



REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA

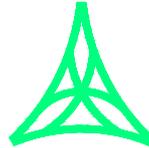
DIREZIONE CENTRALE
INFRASTRUTTURE, MOBILITA', PIANIFICAZIONE TERRITORIALE E LAVORI PUBBLICI

SOGGETTO DELEGATARIO:



FRIULI venezia giulia
STRaDE S.p.A.

PROGETTAZIONE:



S.p.A. AUTOVIE VENETE

34123 TRIESTE - Via V. Locchi, 19 - tel. 040/3189111
 Società soggetta all'attività di direzione e coordinamento da parte di
 Friulia S.p.A. - Finanziaria Regionale Friuli-Venezia Giulia

CONCESSIONARIA AUTOSTRADE
 A4 VENEZIA - TRIESTE
 A23 PALMANOVA - UDINE
 A28 PORTOGRUARO - CONEGLIANO

COLLEGAMENTO TRA LA S.S. 13 PONTEBBANA E LA A23 TANGENZIALE SUD DI UDINE (II LOTTO)

AGGIORNAMENTO PROGETTO DEFINITIVO dd.14.12.2006

OPERE D'ARTE MINORI

Opera n°31: Sottopasso strada di servizio
 Relazione tecnica e di calcolo

TEMATICA

H

N. ALLEGATO e SUB.ALL.

13.01 . 00

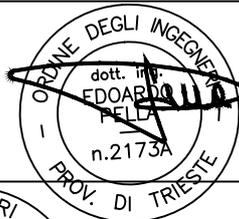
REV.	DATA	DESCRIZIONE	DF REDATTO	FA VERIFICATO	EP APPROVATO
3					
2					
1					
0	30/08/12	EMISSIONE			

COORDINAMENTO E PROGETTAZIONE GENERALE:

S.p.A. AUTOVIE VENETE :

dott. ing. Edoardo PELLA

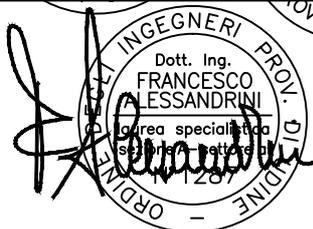
dott. ing. Stefano DI SANTOLO



PROGETTAZIONE SPECIALISTICA:

Strutture :

dott. ing. Francesco ALESSANDRINI



IL CAPO COMMESSA:

dott. ing. Edoardo PELLA

IL DIRETTORE DELL'AREA OPERATIVA:

dott. ing. Enrico RAZZINI

IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO:

NOME FILE:
 1207H1301000.doc
 1207H1301000.pdf

DATA PROGETTO:
30.08.2012

312TN

CODICE MASTRO

12

ANNO

07

N.PROGETTO

0

REVISIONE

INDICE

1.	GENERALITÀ	3
2.	NORMATIVE DI RIFERIMENTO	4
3.	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI.....	5
4.	CARATTERISTICHE DEL TERRENO DI FONDAZIONE	6
4.1.	CAPACITÀ PORTANTE DELLE FONDAZIONI	6
5.	DATI DI CALCOLO	8
6.	ANALISI DEI CARICHI.....	9
6.1.	CARICHI VERTICALI.....	9
6.1.1.	PESO PROPRIO STRUTTURA.....	9
6.1.2.	PESO TERRENO DI RICOPRIMENTO	9
6.2.	DISTORSIONI	9
6.2.1.	VARIAZIONI TERMICHE	9
6.3.	CARICHI MOBILI	9
6.3.1.	CARICHI MOBILI STATICI	9
6.3.2.	INCREMENTO DINAMICO DEI CARICHI MOBILI.....	9
6.3.3.	CARICHI MOBILI COMPLESSIVI	9
6.3.4.	AZIONI LONGITUDINALI DI FRENAMENTO	9
6.3.5.	AZIONE CENTRIFUGA	10
6.3.6.	AZIONE DEL VENTO	10
6.3.7.	AZIONI SU PARAPETTI E GUARD-RAIL	10
6.3.8.	SPINTA DELLE TERRE.....	10
6.3.9.	AZIONI SISMICHE SULLE STRUTTURE DI SOSTEGNO DELLE TERRE	10
6.3.10.	INCREMENTO SISMICO DELLE SPINTE DEL TERRENO.....	10
7.	ANALISI DELLA STRUTTURA INTERRATA	12
7.1.	CONDIZIONI DI CARICO	12
7.1.1.	COMBINAZIONI DI CARICO	12
7.2.	VERIFICA STRUTTURA SCATOLARE	12
7.2.1.	VERIFICA DELLE SEZIONI STRUTTURALI	13
7.2.2.	VERIFICA AZIONI SUL TERRENO	15
7.3.	VERIFICA MURI D'ALA	15
7.3.1.	VERIFICA DI RESISTENZA DELLE SEZIONI	15
7.3.1.1.	Verifica paramento verticale	15
7.3.1.2.	Verifica soletta di fondazione	16
7.3.2.	VERIFICA A STABILITÀ OPERA DI SOSTEGNO	16
8.	ELABORATI DI CALCOLO.....	18

1. GENERALITÀ

La presente relazione di calcolo fornisce l'analisi delle principali strutture previste per la realizzazione di un sottopasso ad uso agricolo, inserito nell'ambito del Progetto Preliminare del "Collegamento Viario tra la s.s. n°13 e la A23 (s.s. n°56) - Tangenziale Sud di Udine", Il lotto, dalla s.s. n°13 alla s.s. n° 353.

