AASHTO LRFD GERGİN EĞİK ASKILI KÖPRÜ

Alp Caner

AASHTO-LRFD kriterleri (Madde 4.6.3.7)

- Analizlerde yük dağılımları hesaplanırken kule geometrisi, üst yapının burulmaya dayanıklılığı ve kablo plan adedi önemlidir.

- Kablolardaki sarkmalar, üst yapı yer değiştirmeleri, ve olağandışı durumlarda malzemelerin doğrusal olmayan davranışlarını izlemek gerekmektedir.

Kabloların Elastik Modulusu

Ani hareketlerdeki rijitlikdeki Emod

$$E_{\text{mod}} = \frac{E}{\left[1 + \frac{EAW^2(\cos\alpha)^5}{12H^3}\right]}$$

Değişen kablo yükleri altında sarkmayı tespit etmek için

$$E_{\text{mod}} = \frac{E}{\left[1 + \frac{(H_1 + H_2)EAW^2(\cos\alpha)^5}{24H_1^{\,2}H_2^2}\right]}$$

Köprü üst yapısı hareket ettikçe kablo yükleri değişir.

Kablo Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

- Statik Yük Altında Tasarım ve Yorulma Değerlendirmeleri
- Kablo Titreşim
- Bağlantı Detayları
- Paslanmaya Karşı Önlem
- Yapım Aşaması

Emniyet Gerilmeleri Tasarımı AASHTO Standart

- DL+LL+IM < 0,45 UTS (yapım aşamasından kaynaklanan yükler, sünme ve rötre dahil)
- Diğer yük kombinsayonları için < 0,50 UTS
- Yapım aşaması ve tamir sırasında <0,56 UTS
- Eğilmeden dolayı 21 MPa gerilme aşılma durumunda hareketli ve dinamik yüklerden oluşan eksenel yük tarafından oluşturulan gerilmelere aktarılacaktır.

Yük Direnim Katsayısı Tasarımı AASHTO LRFD – Yorulma limitleri

Strand (ASTM A416)	% 8,5 UTS	:	UTS = 1860 MPa
Tel (ASTM A421)	%11,7 UTS	:	UTS = 1655 MPa
Bar (ASTM A 722)	%10,0 UTS	:	UTS = 1035 MPa

Tel kabloların yorulma dayanımları daha verimli. Bar kablolar daha çok kısa köprüler için kullanılıyor.

Yük Direnim Katsayısı Tasarımı Dayanım Limitleri – Cooper River Köprüsü

Strength I = 1.25DC + 1.5DW + 1.75(LL+IM +BR)+ 0.5TU (kips)	Strength III = 1.25DC + 1.5DW+ 1.4WS + 0.5TU (kips)	Strength V = 1.25DC + 1.5DW + 1.35(LL+IM +BR) + 0.4WS + 1WL+ 0.5TU (kips)	Extreme Event I = DL + 0.5LL + EQ	Cable Replacement 1.2DL1+1.4DL2+1.5(LL+I) +1.Cable Loss (kips)	Cable Break 1.2DL1+1.4DL2+ 0.75(LL+I)+ 2.Cable Loss (kips)
<0.65 UTS	<0.65 UTS	<0.65 UTS	< 0.85 fy = 0.765 UTS	< 0.8 UTS	< 0.9 UTS

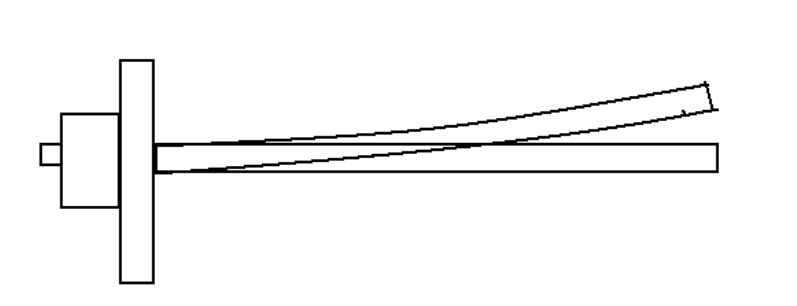
Kablonun Eğilmesinden dolayı oluşan gerilmeler

Dairesel bir kesit için eğilme gerilmeleri:

$$\sigma_m = 2\alpha\sqrt{E\sigma_{axial}}e^{-kx} \qquad k = \sqrt{\frac{F}{EI}}$$

Bağlantı yerinde eğilmeden dolayı oluşan gerilmeler

$$\sigma_m = 2\alpha\sqrt{E\sigma_{axial}}$$

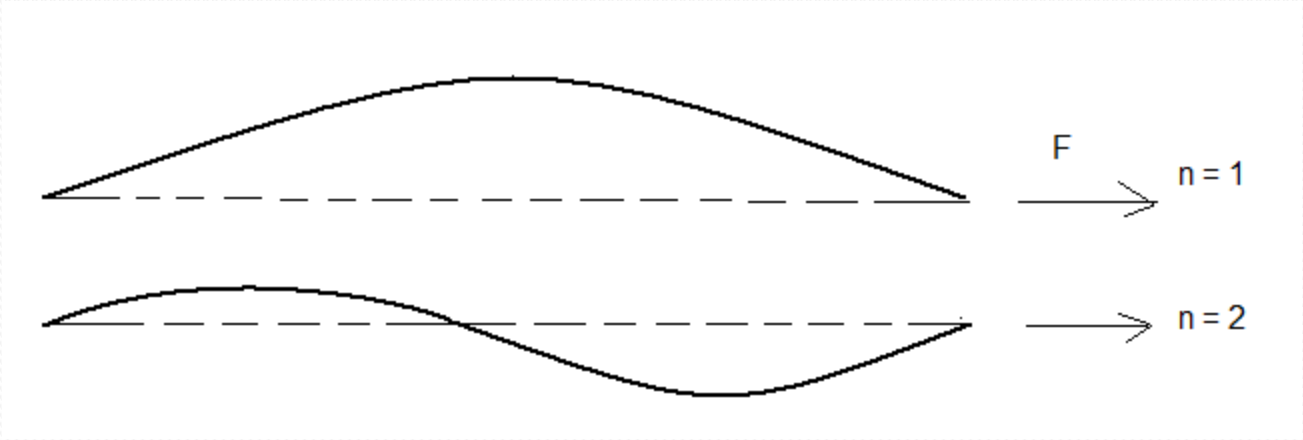


Kablo Titreşimleri

Kablolar rüzgara altında genellikle salınım hareketi gösterirler. Uzun kablolarda ağırlıktan dolayı oluşan sönümleme etkileri azalmaktadır.

$$f_n = \frac{n}{2l}\sqrt{\frac{F}{m}}$$

Doğal frekans ,f_n , eğer rüzgarın oluşturduğu frekans ile aynı konuma gelir ise kablo stabilitesi bozulabilir.



