the natural frequency of the soil layer. This is consistent with WANG [13], conclusion that there is a large rebound phenomenon in the frequency band in the vicinity of predominant frequency in the ground vibration frequency. In addition, YAN et al. [14], created an empirical prediction formula of vibration level in the Z direction that considers the vibration amplification zone of elevated rail transit using combined function method. These studies provide valuable references to vibration prediction of rapid transit system considering vibration amplification zone.

The previous research has shown that the vibration amplification obeys different laws at different frequencies. LI et al. [15], explored the features of amplification at different frequencies. YAN et al. [10], analyzed the vibration signals measured at different frequencies, and concluded that the amplification zone is mainly affected by low-frequency signals (<20 Hz) rather than the medium- or high-frequency signals. MA [16], [17] and WANG [18], through drop-weight vibration test and numerical analysis, found that all signal frequency vibration waves attenuate non-monotonously in wave shape over distance, and that the frequency is negatively correlated with wave spacing. MA [16], ascribed the attenuation of single frequency vibration wave to the difference in propagation velocity between bulk wave and Rayleigh wave.

To disclose the cause of surface vibration amplification, this paper carries out field measurement of the surface vibration caused by train operation in a rapid transit system. Then, a 2D finite-element model was established to see if the surface building affects the vibration propagation, and to discuss the impacts of the location and number of buildings on the propagation process. Finally, it is concluded that the building foundation directly bears on the amplifi-

correlata alla lunghezza d'onda. MA [16], attribuiva l'attenuazione dell'onda vibratoria a frequenza singola alla differenza nella velocità di propagazione tra l'onda di massa e l'onda di Rayleigh.

Per discutere la causa dell'amplificazione delle vibrazioni superficiali, questo documento descrive misure sul campo delle vibrazioni di superficie causate dall'esercizio del treno in un sistema di transito veloce. È stato poi creato un modello 2D a elementi finiti per verificare se l'edificio di superficie influisce sulla propagazione delle vibrazioni e per analizzare gli impatti della posizione e del numero di edifici sul processo di propagazione. Infine, si conclude che la fondazione dell'edificio influenza direttamente l'amplificazione delle vibrazioni di superficie. I risultati della ricerca gettano nuova luce sulla causa dell'amplificazione delle vibrazioni superficiali, costituiscono una solida base per la previsione delle vibrazioni indotte dalla metropolitana e forniscono approfondimenti sulla progettazione delle misure di controllo delle vibrazioni.

2. Misura in campo della vibrazione del terreno

La misurazione in campo è stata eseguita nel segmento rettilineo tra Siping Road Station e Anshan Xincun Station della Linea Metro 8 a Shanghai, in Cina. In questo segmento, il centro del tunnel si trova a circa 11,5 m sotto terra. Il tunnel fu costruito mediante TBM (Tunnel Boring Machine). Il diametro della fresa e il diametro interno del tunnel sono rispettivamente di 6,200 mm e 5,500 mm. Il profilo circolare è costituito da sei segmenti in cemento armato. Ci sono 2 edifici residenziali normali in muratura senza basamento sul terreno vicino al suddetto segmento della metropolitana. I treni della metropolitana su questa linea sono tutti a sei carrelli, con una lunghezza totale di 139,8 m, peso proprio di 216 t e velocità di marcia di 19,0 m/s.

Per la nostra ricerca è stata misurata l'accelerazione vibrazionale. Come mostrato nella Fig. 1, sono stati disposti cinque punti di misurazione sul terreno, indicati come CD-1~5, sostanzialmente perpendicolari al tunnel,

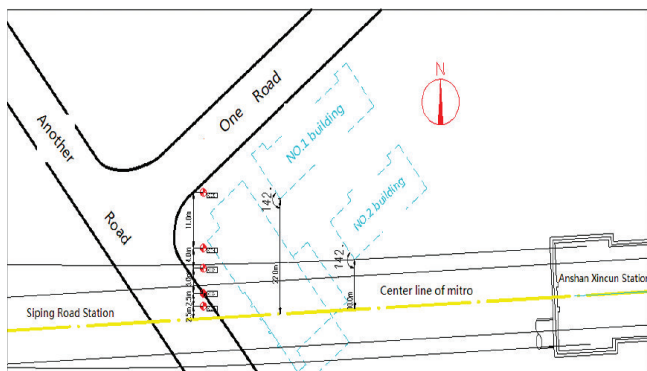


Fig. 1 - Posizioni dei punti di misurazione.
Fig. 1 - Locations of the measuring points.

cation of the surface vibration. The research findings shed new light on the cause of surface vibration amplification, lay a solid basis for the prediction of subway-induced vibration, and provide insights into the design of vibration control measures.

2. Field measurement of ground vibration

The field measurement was carried out in the straight segment between Siping Road Station and Anshan Xincun Station of Metro Line 8 in Shanghai, China. In this segment, the center of the tunnel is about 11.5 m below the ground. The circular tunnel was constructed by shield tunnelling. The shield diameter and the inner diameter of the tunnel are 6,200 mm and 5,500 mm, respectively. The circular profile is made up of six reinforced concrete segments. There are 2 ordinary masonry residential buildings with no basement on the ground near the said metro segment. The metro trains on this line are all six carriages, with a total length of 139.8 m, self-weight of 216 t, and running speed of 19.0 m/s.

The vibration acceleration was measured for our research. As shown in Fig. 1, five measuring points, denoted as CD-1~5, were arranged on the ground basically perpendicular to the tunnel, forming a 25 m-long survey line starting from the position above the centerline at the top of the tunnel (hereinafter referred to as the top centerline position).

The measuring positions are 2.5 m, 5 m, 10 m, 14 m and 25 m away from the top centerline position. The measuring point at 2.5 m away from the top centerline position is considered as being right on that position, because the road is above the top centerline of the tunnel, it is not suitable to arrange the measuring points in the actual situation. The plane layout of the measuring points is presented in Fig. 2. The positions of measuring points and the sectional layout of the buildings are illustrated in Fig. 3. The measuring device and test site were presented in Fig. 4. The sampling frequency was 200 Hz, and 15 groups of valid data were collected.

Run the "DISP" data collection system, and check whether the circuit is connected, the instrument is adjusted to zero and the setting of amplification is reasonable or not by the oscillogram displayed by the computer, and knock the vibrator to check whether the instrument reacts sensitively.

3. Vibration evaluation index and vibration standard

Thanks to the numerous measured data, it is possible to ascertain the attenuation law of vibration acceleration amplitude at different frequencies through 1/3 octave analysis. The acceleration vibration level is defined as:

$$VAL = 20 \lg(a_{rms}/a_0) \quad (1)$$

where the unit of VAL is dB, is the effective value of the vibration acceleration (m/s^2), and a_0 is the reference acceleration ($1 \cdot 10^{-6} m/s^2$, according to ISO2631).

formando una linea di rilevamento lunga 25 m che partiva dalla posizione sopra la mezzeria nella parte superiore del tunnel (di seguito indicata come la posizione centrale superiore).

Le posizioni di misurazione sono 2,5 m, 5 m, 10 m, 14 m e 25 m dalla posizione centrale superiore. Il punto di misurazione a 2,5 m dalla posizione di mezzeria superiore è considerato appropriato, poiché la strada si trova sopra la mezzeria superiore del tunnel e non è consigliabile sistemare i punti di misurazione in posizioni diverse. La Fig. 2 mostra la disposizione nel piano dei punti di misurazione. La Fig. 3 mostra le posizioni dei punti di misurazione e il layout di sezione degli edifici. Il dispositivo di misurazione e il sito di prova sono presentati nella Fig. 4. La frequenza di campionamento è stata fissata in 200 Hz e sono stati raccolti 15 gruppi di dati validi.

L'avvio del sistema di raccolta dati "DISP", il controllo di collegamento del circuito, la regolazione dello strumento su zero e l'impostazione dell'amplificazione sono test ragionevoli verificati sull'oscillogramma visualizzato dal computer, dando un colpo al vibratore per verificare se lo strumento reagisce in modo sensibile.

3. Indice di valutazione delle vibrazioni e standard delle vibrazioni

Grazie ai numerosi dati misurati, è possibile accertare la legge di attenuazione dell'ampiezza di accelerazione delle vibrazioni a diverse frequenze attraverso un'analisi di 1/3 di ottava. Il livello di vibrazione dell'accelerazione è definito come segue:

$$VAL = 20 \lg(a_{rms}/a_0) \quad (1)$$

dove l'unità di misura del VAL è dB, a_{rms} è il valore effettivo dell'accelerazione di vibrazione (m/s^2), ed è l'accelerazione di riferimento ($1 \cdot 10^{-6} m/s^2$, secondo ISO2631).

Nel valutare l'impatto sull'ambiente delle vibrazioni della metropolitana, è solitamente utilizzato il livello di vibrazione verticale VL_z , che può essere scritto come

$$VL_z = 20 \lg(a'_{rms}/a_0) \quad (2)$$

dove a_0 è l'accelerazione di riferimento ed è uguale al valore per calcolare VAL, ed a'_{rms} è la correzione dell'accelerazione di vibrazione (m/s^2) modificata come

$$a'_{rms} = \sqrt{\sum a_{f_{rms}}^2 \cdot 10^{0.1C_f}} \quad (3)$$

dove $a_{f_{rms}}$ è l'accelerazione di vibrazione corrispondente alla frequenza f , ed C_f è il modificatore della percezione dell'accelerazione di vibrazione [19].

