

The failure mechanism of the Morandi Bridge in Genoa

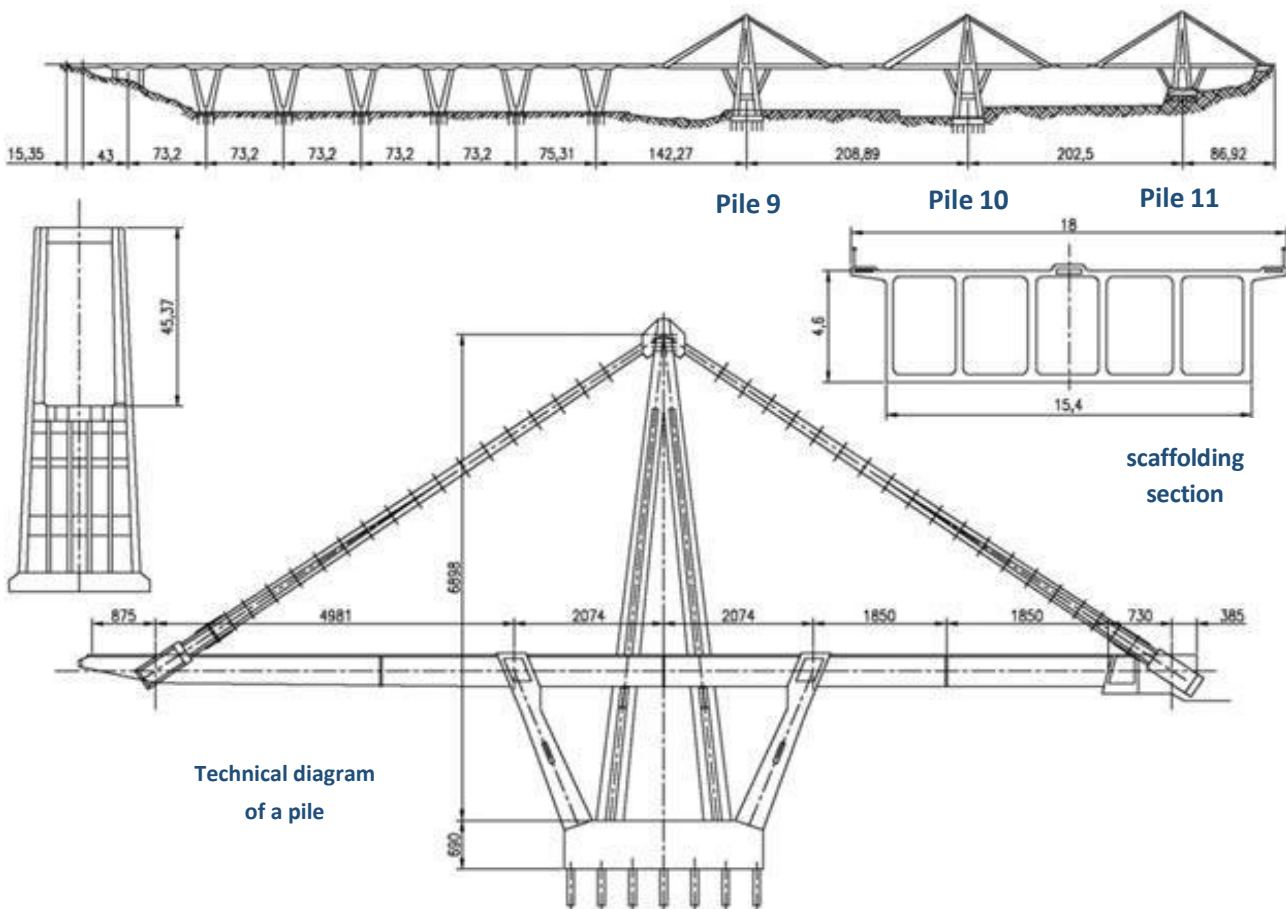
(February review 2020)

The bridge had been in operation since 1967 and had undergone appropriate maintenance over time, including the complete renovation of the tie rods of Pier 11, to compensate for the advanced deterioration of the metal reinforcement within the concrete.

To formulate a hypothesis about the mechanism of the collapse of the Morandi Bridge in Genoa, which occurred on August 14, 2018, I used documents and images easily available online, citing the relevant links.

At the following link <https://www.ingenio-web.it/20897-crolla-il-ponte-morandi-a-genova-problema-strutturale-ma-perche> I found a design diagram of the bridge, useful for visualizing its main dimensional characteristics.

For the engineering analysis that follows, beyond the multiple opinions of experts in the field,