Yağmur-rüzgar birleşimli instabilite

Rüzgar kritik bir hızla esmeye başladığı anda kablo yağmurun da etkisi ile artan bir salınım gösterir. Bu salınımın olmaması için varsayılabilen limit ise

$$\left(\frac{m\zeta}{\rho d^2}\right) > 10$$

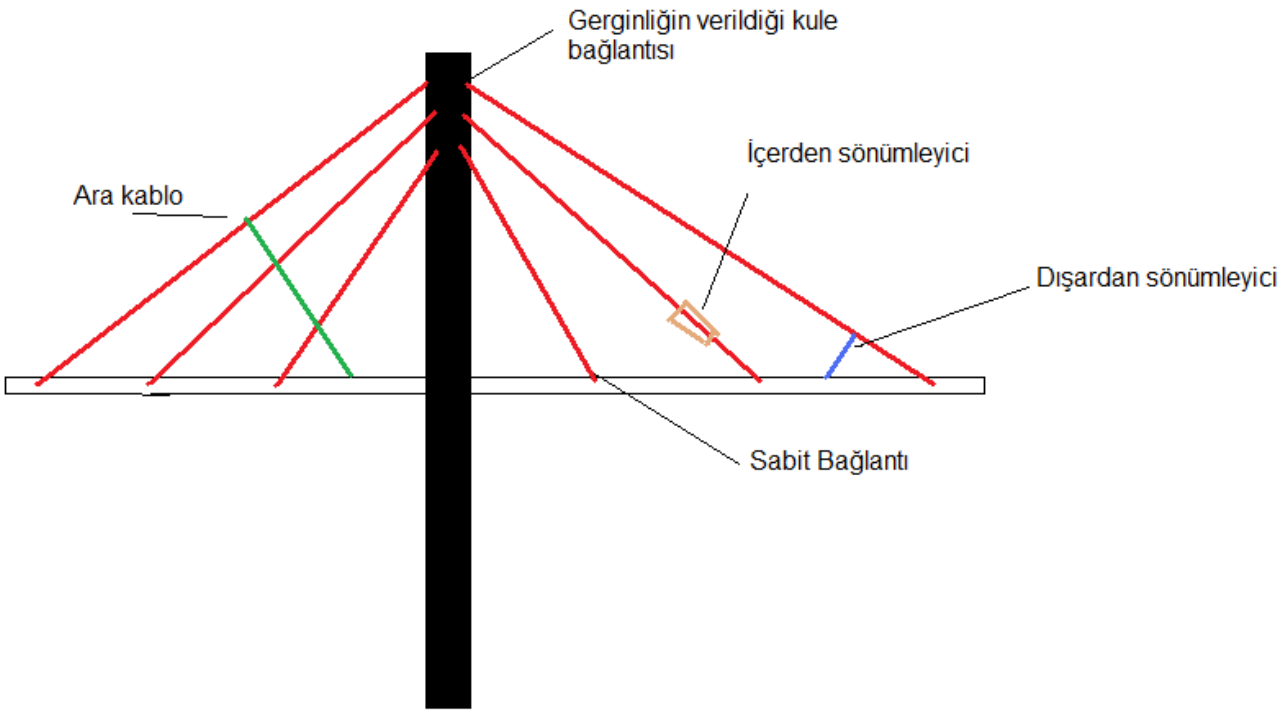
Kritik rüzgar hızının hesaplanması

Kablonun salınımını hızlandıracak kritik rüzgar hızı aşağıdaki denklemden yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$V_{crit} = CNd\sqrt{\frac{m\zeta}{\rho d^2}}$$

Kablo Titreşim Sönümlenmesi

- Ara kablo
- Dışardan sönümleme
- İçerden sönümleme



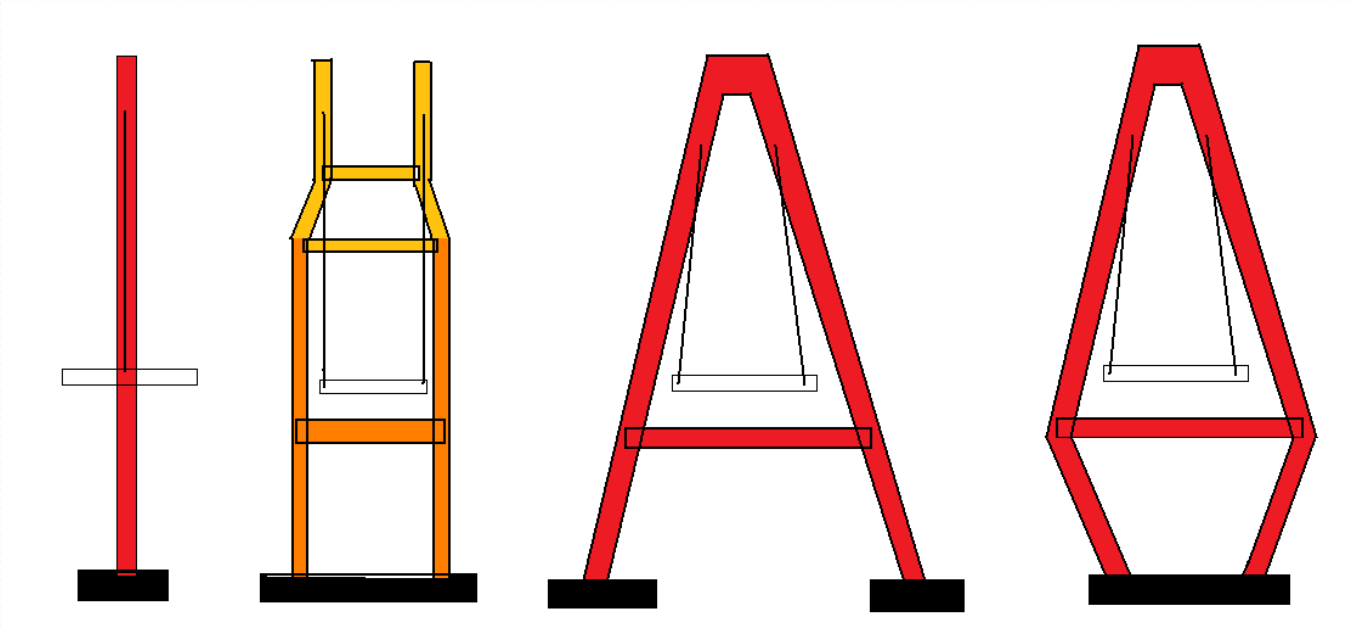
Köprü geneli için kritik rüzgar (girdap) hızı

$$\dot{U} = \frac{ND}{S}$$

Burdaki S, Strouhal sabiti olup döşemeler için 0,05 ve 0,2 arası değişmektedir. D köprü döşeme kalınlığı ve N de girdap frekansıdır. N sayısı yapının frekanslarından birisine denk gelir ise rezonans meydana gelebilir.

Not: Üst yapının düşey ve burulma frekansları arasındaki oranın 3 den yukarıda olmasında fayda vardır. Daha doğrusu yakın olmamalılardır.

Kule Tipleri



Gergin Eğik Askılı Köprü için gereken
Kule Yüksekliği (Yol Yüzeyinden)/Ana açıklık (2 kule arası) = 0,25

Yüklemeler

- Ölü
- Hareketli
- Rüzgar (175 km/hr)
- Deprem (2500 sene dönüş periyodlu)
- Kablo kopması ve onarım
- Gemi Çarpması (33000 ton dikey-altyapı)*

