

Sull'impiego del monitoraggio geomatico per la stima dei parametri nei modelli di calcolo degli spostamenti strutturali

Maria Grazia D'Urso (*), Paolo Russo (**), Salvatore Sessa (***)

(*) DICeM, Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale, Via G. Di Biasio 43, 03043 Cassino (FR), Tel. +39-0776 2994309; Fax:089 2580897; durso@unicas.it

(**) Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara, Viale Saragat 1, 44121 Ferrara, Tel. +39-0532 974950, paolo.russo@unife.it

(***) DIS, Politecnico di Milano, P.zza L. Da Vinci 32, 20133 Milano, Tel. 3339176371, sal.sessa@gmail.com

Sommario

La stima a-priori dei cedimenti delle strutture di fondazione è di grande importanza nella scelta degli interventi di prevenzione dei danni che possono essere causati a un fabbricato o ad una infrastruttura da cantieri interferenti. In questo lavoro si presentano i risultati di uno studio riguardante i cedimenti fondali di alcuni fabbricati ubicati in prossimità di un'area di scavo profondo destinata alla realizzazione di un parcheggio multipiano in un centro urbano. In particolare si mostra come i movimenti misurati mediante livellazione digitale di alta precisione possano essere utilizzati per la calibrazione dei parametri di un modello di calcolo agli elementi finiti (FEM) della zona interessata dallo scavo. Il modello è opportunamente semplificato in modo da poter essere utilizzato con sufficiente affidabilità in applicazioni tecniche correnti.

Abstract

A-priori estimate of the vertical displacements of foundations is particularly important for selecting the preliminary activities able to prevent damages to buildings or infra-structures caused by nearby construction sites. In this paper we present the results of a study concerning the evaluation of the foundation displacements of some buildings close to an urban area where deep excavations have been carried out for constructing a multi-floor parking. It is shown in particular how the displacements measured from high precision digital leveling can be used for calibrating the parameters of a FEM model of the area interested by the excavation. The model is adequately simplified to be used with sufficient reliability in common technical applications.

Il monitoraggio geodetico applicato alle strutture

Le tecniche di monitoraggio e controllo hanno subito nel corso degli ultimi 40 anni una notevole evoluzione in quanto, accanto ai metodi tradizionali, spesso ancora assai affidabili ed accurati, sono gradualmente comparsi strumenti, sensori e sistemi di controllo innovativi che hanno introdotto nuove possibilità in questo settore.

Nel presente lavoro si farà riferimento al “*monitoraggio strutturale*”, intendendo per esso la procedura con la quale si confrontano in continuo dati sperimentali con dati progettuali consentendo di conoscere in tempo reale il grado di sicurezza di un'opera. Poiché il confronto avviene tra dati misurati (il più probabile modello sperimentale) e dati calcolati (il più probabile modello teorico), è ovvio che il problema assume immediatamente una connotazione stocastica che trova ambito naturale nelle misure di alta precisione.

Tipicamente i dati acquisiti sperimentalmente durante un'attività di monitoraggio sono costituiti da spostamenti di punti significativi della struttura. Tali spostamenti vengono giudicati eccessivi quando superano di almeno un ordine di grandezza quelli ottenuti da un modello di calcolo, e sono

pertanto indicativi di potenziali situazioni di rischio per la statica e la funzionalità dell'opera da realizzare o già esistente.

Tale problematica ha assunto notevole valenza in tempi recenti a causa del gran numero di scavi profondi eseguiti in aree fortemente urbanizzate, tipicamente per la realizzazione di parcheggi sotterranei o di linee di metropolitane. Conseguentemente, la scelta della tecnologia di scavo e la successione delle sue fasi può avere notevole influenza sulla integrità delle costruzioni adiacenti alle aree di scavo.

In tal caso gli spostamenti da misurare sono quelli di punti di controllo materializzati sia sugli edifici esistenti che sulla struttura in costruzione. Gli obiettivi del monitoraggio sono fondamentalmente legati alla valutazione della capacità delle fondazioni degli edifici già costruiti, al controllo degli assestamenti strutturali e alla definizione di un'area di rottura potenziale.