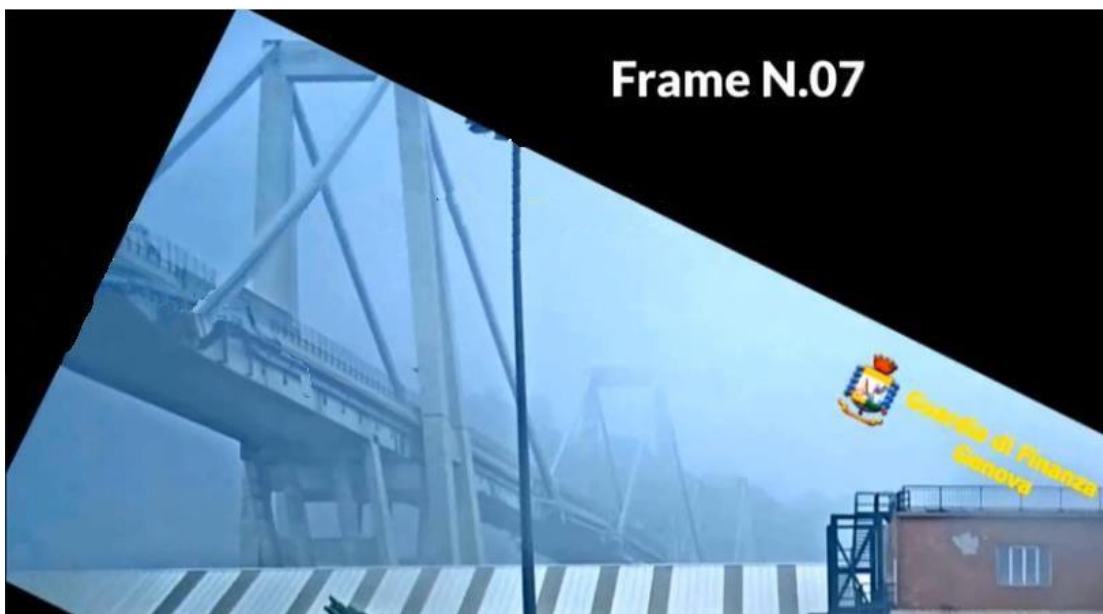
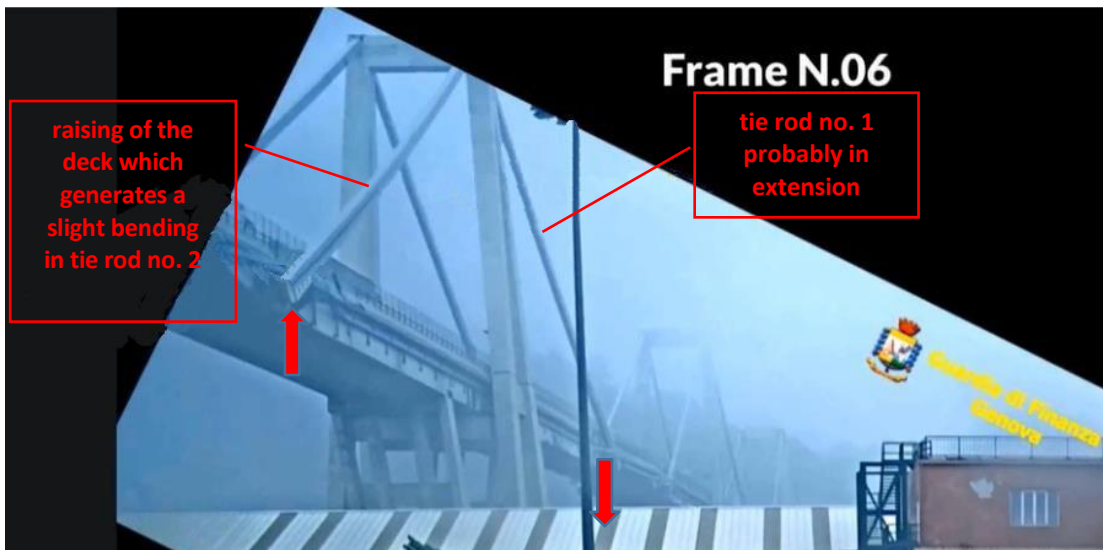


all informed to the utmost caution, I found useful the video clip that appeared online, initially seized by the Guardia di Finanza, and subsequently made public with the authorization of the Judicial Authority, visible at the link <https://youtu.be/a-LfXohbn0U>, reworked and fragmented into a video available at the link <https://youtu.be/8B0zc2TUgmc> with the title “Anomalie video crollo Ponte Morandi a 3fps (Ferrometal)”.

To carefully observe the moments surrounding the tragic event, I extracted the frames from the video cited, analyzed them, and indicated the significant notations. The skipped frames were deemed insignificant for understanding the failure mechanism.

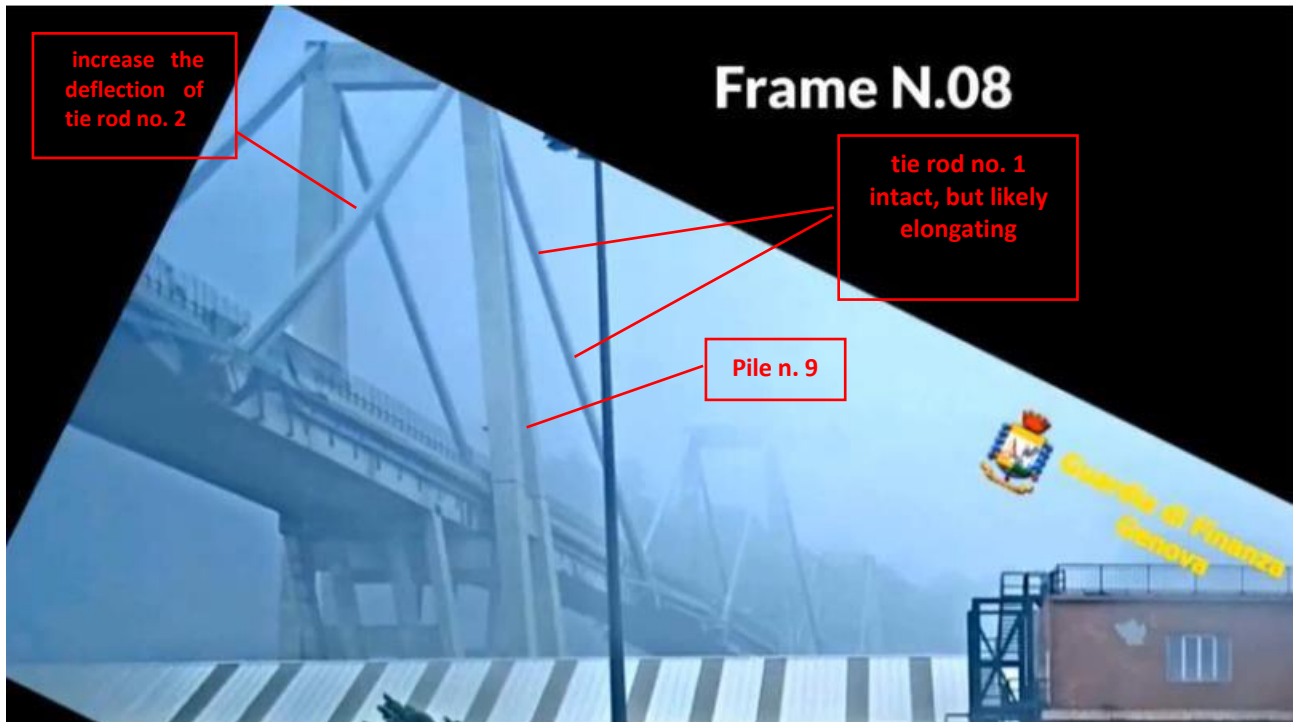
Frames n. 1 ~ 8: the collapse is about to happen