4. Analisi dei risultati sperimentali

Durante la misurazione, la cronologia temporale dell'accelerazione vibrazionale è stata registrata continuamente in tre direzioni: la direzione orizzontale lungo

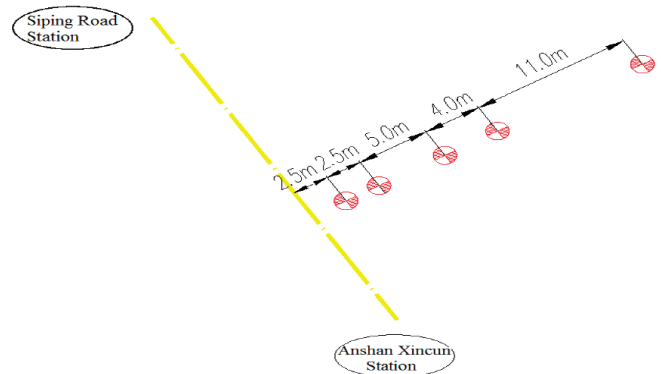


Fig. 2 - Schema del piano dei punti di misurazione.
Fig. 2 - Plane layout of the measuring points.

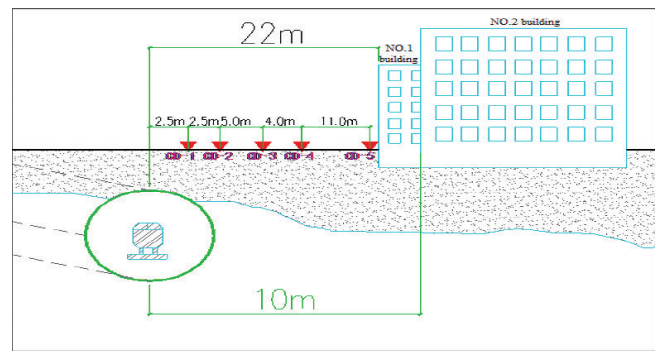


Fig. 3 - Posizioni dei punti di misurazione e disposizione in sezione degli edifici (proiezione a nord-ovest dell'edificio).
Fig. 3 - Positions of measuring points and sectional layout of the buildings (projection along northwest of the building).



Fig. 4 - Il dispositivo di misurazione e il sito di prova.
Fig. 4 - The measuring device and test site.

In evaluating the impact of subway vibrations on the environment, the vertical vibration level VL_z is usually used, which can now be written as

$$VL_z = 20 \lg(a'_{rms}/a_0) \quad (2)$$

where a_0 is the reference acceleration and is the same as the value for calculating VAL, and a'_{rms} is correction of the vibration acceleration (m/s^2) modified as

$$a'_{rms} = \sqrt{\sum a_{f_{rms}}^2 \cdot 10^{0.1C_f}} \quad (3)$$

il tunnel (direzione X), la direzione orizzontale perpendicolare al tunnel (direzione Y) e la direzione verticale (direzione Z), ortogonalmente alle altre prime due direzioni.

I dati registrati sono stati filtrati. Al fine di eliminare l'interferenza casuale nel test, è stato preso il valore medio delle metropolitane per 10 volte in ciascun punto di misurazione.

La vibrazione indotta dal treno dura circa 10 secondi. La vibrazione misurata oltre quel periodo è causata dalle auto che si muovono sulle strade di superficie, cioè le vibrazioni di fondo. I risultati misurati sull'accelerazione vibrazionale sono presentati nella Fig. 5. A causa dello spazio limitato, sono elencati solo la cronologia temporale e lo spettro di frequenza. Lo spettro 3D Fourier delle vibrazioni è visualizzato nella Fig. 6.

Come mostrato nella Fig. 6, i picchi di accelerazione nelle direzioni X e Y si concentrano nell'intervallo 40~80 Hz. La vibrazione del CD-1~4 diminuisce gradualmente con pochi cambiamenti nella distribuzione. Il picco di accelerazione nella direzione Z è cambiato molto nell'intervallo di 40~80 Hz; vi è un picco più evidente nell'intervallo 10~20 Hz, che è l'intervallo di picco dello spettro di Fourier della vibrazione dell'automobile [20], [21], [22]. Inoltre, è stata incrementata la vibrazione 3D su CD-5, che si trova a 25 m dalla posizione della linea centrale superiore, in cui si trova l'edificio, una prova dell'impatto delle fondamenta dell'edificio sull'amplificazione delle vibrazioni del terreno.

where a_{rms} is the vibration acceleration corresponding to frequency f , and C_f is the perception modifier of the vibration acceleration [19].

4. Analysis of experimental results

During the measurement, the time history of vibration acceleration was recorded continuously in three directions: the horizontal direction along the tunnel (the X-direction), the horizontal direction perpendicular to the tunnel (the Y-direction) and the vertical direction to the tunnel (the Z-direction).

And filter the test data. In order to eliminate the random interference in the test, the average value of the metros of more than 10 times is taken at the each measuring point.

The train-induced vibration lasts about 10 s. The vibration measured beyond that period is caused by the cars moving on surface roads, i.e. the background vibration. The measured results on vibration acceleration are presented in Fig. 5. Because of limited space, only the time history and frequency spectrum are listed. The 3D Fourier spectrum of the vibrations is displayed in Fig. 6.

As shown in Fig. 6, the acceleration peaks in the X- and Y-directions concentrated in the range of 40~80 Hz. The vibration of CD-1~4 decreased gradually with little change in the distribution. The acceleration peak in the Z-direction changed greatly in the range of 40~80 Hz; there was a more obvious peak in the range of 10~20 Hz, which is the peak

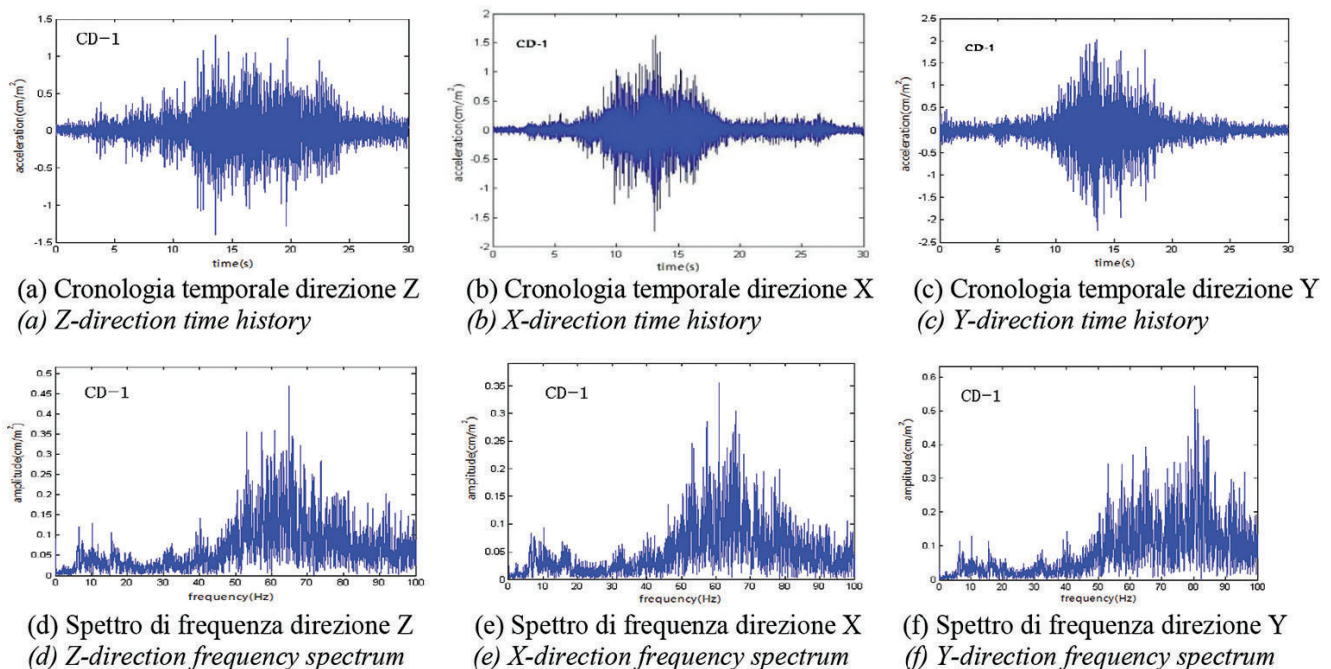


Fig. 5 - Cronologia temporale e spettro di frequenza.

Fig. 5 - Time history and frequency spectrum.