L'opera in oggetto, della lunghezza complessiva di 8.0m circa, è prevista per attraversare il rilevato stradale per la nuova corsia di accelerazione per l'immissione nella A23 – direzione Tarvisio. La larghezza interna del manufatto è di 4.00m, mentre l'altezza (netta interna di calcolo) è di 4.10m.

Il sottopasso è realizzato in c.a.; si tratta di una struttura scatolare, con soletta superiore carrabile (assimilata a ponte di prima categoria) e schema statico di telaio rettangolare chiuso.

La soletta superiore e le pareti verticali presentano spessore pari a 0.60m, così come la soletta di fondazione.

L'altezza media di ricoprimento (terreno e pavimentazione stradale) è assunta pari a 0.65m; alle due estremità del manufatto (a livello di imposta della soletta superiore) si prevede la realizzazione di un tratto di soletta di transizione in c.a., al fine di limitare gli effetti dovuti ad eccessivi cedimenti ed assestamenti nella zona di passaggio tra la struttura rigida di impalcato ed il terrapieno di riporto a tergo del muro/spalla.

Si prevede inoltre la realizzazione di muri d'ala esterni, in modo da contenere il terreno della scarpata del rilevato. Considerata la conformazione esistente del terreno su cui andranno ad insistere le opere di sostegno, si prevede per queste un'altezza maggiore di quella dello scatolare sopra descritto, e comunque non superiore a 5.80m. In particolare la soletta di fondazione presenta larghezza costante di 5.00m e spessore di 0.80m; si realizza un dente di fondazione di larghezza pari a 0.70m, che si sviluppa per una profondità di 0.80m. Lo sviluppo del paramento verticale è di 5.80m, con spessore costante di 0.70m.

Alla presente relazione sono allegati gli elaborati di output di tutti i calcoli automatici eseguiti, ai quali si rimanda per tutti i calcoli specifici che non risultassero esplicitamente da quanto riportato nel proseguo della presente relazione.

Alla presente relazione sono inoltre allegate le tavole di progetto, alle quali si rimanda per una descrizione più completa e dettagliata delle opere previste.

<p>Il calcolo di seguito riportato è stato redatto sulla base dell'OPCM 3274 (2003), del DM 16/01/1996 e, per gli aspetti mancanti, dell'EC7. L'aggiornamento/controllo di adeguatezza alle normative vigenti (NTC 2008) viene redatto a parte sul documento "Aggiornamento relazione tecnica e di calcolo" allegato al progetto.</p>

2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

La presente relazione è redatta in conformità alle seguenti Leggi e Normative:

- a) L. 5 novembre 1971 n. 1086 - "Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica".
- b) D.M. LL. PP. 09 gennaio 1996 - "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche".
- c) CIRC. LL. PP. 15 ottobre 1996 n. 252 - "Istruzioni per l'applicazione delle <<Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche>> di cui al D.M. 09/01/1996".
- d) D.M. 16 gennaio 1996 - "Norme tecniche relative ai Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi".
- e) Circolare n° 156AA.GG./STC. del 04.07.1996 del Min. LL.PP. "Istruzioni per l'applicazione delle <<Norme Tecniche relative ai criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi>> di cui al D.M. 16/01/1996".
- f) D.M. 11 marzo 1988 - "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione".
- g) D.M. 2 agosto 1980 - "Criteri generali e prescrizioni tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo di ponti stradali".
- h) D.M. 4 maggio 1990 - "Aggiornamento alle norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo di ponti stradali".
- i) Circ. LL.PP. n. 34233 del 25 febbraio 1991- "Istruzioni relative alla normativa tecnica dei ponti stradali".
- j) Legge 2 febbraio 1974 n. 64 - "Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche".
- k) D.M. 16 gennaio 1996 - "Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche".
- l) Ordinanza del P.C.M. n. 3274 del 20 marzo 2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica", come modificata ed integrata dall'Ordinanza del P.C.M. n. 3316 del 2 ottobre 2003, e succ. modif. ed integr.
- m) Delibera Giunta Regionale n. 2325 in data 01 agosto 2003 "Recepimento dell'ordinanza del presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003"
- n) Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Calcestruzzo delle strutture di fondazione:

Si impiega un calcestruzzo di classe minima (resistenza cubica caratteristica a 28 gg.):

$$R_{ck} = 30 \text{ MPa} \quad (\text{C25/30})$$

con tensioni di progetto pari a:

- verifiche allo stato limite ultimo $(\gamma_m=1.6)$

$$f_{cd}=15.5 \text{ N/mm}^2 \quad f_{ctd}=1.14 \text{ N/mm}^2$$

- verifiche allo stato limite esercizio $(\gamma_m=1.0)$

$$\sigma_{cls} = 14.9 \text{ N/mm}^2 \text{ (nella c.c. rara)}$$

$$\sigma_{cls} = 11.2 \text{ N/mm}^2 \text{ (nella c.c. quasi permanente)}$$

confezionato secondo le caratteristiche della **classe di esposizione XC2** come definite dalla Norma ENV 206, con **classe di consistenza S4**.