Peraltro, in tali casi, il problema maggiore è costituito dalla determinazione dei valori più plausibili da attribuire ai parametri geotecnici del modello di calcolo. Infatti, tale aspetto costituisce quello di gran lunga più delicato attesa l'anisotropia dei terreni ed il loro comportamento non lineare. Non a caso, è ritenuto più che soddisfacente un modello di calcolo che riesca a stimare l'ordine di grandezza del massimo cedimento atteso.

Inoltre è importante effettuare il monitoraggio sia in fase di realizzazione dell'opera che dopo la sua realizzazione in quanto i fattori che provocano i cedimenti possono essere differenti tra una fase e l'altra. Per progettare un intervento di monitoraggio è necessario conoscere:

- il contesto entro cui si inserisce l'opera;
- i punti significativi dell'opera di cui si vogliono conoscere i movimenti e le direzioni principali di spostamento;
- il sistema di riferimento rispetto a cui riferire le misure e le direzioni di movimento;
- l'ordine di grandezza degli spostamenti dell'opera e le incertezze attribuibili;
- la strumentazione, lo schema geometrico (rete o altro), l'algoritmo di calcolo che consentono di avere nel tempo misure congrue a quelle del punto precedente;
- la valutazione della minima condizione di rischio.

Lo spazio in cui si realizzerà l'opera di cui si vuole eseguire il monitoraggio, costituisce il "*cantiere delle misure*". Quest'ultimo, a differenza del cantiere di costruzione, è un cantiere *permanente* che nasce in quello di costruzione, resta operativo per tutta la vita utile dell'opera e durante questo tempo deve essere sempre agibile.

L'agibilità di questo cantiere è peculiare perché consiste nella possibilità di ripetere nel tempo le misure che si ritengono utili per definire la posizione nel tempo di punti significativi della struttura.

Nell'area impegnata dal cantiere delle misure andranno sviluppate la rete di controllo su cui appoggiare tutte le operazioni di rilevamento del terreno e l'installazione di sottoreti necessarie all'individuazione di punti fissi.

L'applicazione di differenti metodologie di rilevamento topografico rappresenta uno strumento efficace per il monitoraggio statico degli edifici che ancora oggi risulta spesso economicamente più vantaggioso, affidabile e completo rispetto a sistemi di acquisizione in continuo.

Un esempio di monitoraggio geodetico

Il sistema di monitoraggio di precisione che si illustra è stato realizzato per il controllo di possibili effetti indotti sui fabbricati prospicienti la centrale Piazza XXIV Maggio, in Salerno, interessata dai lavori di scavo profondo eseguiti per la costruzione di un parcheggio sotterraneo multipiano. L'attività di monitoraggio è consistita in una serie di campagne di livellazione geometrica di alta precisione eseguite su una rete di n. 40 capisaldi verticali, a superficie sferica in acciaio, installati sulle pareti di fondazione dei fabbricati di controllo, in prossimità del piano campagna, all'interno di pozzetti in PVC chiusi.

Il caposaldo "*zero*" è stato individuato in prossimità dello spigolo Nord Est dell'edificio sede del Tribunale di Salerno su Corso Vittorio Emanuele, e per ogni strada di accesso alla piazza sono stati individuati degli anelli di livellazione secondari di riferimento.

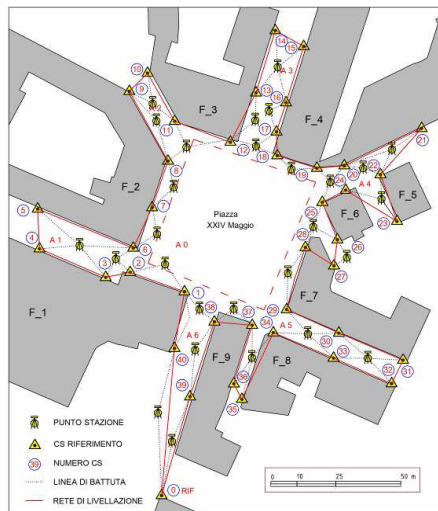


Figura 1. Rete di Monitoraggio dei fabbricati prospicienti Piazza XXIV Maggio: schema delle misure.

La particolare conformazione del sito che presenta sull'intera rete di livellazione più di 14 m di dislivello, la presenza di un cantiere che con le sue recinzioni limita la visibilità, l'alta densità di traffico hanno richiesto campagne di misura notturne, sia per il rilievo iniziale al tempo t_0 che per le campagne successive alla t_0 . L'esecuzione di una singola campagna di misura ha richiesto in media circa 8 ore continue di operazioni di misura. La strumentazione impiegata è consistita in un livello digitale TOPCON modello DL101C e stadie di invar codificate di altezza 3 m e 5 m.