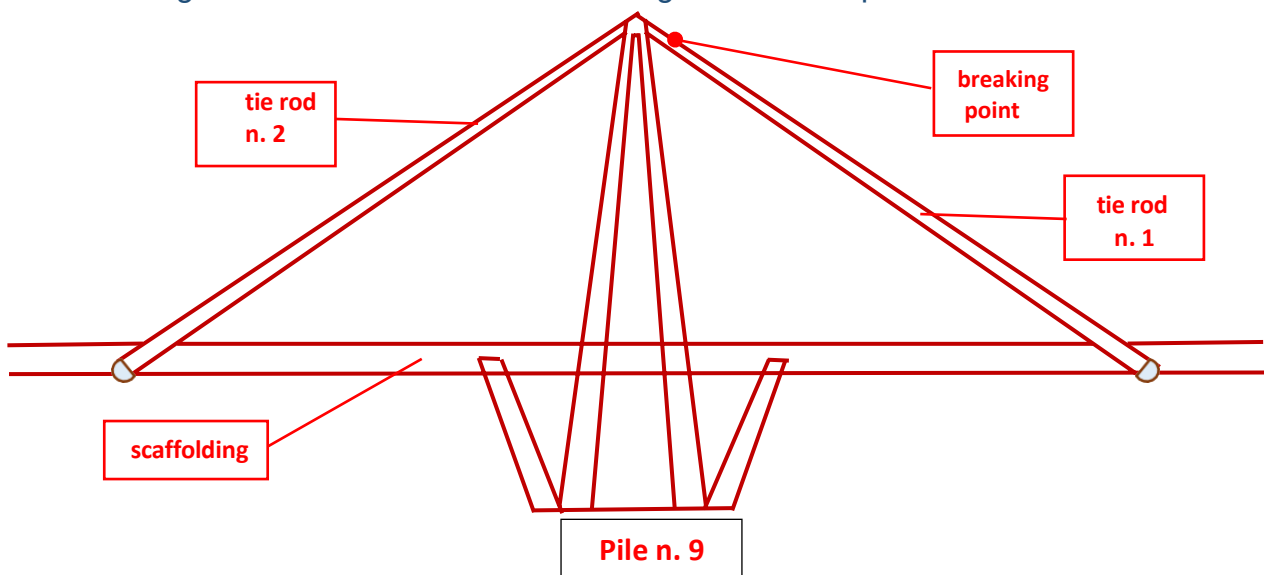


THE BRIDGE COLLAPSES BEGIN

In the following Frame n. 08 the tie rods are still intact, even though the failure of tie rod n. 1 is imminent (note the difference in its high attachment level between Frame n. 08 and the following Frame n. 09).



The structural failure appears to have been triggered by the breakage of the steel cables inside tie rod no. 1 on the seaward side, which had apparently been corroded over time by water infiltrating into the cracks in the surrounding concrete for protection.



