

14 万 KL プレストレストコンクリート LNG タンク (OUTER TANK) の設計と施工

宅和大助¹・濱野洋之¹・金倉隆志²

¹石川島播磨重工業（株） 土建プロジェクト部（〒135-8733 東京都江東区豊洲三丁目2番16号）

²正会員 ピーシー橋梁（株） 海外プロジェクト部（〒105-0004 東京都港区新橋6-17-19）

海外において、PCLNGタンクの建設が盛んに行われている。弊社でもいくつかの案件を受注し、各地でPCLNGタンクを建設中である。本論文では、カタールで建設中のPCLNGタンクを例に、海外仕様のPCLNGタンクの外槽（OUTER TANK）の設計及び施工についてその概要を述べるものである。設計については、海外仕様のPCLNGタンクで特徴的な、漏液時及び火災時の検討方法について、施工については、土木工事と機械工事、設計と施工の取り扱い点について述べる。

キーワード： PCLNGタンク、プレストレストコンクリート、漏液、火災、極低温

1. はじめに

近年、天然ガスの世界的な需要の高まりにより、LNG（液化天然ガス）の受け入れ・払い出し基地の建設及び計画が国内外で盛んになってきている。海外においては、防液堤を一体とした PCLNG タンクが主流になっており、多くの案件がある。弊社では海外において、ここ5年間でインド、カタール、メキシコ及び台湾の案件を受注し、今後も注力案件が控えている。

今回はカタールで建設中の PCLNG タンクを例に、海外仕様の PCLNG タンクの外槽(OUTER TANK)の設計及び施工についてその概要を述べる。

2. PCLNGタンクの概要

本 PCLNG タンクは、場所打ち杭によって支持された基礎スラブ、金属製の内槽、外槽（プレストレストコンクリート製の PC 壁及び RC 屋根）からなり、BS7777¹⁾によって規定される、いわゆるフルコンテインメントタンクに属するものである。図-1は PCLNG タンクの構造を模式的に表したものである。また、表-1に本 PCLNG タンクの主な仕様を示す。

表-1 PCLNG タンクの主な仕様

貯蔵液	LNG (-168°C)	
容量	140,000 KL	
内層 (9% Ni)	内径	74.30 m
	液深	34.00 m
外層 (PC 壁及び RC 屋根)	内径	77.90 m
	側壁高さ	39.50 m
	側壁厚	0.80 m
	屋根内半径	76.30 m

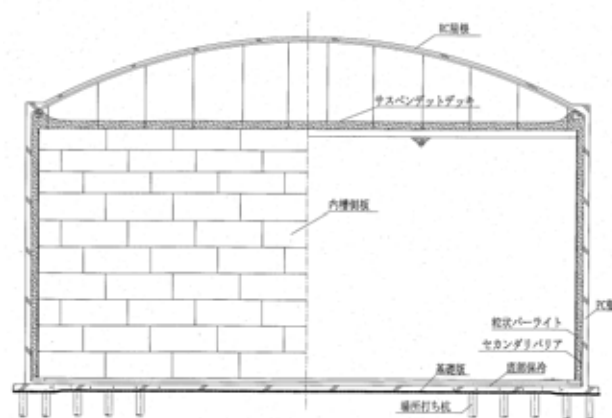


図-1 PCLNGタンクの模式図

通常運転時、LNG (-168℃)は内槽に貯蔵され、内槽は、外槽からは完全に自立している。PC壁は、内槽からの万が一の漏液時に、その全量を保持する液密性を有し、LNGの液圧、ガス圧及び極低温状態に耐えうる構造安定性を有するように設計される。基礎スラブ及びPC壁と基礎スラブの接合部は、漏液時の極低温状態で液密性及び構造安定性を確保することが困難なため、セカンダリバリアと呼ばれる耐低温金属材+保冷材により冷熱を緩和される構造となっている。これらの構造は、PC壁及び基礎スラブ内面全面に冷熱抵抗緩和材を設け、漏液時の冷熱を緩和する設計の国内仕様のタンクと異なっている。