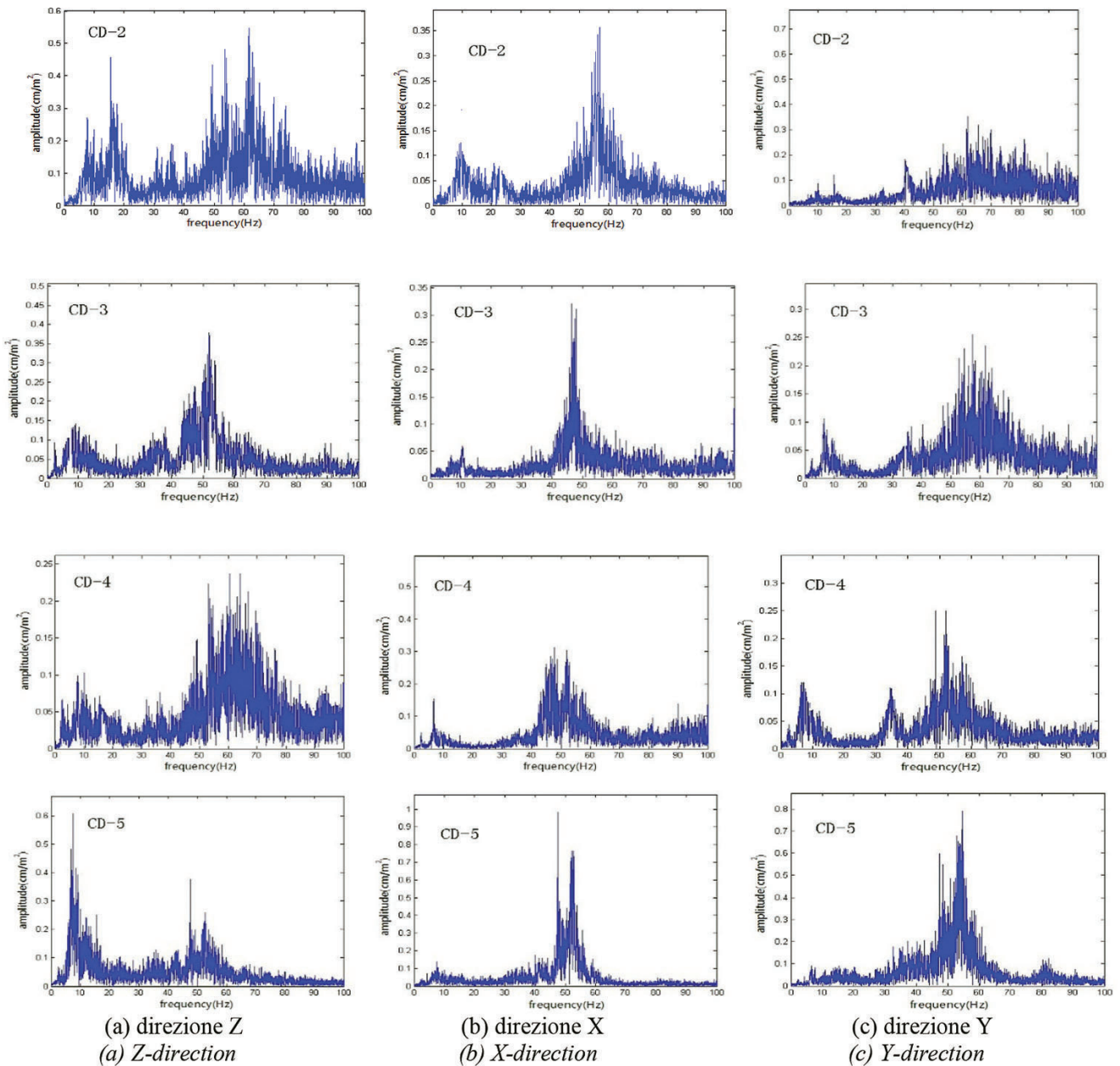


Fig. 6 - Spettro 3D di Fourier.
Fig. 6 - 3D Fourier spectrum.

Questo impatto deriva dalla riflessione dell'onda vibratoria quando si propaga attraverso l'interfaccia tra materiali diversi. In un mezzo non uniforme, la propagazione dell'onda di vibrazione è soggetta a cambiamenti multipli, poiché i diversi materiali hanno diverse energie di riflessione e trasmissione e coefficienti dello smorzamento. L'onda vibratoria che si propaga nel terreno è riflessa e rifratta quando raggiunge le fondamenta poco profonde dell'edificio più vicino. Nell'intervallo di profondità della fondazione, le onde riflesse e rifratte sono so-

range of the Fourier spectrum of automobile vibration [20], [21], [22]. Besides, the 3D vibration at CD-5, which is 25 m away from the top centerline position, where the building is located at was magnified, an evidence to the impact of building foundation on ground vibration amplification.

This impact arises from the reflection of vibration wave when it propagates through the interface between different materials. In a non-uniform medium, the propagation of vibration wave is subjected to multiple changes, because different materials have different reflection and transmis-

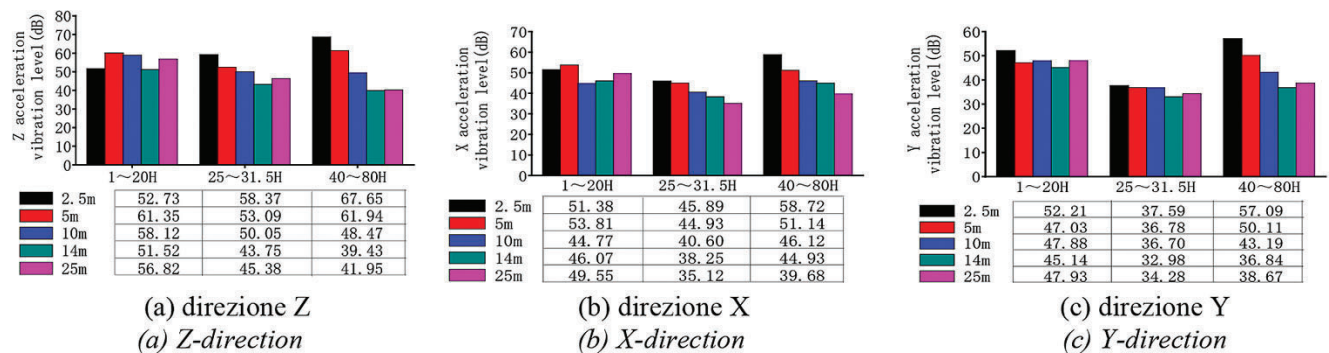


Fig. 7 - Ampiezza di accelerazione della vibrazione.
Fig. 7 - Vibration acceleration amplitude.

vrapposte all'onda di vibrazione originale, conducendo all'amplificazione della vibrazione del terreno nell'area delle fondamenta.

Grazie ai numerosi dati misurati, è possibile accertare la legge di attenuazione dell'ampiezza di accelerazione delle vibrazioni a diverse frequenze attraverso un'analisi di 1/3 di ottava. Per osservare la legge dell'amplificazione delle vibrazioni a frequenze diverse, l'ampiezza di accelerazione della vibrazione in ciascun punto di misurazione è stata calcolata su diverse bande di frequenza (Fig. 7), è stata calcolata l'ampiezza della vibrazione in ogni punto di misurazione (Tabella 1) e sono state tracciate l'attenuazione della media e delle massime ampiezze di vibrazione in tre direzioni (Fig. 8).

Come mostrato nella Fig. 7, l'ampiezza di accelerazione della vibrazione 3D nell'edificio più vicino (CD-5), a 25 m dalla posizione della linea centrale superiore, in ciascuna direzione è la seguente:

- nella direzione Z, l'ampiezza era rispettivamente di 5.3 dB, 1.63 dB e 2.35 dB superiore a quella del CD-4 nella banda delle basse frequenze (1~20 Hz), nella banda delle frequenze medie (25~31.5 Hz) e nella banda ad alta frequenza (40~80 Hz);
- nella direzione X, l'ampiezza era maggiore di 3,48 dB rispetto a quella del CD-4 nella banda delle basse frequenze, e lo stesso con quella delle bande di media e alta frequenza;
- nella direzione Y, l'ampiezza era di 2,79 dB, 1,3 dB e 1,83 dB superiore a quella del CD-4 rispettivamente nelle bande di bassa, media e alta frequenza. Pertanto, l'amplificazione delle vibrazioni avviene principalmente nella banda delle basse frequenze piuttosto che nelle bande di media e alta frequen-

sion energies and the damping absorption coefficients. The vibration wave propagating in the soil is reflected and refracted when it reaches the shallow foundation of the nearer building. In the depth range of the foundation, the reflected and refracted waves are superimposed with the original vibration wave, leading to the amplification of ground vibration in the foundation area.

Thanks to the numerous measured data, it is possible to ascertain the attenuation law of vibration acceleration amplitude at different frequencies through 1/3 octave analysis. To observe the law of vibration amplification at different frequencies, the vibration acceleration amplitude at each measuring point was calculated at different frequency bands (Fig. 7), the vibration amplitude at each measuring point was computed (Table 1), and the attenuation of mean and maximum vibration amplitudes in three directions was plotted (Fig. 8).

As shown in Fig. 7, the 3D vibration acceleration amplitude at the nearer building (CD-5), 25 m away from the top centerline position, in each direction is as follows:

Tabella 1 – Table 1

Livelli di vibrazione in ogni punto di misurazione (unità: dB)
Vibration levels at each measuring point (unit: dB)

Punto di misurazione Measuring point		CD-1	CD-2	CD-3	CD-4	CD-5
direzione Z Z direction	media the average	62.6	61.2	54.8	52.8	52.9
	massimo the maximum	64.8	63	55.9	53.7	53.8
direzione X X direction	media the average	55.9	53.2	53	51.9	50.1
	massimo the maximum	60.4	56.5	54	52.9	53.2
direzione Y Y direction	media the average	54.6	52.3	52.1	46.5	48.5
	massimo the maximum	55.7	54.7	54.5	50.8	50.2

za. Questa conclusione si ritrova nelle constatazioni in [10].

Con l'ampiezza della vibrazione come indice di valutazione, le evidenze possono essere ricavate dalla Tabella 1 e dalla Fig. 8:

- con l'aumento della distanza dalla posizione centrale superiore, la vibrazione nella direzione Z si attenua rapidamente all'inizio, e poi si attenua rallentando e anche leggermente rimbalzando quando la distanza era abbastanza lunga (25 m);
- con l'aumento della distanza dalla posizione centrale superiore, le vibrazioni nelle direzioni X e Y hanno mostrato un andamento di attenuazione lento. L'attenuazione non era evidente nella posizione dell'edificio più vicino (25 m). L'amplificazione e l'attenuazione delle vibrazioni differivano dai valori rappresentativi e la entità totale di cambiamento era così piccola da essere trascurabile.