Complessivamente le campagne di misura sono state in numero di 8 e sono state eseguite nel periodo 2004-2007; le prime due campagne di misura intervallate di 1 anno, prima dell'inizio effettivo dei lavori, sono state svolte su richiesta della Direzione Lavori, rispettivamente nel luglio 2004 e nel luglio 2005. In tal modo è stato possibile verificare la presenza eventuale di fenomeni deformativi in atto ancor prima dell'insediamento del cantiere e dovuti a cause diverse da quelle legate alla realizzazione del parcheggio.

In entrambe le sessioni di misura al tempo " t_0 " è stato eseguito il rilievo globale della rete costituita da 40 capisaldi collegati tra loro da uno schema geometrico che consente la localizzazione e la rimozione di errori grossolani, nonché la stima della precisione dei risultati, indispensabile per la valutazione della significatività dei movimenti.

Lo schema della rete, costituita da 9 anelli chiusi e indipendenti tra loro, connessi in modo da comprendere tutti i punti di controllo, è tale da consentire il controllo di tutte le misure e individuare immediatamente la presenza di eventuali errori grossolani. Soltanto il caposaldo 23 è stato collegato alla rete mediante un ramo aperto. Dopo avere constatato che gli errori di chiusura dei suddetti anelli sono risultati tutti inferiori alla tolleranza tipica della livellazione geometrica di alta precisione, si è proceduto alla compensazione della rete ai minimi quadrati, assumendo la quota del caposaldo di riferimento pari a 10,00 metri.

Ottenuti i risultati della compensazione, si è proceduto al confronto tra le quote determinate in una generica campagna di misure e la prima.

La variazione di quota di un qualsiasi caposaldo verificatasi tra due campagne di misura si considera significativa, cioè dovuta ad un effettivo movimento del caposaldo stesso, se la sua entità è superiore all'incertezza da cui è affetta la variazione stessa, per effetto degli errori di misura. Tale

incertezza è facilmente calcolabile sulla base delle deviazioni standard delle quote che risultano dalla compensazione delle misure i cui valori massimi sono riassunti nella seguente tabella.

| Campagna | Anno | Dev. St. max [mm] |
|----------|---------------|-------------------|
| 1° | 2004 | 0,40 |
| 2° | 2005 | 0,40 |
| 3° | Luglio 2006 | 0,59 |
| 4° | Ottobre 2006 | 0,69 |
| 5° | Novembre 2006 | 0,33 |
| 6° | Gennaio 2007 | 0,38 |
| 7° | Aprile 2007 | 0,57 |
| 8° | Ottobre 2007 | 0,60 |

Tabella 1. Valori massimi delle deviazioni standard nelle varie campagne di misura.

Pertanto la variazione di quota ΔH di un caposaldo relativa a due generiche campagne di misura, una al tempo t_i e l'altra al tempo t_j , si considera significativa se supera il doppio della deviazione standard $\sigma_{\Delta H}$. In tal caso la probabilità che essa indichi un movimento è circa del 95%.