また、屋根は外部からの飛来物による貫通を防ぐため、RC屋根となっており、この点も鋼製屋根を採用している国内仕様のタンクと異なる。

3. PCLNGタンク (OUTER TANK) の設計

(1) 設計思想

本PCLNGタンクの設計は、EEMUA NO. 147²⁾及びBS8110³⁾に従い、限界状態設計法により行われた。上記基準に従い、限界状態として、使用限界状態、終局限界状態及び漏液時の貯液限界状態をそれぞれ設定した。使用限界状態は、耐久性の観点からクラック幅で設定され、終局限界状態は、断面破壊に対する安全性により設定される。また、貯液限界状態として、漏液時のコンクリート部材内の圧縮領域の範囲が規定される。

(2) 設計荷重

本 PCLNG タンクの設計に用いる荷重及び荷重組み合わせは、遭遇する可能性のあるすべての荷重状態を想定して決められる。一般的な荷重組み合わせとして、BS7777で規定されている荷重組み合わせを表-2 及び表-3 に示す。PCLNG タンク特有の荷重として、漏液荷重、火災時荷重及び爆風圧がある。また、PCLNG タンクは、部材厚が比較的厚く、体積も大きいので、温度変化や乾燥収縮による影響が無視できない。そのためこれらの内部応力的な荷重と外荷重とを組み合わせた荷重に対する検討が必要になる。温度は季節によって変動し、乾燥収縮量はコンクリート打設後の期間によって変わるため、想定される荷重状態は多岐にわたり、本設計では、35 通りの荷重組み合わせに対して検討を行った。

(3) 解析手法

本設計のフローを図-2 に示す。解析は線形解析と非線形解析に大別される。通常の荷重に対しては、線形解析を行った。解析モデルは、上部構造、基礎及び杭を一体でモデル化し、地盤をバネでモデル化した。各荷重を解析モデルに入力し、各部材の断面力を算出した。地震時荷重は、応答スペクトル法により求め、想定した荷重状態ごとに荷重を組み合わせ、使用限界及び終局限界状態の照査を行い、配筋を決定した。