Questo perché l'edificio più vicino è sufficientemente lontano dalla posizione centrale superiore. Molta energia delle onde di vibrazione è assorbita nel terreno. Nel complesso, l'ingrandimento della vibrazione non è evidente con l'ampiezza della vibrazione come indice di valutazione.

5. Analisi numerica

Nel segmento della metropolitana, ci sono due linee parallele ad una distanza di 10 m. Se sono simulate due linee come modelli semi-strutturali, la sollecitazione nel tunnel equivale a quella di un tunnel di due linee con la stessa direzione del treno, condizione non con la situazione attuale. Pertanto, le due linee sono generalmente considerate una linea come mostrato in [23]. Per ridurre la pesantezza del calcolo, il presente documento descrive la modellazione semi-strutturale 2D di una sola linea. Le condizioni al contorno sono le seguenti:

- la superficie superiore e la superficie interna del rivestimento del tunnel sono state trattate come superfici libere;
- lo spostamento fuori dal piano vincolato è stato applicato al piano simmetrico;
- la superficie inferiore e altre superfici contratte sono state considerate come confini artificiali.

Sui nodi del limite ideale, l'elemento di smorzamento a molla, come mostrato nella Fig. 9, viene usato per rendere il limite viscoelastico, in cui X è la direzione tangenziale e Y è la direzione normale lungo il confine.

5.1. Parametri del modello

Il modello di deformazione del piano 2D del tunnel-suolo-fondamenta-edificio è stato creato in ANSYS. È stato adottato un modello del suolo semi-infinito consi-

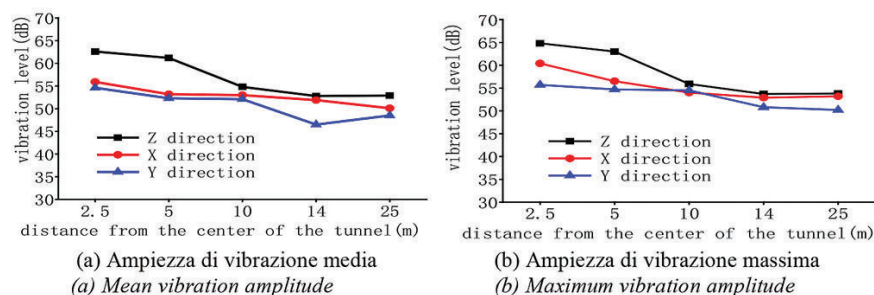


Fig. 8 - Attenuazione dell'ampiezza media e massima della vibrazione in tre direzioni.

Fig. 8 - Attenuation of mean and maximum vibration amplitudes in three directions.

- in Z-direction, the amplitude was 5.3 dB, 1.63 dB and 2.35 dB greater than that at CD-4 in the low-frequency band (1~20 Hz), the medium-frequency band (25~31.5 Hz) and the high-frequency band (40~80 Hz), respectively;
- in the X-direction, the amplitude was 3.48 dB greater than that at CD-4 in the low-frequency band, and the same with that in both the medium- and high-frequency bands;
- in the Y-direction, the amplitude was 2.79 dB, 1.3 dB and 1.83 dB greater than that at CD-4 in the low-, medium- and high-frequency bands, respectively. Thus, the vibration amplification mainly happens in the low-frequency band rather than the medium- and high-frequency bands. This conclusion echoes with the finding in Reference [10].

With vibration amplitude as the evaluation index, the following laws can be derived from Table 1 and Fig. 8:

- with the increase in the distance to the top centerline position, the vibration in the Z-direction attenuated rapidly at first, and then attenuated slowed and even slightly rebounded when the distance was long enough (25 m);
- with the increase in the distance to the top centerline position, the vibrations in the X- and Y- directions exhibited a slow attenuation trend. The attenuation was not obvious at the location of the nearer building (25m). The vibration amplification and attenuation differed with the representative values, and the total amount of change was so small as to be negligible.

This is because the nearer building is far enough from the top centerline position. Lots of vibration wave energy are absorbed in the soil. Overall, the vibration magnification is not obvious with vibration amplitude as the evaluation index.

5. Numerical analysis

In the metro segment, there are two parallel lines with a spacing of 10 m. If the two lines are simulated as semi-structural models, the load in the tunnel is equivalent to that in a tunnel of two lines with the same train direction,

derando la simmetria del terreno. La semi-struttura è lunga 70 m e larga 60 m.

Come mostrato nella Tabella 2, i parametri fisico-meccanici del terreno si riferiscono a quelli dello strato di terreno soffice di Shanghai. Dopo la modellazione, secondo il principio che la velocità approssimativa dell'onda di taglio può essere classificata come per lo stesso strato, il terreno è stato semplificato in tre strati.

Nella Tabella 2, il primo strato è indicato come ①, il secondo strato come ②~⑥ e il terzo strato come ⑦~⑩.

Inoltre, il rapporto di smorzamento del terreno è stato impostato a 0,05, la profondità del tunnel a 11,5 m, il raggio del tunnel a 3,1 m e lo spessore del rivestimento a 0,35 m. L'edificio vicino è una struttura a 5 strati alta 3 m con una campata di 4 m, una sezione del fascio di 300 mm × 500 mm e una sezione di colonna di 500 mm × 500 mm. Il fascio, la colonna e il rivestimento del tunnel sono tutti realizzati in calcestruzzo C30 con modulo elastico $3.0 \times 10^4 \text{ MPa}$, il rapporto di Poisson è 0,2 e la densità è 2600 kg/m^3 . Il carico vivo sul piano di riferimento del binario viene convertito alla densità del pavimento per metà del carico fisso. È stato adottato il carico sull'arco rovescio di detto tunnel [22]. I campioni sono stati raccolti da 27.900 punti alla frequenza di 3.000 Hz. Il caricamento è durato 9,3 secondi (Fig. 10). In ANSYS, il linguaggio apdl viene utilizzato per simulare il movimento

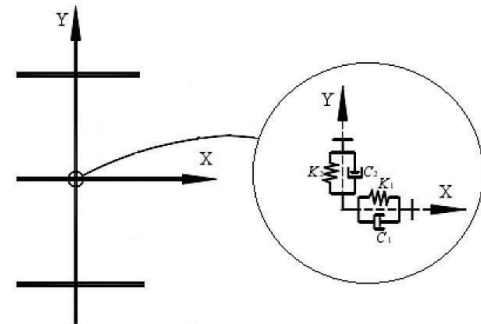


Fig. 9 - Elemento smorzante a molla sul confine artificiale viscoelastico.

Fig. 9 - Spring-damping element on viscoelastic artificial boundary.

which goes contrary to the actual situation. Therefore, the two lines are generally considered as one line [23]. To reduce the computing load, this paper carries out the 2D semi-structural modelling of only one line. The boundary conditions are as follows:

- the top surface and the inner lining surface of the tunnel were treated as free surfaces;
- the constrained out-of-plane displacement was applied to the symmetric plane;

Tabella 2 – Table 2

Parametri fisici e meccanici dello strato di terreno soffice a Shanghai
Physical and mechanical parameters of the soft soil layer in Shanghai

Numero di serie del terreno Soil serial number	Tipo di terreno Soil type	Profondità Dept (m)	Densità Density (kN/m ³)	Razione di Poisson Poisson's ration	Velocità media dell'onda di taglio Average velocity of shear wave(m/s)	Modulo elastico Elastic modulus (MPa)	Modulo di taglio Shear modulus (Mpa)
①	Terreni compatti Packed solis	1,53	19,0	0,29	110	54,4	21,1
②	Argilla limosa Silty clay	3,33	19,5	0,29	150	103,9	40,3
③	Argilla limosa fangosa Muddy silty clay	8,83	17,4	0,29	190	148,7	57,6
④	Argilla sporca Mucky clay	15,65	16,9	0,26	140	76,6	30,4
⑤	Argilla Clay	22,45	17,8	0,41	140	90,3	32,0
⑥	Argilla limosa Silty clay	32,85	18,1	0,29	200	171,4	66,4
⑦	Argilla limosa Silty clay	36,99	19,0	0,37	280	396,1	144,6
⑧	Limo Silt	43,17	19,0	0,37	280	386,3	141,0
⑨	Sabbia limosa fine Silty-fine sand	63,67	19,0	0,37	340	555,0	202,6
⑩	Sabbia fine Fine sand	100	20	0,37	350	615,9	224,8

della metropolitana e la velocità del treno è di 19,0 m/s. La cronologia dei tempi di accelerazione in ogni punto di misurazione viene estratta mediante analisi numerica.

5.2. Verifica del modello

La Fig. 11 mostra il confronto tra la legge di attenuazione del livello di vibrazione in direzione Z della simulazione numerica e quella della misura del campo. Il CD4 della misura del campo si trova a 14 m dal tunnel. Per comodità di confronto, la Fig. 11 mostra la vibrazione in una posizione approssimativa di 15 m.

Poiché:

- il risultato della simulazione numerica è significativamente più alto di quello della misura del campo, il che indica che il risultato del calcolo è sul lato grande. La ragione principale è che il modello di sforzo del piano è considerato con uno spessore di 1 m, senza considerare l'impatto del terreno sulla vibrazione al di fuori del modello del piano. Infatti, il carico ascendente dell'arco del tunnel con elevata rigidità si distribuisce verticalmente in un intervallo più lungo. Cioè, la rigidità complessiva del tunnel indebolisce significativamente il picco dell'azione, ma il modello del piano non può essere considerato;
- la curva della simulazione numerica è quasi parallela a quella della misura del campo, che indica che il risultato della simulazione numerica sul livello di vibrazione è credibile.