*Eğer köprünün ayakları suyun içinde ise

Malzeme

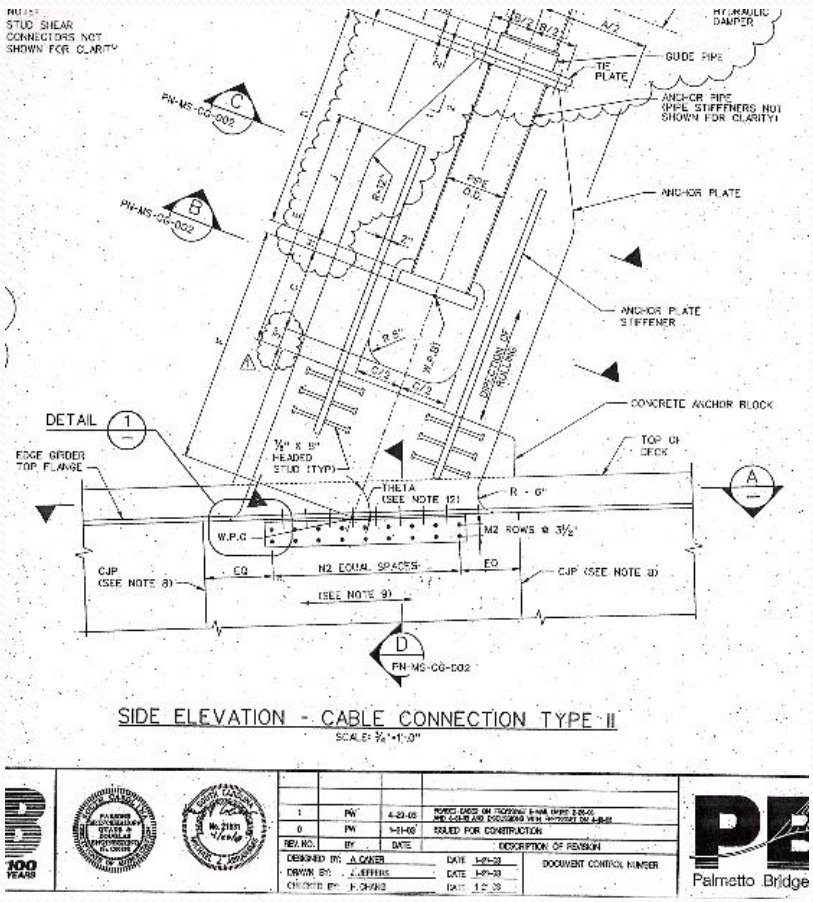
Malzeme için gereken asgari değerler

Beton 28 günlük basınç dayanımı:

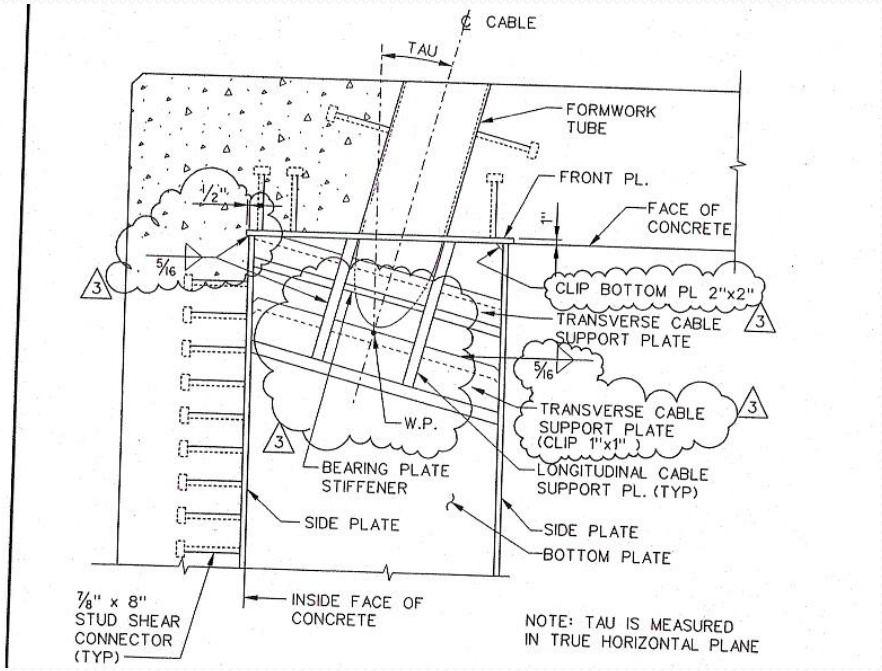
Ayaklar	48 MPa
Kazıklar	35 MPa
Tabla (Deck)	55 MPa
Çelik akma değeri	345 MPa
Donatı akma değeri	420 MPa
Öngerme halatı	1860 MPa

Yapım Aşaması – Cooper River

Üst Yapı Kablo Bağlantısı



Kule Kablo Bağlantısı



Kablo Sönümleyicisi

Dışardan

Dışardan

AASHTO-LRFD Kablo Tasarımı

Connection Design for Cables
Based on AASHTO LRFD – Table 3.4.1-1

South Plane

Cable No.	DC (kips)	DW (kips)	LL+IM (kips)	WS (kips)	WL (kips)	BR (kips)	TU (kips)	Strength I = 1.25DC + 1.5DW + 1.75(LL+IM +BR)+ 0.5TU (kips)	Strength III = 1.25DC + 1.5DW+ 1.4WS + 0.5TU (kips)	Strength V = 1.25DC + 1.5DW + 1.35(LL+IM +BR) + 0.4WS + 1WL+ 0.5TU (kips)	Extreme Event I = DL + 0.5LL + EQmax	Extreme Event I = DL + EQmin	Cable Replacement 1.2DL1+1.4 DL2+1.5(LL+ I)+1.Cable Loss (kips)	Cable Break 1.2DL1+1.4DL 2+ 0.75(LL+I)+ 2.Cable Loss (kips)
								<0.65 UTS	<0.65 UTS	<0.65 UTS	< 0.85 fy = 0.765 UTS	< 0.85 fy = 0.765 UTS	< 0.8 UTS	< 0.9 UTS
1,64	1629	208	506	465	1	5	29	3256	3014	3239	2542	1378	3426	3651
2,63	1629	207	505	459	1	4	20	3247	2999	3228	2419	1295	3494	3733
3,62	1425	166	405	368	0	2	4	2744	2547	2729	1867	982	2917	3097
4,61	1252	167	397	341	0	0	12	2516	2299	2494	1768	897	2671	2832
5,60	1182	142	293	237	1	3	24	2219	2034	2196	1541	811	2293	2394
6,59	1230	145	260	169	1	4	27	2230	2005	2193	1785	853	2148	2230
7,58	1169	143	244	93	1	3	23	2120	1817	2059	2055	707	2185	2303
8,57	1101	137	249	31	0	3	16	2030	1633	1942	2113	626	2156	2295
9,56	987	132	251	59	0	2	10	1880	1520	1802	2068	459	2085	2247
10,55	930	124	256	70	0	1	5	1801	1450	1727	1929	322	2020	2194
11,54	856	111	239	65	0	0	2	1657	1329	1587	1734	281	1878	2050
12,53	804	105	230	59	0	0	0	1566	1246	1498	1690	253	1781	1951
13,52	750	96	212	52	0	0	1	1453	1154	1389	1610	151	1672	1849
14,51	704	86	195	42	0	1	1	1352	1068	1291	1429	122	1550	1725
15,50	597	81	188	30	0	1	1	1199	910	1136	1308	38	1541	1850
16,49	718	121	287	36	2	1	5	1585	1132	1486	2364	119	1848	2078
17,48	710	121	289	40	2	0	7	1579	1128	1481	2376	126	1843	2070
18,47	569	77	181	16	0	1	6	1148	852	1082	1280	48	1506	1810
19,46	696	85	193	20	0	1	5	1340	1028	1270	1325	137	1517	1688
20,45	732	94	208	27	0	1	3	1423	1095	1351	1508	232	1621	1791
21,44	776	101	215	34	0	1	2	1501	1170	1428	1574	258	1706	1877
22,43	845	111	227	44	0	0	1	1621	1284	1547	1625	367	1830	2002
23,42	906	120	241	55	0	0	2	1737	1391	1662	1771	500	1961	2145
24,41	979	134	262	78	0	0	5	1885	1536	1812	1792	418	2111	2295
25,40	1041	145	276	78	1	0	5	2005	1631	1926	1788	549	2236	2423
26,39	1121	161	295	90	1	0	5	2162	1771	2080	1924	751	2385	2567
27,38	1174	169	297	120	1	0	4	2243	1891	2173	2020	777	2465	2643
28,37	1239	178	297	166	1	0	4	2338	2050	2286	2112	849	2583	2786
29,36	1372	189	312	227	1	0	4	2547	2318	2514	2247	1014	2789	2992
30,35	1414	183	313	271	1	1	4	2593	2423	2576	2146	1202	2854	3075
31,34	1489	177	335	299	1	1	4	2716	2547	2702	2145	1220	2992	3229
32,33	1393	162	367	293	1	1	4	2630	2397	2601	2125	1180	2881	3094