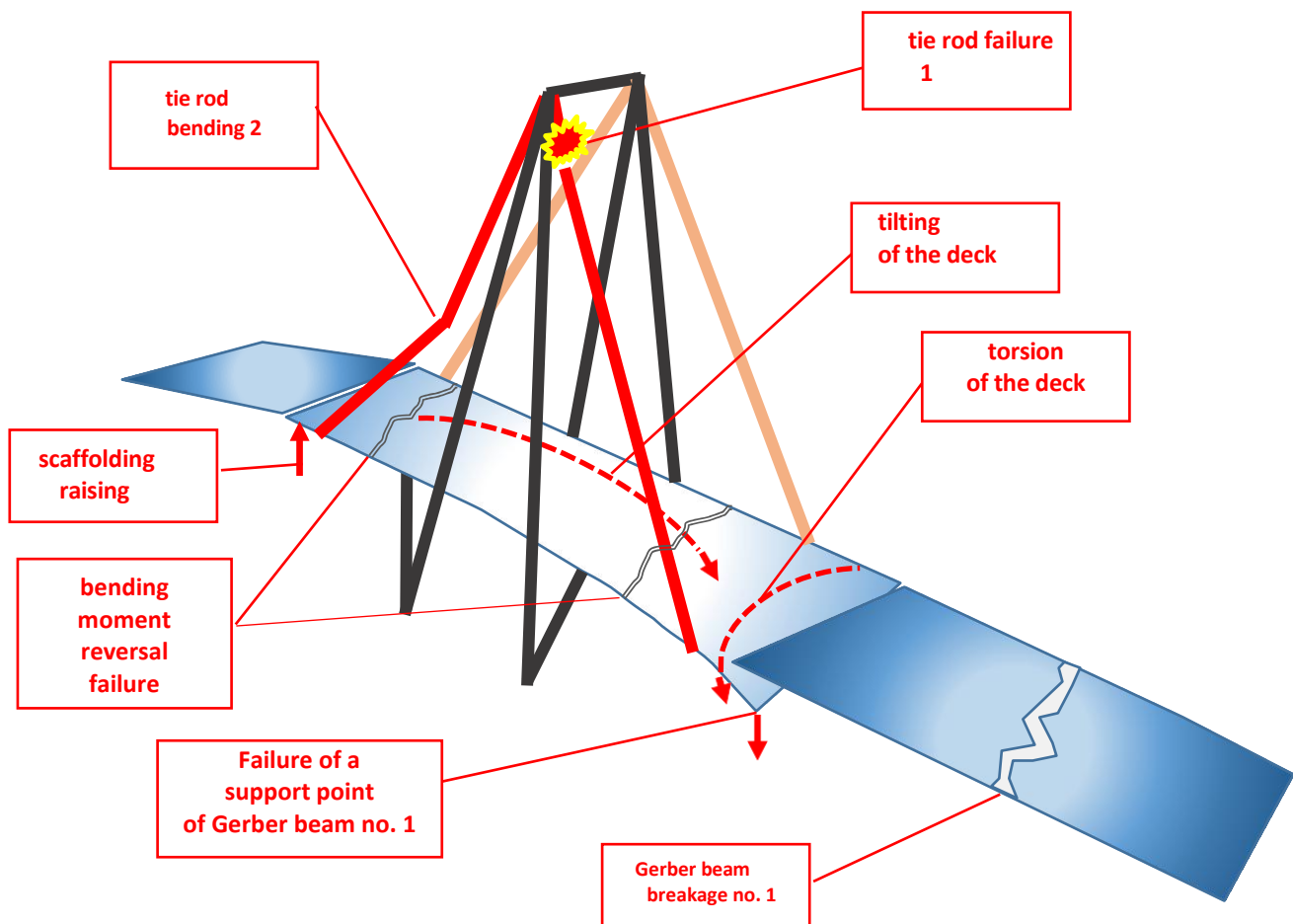
Structural diagram of Pile No. 9

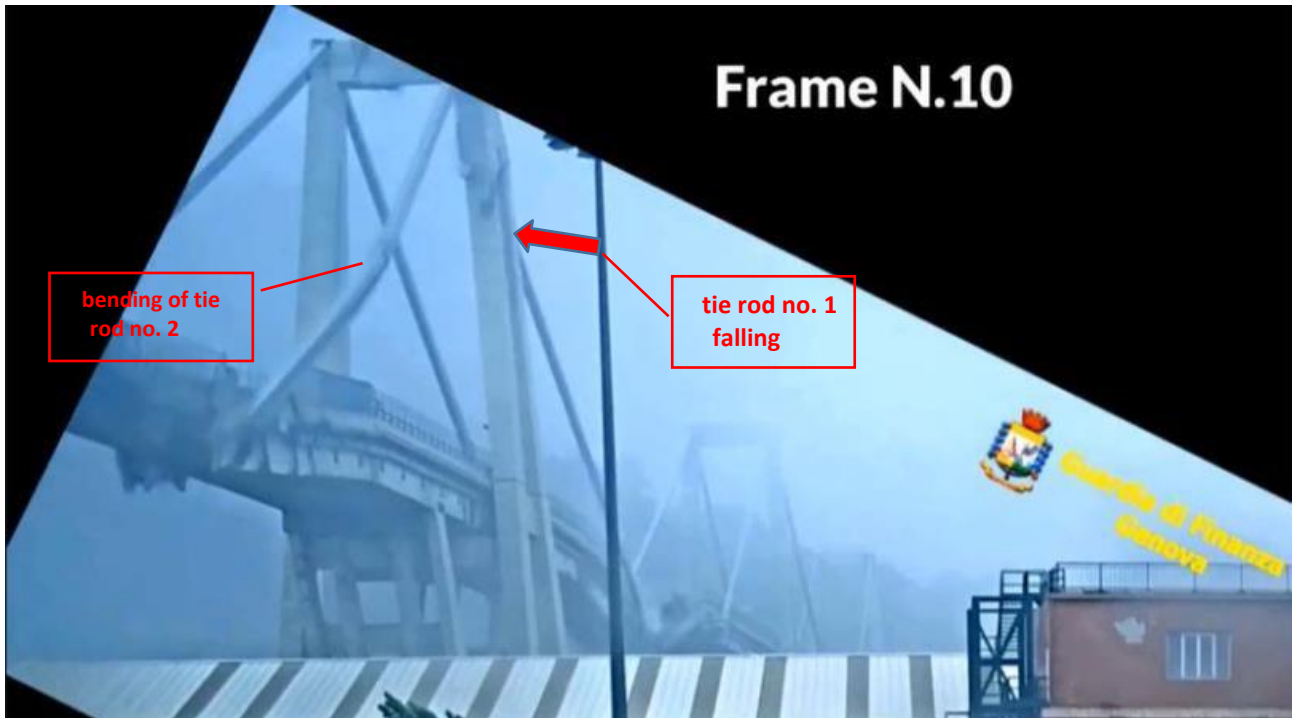
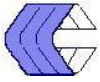
Indeed, from the available frames, two possible causes of the collapse appear:

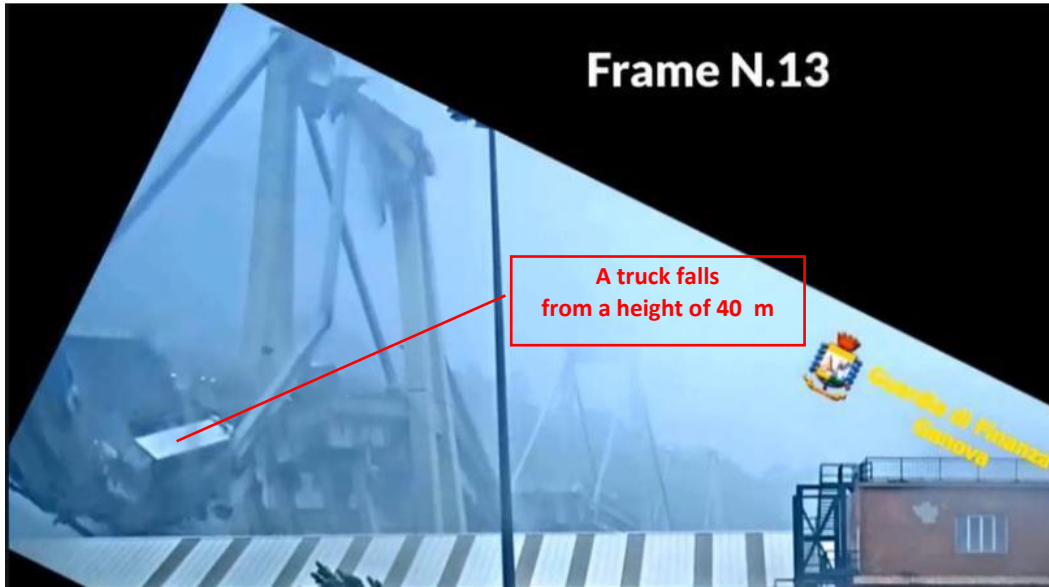
- 1) The seaward breakage of the top of Pier 9, which is considered unlikely;
- 2) The initial breakage of tie rod 1, which appears to be the real cause.

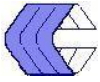
In fact, the evidence supporting the second hypothesis as the primary cause is:

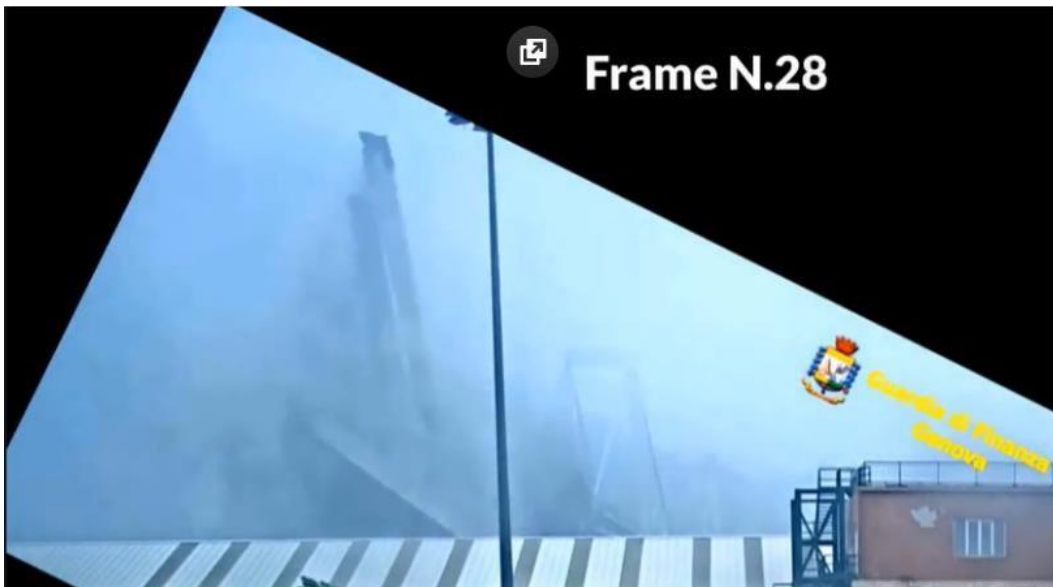
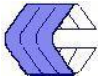
- a) The bending of tie rod 2, evident even before the collapse (due to the raising of the bridge deck on the Gerber girder 2 side, caused by the ongoing elongation of tie rod 1 before its final break);
- b) The evident detachment of tie rod 1 from the top of Pier 9 (Frames 9 et seq.), while the other three stays are still attached to the line.
- c) The position of Gerber girder 2, still intact, while Gerber girder 1 has already broken. 1 (see Frame No. 09). Simultaneously with the tearing of tie rod No. 1, this last beam fails first because, due to the torsion of the deck, which had been stripped of a stay, it was supported by only three supports, instead of the four designed.
- d) Any initial crack at the top of Pier No. 9 would have caused the simultaneous collapse of the two Gerber beams.