Pertanto, il modello di elementi finiti che stabiliamo può riflettere qualitativamente la legge di variazione della vibrazione, ma non può descrivere quantitativamente la forza specifica della vibrazione.

5.3. Impatti dall'edificio più vicino

L'edificio a cinque strati con fondamenta "a scatola" è stato simulato come elemento di contatto delle fondamenta-terreno; l'edificio a cinque strati con fondamenta "a scatola" e il campo libero, sono stati entrambi simulati in condizioni al contorno viscoelastiche. L'edificio si trova a 10 m dalla posizione centrale superiore. Sono stati adottati i parametri nel § 5.1 per la simulazione numerica (Fig. 12). La Fig. 13 mostra la variazione nella vibrazione del terreno.

Come si può vedere dalla Fig. 13, la vibrazione dell'edificio a 10 m dalla posizione centrale superiore è la seguente:

- l'ampiezza della vibrazione verticale è stata ingrandita tra 0 m e 35 m dalla posizione della linea centrale superiore;
- l'ampiezza della vibrazione orizzontale è stata ingrandita a 10 m dalla posizione della linea centrale superiore e la velocità di attenuazione è stata rapida tra 20 m e 40 m, anche inferiore a quella del campo aperto.

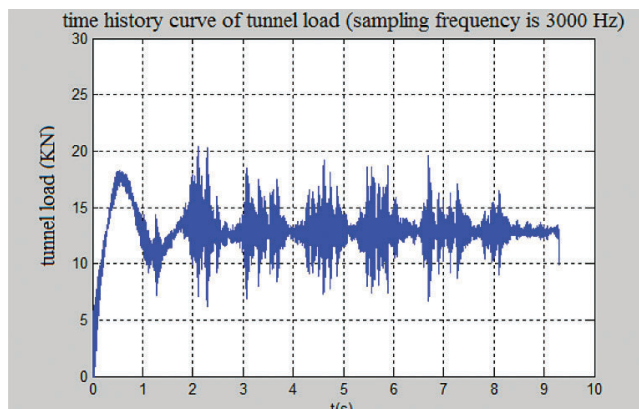


Fig. 10 - Cronologia temporale del carico sull'arco invertito del tunnel.

Fig. 10 - Time history of the load on the inverted arch of the tunnel.

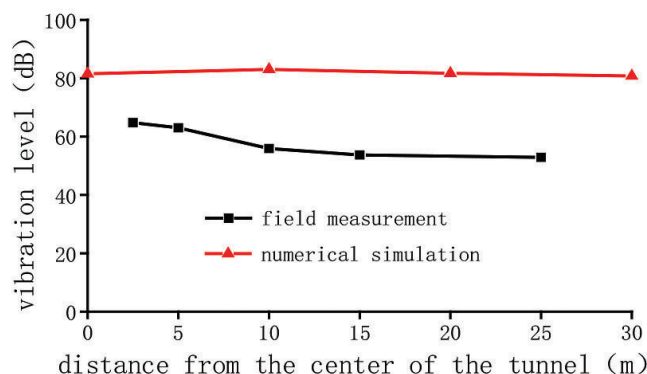


Fig. 11 - Legge di attenuazione del livello di vibrazione in direzione Z.

Fig. 11 - Attenuation law of the Z vibration level.

- the bottom surface and other contracted surfaces were deemed as artificial boundaries.

On the nodes of artificial boundary, the spring damping element as shown in Fig. 9 is used to make the boundary become viscoelastic artificial boundary, in which X is the tangential direction and Y is the normal direction along the boundary.

5.1. Model parameters

The 2D plane strain model of tunnel-soil-foundation-building was created by ANSYS. The semi-infinite soil model was adopted considering the symmetry of the soil. The semi-structure is 70 m long and 60 m wide. As shown in Table 2, the physical-mechanical parameters of the soil refer to those of the soft soil layer in Shanghai. After modelling, according to the principle that the approximate shear wave velocity can be classified as the same layer, the soil was simplified into three layers. In Table 2, the first layer is denoted as ①, the second layer as ②~⑥ and the third layer as ⑦~⑨.

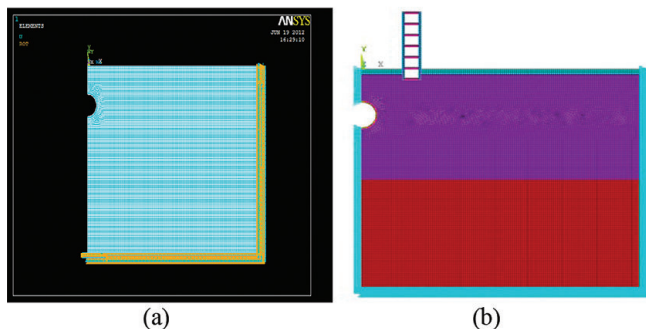


Fig. 12 - Simulazione numerica 2D del campo aperto e dell'edificio più vicino: (a) campo aperto (contorno viscoelastico); (b) fondamenta a scatola (elemento di contatto terreno-fondamenta).

Fig. 12 - 2D numerical simulation of open field and the nearer building: (a) open field (viscoelastic boundary); (b) box foundation (soil-foundation contact element).

Pertanto, l'ampiezza della vibrazione verticale viene amplificata tra 10 m e 15 m dall'edificio, mentre l'ampiezza della vibrazione orizzontale viene amplificata solo nella posizione dell'edificio; l'attenuazione aumenta di velocità con l'aumento della distanza dall'edificio. Comparativamente, la fondazione dell'edificio ha una maggiore influenza sulle vibrazioni verticali rispetto alle vibrazioni orizzontali.

5.4. Impatti della posizione e del numero di edifici sulla vibrazione della superficie

Gli impatti della posizione e del numero di edifici sulla vibrazione della superficie sono stati identificati in base a tre diverse condizioni di lavoro (WCs). Nelle prime e seconde WCs, vi è solo un edificio il cui confine sinistro è lontano rispettivamente 10 m e 25 m dalla posizione centrale superiore; nelle terze WCs, ci sono due edifici i cui contorni di

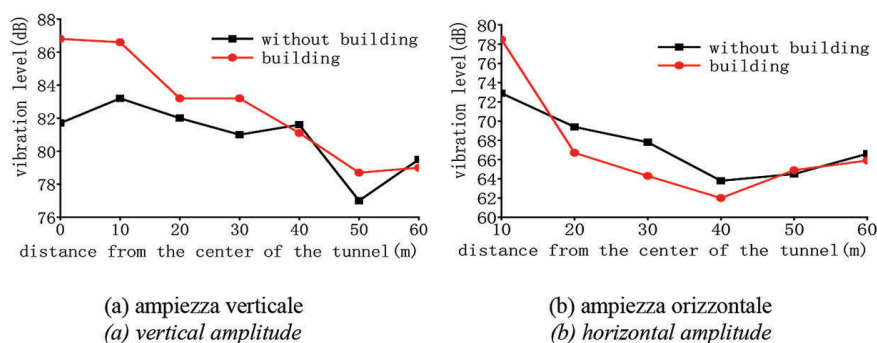


Fig. 13 - Livello di variazione nella vibrazione del terreno (livello di variazione dell'accelerazione).

Fig. 13 - Variation level in ground vibration (acceleration variation level).

In addition, the damping ratio of the soil was set to 0.05, the tunnel depth to 11.5 m, the tunnel radius to 3.1 m and the lining thickness to 0.35 m. The near building is a 3 m-tall 5-layer structure with a 4 m span, a 300 mm × 500 mm beam section and a 500 mm × 500 mm column section. The beam, column and tunnel lining are all made of C30 concrete with elastic modulus is 3.0×10^4 MPa, Poisson's ratio is 0.2 and density is 2600 kg/m³. The live load on the floor is converted to the density of the floor by half of the dead load. The load on the inverted arch of the said tunnel was adopted [22]. The samples were collected from 27,900 points at the frequency of 3,000 Hz. The loading lasted 9.3 s (Fig. 10). In the ANSYS, the apdl language is used to simulate the metro moving, and the train speed is 19.0 m/s. The acceleration time history at each measuring point is extracted by numerical analysis.

5.2. Model verification

The comparison between attenuation law of the Z vibration level of the numerical simulation and that of the field measure is shown in Fig. 11. The CD4 of the field measure is located at 14 m from the tunnel. For the convenience of comparison, the vibration at an approximate position of 15 m is shown in Fig. 11.

By contrast:

- the result of the numerical simulation is significantly higher than that of the field measure, which indicating that the calculation result is on the large side. The main reason is that the plane strain model is considered at a thickness of 1 m, without considering the impact of soil on vibration outside the plane model. In fact, the upward arch load of the tunnel with high stiffness vertically distributes in a longer range. That is, the overall stiffness of the tunnel significantly weakens the peak of the action, but the plane model cannot be considered;
- the curve of the numerical simulation is almost parallel to that of field measure, which indicating that the result of the numerical simulation about vibration level is credible.

Therefore, the finite element model that we establish can qualitatively reflect the variation law of vibration, but it cannot quantitatively describe the specific strength of vibration.

