

Пројекат геодетског осматрања дела потпорног зида на аутопуту Е75 у хоризонталној равни

ПЕТКО Р. ВРАНИЋ, Универзитет у Београду,
Грађевински факултет, Београд

Стручни рад
UDC: 528.482:624
DOI: 10.5937/tehnika1905648V

Деоница аутопута Е75, од Грабовнице до Левосоје, која представља јужни крак Коридора Х, подељена је на 5 деоница. За потребе реализације главног пројекта, извршен је вертикални засек терена. Паралелно са радом на засеку, морала се обезбеђивати потпора терену и то кроз градњу потпорних зидова на косинама. На другој деоници по реду, од Грделице до Царичине долине изграђен је потпорни зид који је предмет осматрања. У овом раду дат је преглед свих прорачуна и процеса у изради пројекта осматрања ове потпорне конструкције у хоризонталној равни са циљем утврђивања свих померања на објекту већих од 2ст.

Кључне речи: деформациона анализа, пројектовање, контролна мрежа

1. УВОД

Приликом грађења инфраструктурних објеката користе се материјали који омогућавају дуг употребни век. Ипак, током година експлоатације истих, услед гравитационе силе, вршног оптерећења, померања тла и осталих деструктивних фактора, потребно је с времена на време испитати геометрију објеката.

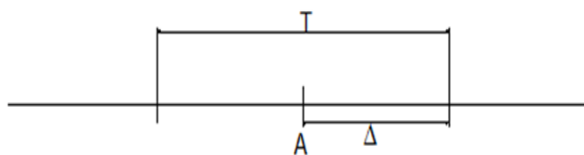
Геодетска мерења за осматрање објеката и деформациону анализу врше се са циљем да се утврде померања тачака на објекту и да се кроз статистичко тестирање овог померања утврди да ли је дошло до промене положаја и геометрије осматраног објекта. Да би се деформациона анализа адекватно применила, потребно је најпре бро испланирати мерења. Дobar пројекат осматрања гарантује компатибилност изабраног модела деформационе анализе са кризним проблемом објекта.

Приликом пројектовања контролне мреже потребно је извршити оптимизацију одређеног броја услова. Редови оптимизације су: нулти ред – одабир датума, први ред избор плана снимања, други ред - одређивање тачности мерења, и опционо, до-

давање нових тачака трећег реда [4]. Проблеми пројектовања могу се решити аналитичким или хеуристичким методама [1]. За дефинисање критеријума, које мрежа мора задовољити, користи се хеуристичка метода. Дефинисана својства су: датум мреже и конфигурација с планом снимања, прецизност мерења и прорачун тачности [6]. Ако неки од дефинисаних критеријума нису испуњени, онда се најчешће мењају конфигурација мреже, план мониторинга или прецизност мерења. Аналитички метод подразумева прибегавање јединственом низу математичких корака за непосредно задовољење дефинисаног критеријума.

Пројектовање, односно израда пројекта контролне 2Д мреже подразумева један дугачак и континуирани процес који се не одвија искључиво једносмерно, већ се често уочавају недостаци, који се коригују, па се наставља процес пројектовања. Да би овај процес био разумљив, потребно је упознати се детаљно са свим фазама пројектовања. На основу толеранције T која садржи дозвољено одступање за грађевинске и геодетске радове, долази се до величине дозвољеног одступања:

$$T^2 = T_{\text{геод.}}^2 + T_{\text{грађ.}}^2 \quad (1)$$



Слика 1 - Грађевинска толеранција [7]

Адреса аутора: Петко Вранић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Београд, Булевар краља Александра 73

e-mail: petvra@gmail.com

Рад примљен: 12.07.2019.

Рад прихваћен: 13.08.2019.

Према принципу занемарљивости, извор грешака се може занемарити ако на укупну грешку утиче са мање од 5% и према томе, грешка геодетског обележавања тачке мора бити занемарљива у односу на дозвољено одступање $\frac{1}{3}\Delta$. Грешка геодетског обележавања тачке састоји се од: грешке датих величина, грешке одмерања, грешке фиксирања тачака и грешке спољашњих услова (овај део грешке се само у неким случајевима узима у обзир, нпр. тамо где постоји вибрација терена, испаравање, обележавање под водом, ...).

2. ПОТПОРНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

Потпорне конструкције спадају у посебну групу геотехничких конструкција. Потпорне конструкције су привремене или сталне конструкције које подупиру земљану масу или стену под вертикалним или стрмим засеком, као и насуту тло, који у предвиђеној геометрији не могу сами да одрже захтевану стабилност. Потпорне конструкције имају широку примену скоро у свим областима грађевинарства: у зградарству као привремене и трајне заштитне конструкције темељних јама (нарочито у градским срединама); у области путева и железница као потпорни зидови код засека, усека и насипа; у мостоградњи као загатни зидови или прибоји приликом извођења темеља стубова, као приступне конструкције; при санацији клизишта; у хидротехници као кејски зидови итд. Потпорне конструкције се могу генерално поделити у три основна типа [10]:

- Гравитациони (масивни) потпорни зидови
- Флексибилни (укопани) потпорни зидови
- Композитне потпорне конструкције

3. ГЕОДЕТСКЕ МРЕЖЕ У ИНЖЕЊЕРСТВУ

Геодетска мрежа је неопходан елемент у решавању свих инжењерских задатака. Познато је да постоје државне геодетске мреже, међутим, оне у многим случајевима својом локацијом и начином стабилизације тачака, као ни тачношћу положаја тачака мреже не задовољавају потребе геодетских радова у инжењерству. Због тога се пројектују и израђују геодетске мреже посебне намене. Геодетске мреже у инжењерству се називају мреже посебне намене, па се реч намена често именује самом врстом објекта за чије потребе је мрежа планирана и реализована. Геодетске мреже у инжењерству, које се реализују за потребе одређених инжењерских задатака су мреже специјалне намене и пројектују се и реализују за потребе тога објекта. Геодетска мрежа објекта се састоји од тачака основне мреже и тачака на објекту. Заједно тачке основне мреже и тачке на објекту чине целину која

представља контролну мрежу и користи се у деформационој анализи и контроли геометрије. Облик и величина мреже зависе од самог објекта и терена у непосредној близини будућег објекта. Некада је случај да у геодетској мрежи у инжењерству постоје веома различите дужине страна. Све је то у функцији простора будућег објекта који се гради или је већ изграђен, па се накнадно реализују геодетске мреже за одређене експертске послове. Дакле, за геодетске мреже посебне намене се могу издвојити следећа својства и то да су [5]:

- Слободне – за објекте смештене на мањем подручју и на објектима где се тражи висока тачност обележавања, као што су мостови, бране, тунели...;
- Неслободне – на положајну и висинску државну мрежу за објекте који су лоцирани на већем подручју где је неопходно међусобно повезивање, типа аутопутеви, велики иригациони канали, далеководи...;
- По величини и облику прилагођене објекту који се гради;
- Хомогене, све тачке су истог реда и изравнавају се као целина;
- Стабилизација тачака се већином обавља стубовима са уређајима за присилно центрање.

Наведене специфичности указују на то да се мора добро познавати објекат грађења, због чега се мрежа и успоставља, технологија и динамика грађења, размештај помоћних објеката и материјала на широј локацији, како тачке геодетске мреже не би биле уништене.

Захтеви који се углавном постављају у пројектном задатку за мреже посебне намене су следећи: Геодетска мрежа посебне намене треба бити: хомогене тачности (елипсе грешака за све тачке приближно једнаке), изотропна (елипсе грешака за све тачке да теже кругу, а у најлошијем случају да однос велике и мале полуосе не буде већи од 2, поуздана (осетљива на утицај неоткривених грубих грешака), економична (рационално пројектована). Принципи које треба поштовати при изради геодетске мреже за потребе изградње одређеног објекта могу се дефинисати на следећи начин [2]:

- геодетска мрежа објекта треба просторно да обухвати цело градилиште и задовољи све потребе основног и детаљног обележавања до краја грађења, без обзира на то шта се може десити, да се објекат гради по етапама и да сам процес грађења дуго траје;
- тачност геодетске мреже посебне намене мора бити хомогена, без обзира на положај и просторни распоред тачака по градилишту и да

одговара захтевима тачности основног обележавања грађевина на целом градилишту;

- ради обезбеђења рачунања података за обележавање и анализу тачности, при изради пројекта мреже, укључује се најчешће главна осовина или неке важне осовине објекта у геодетску мрежу као једна од страна геодетске мреже објекта, и на тај начин се постиже веза између геодетске мреже тачака и пројекта будућег објекта;
- стабилизација тачака геодетске мреже се изводи трајнијим белегама, као што су армирано – бетонске белеге, са прецизним центром за центрисање инструмента и сигнала и са јасно назначеном рупицом на плочици од нерђајућег материјала, убетониран у белегу. У посебним случајевима за стабилизацију тачака геодетске мреже, користе се бетонски стубови округлог или квадратног пресека са уређајима за прилично центрисање инструмента и сигнала.