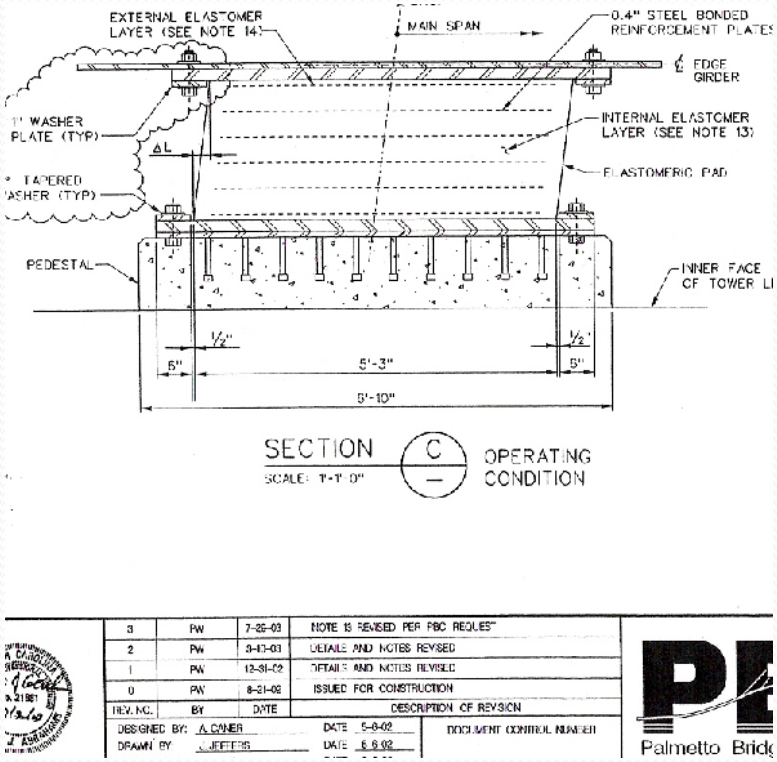
Kablo Bağlantısı Yorulma Analizleri

Check Reversal Lateral Force based on Freysinnet's Reply to
PBC Technical Queries on Dampers Dated April 2002.
(with presence of lateral support)
(continued)

Check Fatigue Due to Live load HS2

Anchor Plate Stiffener - 0.5% Lateral Load			Start of Full Section - 1% Lateral Load				Start of Full Section - 0.5% Lateral Load				Lateral Support Connection - 1% Lateral Load			Lateral Support Connection - 0.5% Lateral Load				
Force per Stiffener Plate (kips)	Fatigue Capacity of Reinforcing Plate Connection (kips)	Demand / Capacity	Distance from Start of Full Section to Bottom of Bearing Plate (in.)	Moment (kip-in)	Stress Range	Stress Range / Allowable (Category B) <1.0	Distance from Start of Full Section to Bottom of Bearing Plate (in.)	Moment (kip-in)	Stress Range	Stress Range / Allowable (Category B) <1.0	Force in Lateral Support (kips)	Stress Range for Stiffener to Anhor Pipe Connection < 4.5 ksi	Stress Range for Bolt Connection at Channels < 18 ksi	Force in Lateral Support (kips)	Stress Range for Stiffener to Anhor Pipe Connection < 2.25 ksi	Stress Range for Bolt Connection at Channels < 16 ksi	Tension in Cable (kips)	Stress Range at Vicinity of Hole < 2.25 ksi
																	192.119	0.836
																	191.383	0.833
																	190.369	0.983
																	186.938	0.965
																	178.876	0.981
																	171.244	1.030
																	163.212	1.003
																	154.902	0.952
																	146.387	0.946
																	137.623	0.910
																	128.735	0.899
18.679	237.673	0.079	38.648	44.725	3.878	0.242	38.648	22.363	1.655	0.207	20.289	2.705	6.651	10.144	1.353	3.325	119.902	0.669
20.591	230.876	0.089	35.675	51.246	4.231	0.264	35.675	25.623	1.865	0.233	20.888	2.785	6.848	10.444	1.393	3.424	111.343	0.666
19.651	224.604	0.087	32.954	43.220	4.711	0.294	32.954	21.610	2.119	0.265	19.082	3.053	6.255	9.541	1.527	3.128	103.450	0.637
15.095	219.336	0.069	30.668	34.067	3.664	0.229	30.668	17.034	1.663	0.208	16.097	2.576	5.277	8.049	1.288	2.638	96.819	0.652
18.256	244.976	0.075	31.131	34.984	2.705	0.169	31.131	17.492	1.190	0.149	21.496	2.866	7.047	10.748	1.433	3.523	92.271	0.446
17.794	233.840	0.076	30.871	35.789	2.808	0.175	30.871	17.895	1.224	0.153	21.097	2.813	6.916	10.549	1.406	3.458	92.317	0.474
13.841	213.973	0.065	29.132	38.595	4.006	0.250	29.132	19.297	1.910	0.239	15.172	2.023	4.974	7.586	1.011	2.487	97.080	0.654
18.619	225.184	0.083	32.291	46.491	4.668	0.292	32.291	23.246	2.221	0.278	18.621	2.979	6.104	9.311	1.490	3.052	104.181	0.702
18.911	232.034	0.082	34.872	55.337	4.172	0.261	34.872	27.668	1.956	0.244	19.929	3.189	6.533	9.964	1.594	3.266	112.799	0.674
																	122.301	0.952
																	132.260	0.969
																	142.397	0.994
																	152.534	0.958
																	162.541	0.999
																	172.355	1.059
10.969	297.913	0.037	64.006	13.174	2.227	0.139	64.006	6.587	0.606	0.076	21.449	2.451	7.031	10.724	1.226	3.516	181.904	0.699
10.716	305.249	0.035	67.388	11.470	2.673	0.167	67.388	5.735	0.635	0.079	22.098	2.526	7.244	11.049	1.263	3.622	191.215	0.668
15.550	317.913	0.049	73.968	9.924	3.163	0.198	73.968	4.962	0.664	0.083	24.965	2.853	8.184	12.482	1.427	4.092	200.237	0.690
14.962	324.826	0.046	77.400	8.453	3.580	0.224	77.400	4.227	0.695	0.087	25.021	2.860	8.202	12.511	1.430	4.101	209.048	0.721
14.247	331.504	0.043	80.769	7.148	3.824	0.239	80.769	3.574	0.704	0.088	25.621	2.928	8.399	12.810	1.464	4.199	217.577	0.750
12.026	338.426	0.036	84.314	5.155	3.641	0.228	84.314	2.577	0.637	0.080	23.483	2.684	7.698	11.741	1.342	3.849	226.481	0.745