Calcestruzzo delle elevazioni:

Si impiega un calcestruzzo di classe minima (resistenza cubica caratteristica a 28 gg.):

$$R_{ck} = 35 \text{ MPa} \quad (\text{C28/35})$$

con tensioni di progetto pari a:

- verifiche allo stato limite ultimo $(\gamma_m=1.6)$

$$f_{cd}=18.1 \text{ N/mm}^2 \quad f_{ctd}=1.26 \text{ N/mm}^2$$

- verifiche allo stato limite esercizio $(\gamma_m=1.0)$

$$\sigma_{cls} = 17.4 \text{ N/mm}^2 \text{ (nella c.c. rara)}$$

$$\sigma_{cls} = 13.0 \text{ N/mm}^2 \text{ (nella c.c. quasi permanente)}$$

confezionato secondo le caratteristiche della **classe di esposizione XC3** come definite dalla Norma ENV 206, con **classe di consistenza S4**.

Calcestruzzo della soletta d'impalcato:

Si impiega un calcestruzzo di classe minima (resistenza cubica caratteristica a 28 gg.):

$$R_{ck} = 35 \text{ MPa} \quad (\text{C28/35})$$

con tensioni di progetto pari a:

- verifiche allo stato limite ultimo $(\gamma_m=1.6)$

$$f_{cd}=18.1 \text{ N/mm}^2 \quad f_{ctd}=1.26 \text{ N/mm}^2$$

- verifiche allo stato limite esercizio $(\gamma_m=1.0)$

$$\sigma_{cls} = 17.4 \text{ N/mm}^2 \text{ (nella c.c. rara)}$$

$$\sigma_{cls} = 13.0 \text{ N/mm}^2 \text{ (nella c.c. quasi permanente)}$$

confezionato secondo le caratteristiche della **classe di esposizione XC3** come definite dalla Norma ENV 206, con **classe di consistenza S4**.

Acciaio da c.a.:

Per le armature si impiega un acciaio in barre ad aderenza migliorata del tipo:

Fe B 44 k

controllato in stabilimento, con caratteristiche di resistenza:

$$f_{\text{caratt. snerv.}} = 430 \text{ N/mm}^2$$

con tensioni di progetto pari a:

- verifiche allo stato limite ultimo $(\gamma_m=1.15)$ $f_{yd}=373 \text{ N/mm}^2$

- verifiche allo stato limite esercizio $(\gamma_m=1.00)$ $\sigma_s = 300 \text{ N/mm}^2$ (nelle c.c. rara e quasi permanente)

che soddisfis i seguenti rapporti minimi:

$$\epsilon_{su,k} > 8\%$$

$$1.15 < f_t / f_y < 1.35$$

$$(f_{y,eff} / f_{y,nom}) < 1.25$$

4. CARATTERISTICHE DEL TERRENO DI FONDAZIONE

L'area oggetto della realizzazione dell'opera appartiene ai terreni della media pianura friulana (depositi alluvionali del Würmiano), compresa tra i conoidi del torrente Corno e del torrente Cormor; è caratterizzata da depositi ghiaiosi con sabbie e presenza estremamente limitata di materiale più fino (limi); lo strato di alterazione superficiale, agricolo o naturale, è di spessore modesto (30÷60cm) ed essenzialmente di natura limosa.

Sulle zone in cui si prevede la realizzazione delle opere sono state condotte diverse indagini geognostiche, che hanno confermato la natura essenzialmente incoerente del terreno e le buone caratteristiche geotecniche; sono emerse infatti situazioni pressoché omogenee di ghiaie e sabbie debolmente limose con ciottoli, compatte fin dai primi metri di profondità.

I sondaggi svolti in zone limitrofe a quella d'interesse, e spinti fino ad una profondità di almeno -10m dal p.c., non hanno intercettato la falda acquifera.

Il suolo di fondazione è classificabile, ai sensi di quanto prescritto dall'O.P.C.M. 3274 e succ. integr. e modif., come appartenente alla categoria B.

Nel calcolo della capacità portante delle fondazioni superficiali si adotteranno i seguenti parametri geotecnici minimi:

Ghiaie compatte con sabbia:

Peso di volume:	γ	= 19 kN/m ³
Angolo di attrito:	Φ	= 35°
Coesione:	c	= 0.0 kN/m ²

Per quanto riguarda il terreno di riporto per il ripristino del rilevato stradale, si sono assunte le seguenti caratteristiche geotecniche:

Peso di volume:	γ	= 18 kN/m ³
Angolo di attrito:	Φ	= 30°
Angolo di attrito terreno - muro:	Φ'	= 20°
Coesione:	c	= 0.00 kN/m ²
Coefficiente di spinta attiva ($\Phi=30^\circ$)	Ka	= 0.301