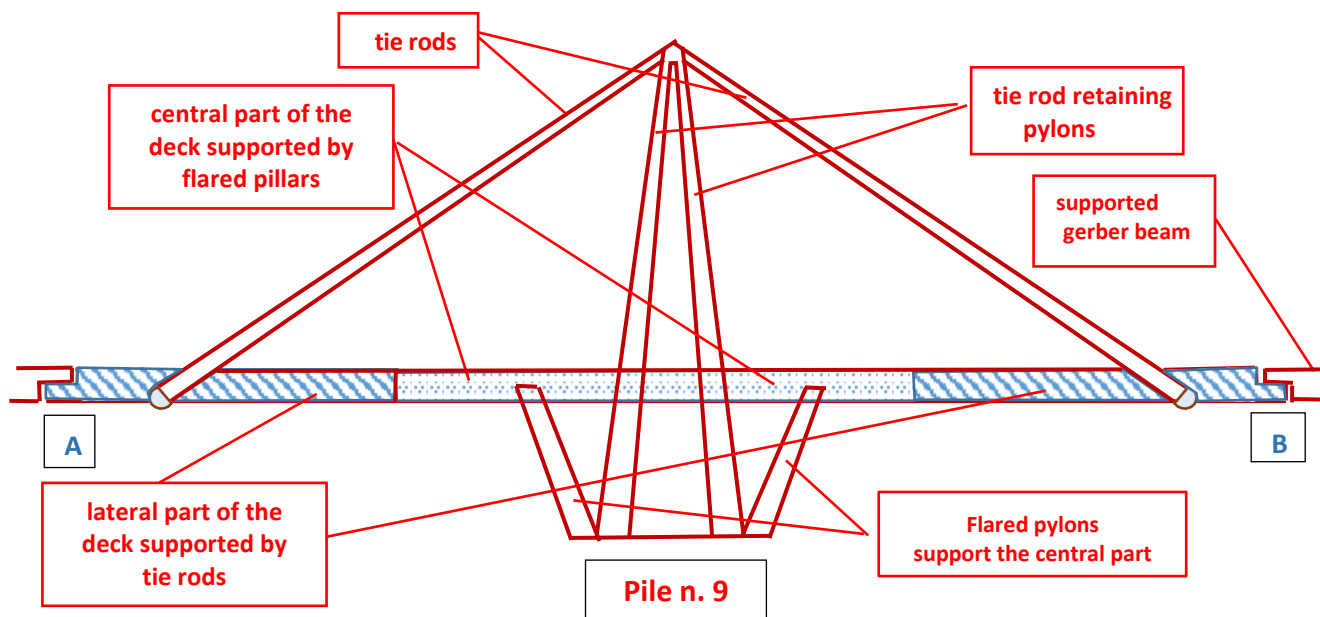






The structural failure of tie rod no. 1 of Pier 9 likely caused the cascade failure of the pier-deck assembly, and the non-simultaneous collapse of the two Gerber beams resting at the ends of the deck integral with Pier no. 9; the deck which, without the supporting tie rod no. 1, buckled on itself, flexed, twisted, and collapsed along with the rest of the bridge.

In an interview available online, the designer, Engineer Morandi, explains the structural functioning of his creation very well. The tall central pylons serve to maintain balance and support the two lateral tie rods, which are responsible for supporting the outer sections of the road deck  while the support of the central part of the roadway indicated by  is provided by the two flared central pillars.



From some images dating back to the construction of the bridge it can be seen that the part of the deck, identifiable from the point A to the point B it was designed to be self-supporting even without the lateral stays (tie rods), but in the absence of loads. This leads to the consideration that the fixed overload of the concrete crash barriers (New Jersey), combined with the live load of the vehicles circulating at the time, as well as the weight of the two Gerber beams positioned at the ends, could have generated sufficient traction to cause tie rod 1 to break.

Ing. Giovanni Corrao

14 August 2019

in memory of the 43 deceased

(revised February 27, 2020)



The project report by engineer Riccardo Morandi

MORANDI Riccardo 2.9.67

PROG. N. FOGLIO N. 1

ORIG. FEBBRA,

IL VIADOTTO DEL POLCEVERA
DELL'AUTOSTRADA GENOVA - SAVONA

ROMA, 25 AGOSTO 1967

DOGLIA - V.le Rissotto 20 - Tel. 05 52 50 - Roma

PROG. N.

FOGLIO N. 2

tr. 8/9 11

Il tratto terminale, verso Genova, dell'Autostrada Savona-Genova, prima di innestarsi all'Autostrada Genova-Valle del Po e dopo aver sottopassato con una galleria la collina della Coronata, sovrappassa la Valle del Polcevera ed indi si ~~stecca~~ *dirama* nel sistema di innesto tra le due autostrade.

L'attraversamento della Valle del Polcevera ed il dispositivo di innesto hanno obbligato alla realizzazione di una grande opera d'arte di concezione unitaria e di notevoli dimensioni ed interesse tecnico, per il fatto che si inserisce entro una zona intensamente fabbricata con edifici civili ed industriali e soprattutto interessata, oltre che dal fiume Polcevera, anche da una serie di impianti ferroviari di grande importanza.

Ovviamente tutte queste esigenze hanno condizionato la impostazione del progetto, sia per quanto si riferisce al partito statico ed alla scansione delle luci, sia per il metodo di esecuzione.

L'opera quindi nel suo complesso può considerarsi un interessante esempio di inserimento di una grande infrastruttura entro un fitto tessuto urbano ed industriale; ^{con il} ~~con il~~ ^{intento} di creare una corretta composizione anche dal punto di vista formale e paesaggistico.