Kule-Üst Yapı Sismik İzolasyon



Sismik İzolasyon Hesapları

Seismic Forces and Displacements				
Precompression (kips) :	556	kips		
Axialmin	-304.92	kips		
Axialmax	194.79	kips	Pc+ Axial =	750.35 kips
Shear Long.	736.00	kips	Pc-Axial =	250.64 kips
Vert.	677.00	kips		
Long. Disp (in.)	35.62	in.		
Vert. Disp. (in.)	19.36	in.		
Teta Long	0.0424	rad		
Teta Vert	0.0182	rad		

Shear Strain (gc) due to compression by vertical loads			
gc_long =	2.10	in/in	longitudinal
gc_vert =	1.75	in/in	vertical
gc =	2.10	in/in	

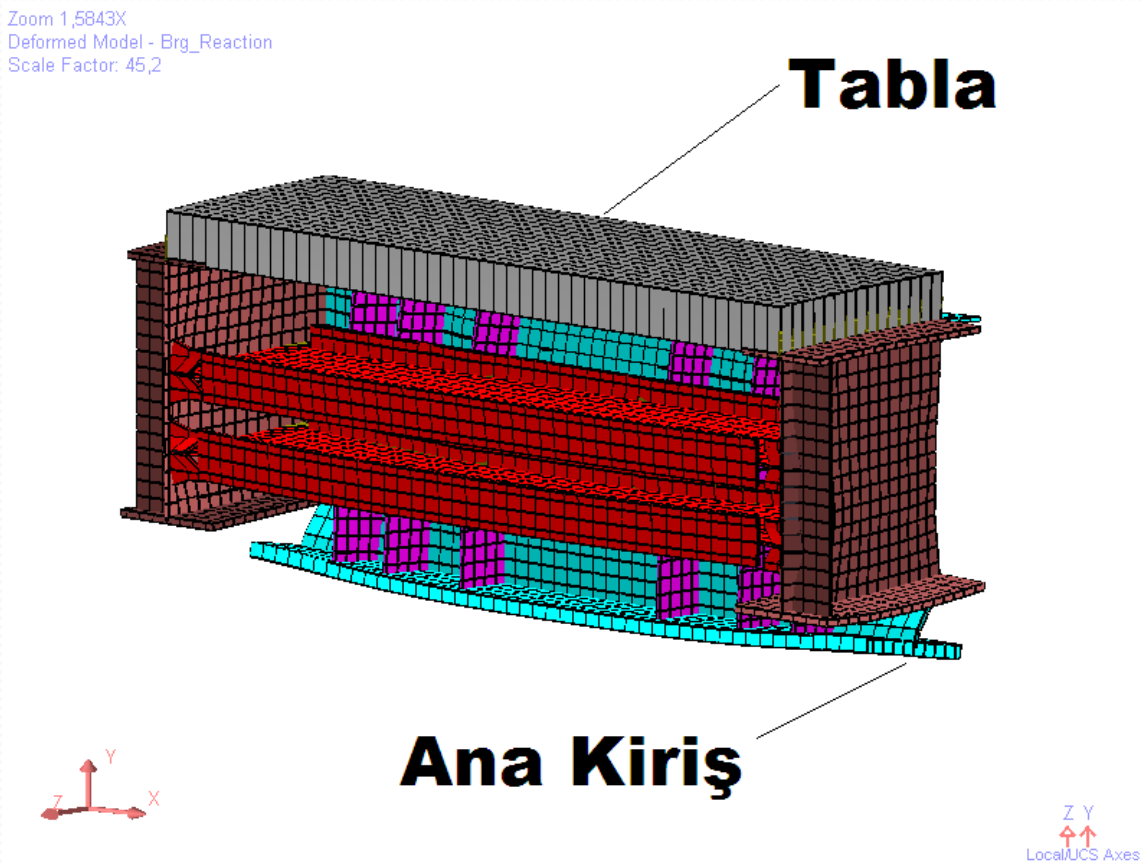
Shear Strain (gss) due to imposed non-seismic lateral displacement			
gss_long =	0.17	in/in	Longitudinal
gss_vert =	0.38	in/in	Vertical
gss+max =	0.38	in/in	

Shear Strain (gseq) due to earthquake imposed lateral displacement			
gseq_long =	1.57	in/in	Longitudinal
gseq_vert =	0.85	in/in	Vertical
gseq_max =	1.57	in/in	

Shear strain (gr) due to rotation			
gr_long =	0.33	in/in	Longitudinal Rotation
gr_vert =	0.35	in/in	Vertical Rotation
gr max=	0.35	in/in	

Elastomeric Bearing shall satisfy :						
gc_long =	2.10		<	Limit	2.50 in/in	ok
gc_vert =	1.75		<	Limit	2.50 in/in	ok
gc_vert+gss_vert+gr_long =	2.46	in/in	<	Limit	5.00 in/in	ok
gc_long+gss_long+gr_vert =	2.62	in/in	<	Limit	5.00 in/in	ok
gc_vert+gseq_vert+0.5gr_long	2.77	in/in	<	Limit	5.50 in/in	ok
gc_long+gseq_long+0.5gr_vert	3.84	in/in	<	Limit	5.50 in/in	ok