4.1. CAPACITÀ PORTANTE DELLE FONDAZIONI

La capacità portante del terreno interessato dalla soletta di fondazione viene di seguito calcolata, relativamente allo strato di terreno sul quale insiste la struttura, mediante la formula di Hansen nella sua espressione per terreni incoerenti, per fondazione orizzontale con carico verticale centrato:

$$\sigma_{lim} = q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q + 0.5 \cdot b \cdot \gamma \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma$$

con il significato dei termini classico di letteratura, dove i coefficienti N_q e N_γ valgono:

$$N_q = 10.43 (\Phi_d=24.7^\circ)$$

$$N_\gamma = 20.08 (\Phi_d=29.3^\circ)$$

Nel calcolo della capacità portante si adotta il coefficiente sul materiale (terreno) proposto nell'Eurocodice 7, in modo da ridurre l'angolo di attrito interno di calcolo:

$$\tan(\Phi_d) = \tan(\Phi)/1.25$$

Si riporta, di seguito, il calcolo della capacità portante della soletta di fondazione della struttura interrata e di quella dei muri d'ala.

Fondazione BxL = 5.2x8.0m – SCATOLARE INTERRATO

I coefficienti da inserire nella formula di Hansen, assumono i seguenti valori:

Larghezza della fondazione: $B = 5.20\text{m}$
Lunghezza della fondazione: $L = 8.00\text{m}$
Profondità del piano fondazionale: $D = 5.80\text{m}$
Fattori di forma: $s_q = 1.43$
 $s_\gamma = 0.69$
Fattori di profondità: $d_q = 1.34$
 $d_\gamma = 1.00$

Sostituendo, si ottiene:
 $q_{ult} = 687 + 2099 = 2786 \text{ kPa}$

Fondazione dei muri d'ala

I coefficienti da inserire nella formula di Hansen, assumono i seguenti valori:

Larghezza della fondazione: $B = 5.00\text{m}$
Profondità del piano fondazionale: $D = 1.00\text{m}$ medio
Fattori di forma: $s_q = 1.00$
 $s_\gamma = 1.00$
Fattori di profondità: $d_q = 1.06$
 $d_\gamma = 1.00$

Sostituendo, si ottiene:
 $q_{ult} = 934 + 205 = 1139 \text{ kPa}$

5. DATI DI CALCOLO

Il sottopasso in oggetto ha dimensioni minime interne di 4.00m di larghezza e 4.10m di altezza; si sviluppa per 8.0m circa all'interno del rilevato stradale per la realizzazione della corsia di accelerazione per l'immissione in autostrada, fino a raccordarsi col sottopasso esistente (posto ad Ovest rispetto la carreggiata stradale).

Si riassumono, nel seguito, i principali dati geometrici e di calcolo della struttura:

Sottopasso

Larghezza interna	4.00 m
Altezza minima.....	4.10 m
Sviluppo longitudinale	~8.00 m
Spessore soletta di fondazione	0.60 m
Spessore pareti verticali	0.60 m
Spessore soletta superiore	0.60 m

Muri d'ala

Altezza massima del paramento.....	5.80 m
Spessore paramento verticale.....	0.70 m
Sviluppo longitudinale	5.00+9.00 m
Spessore soletta di fondazione	0.70 m

6. ANALISI DEI CARICHI

6.1. CARICHI VERTICALI

6.1.1. Peso proprio struttura

Per il calcolo del peso proprio della struttura in c.a. si assume un peso specifico del materiale γ_{cls} pari a 25 kN/m³.

6.1.2. Peso terreno di ricoprimento

Per il calcolo del peso dovuto al terreno di rinfiaccio e di ricoprimento della struttura del sottopasso, si assume un peso specifico del materiale γ_{terr} pari a 18 kN/m³.

L'altezza di ricoprimento della soletta superiore del sottopasso è di 0.65m, a cui corrisponde un carico verticale di 12 kN/m².

6.2. DISTORSIONI

6.2.1. Variazioni termiche

Considerato che la struttura principale è completamente interrata, non sono stati considerati gli effetti delle azioni termiche.

6.3. CARICHI MOBILI

6.3.1. Carichi mobili statici

Si considerano i carichi mobili q_{1a} , q_{1b} e q_{1e} per ponte di prima categoria:

$$q_{1a} = 600 \text{ kN (cfr. schema di Normativa)}$$

$$q_{1b} = 30.0 \text{ kN/m}$$

6.3.2. Incremento dinamico dei carichi mobili

$$\phi, \text{ coefficiente dinamico} = 1.4 - (L-10)/150 \quad (\phi_{\min} = 1)$$

$$\phi (L=4.60 \text{ m}) = 1.4$$

$$q_{2a} (L=4.60 \text{ m}) = 0.4 \cdot 600 = 240.0 \text{ kN}$$

$$q_{2b} (L=4.60 \text{ m}) = 0.4 \cdot 30 = 12.00 \text{ kN/m}$$

6.3.3. Carichi mobili complessivi

$$q_{ma} (L=4.60 \text{ m}) = q_{1a} + q_{2a} = 840.0 \text{ kN}$$

$$q_{mb} (L=4.60 \text{ m}) = q_{1b} + q_{2b} = 42.0 \text{ kN/m}$$

Nell'ipotesi di diffusione a 45° del carico q_{1a} (che interessa l'opera in progetto) nello spessore del ricoprimento ed in metà dello spessore della soletta, si ottiene un carico equivalente uniformemente distribuito ripartito pari a:

$$b_1 = 3.30 + 2 \cdot (0.65 + 0.3) = 5.10 \text{ m (in senso longitudinale)}$$

$$b_2 = 2.30 + 2 \cdot (0.65 + 0.3) = 4.1 \text{ m (in senso trasversale)}$$

Si assume $b_1=5.10\text{m}$ e $b_2=3.50\text{m}$ (pari all'ingombro convenzionale di una colonna di carico), da cui si ottiene:

$$q_{rip} = 840 / (5.1 \cdot 3.5) = 47 \text{ kN/m}^2$$

6.3.4. Azioni longitudinali di frenamento

Non si considera l'azione del frenamento, perché trascurabile rispetto l'entità delle spinte (passiva, a riposo od attiva) dovute al terreno di rinfiaccio.

6.3.5. Azione centrifuga

Non si considera l'azione centrifuga.

6.3.6. Azione del vento

Non si considera l'azione del vento.

6.3.7. Azioni su parapetti e guard-rail

a) Azione applicata al guard-rail:

$$q_{8gr} = 45.0 \text{ kN} \quad (\text{in direzione trasversale})$$

$$q_{8gr} = 30.0 \text{ kN} \quad (\text{in direzione longitudinale})$$

L'azione è applicata a 0.60 m dal piano stradale.

b) Azione applicata ai parapetti:

$$q_{8pa} = 1.3 \text{ kN/m} \quad (\text{in direzione trasversale})$$

L'azione è applicata al corrimano del parapetto.

6.3.8. Spinta delle terre

La spinta delle terre dovuta ai carichi permanenti si sviluppa sulla superficie delle opere a contatto con il terreno. Le caratteristiche del terreno considerate nei calcoli sono quelle introdotte al capitolo 4. della presente relazione, relativamente agli strati di terreno indicati.

L'incremento di spinta con la profondità è regolato dalla nota formula:

$$\sigma = h \cdot \gamma \cdot K$$

con K coefficiente di spinta attiva/riposo per i vari strati di terreno considerati.

Incremento della spinta per carichi accidentali

La spinta delle terre dovuta a carichi accidentali q sul terrapieno a monte delle strutture di sostegno si traduce in una pressione orizzontale uniformemente distribuita sul muro pari a:

$$\sigma_q = q \cdot K$$

con K coefficiente di spinta attiva/riposo per i vari strati di terreno considerati.

6.3.9. Azioni sismiche sulle strutture di sostegno delle terre

L'opera è situata in comune di Udine (UD); ai sensi dell'Ordinanza del P.C.M. n. 3274 del 20 marzo 2003, e succ. modif. ed integr., l'area d'intervento è classificata come zona sismica 2, con accelerazione al suolo a_g/g di 0.25. Il terreno, visto quanto riportato al p.to 4., è di tipo B. Si assume per γ_1 un valore pari a 1.3.

In accordo con le vigenti norme sulla progettazione dei ponti stradali, non si considera la presenza di carichi accidentali viaggianti in concomitanza con l'evento sismico.

6.3.10. Incremento sismico delle spinte del terreno

La spinta indotta dal terreno a monte delle strutture di sostegno (flessibile) viene calcolato come somma di tre contributi, come di seguito riportato:

$$E_{d1} = \frac{1}{2} \gamma' K H^2$$

$$E_{d2} = \pm \frac{1}{2} \gamma' K k_v H^2$$

$$E_{d3} = E_{ws}$$

con:

γ' : peso specifico del terreno, ovvero differenza tra il peso specifico del terreno saturo ed il peso specifico dell'acqua, a seconda delle caratteristiche della falda;

K: coefficiente di spinta, attiva o passiva, del terreno (statico + dinamico);

H: altezza del muro di sostegno;

k_v : coefficiente sismico verticale, pari a:

$$k_v = \frac{1}{2} [S a_g / g] / r$$

r = 1 per opere di sostegno che non ammettono spostamenti;

r = 2 per opere di sostegno che ammettono spostamenti.

E_{ws} : spinta idrostatica dell'acqua a monte.

Per strutture rigide la normativa fornisce la seguente relazione per il calcolo dell'incremento della spinta dovuta all'evento sismico:

$$\Delta Pd = [S a_g / g] \gamma' H^2$$

7. ANALISI DELLA STRUTTURA INTERRATA

Per l'analisi delle sollecitazioni nella struttura scatolare costituente lo scatolare si è ricorso all'elaboratore elettronico, utilizzando il codice di calcolo SCAT 9, prodotto dalla ditta Aztec, di cui si riportano i tabulati di input e di output in formato digitale nel CD-ROM allegato.

Per l'analisi della struttura si è considerata una porzione di larghezza unitaria, che è stata schematizzata agli elementi finiti mediante elementi "beam"; il terreno di rinfiando e di fondazione viene invece schematizzato con una serie di elementi molle non reagenti a trazione (modello di Winkler). L'area della singola molla è direttamente proporzionale alla costante di Winkler del terreno e all'area di influenza della molla stessa.