| Capisaldi | DIFFERENZE DI QUOTA TRA LE VARIE CAMPAGNE DI MISURA | | | | | | | |
|-----------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 2° - 1° | 3° - 1° | 4° - 1° | 5° - 1° | 6° - 1° | 7° - 1° | 8° - 1° | 9° - 1° |
| | ΔH [m] | ΔH [m] | ΔH [m] | ΔH [m] | ΔH [m] | ΔH [m] | ΔH [m] | ΔH [m] |
| CS Rif 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | -0.0006 | -0.0019 | -0.0029 | -0.0033 | -0.0032 | -0.0032 | -0.0048 | -0.0040 |
| 2 | -0.0006 | -0.0024 | -0.0036 | -0.0045 | -0.0046 | -0.0050 | -0.0068 | -0.0073 |
| 3 | -0.0021 | -0.0037 | -0.0059 | -0.0073 | -0.0077 | -0.0078 | -0.0103 | -0.0100 |
| 4 | 0.0002 | 0.0003 | -0.0007 | -0.0017 | -0.0012 | -0.0010 | -0.0022 | -0.0014 |
| 5 | 0.0003 | 0.0006 | -0.0003 | -0.0013 | -0.0006 | -0.0004 | -0.0014 | -0.0002 |
| 6 | -1E-04 | -0.0025 | -0.0032 | -0.0036 | -0.0033 | -0.0037 | -0.0050 | -0.0045 |
| 7 | -0.0003 | -0.0013 | -0.0022 | -0.0032 | -0.0026 | -0.0027 | -0.0038 | |
| 8 | -0.0002 | -0.001 | -0.002 | -0.0026 | -0.0019 | -0.0022 | -0.0031 | |
| 9 | -0.0171 | -0.0171 | -0.0181 | | -0.0183 | -0.0187 | -0.0199 | |
| 10 | -0.0007 | -0.0002 | -0.0009 | | -0.0011 | -0.0013 | -0.0021 | |
| 11 | -0.0003 | -1E-04 | -0.0012 | -0.0021 | -0.0011 | -0.0013 | -0.0022 | |
| 12 | -1E-05 | 0.0003 | -0.0011 | -0.0018 | -0.0006 | -0.0008 | -0.0020 | |
| 13 | -0.0003 | 0.0008 | -0.0007 | | -0.0005 | 0.0000 | -0.0015 | |
| 14 | -0.0004 | 0.0008 | -0.0004 | | -0.0005 | -0.0003 | -0.0013 | |
| 15 | -0.0007 | 0.0004 | -0.0006 | | -0.0009 | -0.0007 | -0.0017 | |
| 16 | -0.004 | -0.0037 | -0.0049 | | -0.0053 | -0.005 | -0.0061 | |
| 17 | -0.0009 | -1E-04 | -0.001 | | -0.0014 | -0.0012 | -0.0021 | |
| 18 | -0.0003 | 0.0003 | -0.0011 | -0.0015 | -0.0006 | -0.0007 | -0.0019 | |
| 19 | -0.0003 | -0.0003 | -0.0013 | -0.0016 | -0.0010 | -0.0008 | -0.0016 | |
| 20 | -0.0006 | 0 | -0.0011 | | -0.0009 | -0.0006 | -0.0014 | |
| 21 | -0.0007 | -0.0003 | -0.0015 | | -0.0011 | -0.0004 | -0.0018 | |
| 22 | -0.0005 | 0.0003 | 0.0012 | | -0.0007 | -0.0002 | -0.0012 | |
| 23 | -0.0008 | -0.0008 | 0.0007 | | -0.0016 | -0.0015 | -0.0025 | |
| 24 | -0.0004 | 1E-04 | -0.001 | | -0.0010 | -0.0005 | -0.0018 | |
| 25 | -0.0004 | -0.0004 | -0.0014 | -0.0017 | -0.0015 | -0.0013 | -0.0020 | |
| 26 | -0.0005 | -0.0002 | -0.0013 | | -0.0013 | -0.0010 | -0.0020 | |
| 27 | -0.0004 | -1E-04 | -0.0011 | | -0.0012 | -0.0007 | -0.0019 | |
| 28 | -0.0003 | -1E-04 | -0.0009 | -0.0012 | -0.0008 | -0.0008 | -0.0015 | |
| 29 | -0.0001 | 0.0003 | -0.0005 | -0.0002 | -0.0003 | -0.0003 | -0.0010 | |
| 30 | -0.0001 | 0.0003 | -0.0007 | | -0.0004 | 1E-04 | -0.0010 | |
| 31 | -1E-04 | 0.0003 | -0.0007 | | -0.0003 | -0.0002 | -0.0008 | |
| 32 | -0.0007 | -0.0005 | -0.0017 | | -0.0015 | -0.0014 | -0.0020 | |
| 33 | -0.0006 | -0.0003 | -0.0014 | | -0.0013 | -0.0012 | -0.0016 | |
| 34 | -0.0007 | -0.0006 | -0.0013 | -0.0012 | -0.0012 | -0.0011 | -0.0016 | |
| 35 | -0.0008 | -0.0003 | -0.0015 | | -0.0014 | -0.0012 | -0.0014 | |
| 36 | -0.0018 | 0 | -0.0008 | | -0.0015 | -0.0010 | -0.0012 | |
| 37 | -0.0011 | -0.0003 | -0.0009 | -0.0011 | -0.0013 | -0.0011 | -0.0013 | |
| 38 | -0.0007 | -0.0006 | -0.0011 | -0.0015 | -0.0017 | -0.0012 | -0.0016 | -0.0020 |
| 39 | -0.001 | -0.0007 | -0.001 | -0.0015 | -0.0015 | -0.0011 | -0.0015 | -0.0017 |
| 40 | -0.0006 | 0 | -0.0006 | -0.001 | -0.0008 | -0.0003 | -0.0010 | -0.0009 |