4. ПРОРАЧУН ТАЧНОСТИ КОНТРОЛНЕ 2Д МРЕЖЕ

Након формирања матрице дизајна А, матрице тежина Р и датумских услова В, за прорачун тачности неопходно је срачунати матрице $Q_{\hat{x}}$ и $Q_{\hat{v}}$. За рачунање мера прецизности основни извор информација јесте матрица $Q_{\hat{x}}$, док се за рачунање мера поузданости користе матрице Р и $Q_{\hat{v}}$.

$$Q_{\hat{x}} = (N + BV^T)^{-1} - BV^T \quad (2)$$

$$Q_{\hat{v}} = P^{-1} - AQ_{\hat{x}}A^T \quad (3)$$

При пројектовању геодетских мрежа у инжењерству, тежи се хомогено-изотропним мрежама. Хомогеност мреже огледа се у томе да све тачке имају исту положајну тачност, што се постиже тачношћу мерених величина, планом опажања и избором датума мреже.

Изотропност подразумева да елипсе грешака треба да буду што приближније круговима грешака, а услов изотропности гласи: $a:b=2:1$ при чему су а и b велика и мала полуоса елипсе. Мере поузданости дефинишу се глобалном и локалном мером унутрашње и спољашње поузданости. Локална мера унутрашње поузданости представља утицај i-тог мерења на i-ту поправку, а повећањем тачности мерења повећава се и унутрашња поузданост. Глобална мера унутрашње поузданости се рачуна у функцији броја мерених и непознатих величина, као и дефекта геодетске мреже:

$$\bar{r} = \frac{n-u+d}{n} \quad (4)$$

За геодетске 2Д мреже правило је: $r_{ii} \geq 0,3$ – тада је број мерења при оцени непознатих параметара већи од минималног.

Битан локални показатељ поузданости геодетске мреже је и маргинална грешка. Маргинална грешка представља вредност грубе грешке која се може открити тестом при претпоставци да постоји само једна груба грешка, и рачуна се према изразу:

$$|G_i| = \frac{\sigma_0 \sqrt{\lambda_0}}{P_{ii} \sqrt{Q_{\hat{v}_{ii}}}}$$

где су:

$\sqrt{\lambda_0} = t_{1-\beta_0} + t_{1-\alpha_0/2}$ – параметар нецентралности,

$t_{1-\beta_0}$ – квантил Студентовог распореда за усвојену моћ теста и

$t_{1-\alpha_0/2}$ – квантил Студентовог распореда за усвојени ниво значајности.

Што се добије мања вредност маргиналне грешке то је поузданост мреже већа. Вредности за маргиналну грешку крећу се између $5\sigma_i$ и $7\sigma_i$ где је σ_i стандард појединог мерења [3].

У контролним мрежама у деформационој анализи задатак геодете је да открије величину померања која не угрожава стабилност објекта и то $\frac{1}{5}$ величине померања мора бити положајна тачност тачака контролне мреже.

На пример, уколико се захтева да се открију вектори померања преко 2 mm, потребно је остварити положајну или висинску тачност тачака контролне мреже од 0,4 mm.

Да би се срачунао оптималан број мерења у мрежи користи се формула за рачунање глобалне мере унутрашње поузданости, и на основу ње се одређује број мерених величина које су неопходне како би имали довољну контролу мерења:

$$r = \frac{n-u+d}{n} \rightarrow n = \frac{u-d}{1-r} \quad (6)$$

Након обављеног прорачуна тачности, и додатне анализе добијених података, процес се циклично понавља, док год се не задовоље претходно дефинисани критеријуми. Након тога, сматра се да је процес пројектовања у оквиру пројекта осматрања завршен.