7.1. CONDIZIONI DI CARICO

Le condizioni di carico semplici, comuni agli stati limite rispetto ai quali verrà eseguita la verifica, considerate nel calcolo della trave continua sono le seguenti:

- c.c.1 : pesi permanenti g_1
- c.c.2 : spinta del terreno di rinfiando
- c.c.3 : azione accidentale dovuta al carico mobile q_{1a}
- c.c.4 : azione sismica

Il carico/sovraccarico dovuto al passaggio dei carichi mobili è calcolato nell'ipotesi di diffusione a 45° del carico q_{1a} nello spessore del ricoprimento ed in metà dello spessore della soletta. Si ottiene un carico equivalente uniformemente ripartito pari a:

$q = 47 \text{ kN/m}^2$
come calcolato al capitolo precedente.

7.1.1. Combinazioni di carico

Le condizioni di carico di cui al precedente p.to vengono combinate tra loro per ottenere le seguenti combinazioni di carico, che saranno poi considerate nelle verifiche successive.

Caso di carico B

- SLE1 c.c.1 + c.c.2
- SLE2 c.c.1 + c.c.2 + c.c.3
- SLU1 1.5 c.c.1 + 1.5 c.c.2
- SLU2 1.5 c.c.1 + 1.5 c.c.2 + 1.5 c.c.3
- SIS1 1.3 c.c.1 + 1.3 c.c.2 + 1.3 c.c. 4

Caso di carico C

- SLU1 c.c.1 + c.c.2
- SLU2 c.c.1 + c.c.2 + 1.3 c.c.3
- SIS1 1.3 c.c.1 + 1.3 c.c.2 + 1.3 c.c. 4

La distinzione tra le combinazioni di carico nei due casi è fatta in coerenza con quanto indicato nell'Eurocodice 7: il caso B non prevede alcun coefficiente sul materiale "terreno", ed è utilizzato per le verifiche di resistenza dell'opera, mentre il caso C prevede la riduzione delle caratteristiche geotecniche del terreno, come indicato nel cap. 4, ed è finalizzato alle verifiche di stabilità/resistenza del terreno.

7.2. VERIFICA STRUTTURA SCATOLARE

Si riportano nel seguito le verifiche delle sezioni maggiormente sollecitate appartenenti alla struttura scatolare d'estremità.

I carichi indotti dal terreno di ricoprimento e dai carico mobile equivalente sono:

$$p = 12.0 \text{ kN/m}^2$$
$$q = 47 \text{ kN/m}^2$$

B= 1.00m H=0.60m As,inf=Φ20/20 As,sup=Φ20/20

Verifiche in esercizio

$M_{SD} = -116 \text{ kNm/m}$ $\sigma_{cls} = -3.1 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_s = 150 \text{ N/mm}^2$

Verifiche allo Stato Limite Ultimo

$M_{SD} = -173 \text{ kNm/m}$ $M_{RD} = -300 \text{ kNm/m}$

$V_{SD} = 57 \text{ kN/m} < V_{RD1} = 185 \text{ kN/m}$

Verifiche in condizioni sismiche

$M_{SD} = -88 \text{ kNm/m}$ $\sigma_{cls} = -2.4 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_s = 114 \text{ N/mm}^2$

$V_{SD} = 100 \text{ kN/m} < V_{RD1} = 185 \text{ kN/m}$

Sezione di incastro parete verticale (S3)

B= 1.00m H=0.60m As,est=Φ20/20+Φ20/40 As,int=Φ16/20

Verifiche in esercizio

$M_{SD} = 184 \text{ kNm/m}$ $\sigma_{cls} = -4.4 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_s = 161 \text{ N/mm}^2$

Verifiche allo Stato Limite Ultimo

$M_{SD} = 277 \text{ kNm/m}$ $M_{RD} = 440 \text{ kNm/m}$

$V_{SD} = 243 \text{ kN/m} > V_{RD1} = 220 \text{ kN/m}$

Si dispongono delle barre piegate a 45° (Φ12/40), disposte con passo s=400mm.

Verifica puntone compresso $V_{SD} < V_{RDU} = 2996 \text{ kN}$

Verifica armatura trasversale: $V_{cd} = 417 \text{ kN}$

$V_{wd} = 175 \text{ kN}$

$V_{Rd2} = 350 \text{ kN} > V_{SD}$

Verifiche in condizioni sismiche

$M_{SD} = 291 \text{ kNm/m}$ $\sigma_{cls} = -6.9 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_s = 254 \text{ N/mm}^2$

$V_{SD} = 280 \text{ kN/m} < V_{RD2} = 350 \text{ kN/m}$

Sezione di mezzera parete verticale (S4)

B= 1.00m H=0.60m As,est=Φ20/20 As,int=Φ16/20

Verifiche in esercizio

$M_{SD} = -47 \text{ kNm/m}$ $\sigma_{cls} = -1.5 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_s = 94 \text{ N/mm}^2$

Verifiche allo Stato Limite Ultimo

$M_{SD} = -70 \text{ kNm/m}$ $M_{RD} = -195 \text{ kNm/m}$

$V_{SD} = 34 \text{ kN/m} < V_{RD1} = 200 \text{ kN/m}$

Verifiche in condizioni sismiche

$M_{SD} = -81 \text{ kNm/m}$ $\sigma_{cls} = -2.6 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_s = 161 \text{ N/mm}^2$