漏液時及び火災時の解析は、非線形解析を行った。非線形解析により、線形解析で決定した配筋等の照査を行い、その妥当性を検討した。

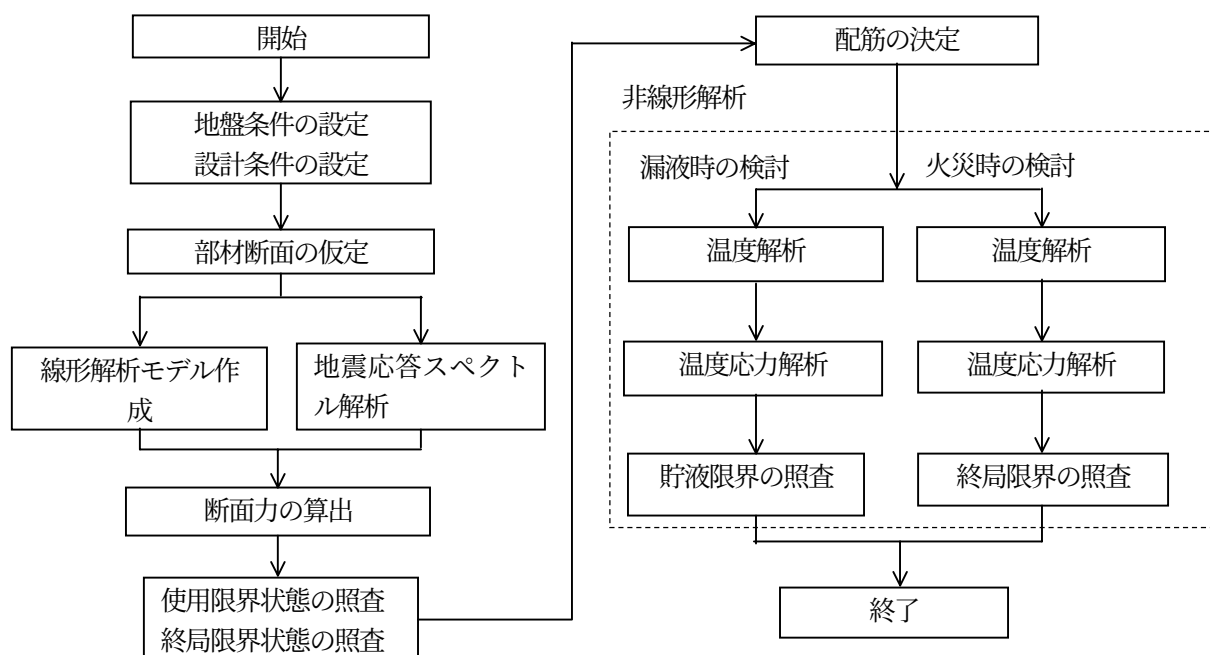


図-2 PCLNG タンクの設計フロー

表-2 組み合わせ荷重（施工時，試験時，通常運転時）

Operational loads and load combinations										
Loading conditions	Construction		Test		Cool down		Operation		Maintenance	
	wall	base	Wall	Base	wall	base	wall	base	Wall	base
Dead weight of concrete	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Dead weight of steel tank		X		X		X		X		X
Live load	(X)	X					X	X		X
Design pressure				X		X		X		X
Wind load	X		X		X		X		X	
Prestressing	X	(X)	X	(X)	X	(X)	X	(X)	X	(X)
Shrinkage	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Creep	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Temperature differential					(X)	X	(X)	X		
Key X, applicable; (X), not always applicable, or not required for adverse loading.										

表-3 組み合わせ荷重（異常時）

Emergency loads and load combinations									
Loading conditions	Leakage		Blast		Earthquake		Fire		
	wall	base	wall	Base	wall	base	wall	base	
Dead weight of concrete	X	X	X	X	X	X	X	X	
Dead weight of steel tank		X		X		X		X	
Live load									
Design pressure	X	X	X	X	X	X	X	X	
Wind load	X		(X)		(X)		X		
Prestressing	X	(X)	X	(X)	X	(X)	X	(X)	
Shrinkage	X	X	X	X	X	X	X	X	
Creep									
Temperature differential	X	X		X		X	X	X	
Leakage	X	X							
Blast			X	(X)					
Earthquake					X	X			
Fire							X		
Key X, applicable; (X), not always applicable, or not required for adverse loading.									

(4) 漏液時の検討

漏液時の検討は、内槽から全量の LNG が流出したと仮定して行われた。漏液時には、LNG 液圧、ガス圧及び温度荷重（-168℃）が作用する。

漏液時には、貯液限界状態として、①コンクリート断面内に圧縮領域を部材厚の 10%以上あるいは 80mm 以上確保する、②圧縮領域の平均圧縮応力が 1MPa 以上であることが要求される。さらに、セカンダリーバリアとの境界付近は、急激に温度が変化するため、局所的な引っ張り応力が発生する。この付近に大きなひび割れが発生すると、セカンダリーバリア背面に LNG が回り込む可能性があるため、クラック幅を 0.3mm 以下にするように規定されている。また、構造安定性の照査として鉄筋が降伏しないこと及びコンクリートが圧壊しないことが要求される。

このような問題を解くため、まず極低温状態での熱伝導解析を行う。その後、応力解析を温度応力、液圧及びガス圧等を考慮して実施する。解析は軸対称モデルを作成して行われ、躯体はソリッド要素で構成される。5m 付近は、急激な温度変化に対応するため、メッシュを非常に細かく分割した。また、コンクリートの引張剛性モデルは、コンクリートの引張ひずみがコンクリートの引張限界ひずみ（ ϵ_e ）に達した時点でひび割れが発生すると仮定し、 ϵ_e+10^{-3} 時点で、コンクリートの引張強度が引張限界応力の 25%、 ϵ_e+10^{-3} の時点でコンクリートの

引張強度が 0 となるように設定した（図-3 参照）。

本解析における応力解析の結果を図-4 に、熱伝導解析の結果を図-5 に示す。図-4 より、セカンダリーバリアより上のエリアでは、内面にひび割れ域が発生しているが、外面は圧縮状態となっており、80mm 以上の圧縮領域が確保されている。図-5 より、セカンダリーバリアより上方は、直接 LNG が触れるため、温度は、コンクリート表面で -168℃、内側鉄筋の位置でも約 -150℃と、極低温状態になっている。鉄筋は、低温になるにしたがって、降伏点及び引張強さは増加するが、靱性は低下す