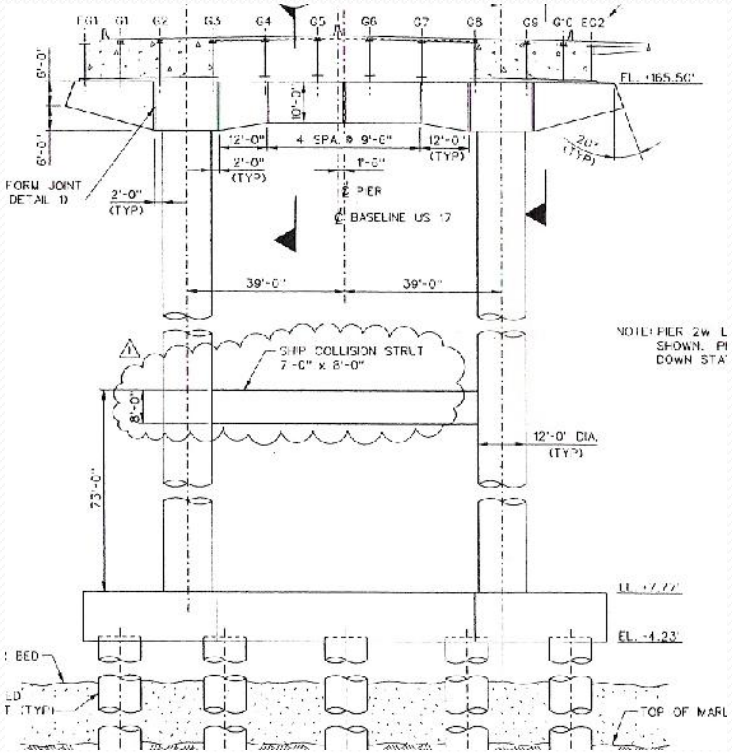
Sismik İzolasyon Yerleştirme



Üst Yapı

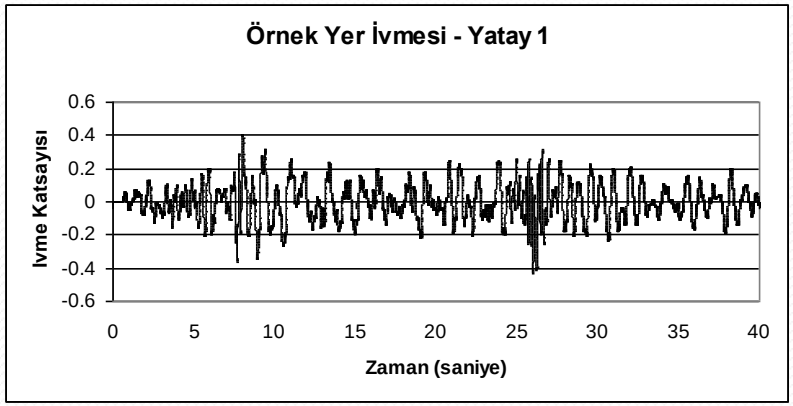
Kulenin İç Görünümü

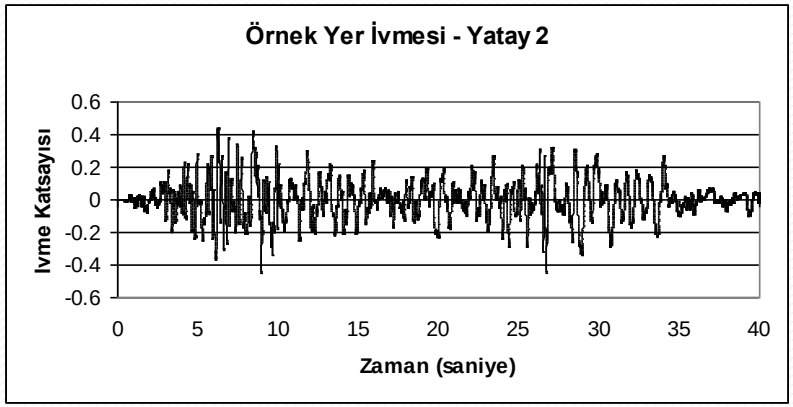
Yaklaşım Açıklıkları

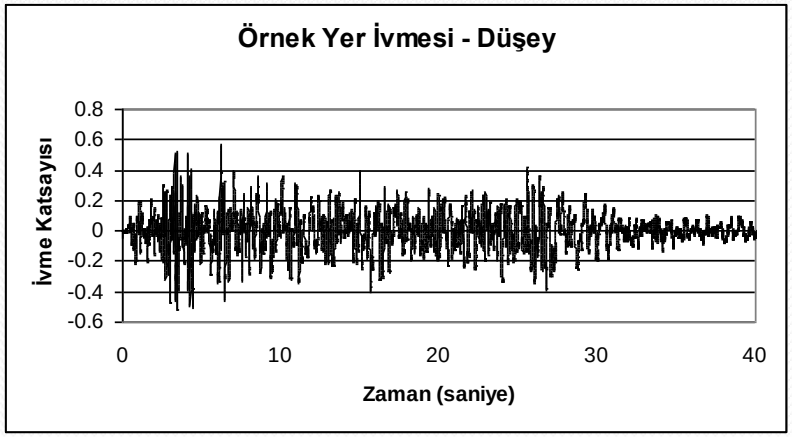


Rüzgarlık

Deprem İvme Kayıtları







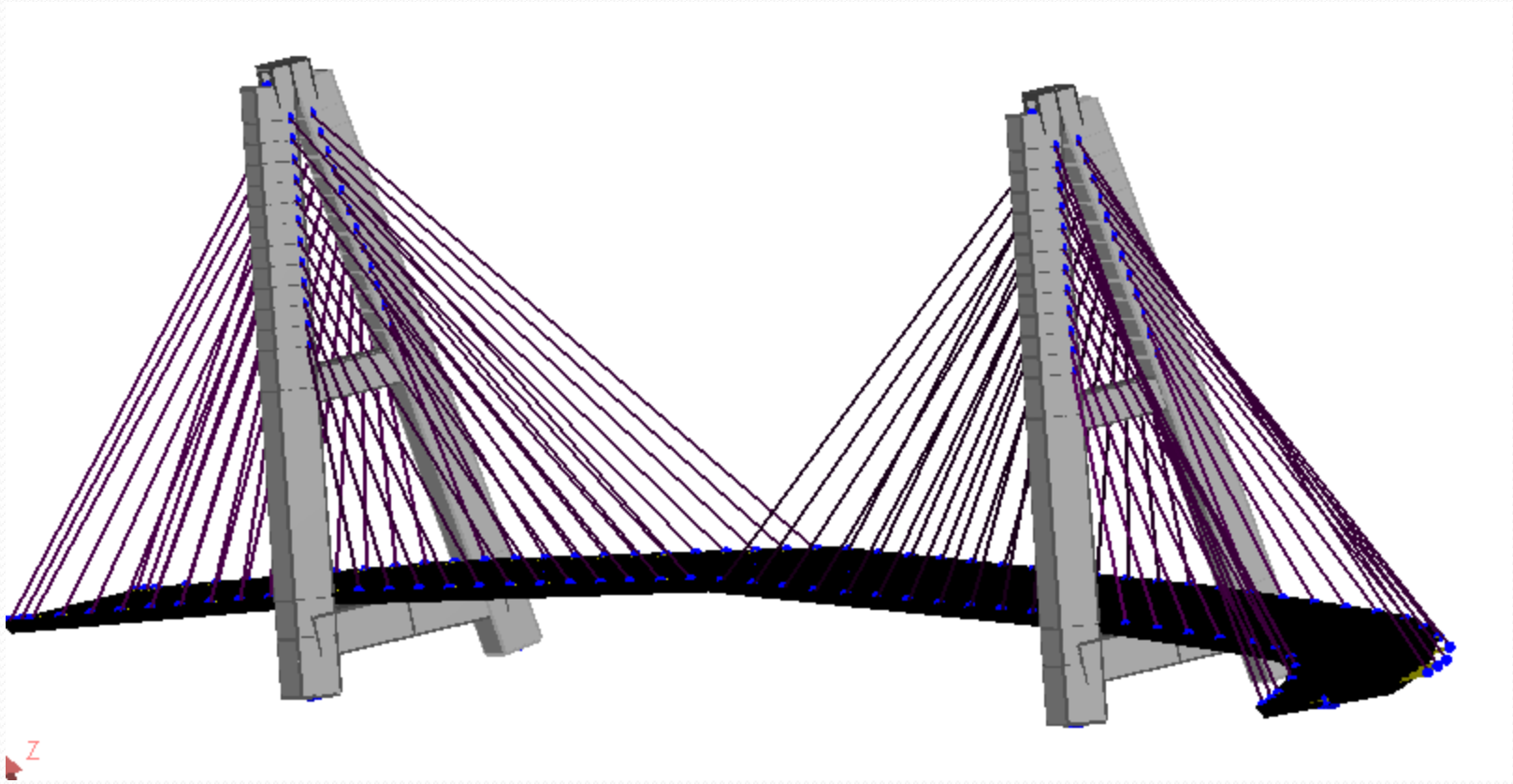
Deprem Analizleri

- Elastik Spektral Analizleri
- R faktörünün belirlenmesi için push-over (itme) analizi
- Üstteki analizlerin teyidi için doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri
- Zaman Tanım alanında köprü uzunluğu dikkate alınırak kulelere değişik ivmeler tanımlanmıştır. İvme kayıtları, yer değiştirme kayıtlarına çevrilip kazıklar boyunca da değişken olarak verilmiştir.