Евентуални даљи кораци геодетског посла би подразумевали мерење и изравнање са оценом тачности у оквиру контролне 2Д мреже, а након обављених мерења у више епоха и деформациону анализу.

5. ДЕФОРМАЦИОНА АНАЛИЗА ИНЖЕЊЕРСКИХ ОБЈЕКТА

Мониторинг инжењерских објеката има огроман значај за стабилност и експлоатацију објекта. Велики инжењерски објекти, као што су бране, тунели, мостови, високе зграде, требали би да се перманентно осматрају. Инжењерска геодезија је укључена у све фазе животног века једне конструкције. Сврха надгледања објекта у току експлоатације је да се на време уоче могућа оштећења и опасности по рад објекта, како би се могло право-времено реаговати. Надзор објекта који учествује у деформационом процесу захтева да се моделује како објекат, тако и процес деформација.

Конвенционално геодетско моделовање објекта подразумева да се објекат дискретизује карактеристичним тачакама, а такође, да померање тих тачака репрезентује померање и дисторзије објекта. То значи да се моделује само геометрија објекта. За конвенционалну анализу у времену и простору се примењују две класе модела. Модел који се заснива на тестирању подударности (конгруенције) карактеристичних тачака у различитим временским епохама се назива модел конгруенције. У њему фактор времена фигурише имплицитно. Модел који описује деформације на основу усвојене функције која зависи од времена, тј. узима се у обзир брзина и убрзање назива се кинематички модел. У моделе конгруенције убрајају се: Пелцорова метода или хановерски поступак, Каспаријева метода, Метод Делфт, Метод Карлсруе и Метод Велша [8].

У оквиру пројекта за праћење објекта израчунава се величина померања која се појединачним тестом подударности тачака између епоха може „сигурно” открити.

Најнеповољнији случај одређивања подударности тачака између две епохе у 2Д мрежи је у правцу велике полуосе, јер је у том правцу грешка одређивања положаја тачака највећа. Величина померања која се „сигурно” може открити се рачуна по следећој формули [9]:

$$\lambda = \frac{d_p^2 [\sin \theta \quad \cos \theta] Q_d^{-1} \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix}}{\sigma_0^2}$$

где је:

λ - параметар нецентралности χ^2 расподеле који је у функцији од ранга матрице Q_d , нивоа значајности и моћи теста

θ – угао који велика полуоса елипсе грешака заклапа са позитивним смером X осе

σ_0^2 – априори дисперзиони фактор

$Q_d=2Q_x$

d_p – величина померања која се „сигурно” може открити.

6. ПРАКТИЧНИ ПРИМЕР

Потпорни зид који је предмет осматрања налази се на деоници Грделица – Царичина долина, на јужном краку коридора X, на аутопуту E75, на стационажи (875+505, 876+240). За потребе реализације главног пројекта, извршен је вертикални засек терена. Паралелно са радом на засеку, морала се обезбеђивати потпора терену и то кроз градњу потпорних зидова на косини. Изглед дела потпорне конструкције приказан је на слици 2. Контролну 2Д мрежу дефинише 5 тачака основне мреже (OM8, OM9, OM10, OM11, R5) и 17 тачака на објекту који су означени редним бројем профила и редним бројем тачке на профилу (11-8, 10-6, 10-4, 10-2, 10-1, 9-9, 9-8, 9-7, 9-6, 9-5, 9-4, 9-3, 9-1, 8-5, 8-3, 8-2, 8-1). Основни подаци о контролној мрежи су приказани у табели 1. Треба истаћи да пројектом није дефинисано осматрање у 1Д равни, због природе улоге потпорне конструкције на овом делу терена. При избору локације за постављање геодетских тачака на терену водило се рачуна да оне буду постављене ван зоне градилишта и да се оствари догледање између њих.