Tabella 2. Variazioni di quota dei capisaldi.

Assumendo come misura precauzionale il valore massimo di $\sigma_{\Delta H}$ e cioè

$$\sigma_{\Delta H} = \sqrt{\sigma_{\max,ti}^2 + \sigma_{\max,tj}^2} \quad [1]$$

si ritiene significativa al 95% o al 99% una variazione di quota superiore a $2\sigma_{\Delta H \max}$ e a $3\sigma_{\Delta H \max}$ rispettivamente.

Essendo opportuno utilizzare soltanto due valori per l'incertezza delle variazioni di quota, è risultato, dai valori massimi delle deviazioni standard ottenuti dalla compensazione eseguita nelle varie campagne di misura, che una variazione di quota si poteva considerare significativa al 95% o al 99% se risultava superiore o uguale rispettivamente a 1,5 mm e a 2,0 mm.

Nella Tab. 2 sono riportate le differenze di quota tra le 8 campagne di misura svolte per l'intera rete e la campagna n. 9 eseguita solo in corrispondenza dello scavo centrale; per semplicità ci si limita a evidenziare le variazioni significative al 95% (evidenziate in rosso) e al 99% (evidenziate in grigio) solo nei risultati del confronto tra la prima e l'ottava campagna di misure, e tra la prima e l'ultima campagna di misure n.9 in cui come detto è stato eseguito un controllo parziale della rete.

A titolo di esempio nella Figura 2 sono riportati i grafici degli abbassamenti dei capisaldi più significativi, in particolare i capisaldi 2, 3 e 6 che presentano un trend di abbassamento molto netto. Per quanto non è possibile dire se tali variazioni siano effettivamente indicative di un movimento o, semplicemente, siano dovute agli inevitabili errori di misura.

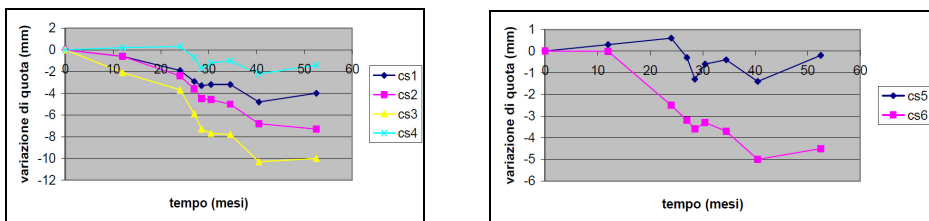


Figura 2. Abbassamenti di alcuni capisaldi della rete in funzione del tempo.

Il modello degli spostamenti attesi

L'intervento di scavo in ambito urbano impone sempre una certa attenzione nella valutazione degli effetti che questo può indurre sulla stabilità o sulla funzionalità delle costruzioni che sorgono in prossimità dello scavo stesso. In tal senso, e' utile un confronto tra i cedimenti dei capisaldi solidali agli edifici ed i relativi valori attesi.

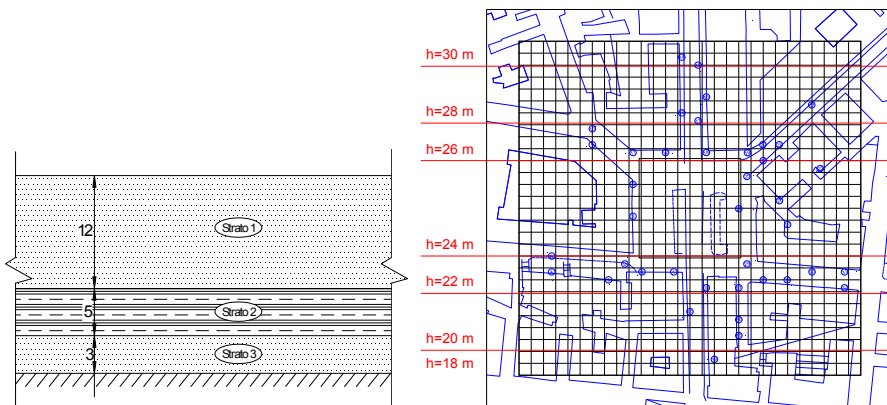


Figura 3. a) Stratigrafia del terreno; b) mesh del modello agli elementi finiti.