Inoltre la dimensione notevole delle luci maggiori, scavate con strutture di notevole economicità, contribuisce a dimostrare, insieme ad altri casi consimili, la possibilità di costruzioni di opere sempre più importanti pur continuando ad adottare la tecnica e la tecnologia del calcestruzzo di cemento armato e precompresso, ovviamente trattate con sempre maggiore elaborazione.

Il viadotto, della lunghezza totale (senza i dispositivi di raccordo) di ml. 1100, è della larghezza di ml. 18,00 e corre ad una altezza di circa 45 metri al disopra della quota media del sistema viario cittadino, presentando la seguente sequenza di luci teoriche :

1 luce da ml. 43,00

~~5 luci da ml. 73,20~~

1 luce da ml. 75,31

5 luci da ml. 73,20

1 luce da ml. 142,65

1 luce da ml. 207,88

1 luce da ml. 202,50

1 luce da ml. 65,10

Il sistema delle grandi luci ricalca, nelle sue grandi linee, il tema già precedentemente risolto dal progettista nella realizzazione del ponte sul Lago di Maracaibo (Venezuela), già inaugurato nel 1962.

Gli attraversamenti sono risolti a mezzo di speciali sistemi bilanciati, in cui la travata consta di un continuo a tre luci, su quattro appoggi elastici, con sbalzi terminali all'estremità dei quali poggia la trave centrale di serraglia.

I due appoggi estremi di ciascuna travata sono costituiti dai terminali di due tiranti in acciaio pretesi, che passano al disopra di un'antenna a quattro elementi obliqui, alta ml. 42,25 al disopra del piano viabile.

Ciascuna grande pila insiste su una zattera di calcestruzzo armato, poggiata su palificate fondali costituite da pali trivellati di grande diametro, lunghi in molti casi fino a circa 40 metri.



Al disopra delle zattere si dipartono due sistemi statici distinti, simmetrici rispetto ad un comune piano assiale, e cioè :

- uno speciale cavalletto di calcestruzzo armato a V composto di quattro elementi paralleli, a due braccia, collegati fra loro, sia a metà altezza che al piano dell'impalcato, per mezzo di traversi normali all'asse del viadotto ;
- un sistema di antenne a quattro gambe, a forma tronco-piramidale, con travi di collegamento longitudinale al piano di impalcato e con un trasverso in sommità.

L'impalcato è costituito da una travata continua di tipo cellulare, con una soletta estradossale e n° 6 pareti verticali dello spessore medio di cm. 22.

Le estremità delle travate presentano un robusto trasverso, sporgente dalle pareti esterne con sbalzi, ai quali risultano assicurati i già citati tiranti, che poggiano sulla sommità dell'antenna e sono costituiti da fasci di acciaio armonico coinvolti da una guaina di calcestruzzo.-

Fra le estremità delle pareti a sbalzo di due travate bilanciate consecutive, come già detto, è stata varata infine una travata della luce di ml. 36,00, semplicemente appoggiata, mediante l'interposizione di apparecchi oscillanti.-

I tre graddi sistemi bilanciati così risultanti sono indipendenti l'uno dall'altro e quindi non vengono indotte sollecitazioni nella struttura per eventuali assestamenti disuniformi delle fondazioni.-



PROG. N.

FOGLIO N. 5

La seconda parte del viadotto è costituita da una serie di speciali pile a V composte ciascuna da quattro doppi pilastri a sezione variabile, collegati a metà altezza ed in sommità da trasversi e poggianti su zattere di fondazione, fondate ugualmente su palificate a pali di grosso diametro.-

L'estremità superiore dei pilastri a V sopporta una trave della lunghezza di ml. 20,00 che si protende a sbalzo al di fuori dei pilastri stessi per ml. 7,50 da ciascun lato.-

Appoggiate agli sbalzi in questione ^{sono state} ~~verranno~~ varate travi prefabbricate, di dimensioni e luci identiche a quelle che collegano i grandi sistemi bilanciati delle grandi campate.-

Tutte le strutture sopra descritte sono in calcestruzzo normale o precompresso; in particolare, la precompressione ^{è stata} ~~viene~~ adottata per una parte delle travi di impalcato delle grandi pile e per i relativi grandi cavi di sostegno, nonché per tutte le travate indipendenti in terposte fra le pile.-

Le speciali condizioni ambientali hanno obbligato ad eseguire le travate di ciascun sistema bilanciato con un metodo che, se non si può definire completamente originale, può considerarsi interessante e delicato.-

Costruito con normali puntellature il tratto di impalcato compreso tra i due ritti obliqui di ciascun cavalletto, su detto tratto sono stati montati due speciali carrelloni su ruote e rotaie, ciascuno in grado di sopportare il peso corrispondente al getto dell'intera sezione di impalcato del ponte per una lunghezza di ml. 5,50.

PROG. N.