Слика 2 - Изглед дела скоро завршене потпорне конструкције (Извор: Грађевински факултет Универзитета у Београду, Институт за материјале и конструкције)

Приликом пројектовања геометрије мреже поштовани су следећи захтеви:

- Тачке основне мреже су постављене на терену за који се претпоставља да је изван утицаја посматраног подручја, са тенденцијом што дужег опстанка на истом, обзиром на карактер терена, близину Западне Мораве и високу фреквенцију саобраћаја, тј. камиона који превозе терет на градилишту;
- Свака тачка основне мреже се догледа са бар две друге тачке основне мреже. Тачке основне мреже су постављене тако да се визуре секу под угловима у интервалу од 30° до 120°;

- Тачке на објекту су постављене уз консултацију са грађевинским инжењерима, на местима где су највећа оптерећења;
- Тачке на објекту су тако постављене да се свака тачка објекта догледа са бар 3 тачке основне мреже.

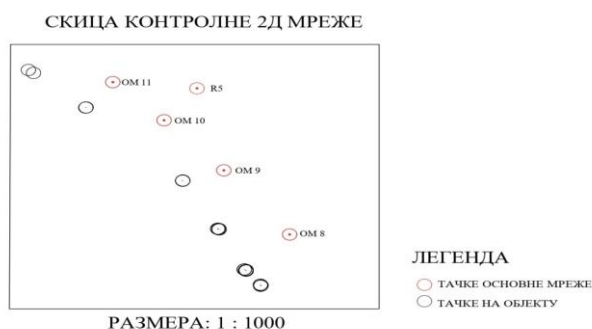
Табела 1. Основни подаци контролне 2Д мреже

Избор датума	Минимални траг матрице Q_x за све тачке
Дефект мреже	3
Број тачака основне 2Д мреже	5
Број тачака на објекту	17
Укупан број тачака у мрежи	22
Број мерених праваца	61
Број мерених дужина	57
Укупан број мерења	118
Број непознатих параметара	49
Број степени слободе	72
<i>a priori</i> стандард	10.00

За априори стандард је усвојена вредност $\sigma_0=10$, због нумеричке стабилности математичког модела. Тачност мерених праваца дефинисана је на основу тачности контролне мреже и дужине визууре, а тачност мерених дужина дефинисана је на основу тачности контролне мреже. На основу ових вредности срачунате су тежине мерених величина. За пројектовану геометрију мреже усвојен је план опажања и тачност мерења праваца и дужина који обезбеђују одређивање положаја тачака са стандардом:

$$\sigma_p \leq \frac{\Delta}{5} = 4.00 \text{ mm} \quad (7)$$

Приближне координате тачака контролне 2Д мреже су одређене у државном координатном систему, обзиром на природу објекта (издужени објекат, саобраћајница). На слици 3 приказана је скица контролне мреже.



Слика 3 - Скица контролне мреже

Прорачуном су дефинисани следећи услови мерења:

- Правце мерити у два гируса и то инструментом чија је декларисана тачност најмање 7";
- Дужине мерити приликом сваког регистравања правца, инструментом чија је декларисана тачност најмање 2 mm+2 mm/km;
- На основу прорачуна тачности за грешку центрисања инструмента, где је као најстрожији критеријум усвојена тачност $\sigma_{ci}=1.89 \text{ mm}$, донет је закључак да је потребно центрисање инструмената у мрежи извршити присилно и то оптичким висковима;
- Тачке стабилизоване на објекту требају бити сигнализане рефлектујућим сигнаlima облика пешчаног сата, јер је немогуће објекат сигнализирати типичним визуирним маркицама. Из наведеног се закључује да је грешка центрисања сигнала $\sigma_{cs}=0.00 \text{ mm}$, што је претходно и кориштено у оквиру прорачуна тачности.

За пројектовани план осматрања и конфигурацију мреже прорачуном је утврђена вредност максималног померања која се може открити од 7.63 mm на тачки 8-5 која се налази на објекту. Ова вредност задовољава услов, јер је мања од задатих 20 mm. Такође, иста тачка има и највећу априори вредност стандардног одступања положаја од 2.39 mm, што такође задовољава прорачунату дозвољену вредност од 4 mm. Из приложеног се може закључити да је план осматрања могао бити мање захтеван, што би било веома важно са аспекта економичности. Међутим, овако строг приступ је изабран због немогућности дужег опстанка свих тачака основне мреже, услед свакодневног превоза велике количине терета преко подручја које је покривено основном мрежом. Унутрашња поузданост геодетске мреже је значајна и креће се од 0.35 до 0.90 што је прихватљиво за 2Д мрежу овакве намене. Глобална мера унутрашње поузданости – просечан допринос редувантности износи 0.63. Вредности маргиналне грубе грешке су у интервалу од 20" до 70" за правце и 8 mm до 12 mm за дужине, што такође указује на високу поузданост пројектоване мреже. Геодетска мрежа се одликује високом прецизношћу, којом се, уз поменути поузданост мреже, може гарантовати откривање свих евентуалних померања на објекту, већих од 20 mm, што је и био циљ успостављања контролне 2Д мреже објекта.