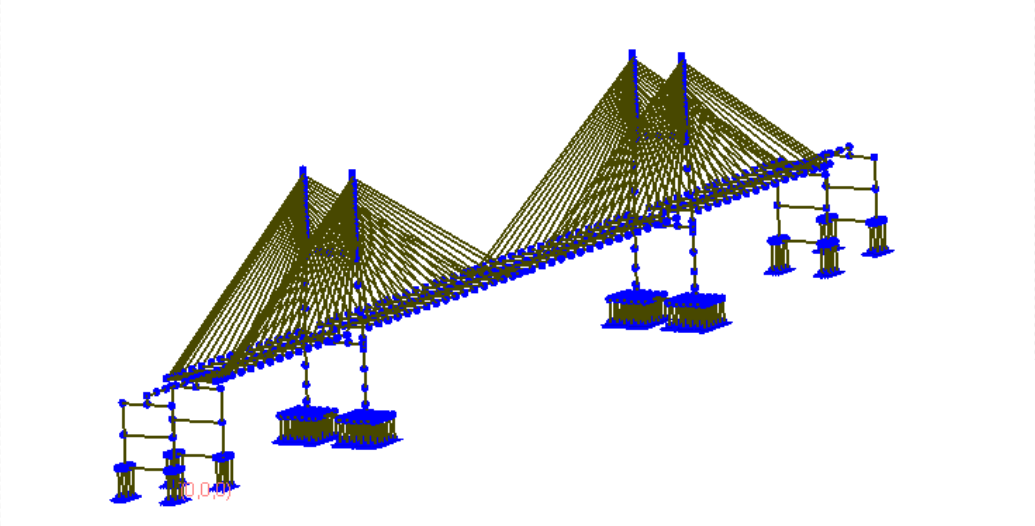
Köprü Modellemesi

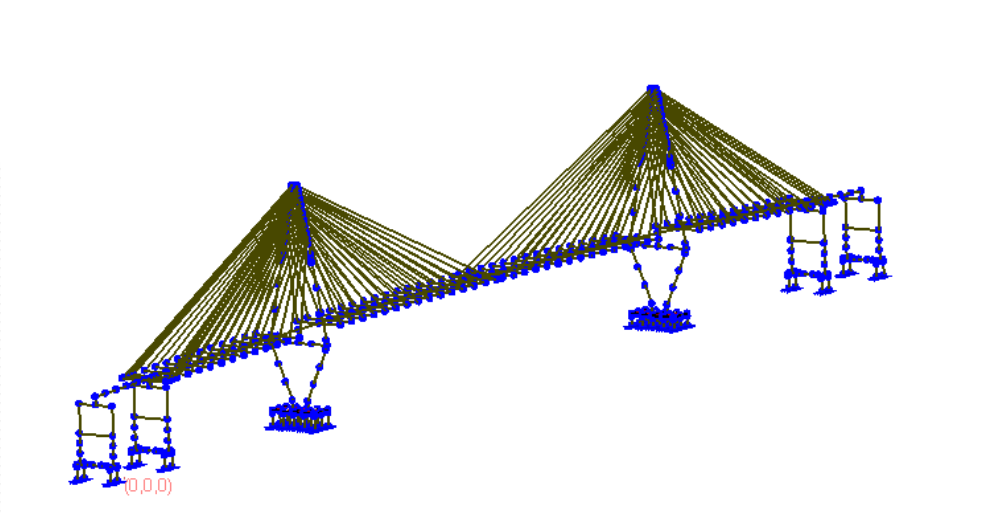
Çalışma: LARSA4D Modellemeleri

Kömürhan Etüd Çalışma

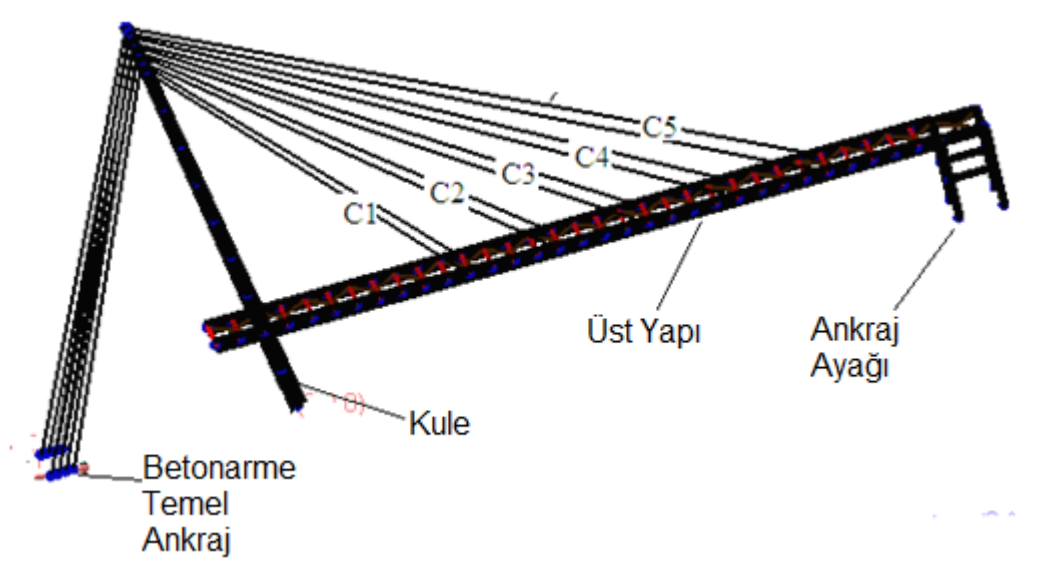


Cooper River İhale Modelleri

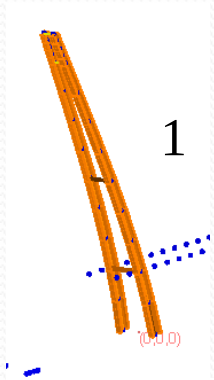


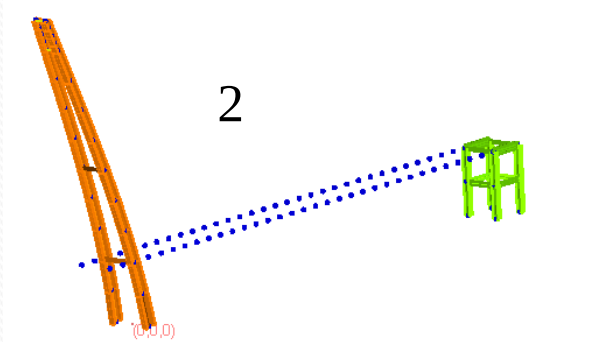


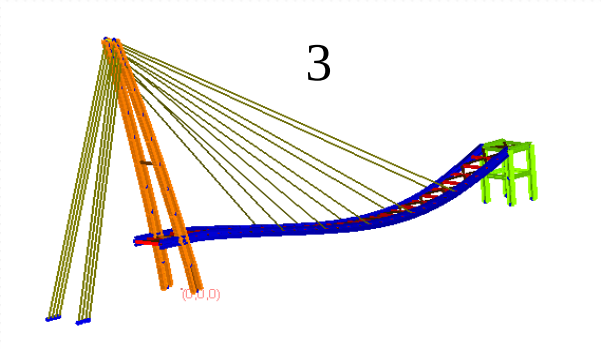
Kablo Yaya Köprüsü Etüd

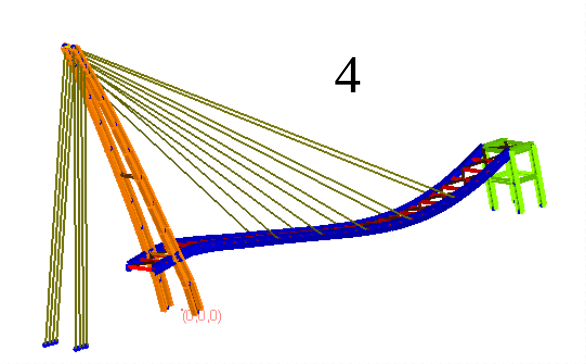


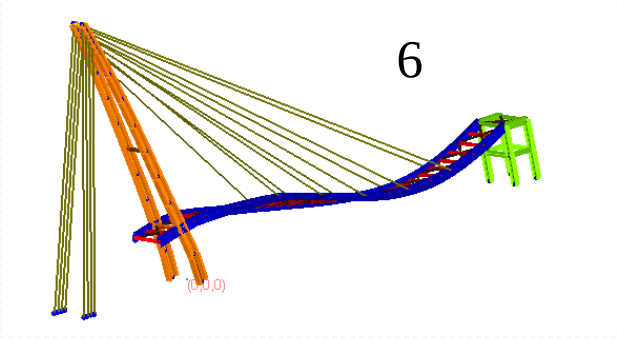
Yapım Aşamaları Yer Değiştirmeler Alternatif