FOGLIO N. 6

I
Detti carrelloni sono stati quindi mossi all'infuori simultaneamente e simmetricamente rispetto al piano verticale trasversale del ponte passante per l'asse della pila ed hanno gettato, da ambo le parti, il primo concio da ml. 5,50.-

Indurito il getto, reso solidale alla struttura precedente a mezzo di armature in acciaio normale, esso è stato reso atto a resistere alle sollecitazioni di flessione e taglio derivanti dal metodo di costruzione a sbalzo mediante fili provvisori in acciaio armonico, ammarrati alle sezioni simmetriche di estremità dei conci e posti opportunamente in tensione da ambo i lati.-

Questi fili, non protetti da guaine di calcestruzzo, erano disposti al disopra del piano estradossale dell'impalcato e rinviati da due setti verticali in calcestruzzo armato dell'altezza di ml. 2,10, posti in corrispondenza delle sezioni di attacco ai ritti del cavalletto.-

Svincolato quindi il carrellone dal concio eseguito, esso è stato avanzato per il getto del secondo tratto da ml. 5,50, al termine del quale sono state ripetute le operazioni di aggancio ad una serie di cavi provvisori e di loro tesatura.-

Sono state così effettuate n° 9 operazioni successive fino ad arrivare alla sezione di attacco ai tiranti di esercizio.- L'ultimo concio è stato gettato senza includere il volume totale del trasversone di ancoraggio dei tiranti stessi all'impalcato, ma solo quello di uno strato inferiore dell'altezza di ml. 1,00.- Ciò allo scopo di evitare di gravare l'estremità della mensola di oltre ml. 50,00 di luce del considerevole peso del trasversone stesso.-



PROG. N.

FOGLIO N. 7

A questo punto sono stati posti in opera dei tiranti provvisori costituiti da fasci di ~~4~~ 5 fili di acciaio armonico, in posizione simile a quella dei tiranti di esercizio (e quindi scavalcanti l'antenna) ma ancorati, a quota dell'impalcato, non all'estremità del trasversone ma in corrispondenza delle sei singole nervature.-

Indurito lo strato di fondo di ml. 1,00 del trasversone, si sono messi in tensione i tiranti provvisori e si è completato il getto del trasversone stesso.-

Sono stati quindi messi in opera i cavi dei tiranti definitivi e, previa parziale tesatura dei cavi di precompressione del trasversone, posti in leggera tensione.

Eliminati i cavi dei tiranti provvisori, la tensione nei cavi definitivi si è incrementata automaticamente anche per effetto del getto in due conci, sempre tramite carrellone, degli sbalzi oltre i nodi di tirante.-

Dopo aver parzialmente posto in tensione i cavi di precompressione di esercizio della travata, sono stati eliminati i cavi provvisori di sostentamento della travata, concio per concio lungo tutta la sua lunghezza.- Si è quindi completata la tesatura dei cavi della travata e, smontato il carrellone, asportandolo.

Completata la tesatura dei cavi di precompressione del trasversone e quella dei cavi dei tiranti, si sono posti in opera, intorno ai cavi già in tensione, quelli ausiliari per la precompressione delle guaine dei tiranti.

Si sono quindi gettate le guaine, anch'esse come già detto a conci, avendo avuto cura di lasciare libero un certo intervallo in corrispondenza dell'attacco all'impalcato.- Induriti i getti e le sigillature che successi



PRGG. N.

FOGLIO N. 8

vamente sono state gettate tra concio e concio, si è proceduto alla messa in coazione delle guaine operando la tesatura dei cavi ausiliari dalla testata provvisoria in corrispondenza dell'estremità libera al disopra del piano di impalcato.-

Si è quindi proceduto al getto della restante parte di guaina e, previo allungamento dei cavi ausiliari mediante speciale manicotto di giunzione fino alla testata definitiva in corrispondenza del trasversone, alla sua precompressione.-

Iniettati tutti i cavi, la struttura è risultata pronta ad accogliere prima il varo delle nervature prefabbricate delle travi da ml. 36,00, quindi i successivi getti in opera di completamento delle medesime, la stesa della pavimentazione e delle altre sovrastrutture stradali e finalmente i carichi mobili.-

Durante tutto il processo di costruzione della travata sono state costantemente controllate le deformazioni della struttura ed in particolare gli abbassamenti delle sue estremità e, agendo sui tiranti, operate le opportune correzioni in modo da far si che, alla fine delle varie operazioni ed avendo tenuto debito conto dell'effetto di ognuna di esse, la posizione raggiunta da tali sezioni sulla verticale fosse rigorosamente quella competente alla condizione di esercizio del ponte.-

Allo scopo infine di lumeggiare l'aspetto economico della soluzione adottata per le grandi luci, si precisa quanto segue :

Si consideri una luce di ml. 208,00 : la superficie dell'impalcato è di mq. 3742,00.



PROG. N.

FOGLIO N. 9

Per il sistema costituito dall'impalcato, dalle antenne e dai tiranti (escludendo i cavalletti che si assomigliano alle pile di qualsiasi altra soluzione), si riscontrano le seguenti quantità :

| | | |
|------------------------------------|-----|---------|
| - Calcestruzzo : | mc. | 5530,00 |
| - Acciaio ad aderenza migliorata : | Tn. | 348,50 |
| - Acciaio R/170 Kg/mmq. : | Tn. | 191,60 |

Tali quantità, rapportate a metro quadrato di impalcato, determinano i seguenti numeri indici :

| | | |
|------------------------------------|--------|-------|
| - Calcestruzzo : | mc/mq. | 1,48 |
| - Acciaio ad aderenza migliorata : | Kg/mq. | 93,00 |
| - Acciaio R/170 Kg/mmq. : | Kg/mq. | 51,00 |

L'opera, progettata dal Prof. Ing. Riccardo Morandi con la collaborazione del Dott. Ing. Claudio Cherubini, è stata eseguita dalla Società Italiana per Condotte d'Acqua di Roma sotto la direzione ed il controllo dell'Ufficio Speciale Autostrade dell'Azienda Autonoma delle Strade Statali.-

Il Dott. Ing. Luigi De Sanctis, per conto dell'Impresa, ha diretto la costruzione.-