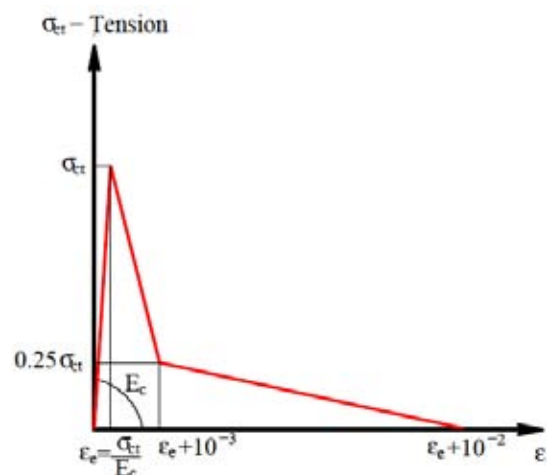


図-3 コンクリートの引張剛性モデル

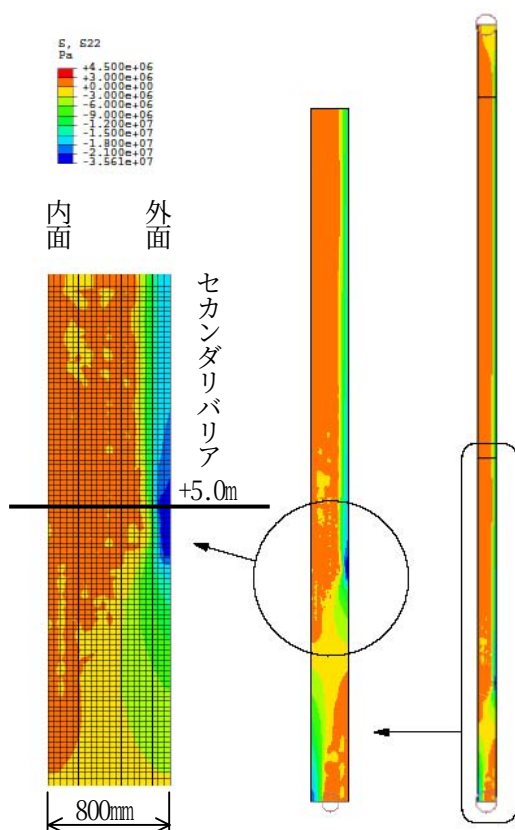


図-4 漏液時の PC 壁の応力発生状態（鉛直）

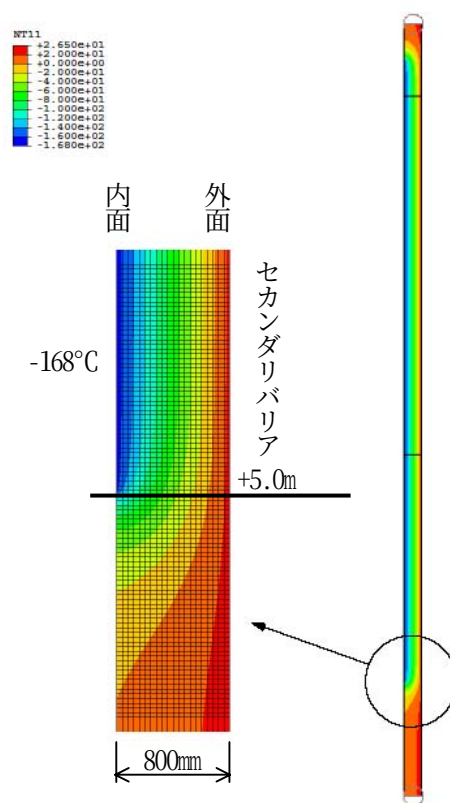


図-5 漏液時の PC 壁の温度分布

る。そのため、BS7777 では鉄筋の温度が -20°C 以下になる場合は、低温状態で規定された破断伸び、切欠き感受性比に適合する材料を用いる、あるいは鋼材の許容引張応力度を低減する、の何れかにすることが規定されている。本プロジェクトでは、極低温状態で、BS7777 の条件に適合する鉄筋を使用した。

(5) 火災時の検討

火災時は、①隣接タンクの炎上、②リリースバルブディスチャージの炎上、③LNG プールの炎上、を想定し、検討を行う。隣接タンク炎上時は $50\text{kw}/\text{m}^2$ の熱量が 5 時間にわたって作用することを想定した。このような条件下で引張鉄筋が降伏しないことが設計条件となる。漏液時の解析と同様、まず熱伝導解析を行うが、5 時間ではコンクリート内の温度が定常状態にならないため、非定常の解析を行った。また、材料非線形性に加えて、材料特性の温度依存性を考慮した。図-6 に鋼材の温度依存特性を示す。