5.3. Impacts from the nearer building

The five-layer building with a box foundation was simulated as soil-foundation contact element, the five-layer building with a box foundation and the open field were both simulated under viscoelastic boundary condi-

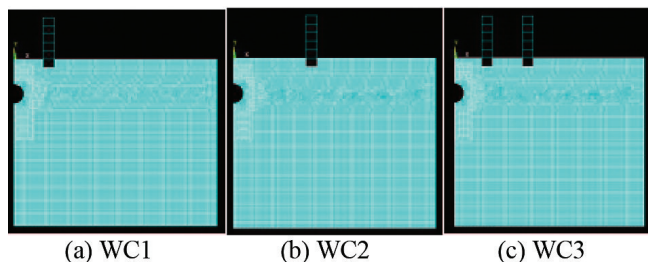


Fig. 14 - Modelli di tunnel-terreno-edificio.
Fig. 14 - Tunnel-soil-building models.

sinistra sono rispettivamente 10 m e 25 m dalla posizione centrale superiore. I modelli agli elementi finiti (Fig. 14) sono stati stabiliti utilizzando i parametri e le condizioni indicate nel § 5.1. Si noti che sia la fondazione che lo strato di terreno sono stati simulati come contatto fisso nei tre modelli della Fig. 14, con l'obiettivo di ridurre la pesantezza e il tempo di calcolo. Come esemplificazione, qui viene presentato solo lo spettro di frequenza della terza WC (Fig. 15).

Le Figg. 16 e 17 mostrano rispettivamente l'ampiezza di accelerazione della vibrazione sulla superficie e la fondazione (-3 m) a diverse distanze dalla posizione centrale superiore. Come mostrato nelle due figure, la zona di amplificazione della vibrazione orizzontale è 3~5 m dietro quella verticale. In base alla variazione delle ampiezze di accelerazione di vibrazione della superficie e delle fondamenta (-3 m) (Tabella 3), sia l'ampiezza verticale che quella orizzontale dell'accelerazione della vibrazione sulla superficie e fondazione diminuivano con l'aumento della distanza dalla posizione centrale superiore ma aumentavano nelle posizioni locali.

Le seguenti evidenze nelle variazioni di vibrazione possono essere ottenute dalla Tabella 3. Innanzitutto, sia le ampiezze di vibrazione verticali che quelle orizzontali della superficie e della fondazione sono state aumentate in tutte e tre le condizioni, tranne la vibrazione orizzontale sulla superficie del WC2 e le vibrazioni alla fondazione del WC3; la distanza dalla posizione centrale superiore è correlata positivamente con la variazione della vibrazione orizzontale sulla superficie e negativamente con la variazione della vibrazione verticale sulla superficie. In secondo luogo, l'ambito dell'amplificazione delle vibrazioni

The building is located 10 m away from the top centerline position. The parameters in § 5.1 were adopted for numerical simulation (Fig. 12). The variation in ground vibration is shown in Fig. 13.

As can be seen from Fig. 13, the vibration of the building at 10 m away from the top centerline position is as follows:

- the vertical vibration amplitude was magnified between 0 m and 35 m from the top centerline position;
- the horizontal vibration amplitude was magnified at 10 m away from the top centerline position, and the attenuation speed was fast between 20 m and 40 m, even lower than that of the open field.

Therefore, the vertical vibration magnitude is amplified between 10 m and 15 m away from the building, while the horizontal vibration magnitude is amplified only at the position of the building; the attenuation picks up speed with the increase in the distance from the building. Comparatively, the building foundation has a greater scope of influence on vertical vibration than on horizontal vibration.

5.4. Impacts of the position and number of buildings on surface vibration

The impacts of the position and number of buildings on surface vibration were identified against three different working conditions (WCs). Under the first and second WCs, there is only one building whose left boundary is 10 m and 25 m away from the top centerline position, respectively; under the third WC, there are two buildings whose left boundaries are 10 m and 25 m away from the top centerline position, respectively. The finite-elements models (Fig. 14) were established using the parameters and loads in § 5.1. Note that both the foundation and the soil layer were simulated as fixed contact in the three models in Fig. 14, aiming to reduce the computation load and time. Due to the lack of space, only frequency spectrum of the third WC are presented here (Fig. 15).

Figs 16 and 17 respectively show the vibration acceleration amplitude on the surface and the foundation (-3 m) at different distances from the top centerline position. As shown in the two figures, the horizontal vibration amplification zone is 3~5 m behind the vertical one. According to the variation in surface and foundation (-3 m) vibration acceleration amplitudes (Table 3), both the vertical and horizontal amplitudes of vibration acceleration at the surface and the foundation decreased with the increase of the distance to the top centerline position but increased at local positions.

The following regulars in vibration changes can be obtained from Table 3. First, both vertical and horizontal vibration amplitudes of the surface and the foundation were magnified in all

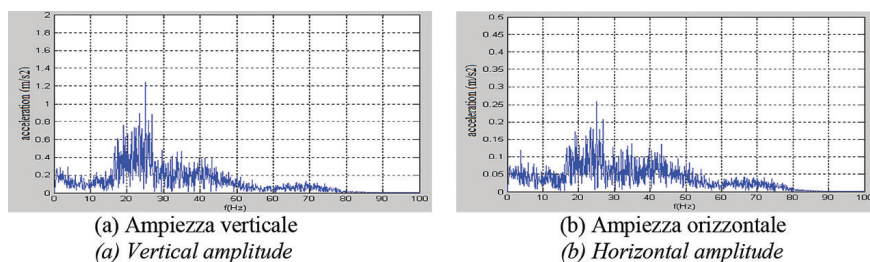


Fig. 15 - Spettro di frequenza di WC3.
Fig. 15 - Frequency spectrum of WC3.

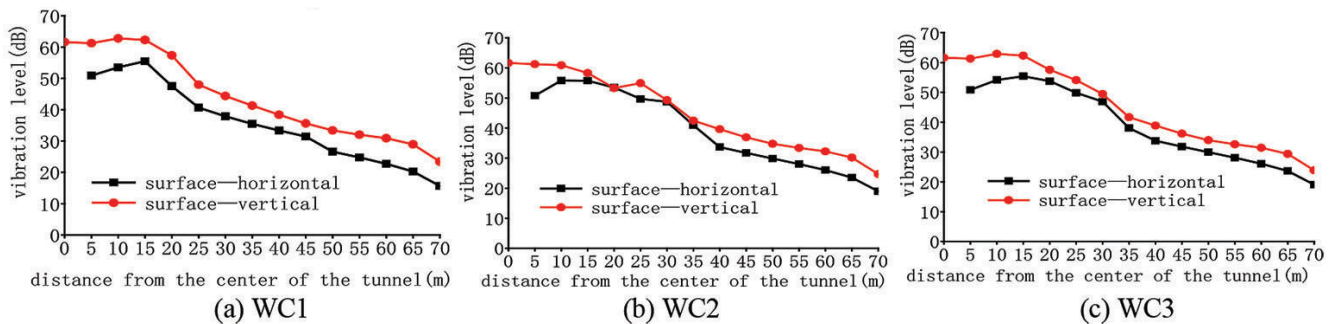


Fig. 16 - Ampiezze di accelerazione delle vibrazioni sulla superficie a diverse distanze dalla posizione centrale superiore.
Fig. 16 - Vibration acceleration amplitudes at the surface at different distances from the top centerline position.

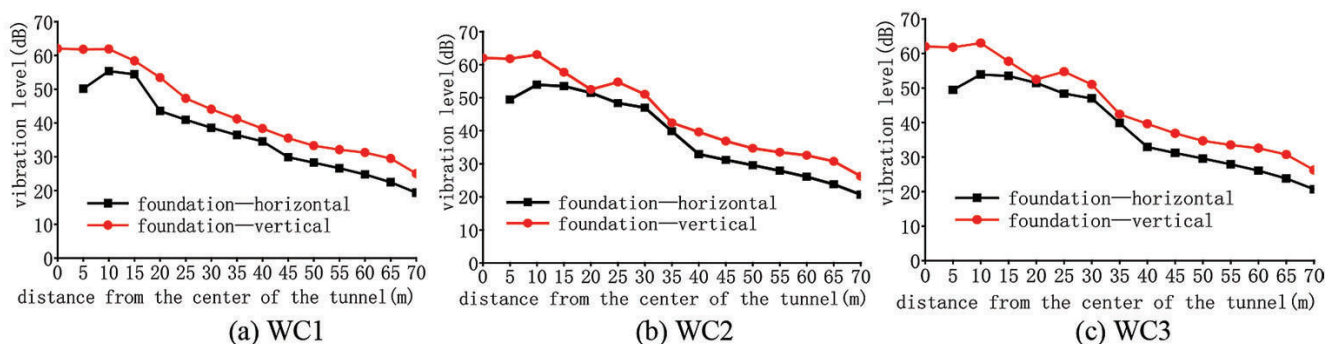


Fig. 17 - Ampiezze di accelerazione delle vibrazioni alle fondamenta (-3 m) a diverse distanze dalla posizione centrale superiore.

Fig. 17 - Vibration acceleration amplitudes at the foundation (-3 m) at different distances from the top centerline position.

orizzontali era maggiore di quello dell'amplificazione verticale delle vibrazioni in WC1 e WC3. Terzo, l'ampiezza di vibrazione verticale era piccola e l'ampiezza di vibrazione orizzontale attenuata in WC2: questo perché l'onda di vibrazione si indebolisce dopo aver percorso una lunga distanza dal tunnel e la fondazione non ha un evidente effetto di amplificazione. Questa considerazione, le vibrazioni verticali e orizzontali dell'edificio distante, hanno mostrato una tendenza decrescente; la possibile causa della diminuzione può essere spiegata come segue: vi è un edificio tra la posizione centrale superiore e l'edificio distante, in modo tale che l'onda vibratoria sia amplificata dalla fondazione dell'edificio più vicino; quando l'onda amplificata continua a viaggiare verso l'edificio distante, gran parte della sua energia rimane assorbita dallo strato di suolo; unita al debole impatto della fondazione, la poca energia residua non può essere amplificata in modo rilevante.