Questi ultimi sono stati stimati mediante analisi numeriche agli elementi finiti che hanno simulato l'intera procedura di scavo. I parametri meccanici del terreno sono stati definiti sulla base della stratigrafia desunta dalla relazione geologico–tecnica a corredo del progetto e riassunta nella figura 4a. Nello specifico, gli strati si presentano prevalentemente sabbiosi con inclusioni di lenti a grana fina. I valori caratteristici, riportati di seguito, hanno permesso la definizione meccanica degli elementi finiti secondo un modello elastico alla Winkler.

| Strato | E (kg/cm ²) | ϕ_1 | γ_1 (kg/cm ³) |
|--------|-------------------------|----------|-----------------------------------|
| 1 | 500 | 40° | 1800 |
| 2 | 120 | 28° | 1500 |
| 3 | 1000 | 40° | 1800 |

Tabella 3. Parametri meccanici del terreno.

Dalle relazioni progettuali, inoltre, si evince la presenza di una paratia che delimita lo scavo e ne costituisce le pareti perimetrali. Ne consegue uno schema 3D ad elementi finiti con elementi brick, per la modellazione del terreno, interagenti con elementi shell, per la modellazione della paratia, la cui planimetria e' schematizzata nella figura 4b. La scelta di tale modellazione e' motivata dalla necessita' di una schematizzazione accurata, al fine di trarre indicazioni attendibili sugli spostamenti che hanno luogo nel terreno a tergo della paratia stessa nelle varie fasi della realizzazione dell'opera.

Confronto tra gli spostamenti misurati e quelli attesi

A valle dell'analisi FEM, e' stato eseguito un confronto tra i cedimenti misurati e quelli stimati dal modello.

In figura 5 si riportano, per i capisaldi ritenuti piu' significativi, i grafici a dispersione in cui sull'asse delle ascisse viene riportato il cedimento misurato, e sulle ordinate quello stimato dal modello FEM in corrispondenza delle 4 fasi di scavo, rispettivamente a 2 m, 6 m, 8 m, 12 m, in accordo con il cronoprogramma dei lavori. Per ciascun grafico e' stata desunta una retta di regressione nonché i rapporti $\frac{\text{spostamenti} - \text{misurati}}{\text{spostamenti} - \text{calcolati}}$.

Come si evince dai grafici il confronto tra spostamenti misurati e spostamenti calcolati (attesi), eseguito per ogni caposaldo, ha mostrato che per ciascuna campagna di monitoraggio esiste una soddisfacente linearità per la maggior parte di essi.

In accordo con i risultati attesi la gran parte degli spostamenti si è verificata nella fase di scavo relativa alla profondità di 6 m. Infine considerando un range tra 0,1 mm e 10 mm, il confronto ha posto in evidenza che al termine della campagna triennale di monitoraggio (2004 – 2007), circa il 60% del numero totale dei capisaldi ha subito cedimenti che rientrano in tale intervallo.

In alcuni casi, tuttavia, la correlazione risulta inaccurata. Si ritiene che tali discrepanze siano da imputare a diversi fattori quali:

- impossibilità di infittire ulteriormente la mesh per limitare l'onere computazionale: gli elementi brick impiegati, di dimensioni (6x6) m in pianta e 2 m in profondità, comportano all'incirca 5×10^5 gradi di libertà del modello complessivo;
- la linearità e l'isotropia del legame costitutivo del terreno assunto nel modello FEM a fronte di un comportamento reale fortemente non lineare ed anisotropo;
- l'incertezza circa il carico trasmesso dai fabbricati, stimato, in mancanza di dati precisi, nel valore di 1 kg/cm² assumendo, inoltre, una sua distribuzione uniforme;
- la presenza di cavità sotto i fabbricati (scantinati, garage, ecc.) non è stata considerata.