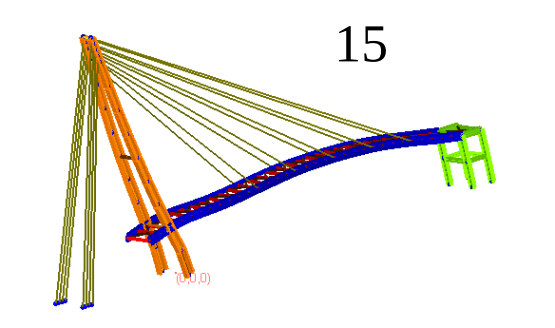










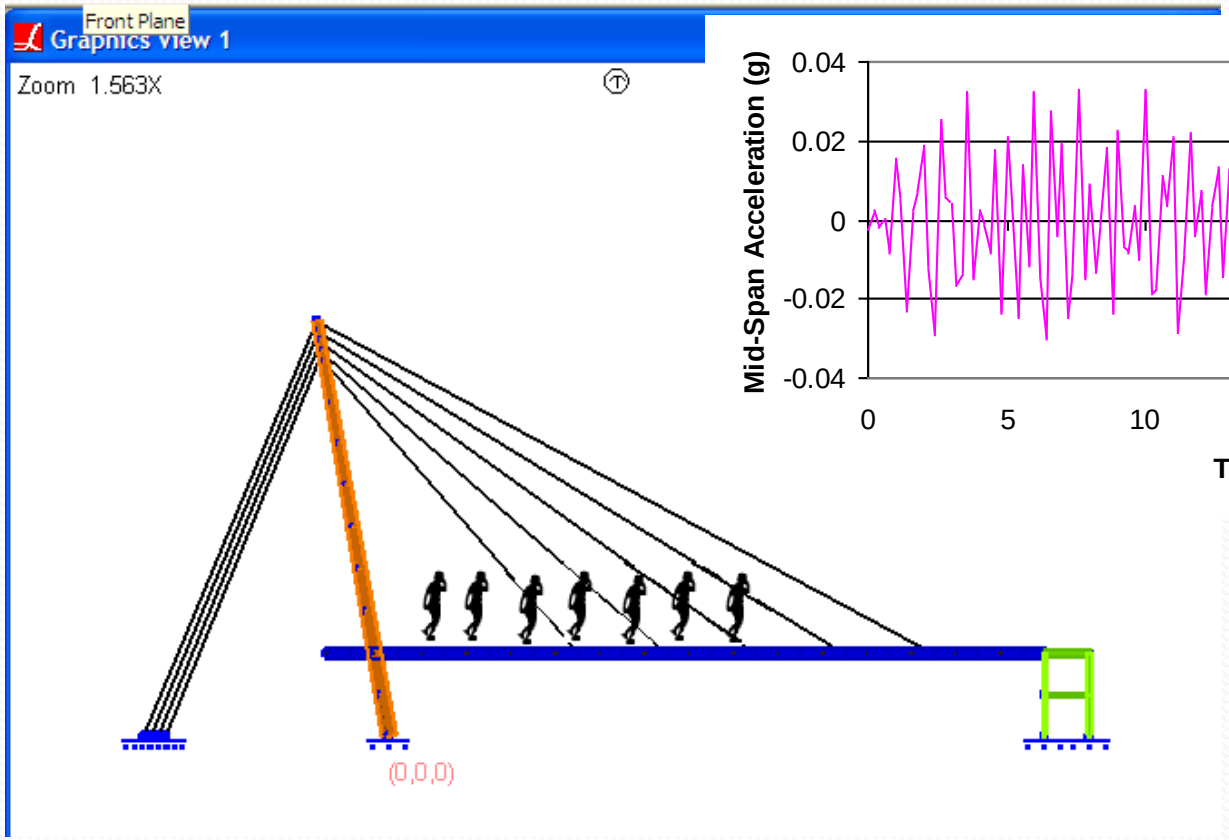


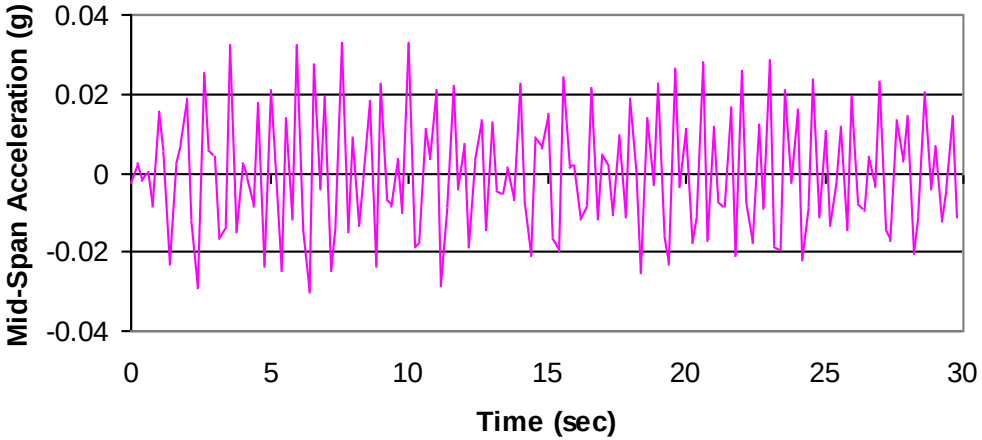
Kablo Yükleri

Yapım Aşaması Alternatif	Kablo Yükleri C1 kuleye en yakın C5 ankraj ayağına en yakın									
	C1		C2		C3		C4		C5	
	I* (kN)	F** (kN)	I* (kN)	F** (kN)	I* (kN)	F** (kN)	I* (kN)	F** (kN)	I* (kN)	F** (kN)
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	65	0	75	0	70	0	53	0	29
3	120	68	110	65	100	59	100	70	130	127
4	100	52	80	80	100	53	100	89	130	100

I* = ilk gerginlik
F** = kalan gerginlik

Kablo Yaya Köprüsünün Kalabalık Yürümeden Titreşimi





$$[M][\ddot{u}]+[C][\dot{u}]+[K][u]=[P(x,t)]$$

Kalabalığın Hızı = 1,5 m/sn

Orta Açıklık İvme

Yapım Aşaması Alternatif	Orta Açıklık Hareketli Yük Düşey Yer Değiştirme (mm)			Orta Açıklık İvme (g)		
	Statik	Kalabalık Durum 1	Kalabalık Durum 2	Statik	Kalabalık Durum 1	Kalabalık Durum 2
1	90	14.7	24.2	-	0.080	0.139
2	88	2.9	3.1	-	0.029	0.033
3	85	4.5	4.6	-	0.047	0.055
4	86	0.2	3.1	-	0.009	0.033

Kaynak

- AASHTO LRFD 2007
- PTI Manual 6th Edition
- Bridge Engineering Handbook, 1999, CRC press