L'amplificazione della vibrazione a tre direzioni nella Tabella 3 mostra che la fondazione dell'edificio ha un impatto limitato sulle vibrazioni superficiali. Dopo la generazione dell'onda di vibrazione da parte del treno, la fondazione dell'edificio può aumentare l'ampiezza della vibrazione sulla superficie in tre direzioni se l'edificio si trova a soli 10~15 m dal tunnel. L'effetto dell'aumento cessa di esistere se la distanza è tra 25~30 m.

three conditions, except the horizontal vibration at the surface in WC2 and the vibrations at the foundation in WC3; the distance to the top centerline position is positively correlated with the variation in horizontal vibration at the surface and negatively with the variation in vertical vibration at the surface. Second, the scope of horizontal vibration amplification was greater than the scope of vertical vibration amplification in WC1 and WC3. Third, the vertical vibration amplitude was small and the horizontal vibration amplitude attenuated in WC2; this is because the vibration wave is weakened after travelling a long distance from the tunnel and the foundation has no obvious amplification effect. Fourth, the vertical and horizontal vibrations of the distant building exhibited a declining trend; the possible cause of the decline can be explained as: there is a building between the top centerline position and the distant building, such that the vibration wave is amplified by the nearer building foundation; when the amplified wave continues to travel to the distant building, much of its energy has been absorbed by the soil layer; coupled with the weak impact of the foundation, the few residual energy cannot be amplified significantly.

The amplification of three direction vibration in Table 3 shows that the building foundation has a limited scope of impact on surface vibration. After the train produces the

Tabella 3 – Table 3

Variazione delle ampiezze di accelerazione della vibrazione della superficie e delle fondamenta (-3 m)
a diverse distanze dalla posizione centrale superiore

*Variation in surface and foundation (-3 m) vibration acceleration amplitudes at different distances
from the top centerline position*

Condizioni <i>Conditions</i>	La distanza dalla linea mediana del tunnel <i>The distance from the middle line of the tunnel</i>	Posizione <i>Position</i>	Direzione del livello di vibrazione <i>Direction of vibration level</i>	Modifiche <i>Changes</i>	L'amplificazione della vibrazione a tre direzioni <i>The amplification of three direction vibration</i>
condizione di lavoro 1 (WC1) (edificio 10 metri) <i>working condition 1 (10 m building)</i>	10 m~15 m	suolo <i>ground</i>	verticale <i>vertical</i>	aumento di circa 1,5 dB <i>magnify about 1.5 dB</i>	sia la direzione verticale che quella orizzontale sono aumentate; <i>both vertical and horizontal direction are magnified;</i> l'amplificazione verticale è piccola; <i>the vertical magnification is small;</i> l'amplificazione orizzontale è grande <i>the horizontal magnification is large</i>
			orizzontale <i>horizontal</i>	aumento di circa 4,6 dB <i>magnify about 4.6 dB</i>	
		fondamenta <i>foundation</i>	verticale <i>vertical</i>	quasi nessun cambiamento <i>almost no change</i>	
			orizzontale <i>horizontal</i>	aumento di circa 4,3~5 dB <i>magnify about 4.3~5 dB</i>	
condizione di lavoro 2 (WC2) (edificio 25 m)	25 m~30 m	suolo <i>ground</i>	verticale <i>vertical</i>	aumento di circa 1,6 dB <i>magnify about 1.6 dB</i>	amplificazione verticale e attenuazione orizzontale; <i>vertical amplification and horizontal attenuation;</i> l'amplificazione verticale è piccola <i>vertical amplification is small</i>
			orizzontale <i>horizontal</i>	piccola tendenza all'attenuazione <i>small attenuation trend</i>	
		fondamenta <i>foundation</i>	verticale <i>vertical</i>	aumento di circa 2,2 dB <i>magnify about 2.2 dB</i>	
			orizzontale <i>horizontal</i>	piccola tendenza all'attenuazione <i>small attenuation trend</i>	
condizioni di lavoro (due edifici)	10 m~15 m	suolo <i>ground</i>	verticale <i>vertical</i>	aumento di circa 1,6 dB <i>magnify about 1.6 dB</i>	sia la direzione verticale che quella orizzontale sono aumentate; <i>both vertical and horizontal direction are magnified;</i> l'amplificazione verticale è piccola <i>the vertical magnification is small;</i> l'amplificazione orizzontale è grande (l'amplificazione è la stessa della condizione di lavoro 1) <i>the horizontal magnification is large (Magnification is the same as working condition 1)</i>
			orizzontale <i>horizontal</i>	aumento di circa 4,6 dB <i>magnify about 4.6 dB</i>	
		fondamenta <i>foundation</i>	verticale <i>vertical</i>	aumento di circa 1,6 dB <i>magnify about 1.6 dB</i>	
			orizzontale <i>horizontal</i>	aumento di circa 5,1 dB <i>magnify about 5.1 dB</i>	
	25 m~30 m	suolo <i>ground</i>	verticale <i>vertical</i>	piccola tendenza all'attenuazione <i>small attenuation trend</i>	riduzione sia verticale che orizzontale <i>both vertical and horizontal reduction</i>
			orizzontale <i>horizontal</i>	piccola tendenza all'attenuazione <i>small attenuation trend</i>	
		fondamenta <i>foundation</i>	verticale <i>vertical</i>	piccola tendenza all'attenuazione <i>small attenuation trend</i>	
			orizzontale <i>horizontal</i>	piccola tendenza all'attenuazione <i>small attenuation trend</i>	

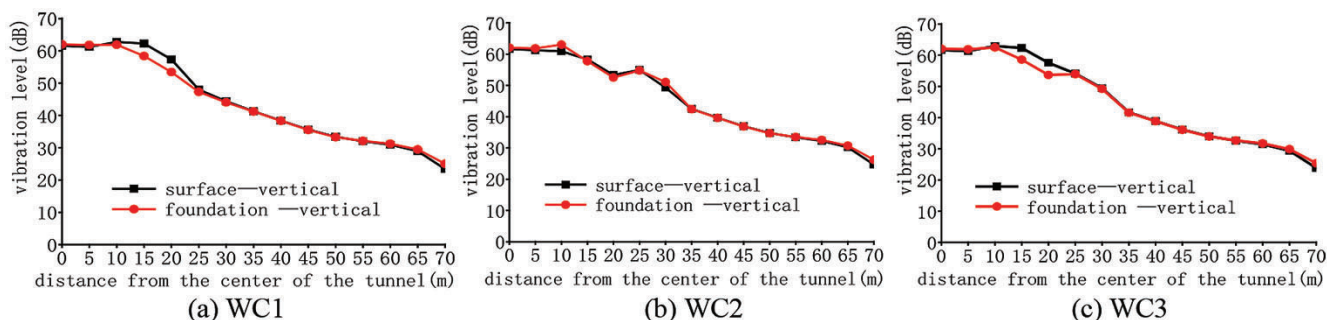


Fig. 18 - Distribuzione verticale delle vibrazioni dalla fondazione alla superficie nella stessa posizione.
 Fig. 18 - Vertical vibration distribution from the foundation to the surface at the same position.

La Fig.18 mostra la variazione di vibrazione dalla fondazione alla superficie nella stessa posizione. La vibrazione della superficie a 10~25 m è maggiore di 3.9 dB rispetto a quella della fondazione in WC1; la vibrazione di superficie è coerente con la vibrazione della fondazione in WC2; la vibrazione di superficie a 10~25 m è 3,8 dB maggiore di quella della fondazione in WC3.

Per riassumere:

- quando un edificio è costruito sulla superficie, le ampiezze di vibrazione verticali e orizzontali saranno leggermente aumentate; l'allargamento orizzontale è maggiore dell'allargamento verticale;
- la distanza tra l'edificio di superficie e la posizione centrale superiore è correlata positivamente con l'impatto dell'edificio sulla vibrazione verticale sulla superficie e negativamente con l'impatto dell'edificio sulla vibrazione orizzontale;
- in un campo aperto, la vibrazione di superficie è inferiore alla vibrazione della fondazione; nella posizione dell'edificio, la vibrazione di superficie è maggiore della vibrazione della fondazione, grazie all'effetto amplificazione; questo effetto si indebolisce gradualmente ma leggermente con l'aumento della distanza dall'edificio;
- quando due edifici sono costruiti a distanze diverse dalla posizione centrale superiore, non saranno amplificate né le vibrazioni verticali né le vibrazioni orizzontali sulla superficie lontana dall'edificio a distanza.

6. Conclusioni

Questo documento analizza le vibrazioni in superficie causate dall'esercizio del treno in un sistema di transito "rapid transit" attraverso misurazioni in campo e la simulazione numerica. Possono essere presentate le seguenti conclusioni dalla ricerca.

Con l'ampiezza della vibrazione come indice di valutazione, l'aumento della vibrazione non è evidente a 25 m dalla posizione della linea centrale superiore. La legge di attenuazione dell'ampiezza di accelerazione delle vibrazioni a

vibration wave, the building foundation can magnify the vibration amplitude on the surface in three directions if the building is only 10~15 m away from the tunnel. The magnification effect ceases to exist if the distance falls in 25~30 m.

Fig. 18 illustrates the vibration variation from the foundation to the surface at the same position. The surface vibration in 10~25 m was 3.9 dB greater than that of the foundation in WC1; the surface vibration was consistent with the foundation vibration in WC2; the surface vibration in 10~25 m was 3.8 dB greater than that of the foundation in WC3.