$V_{SD} = 60 \text{ kN/m} < V_{RD1} = 200 \text{ kN/m}$

Sezione di incastro soletta superiore (S5)

B= 1.00m H=0.60m As,inf=Φ20/20 As,sup=Φ20/20+Φ20/40

Verifiche in esercizio

$M_{SD} = -134 \text{ kNm/m}$ $\sigma_{cls} = -3.4 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_s = 147 \text{ N/mm}^2$

Verifiche allo Stato Limite Ultimo

$M_{SD} = -200 \text{ kNm/m}$ $M_{RD} = -350 \text{ kNm/m}$

$V_{SD} = 265 \text{ kN/m} > V_{RD1} = 210 \text{ kN/m}$

Si dispongono delle barre piegate a 45° (Φ12/40), disposte con passo s=400mm.

Verifica puntone compresso $V_{SD} < V_{RDU} = 2996 \text{ kN}$

Verifica armatura trasversale: $V_{cd} = 417 \text{ kN}$

$V_{wd} = 175 \text{ kN}$

$V_{Rd2} = 350 \text{ kN} > V_{SD}$

Verifiche in condizioni sismiche

$$M_{SD} = -198 \text{ kNm/m} \quad \sigma_{cls} = -5.0 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_s = 218 \text{ N/mm}^2$$
$$V_{SD} = 154 \text{ kN/m} < V_{RD2} = 350 \text{ kN/m}$$

Sezione di mezzeria soletta superiore (S6)

$$B = 1.00\text{m} \quad H = 0.60\text{m} \quad A_{s,inf} = \Phi 20/20 \quad A_{s,sup} = \Phi 20/20$$

Verifiche in esercizio

$$M_{SD} = 103 \text{ kNm/m} \quad \sigma_{cls} = -2.7 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_s = 132 \text{ N/mm}^2$$

Verifiche allo Stato Limite Ultimo

$$M_{SD} = 154 \text{ kNm/m} \quad M_{RD} = 300 \text{ kNm/m}$$
$$V_{SD} = 28 \text{ kN/m} < V_{RD1} = 205 \text{ kN/m}$$

Verifiche in condizioni sismiche

$$M_{SD} = 40 \text{ kNm/m} \quad \sigma_{cls} = -1.1 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_s = 52 \text{ N/mm}^2$$
$$V_{SD} = 50 \text{ kN/m} < V_{RD1} = 205 \text{ kN/m}$$

Per questa sezione, essendo l'intradosso della soletta superiore non protetto da guaine e/o rivestimenti, si esegue la verifica a fessurazione.

$$\text{c.c. frequente } (\Psi=0.7) \quad M_{SD} = 83 \text{ kNm/m} \quad \omega = 0.20 \text{ mm} < 0.40 \text{ mm}$$
$$\text{c.c. quasi permanente } (\Psi=0.2) \quad M_{SD} = 47 \text{ kNm/m} \quad \omega = 0.11 \text{ mm} < 0.20 \text{ mm}$$

7.2.2. Verifica azioni sul terreno

Nelle combinazioni di carico definite nel caso C, la massima pressione sul terreno risulta pari a 196 kPa in condizioni non sismiche, mentre in condizioni sismiche si ottiene una pressione massima di 181 kPa, entrambe inferiori alla capacità portante calcolata al capitolo 4.

7.3. VERIFICA MURI D'ALA

Si riportano nel seguito le verifiche delle sezioni maggiormente sollecitate appartenenti alle opere di sostegno laterali per il contenimento del terreno del rilevato stradale di progetto.

L'altezza del paramento (di spessore 0.70m) è variabile, fino ad un massimo di 5.80m. La soletta di fondazione ha spessore di 0.80m, e larghezza di 5.00m.

La verifica di resistenza del manufatto è svolta considerando le combinazioni di carico riportate all'inizio del presente capitolo. Si seguono le verifiche del paramento verticale (sezione di incastro) e della soletta di fondazione (all'incastro con la parete verticale).

7.3.1. Verifica di resistenza delle sezioni

La verifica di resistenza del manufatto è svolta considerando le combinazioni di carico riportate all'inizio del presente capitolo. Si seguono le verifiche del paramento verticale (sezione di incastro) e della soletta di fondazione (all'incastro con la parete verticale).

7.3.1.1. Verifica paramento verticale

Si verifica la sezione d'incastro del muro verticale, considerando una fascia di larghezza unitario ($b=1.00\text{m}$) e spessore 0.70m; si dispone un'armatura resistente di $5\Phi 16$ sulla faccia a valle, e $5+5\Phi 20$ a monte.