Tali considerazioni forniscono anche utili indicazioni su sviluppi futuri della ricerca riguardanti in particolare l'impiego di modelli FEM piu' raffinati in grado di considerare anisotropia e legami costitutivi specifici, nonché una caratterizzazione probabilistica dei carichi esterni agenti sul modello.

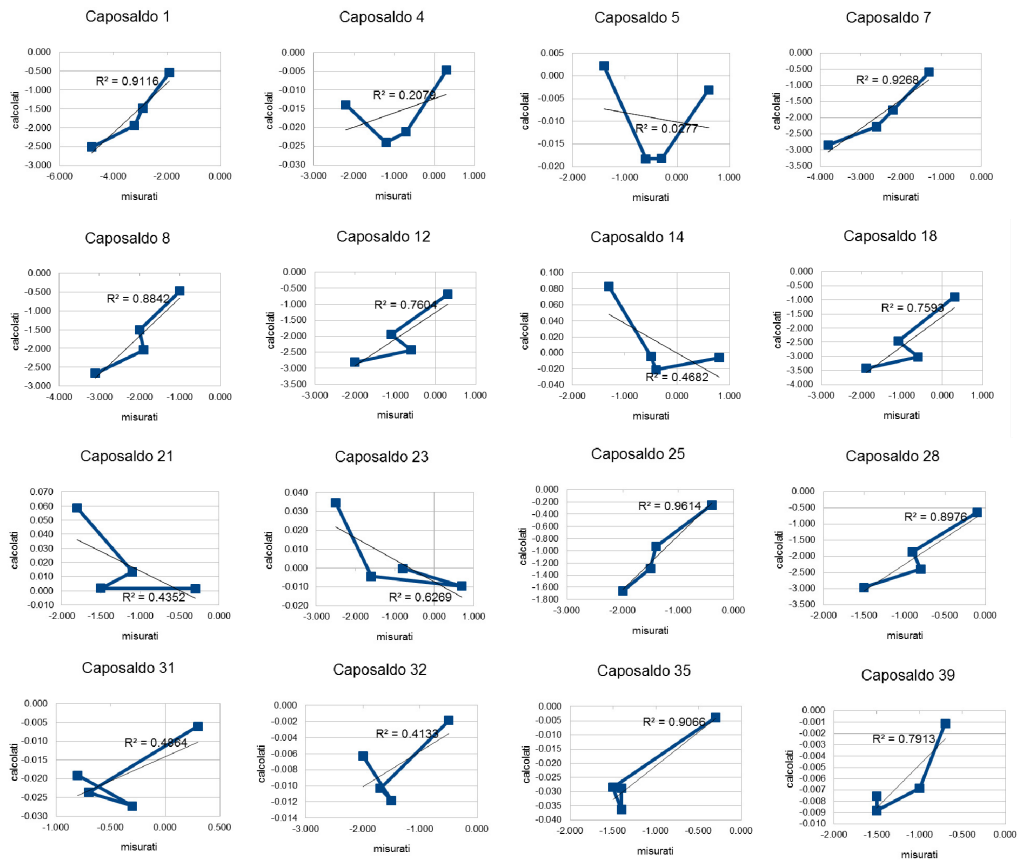


Figura 4. Confronto tra abbassamenti misurati e abbassamenti calcolati.

Conclusioni

Il caso di studio illustrato in precedenza ha mostrato che il monitoraggio di sorveglianza, inteso come monitoraggio geomatico di spostamenti e deformazioni di organismi strutturali, costituisce uno strumento quanto mai efficace nella vita di un'opera. Infatti, esso consente non solo di ridurre, se non eliminare del tutto, contenziosi legali ma anche di avere conferma sperimentale della modellazione adottata, a livello costitutivo e strutturale, e tararne opportunamente i relativi parametri sulla base delle misure eseguite nelle fasi preliminari di scavo e di realizzazione dell'opera.

Tenuto altresì conto del costo relativamente modesto di un monitoraggio di sorveglianza, è lecito affermare che i tempi sono sufficientemente maturi affinché il monitoraggio diventi uno strumento presente fin dal concepimento dell'opera; in questa direzione sarebbe quindi auspicabile un tempestivo intervento delle normative.