To sum up:

- when a building is constructed on the surface, the vertical and horizontal vibration amplitudes will be boosted slightly; the horizontal enlargement is greater than the vertical enlargement;
- the distance between the surface building and the top centerline position is positively correlated with the building's impact on vertical vibration at the surface and negatively with the building's impact on horizontal vibration;
- on an open field, the surface vibration is smaller than the foundation vibration; at the position of the building, the surface vibration is greater than the foundation vibration, thanks to the amplification effect; this effect weakens gradually but slightly with the increase in the distance from the building;
- when two buildings are constructed at different distances from the top centerline position, neither vertical nor horizontal vibrations will be amplified at the surface far from the distance building.

6. Conclusions

This paper analyses the surface vibration caused by train operation in a rapid transit system through field measurement and numerical simulation. The following conclusions are put forward through the research.

diverse frequenze può essere ottenuta facilmente attraverso un'analisi di 1/3 di ottava. L'amplificazione delle vibrazioni avviene principalmente nella banda delle basse frequenze piuttosto che nelle bande di media e alta frequenza.

Pertanto, l'ampiezza della vibrazione verticale viene amplificata tra 10 m e 15 m dall'edificio, mentre l'ampiezza della vibrazione orizzontale viene amplificata solo nella posizione dell'edificio: l'attenuazione aumenta con l'aumento della distanza dall'edificio. Comparativamente, la fondazione dell'edificio ha una maggiore influenza sulle vibrazioni verticali rispetto alle vibrazioni orizzontali.

Le ampiezze di vibrazione verticali e orizzontali diminuiscono con l'aumento della distanza tra la superficie e le posizioni della fondazione dalla posizione centrale superiore ma aumentano in corrispondenza delle posizioni locali. La zona di amplificazione della vibrazione orizzontale è 3~5 m dietro quella verticale. In un campo aperto, la vibrazione di superficie è inferiore alla vibrazione di fondazione; nella posizione dell'edificio, la vibrazione di superficie è maggiore della vibrazione di fondazione.

La fondazione dell'edificio ha un impatto limitato sulle vibrazioni in superficie. Dopo la generazione dell'onda di vibrazione da parte del treno, la fondazione dell'edificio può aumentare l'ampiezza della vibrazione sulla superficie in tre direzioni se l'edificio si trova a soli 10~15 m dal tunnel. L'effetto dell'aumento cessa di esistere se la distanza è tra 25~30 m.

Quando un edificio è costruito sulla superficie, le ampiezze di vibrazione verticali e orizzontali saranno leggermente amplificate; l'aumento orizzontale è maggiore di quello verticale; la distanza tra l'edificio in superficie e la posizione centrale superiore è correlata positivamente con l'impatto dell'edificio sulla vibrazione verticale in superficie e negativamente con l'impatto dell'edificio sulla vibrazione orizzontale.

In un campo aperto, la vibrazione di superficie è inferiore alla vibrazione di fondazione; nella posizione dell'edificio, la vibrazione di superficie è maggiore della vibrazione di fondazione, grazie all'effetto di amplificazione: questo effetto si attenua gradualmente ma leggermente con l'aumento della distanza dall'edificio.

Quando due edifici sono costruiti a distanze diverse dalla posizione centrale superiore, non sono amplificate né le vibrazioni verticali né le vibrazioni orizzontali in superficie lontano dall'edificio a distanza (maggiore di 25 m).

Questo lavoro è supportato dal fondo nazionale per le scienze naturali (51708450); Progetto della Fondazione Scienza Postdottorale della Cina (2018M643702); Progetto di ricerca di base di scienze naturali nella Provincia di Shaanxi (2018JQ5169); Progetto della Fondazione postdottorale provinciale di Shaanxi (2018BSHEDZZ22); Ph. D. Progetto Start-up di ricerca (107-451115002); Progetto di ricerca scientifica a livello scolastico (2016CX025).

With vibration amplitude as the evaluation index, the vibration magnification is not obvious at 25 m away from the top centerline position. The attenuation law of vibration acceleration amplitude at different frequencies can be obtained easily through 1/3 octave analysis. The vibration amplification mainly happens in the low-frequency band rather than the medium- and high-frequency bands.

The vertical vibration magnitude is amplified between 10 m and 15 m away from the building, while the horizontal vibration magnitude is amplified only at the position of the building; the attenuation picks up speed with the increase in the distance from the building. Comparatively, the building foundation has a greater scope of influence on vertical vibration than on horizontal vibration.

The vertical and the horizontal vibration amplitudes both decreased with the increase in the distance between the surface and foundation positions from the top centerline position but increased at local positions. The horizontal vibration amplification zone is 3~5 m behind the vertical one. On an open field, the surface vibration is smaller than the foundation vibration; at the position of the building, the surface vibration is greater than the foundation vibration.

The building foundation has a limited scope of impact on surface vibration. After the train produces the vibration wave, the building foundation can magnify the vibration amplitude on the surface in three directions if the building is only 10~15 m away from the tunnel. The magnification effect ceases to exist if the distance falls in 25~30 m.

When a building is constructed on the surface, the vertical and horizontal vibration amplitudes will be boosted slightly; the horizontal enlargement is greater than the vertical enlargement; the distance between the surface building and the top centerline position is positively correlated with the building's impact on vertical vibration at the surface and negatively with the building's impact on horizontal vibration.

On an open field, the surface vibration is smaller than the foundation vibration; at the position of the building, the surface vibration is greater than the foundation vibration, thanks to the amplification effect; this effect weakens gradually but slightly with the increase in the distance from the building.

When two buildings are constructed at different distances from the top centerline position, neither vertical nor horizontal vibrations will be amplified at the surface far from the distance building (bigger than 25 m).

This work is supported by the national natural science fund (51708450); China Postdoctoral Science Foundation Project (2018M643702); Basic Research Project of Natural Science in Shaanxi Province(2018JQ5169); Shaanxi Provincial Postdoctoral Foundation Project (2018BSHEDZZ22); Ph. D. Research Start-up Project (107-451115002); School-level Scientific Research Project (2016CX025).

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] LIU W.N., XIA H., "Environmental response of subway train vibration", Nanjing 1996, pp. 586-593.
- [2] XIA H., ZHANG N., CAO Y.M., "Experimental study of train-induced vibrations of ground and nearby buildings", Journal of the China Railway Society 2004, 4, pp. 93-98.
- [3] XIA H., "Characteristics of traffic induced vibrations and their effects on environments", TIVC2001, 2001.
- [4] DEGRANDE G., LOMBAERT G., "High-speed train induced free field vibrations: in situ measurements and numerical modeling", Bochum, Proc. Wave 2000.
- [5] LI R.D., ZHANG H.R., LIU W.N., "Testing and analysis of Metro-Induced ground vibrations response near Beijing metro line 1", Journal of Beijing Jiaotong University 2007, (4), pp. 31-34.
- [6] LI R.D., ZHANG H.R., LIU W.N., "Metro-induced ground vibrations and their impacts on precision instrument", Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2008, (1), pp. 206-214.
- [7] LI R.D., LIU W.N. ZHANG, H.R., "Test analysis of metro induced ground vibrations at interval", China Railway Science 2008, (1), pp. 120-126.
- [8] YAN W.N., NIE H., REN M. "In situ experiment and analysis of ground surface vibration induced by urban subway transit", Journal of Railway Science and Engineering 2006, (2), pp. 1-5.
- [9] WANG F.T., TAO X.X., ZHENG X., "PSD correction method for removing background vibration from traffic environmental vibration observation", Journal of Vibration and Shock 2011, (4), pp. 124-126.
- [10] YAN W.N., ZHANG Y., REN M., "In situ experiment and analysis of environmental vibration induced by urban subway transit", Journal of Beijing University of Technology 2006, (2), pp. 149-154.
- [11] Thompson D., "Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control", Elsevier Science & Technology 2008, (4): 21-25.
- [12] FUJIKAKE T., "A prediction method for the propagation of ground vibration from railway trains on level tracks with welded rails", Journal of Sound & Vibration 1986, (2), pp. 289-297.
- [13] WANG F.T., TAO X.X., CUI G.H., "Test in situ for free ground vibration near urban railway line", Journal of Vibration and Shock 2011, (5), pp. 131-135.
- [14] YAN W.M., NIE H., REN M., "In situ experiment and analysis of environmental vibration induced by urban subway transit", Earthquake Engineering and Engineering Vibration 2006, (4), pp. 187-191.
- [15] LIU W.N., XIA H., GUO W.J., "Study of vibration effects of underground trains on surrounding environments", Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 1996, (s1), pp. 586-593.
- [16] MA M., "Study on the prediction of metro train-induced vibrations based on sensitivity of environmental influence and design stage-accompanied evaluation system", Beijing Jiaotong University 2012.
- [17] MA M., "Track selection system for Beijing subway according to the sensitivity of environmental vibrations-research proposal", Delft: Delft University of Technology & Beijing Jiaotong University 2010.
- [18] WANG W.B., "Study on metro train-induced environmental vibration and transfer function prediction based on pulse experiment method", Beijing Jiaotong University 2011.
- [19] ISO2631/1, "Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole body vibration-Part 1: General Requirements", 1997.
- [20] DENG X.J., SUN L., "Vehicle-ground structure system dynamics", People's Communication Press 2000.
- [21] WANG T.Y., "Study on environmental vibration and building isolation method caused by subway", Tongji University 2007.
- [22] XIA Q., "Study on subway-induced existing building vibration and isolation method", Tongji University, Shanghai 2014.
- [23] GAO J.T., "The mitigation measurement analysis of the low-frequency vibration induced by subway load", Wuhan University of technology 2008.