- condizioni allo stato limite d'esercizio

$$M_{SD} = 312 \text{ kNm/m} \quad \sigma_{cls} = -5.0 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_s = 173 \text{ N/mm}^2$$

- condizioni allo stato limite ultimo

$$M_{SD} = 468 \text{ kNm/m} \quad M_{RD} = 700 \text{ kNm/m}$$
$$V_{SD} = 208 \text{ kN/m} \quad V_{RD1} = 225 \text{ kN/m}$$

- condizioni sismiche

$$M_{SD} = 514 \text{ kNm/m} \quad \sigma_{cls} = -8.2 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_s = 283 \text{ N/mm}^2$$
$$V_{SD} = 216 \text{ kN/m} < V_{RD1} = 225 \text{ kN/m}$$

7.3.1.2. Verifica soletta di fondazione

La struttura di fondazione è interessata dalle sollecitazioni indotte dalle sottopressioni del terreno e dal peso proprio della struttura, nonché dal peso del terreno di riempimento a monte

La sezione presenta una larghezza di 1.00m, spessore di 0.80m e risulta armata con 5+5Φ20 superiori e 5Φ20 inferiori.

condizioni d'esercizio: $M_{SD} = 237 \text{ kNm/m}$ $\sigma_{cls} = -2.9 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_s = 112 \text{ N/mm}^2$
condizioni allo S.L.U.: $M_{SD} = 410 \text{ kNm/m}$ $M_{RD} = 819 \text{ kNm/m}$

$V_{SD} = 249 \text{ kN/m}$ $V_{RD1} = 236 \text{ kNm/m}$

Si dispongono Φ16/40 piegati a 45°, con interasse di calcolo di 0.60m. La resistenza della sezione con l'armatura a taglio risulta:

$V_{RDU} = 3455 \text{ kN/m}$

$V_{CD} = 505 \text{ kN/m}$ $V_{WD} = 285 \text{ kN/m}$ $V_{RD2} = 570 \text{ kN/m} > V_{SD}$

condizioni sismiche: $M_{SD} = 536 \text{ kNm/m}$ $\sigma_{cls} = -6.5 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_s = 254 \text{ N/mm}^2$
 $V_{SD} = 264 \text{ kN/m} < V_{RD2} = 570 \text{ kNm/m}$

7.3.2. Verifica a stabilità opera di sostegno

Si riportano di seguito le verifiche a stabilità del manufatto nelle due combinazioni di carico alle quali la struttura è soggetta (casi di carico C).

Combinazione di carico C1

Momento stabilizzante: -1639 kNm/m

Momento sollecitante: +343 kNm/m

Eccentricità (rispetto la mezzeria del piano fondale): 0.40m

La pressione massima trasmessa al terreno risulta pari a 183 kPa.

L'eccentricità è tale per cui la risultante è interna alla sezione, e quindi risulta soddisfatta la verifica a ribaltamento.

Spinta orizzontale massima sul manufatto

$F_{SD,h} = 220 - 83 = 137 \text{ kN/m}$

Forza resistente orizzontale:

$F_{RD,H} = N_{vert} \cdot 0.8 \tan(\delta_d) = 275 \text{ kN/m} > F_{SD,h}$

Combinazione di carico C2 (spinta sismica verticale positiva)

Momento stabilizzante: -1639 kNm/m

Momento sollecitante: +954 kNm/m

Eccentricità (rispetto la mezzeria del piano fondale): 1.31m ($L_{comp} = 3.56\text{m}$)

La pressione massima trasmessa al terreno risulta pari a 324 kPa.

L'eccentricità è tale per cui la risultante è interna alla sezione, e quindi risulta soddisfatta la verifica a ribaltamento.

Spinta orizzontale massima sul manufatto

$F_{SD,h} = 403 - 84 \text{ kN/m} = 319 \text{ kN/m}$

Forza resistente orizzontale:

$F_{RD,H} = N_{vert} \cdot \tan(\delta_d) = 322 \text{ kN/m} > F_{SD,h}$

La spinta passiva offerta dal dente di fondazione è stata computata considerandone un'aliquota del 100%, e utilizzando il coefficiente di spinta passiva determinata con la formula di Mononobe-Okabe prevista dalla normativa sismica di riferimento.

Combinazione di carico C2 (spinta sismica verticale negativa)

Momento stabilizzante: -1639 kNm/m

Momento sollecitante: +621 kNm/m

Eccentricità (rispetto la mezzeria del piano fondale): 1.03m ($L_{comp} = 4.41\text{m}$)

La pressione massima trasmessa al terreno risulta pari a 315 kPa.

L'eccentricità è tale per cui la risultante è interna alla sezione, e quindi risulta soddisfatta la verifica a ribaltamento.

Spinta orizzontale massima sul manufatto

$F_{SD,h} = 403 - 84 \text{ kN/m} = 319 \text{ kN/m}$

Forza resistente orizzontale:

$$F_{RD,H} = N_{vert} \cdot \tan(\delta_d) = 387 \text{ kN/m} > F_{SD,h}$$

La spinta passiva offerta dal dente di fondazione è stata computata considerandone un'aliquota del 100%, e utilizzando il coefficiente di spinta passiva determinata con la formula di Mononobe-Okabe prevista dalla normativa sismica di riferimento.

8. ELABORATI DI CALCOLO

Gli elaborati delle analisi eseguite con il calcolatore elettronico sono riportati in formato digitale in allegato separato. In particolare si riportano le relazioni di output del modello strutturale studiati (struttura scatolare del sottopasso).

Nelle relazioni sono riportati i dati di input, i principali risultati in termini di spostamenti e sollecitazioni, nonché una descrizione schematica del metodo di calcolo adottato.