Infatti, si ha l'impressione che, nella realizzazione delle opere di ingegneria, la mancanza di un adeguato quadro normativo in materia di monitoraggio dia eccessivo spazio ad un approccio empirico ed approssimativo da parte della maggioranza degli operatori, con il risultato di non conseguire obiettivi significativi in relazione al problema affrontato. Sarebbe, quindi, opportuno provvedere all'elaborazione di linee guida, che siano in grado di fornire metodi e criteri idonei per una casistica quanto più possibile ampia nell'ambito di alcuni aspetti del monitoraggio strutturale.

Bibliografia

- Armer, G.S.T. (2001), *Monitoring and Assessment of Structures*, McGraw Hill, New York
- Ball A. D., Cooper J.E., Worden K. (1991), "On-line system identification techniques for structural analysis and monitoring", *Structural Integrity Assessment*, P. Stanley Ed., Elsevier, 236-245
- Barzaghi R., Pinto L. (2008), "Alcuni aspetti dell'analisi della deformazione", *SIFET*, Sorrento
- Becker J.M., Heister H., Slaboch V. (2000), "New technical standards improving the quality in positioning and measurement", *XX FIG International Congress*, Prague, 21-31
- Bitelli G., Bonsignore F., Unguendoli M. (2000), "Levelling and GPS Networks to Monitor Ground Subsidence in the Southern Po Valley", *J. of Geodynamics*, 30:355-369
- Brigante M., D'Urso M.G. (2006), "Crolli e Affidabilità delle Strutture Civili- Prevenzione e Controllo degli Spostamenti dei Dissesti Strutturali con Tecniche di Monitoraggio di Sorveglianza", *IF CRASH*, Messina
- Coppa U., Guarnirei A., Pirotti F., Vettore A. (2008), "Integrazione di tecniche di rilevamento per il controllo di stabilità di una struttura storica", *Convegno SIFET*, Sorrento
- D'Urso M.G., Russo P. (2006), "Norme tecniche per l'impiego degli apparati digitali di livellazione geometrica", *Bollettino della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia*, 4:165-178
- Davis E., Marsic S., Rodarmel W. (2008), "Deformation Monitoring Through Multi-Platform Integration", *13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis; 4th Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, LNCE, LISBON
- De Seixas A., De Seixas J.R., De Seixas J.J. (2006), "Control and Monitoring of Building Foundations - Applications in Very High Building Structures", *XXIII FIG Congress*, Munich,
- Grafarend, E.W. (1982), "Optimisation of geodetic networks", *DGK, Band B*, 258/III:69-81
- Henriques M. J., Casaca J. (2001), "Monitoring vertical displacements by means of geometric levelling", *Historical Constructions*, P.B. Lourenco and P. Roca (eds.), Guimarães, 403-412
- Ingensand H. (1999), "The use of digital level techniques: limitations and new solutions", *XIX FIG International Congress*, Gavle, 59-68
- Matarazzo L., Arena A.B. (2005), *La statica degli edifici esistenti: indagini e monitoraggio*, Sistemi ditorili ditorE
- Moore J.F.A. (1992), *Monitoring Building Structures*, Blakie & Son Ltd, Glasgow UK
- Radicioni F. (1994), Advanced mathematical analysis of control data of a high precision levelling network for monitoring the settlement of the 1982 Ancona landslide, D.S.M.T., Univ. of Ancona
- Rigo A., Cushing M. (1999), "Effets topographiques sur les comparaisons de profiles de nivellement: cas français de Saint-Paul-de-Fenouillet (Pyrénées-Orientales) et d'Arudy (Pyrénées-Atlantiques)", *Edition scientifiques et médicales*, Paris
- Sessa S., D'Urso M.G. (2013), "Employment of Bayesian networks for risk assessment of excavation processes in dense urban areas" sottoposto *11th Int. Conf. Struct. Safety & Reliability* New York
- Waschitz H., Brunner F. K. (2002), "System calibration of digital levels: experimental results of systematic effects", *INGEO, 2nd Conference of Engineering Surveying*, Kopacik A. and Kyrinovic P. (eds.), Bratislava
- Yetki M., Inal C., Yigit C.O. (2008), "Optimal Design of Deformation Monitoring Networks Using Pso Algorithm", *13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis; 4th Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, LNCE, LISBON