7. ЗАКЉУЧАК

Праћење деформација објекта у току његове експлоатације јесте веома битно, јер пружа информације о безбедносном аспекту употребе објекта.

Суштина овог значаја се огледа у информацијама о геометријским неправилностима објекта, које су настале на њему током експлоатације.

Ове информације омогућавају, са претпоставком предузимања адекватних мера, избегавање угрожавања људских живота и великих материјалних штета узрокованих потенцијалним урушавањем објекта.

Санирањем откривених неправилности, продужава се животни век објекта. Саобраћајни објекти су од суштинског значаја за функционисање друштва, а ако су оштећени могу настати значајне последице. Задатак геодетских инжењера је да надгледају дугорочне деформације унутар координатног система објекта, са тенденцијом за перманентним осматрањем објекта.

Захтеви који се односе на опсег померања су веома строги, тако да је високо прецизно надгледање велика одговорност инжењера. Да би се спровела успешна анкета и анализа података, неопходно је имати квалитетан пројекат.

Од пројектанта се очекује да буде стручњак за математичку статистику, испитивање извора и утицаја грешака, метод анализе деформација и употребу софтвера за израчунавање тачности.

8. ЗАХВАЛНОСТ

Овај рад је реализован у оквиру пројекта „Примена ГНСС И ЛИДАР технологије у праћењу стабилности инфраструктурних објеката и терена“ (36009) који финансира Министарство за просвету и науку Републике Србије у оквиру програма Технолошког развоја за период 2011-2019. године.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Amiri-Simkooei A. R, Comparison of reliability and geometrical strength criteria in geodetic networks, *Journal of Geodesy*, 75, str. 227-233, 2001.

[2] Ашанин С, *Инжењерска геодезија*, Београд: Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2003.

[3] Беговић А. и Госпавић З, *Инжењерска геодезија 1*. Београд: Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2016.

[4] Grafarend, E. W, Sanso F, eds, *Optimization and design of geodetic networks*, Springer, Berlin, 1985.

[5] Михаиловић К. и Алексић И, *Концепти мрежа у геодетском премеру*. Београд, Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2008.

[6] Миловановић Б, Госпавић З, Пејовић М, Васиљевић С, Пројекат основне мреже, *Копаник, Зборник радова научног скупа - ГЕО2014*, стр. 3-11, 2014.

[7] Миловановић Б, Designing the control network for hydrotechnical objects for the purpose of geodetic monitoring, *International symposium on engineering geodesy SIG 2016 – Proceedings*, Вараждин. Хрватска, 2016.

[8] Миловановић Б, *Линеарно и нелинеарно моделирање геодетски реги-строваних деформационих процеса констр-укција*. докторска дисертација. Београд: Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2012.

[9] Миловановић Б, Госпавић З, Пејовић М, *Збирка задатака из инжењерске геодезије*, Београд: Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2014.

[10] Вукићевић М, *Примена еластопластичних модела за тло у прорачуну флексибилних потпорних конструкција*. докторска дисертација. Београд: Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2006.

SUMMARY

PROJECT OF HORIZONTAL DEPLACEMENT MONITORING BY GEODETIC METHODS AT THE PART OF SUPPORTING WALL OF THE E75 MOTORWAY

The section of the E75 motorway, from Grabovnica to Levosoje, which represents the southern leg of the Corridor X, is divided into 5 sections. For the needs of realization of the main project, the vertical seating of the terrain was performed. In parallel with the work on the shutter, it was necessary to provide support to the field through the construction of supporting walls on the slopes. On the second section in line, from Grdelica to Caricina Dolina, a support wall was built, which is the subject of observation. In this paper we give an overview of all the calculations and processes in the design of the project of observing this support structure in the horizontal plane with the aim of determining all movements on an object larger than 2 cm.

Key words: *deformation analysis, design, control network*