継続時間 1～5 時間でのコンクリート内の温度分布を図-7 に、継続時間 5 時間でのコンクリートの応力状態を図-8 に示す。図-7 より継続時間 5 時間でコンクリート表面温度は 800°C 近くに達するが、40cm より内側は、温度変化はほとんどないことが分かる。引張鉄筋及び PC 鋼材の位置では、温度は 100°C 以下で、強度が低下するような温度には達していない。また、図-8 に示すとおり、PC 壁内面が引張りとなるが、鉄筋の応力は降伏応力以内であることを確認した。

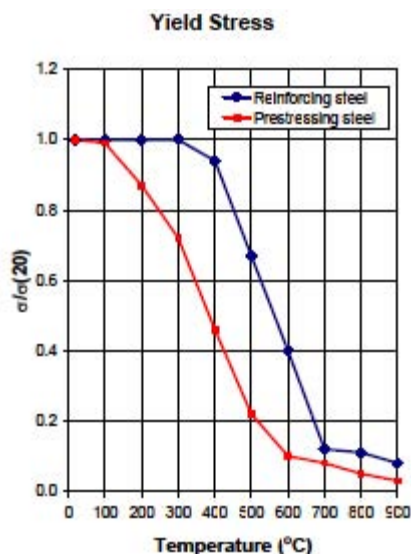


図-6 鋼材の温度依存特性（火災時）

4. PCLNGタンクの建設

(1) 土木工事と機械工事の取り合い

PCLNG タンクの建設は、土木工事と機械工事が並行で行われる。図-9 に土木工事と機械工事の施工手順および取り合い点を示す。海外工事は工期が厳しい場合が多く、土木工事と機械工事の取り合いを如何にスムーズに行うかが成功の鍵となる。各取り合い点における、土木側から機械側への引き渡し条件を明確にし、よく協議した上でスケジュールを構築する必要がある。

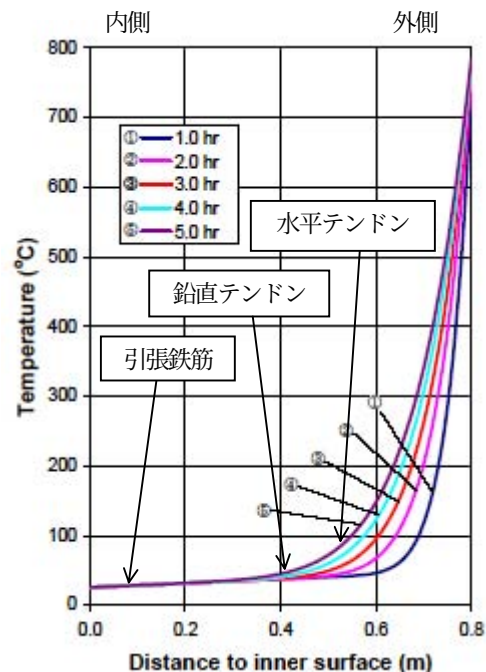


図-7 火災時の PC 壁断面の温度経時変化

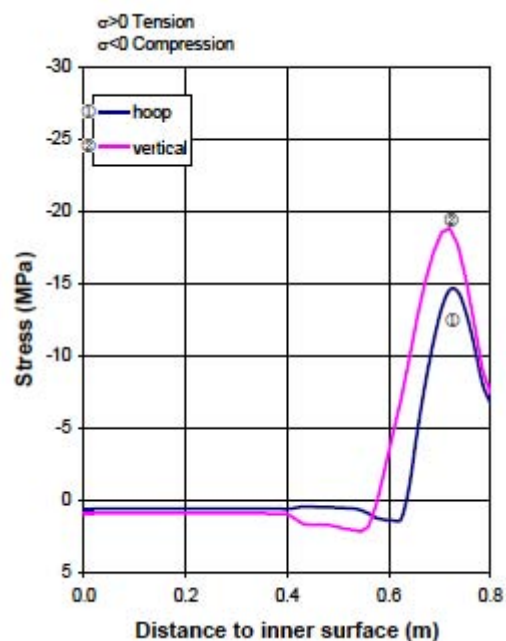


図-8 火災時の PC 壁の応力発生状態

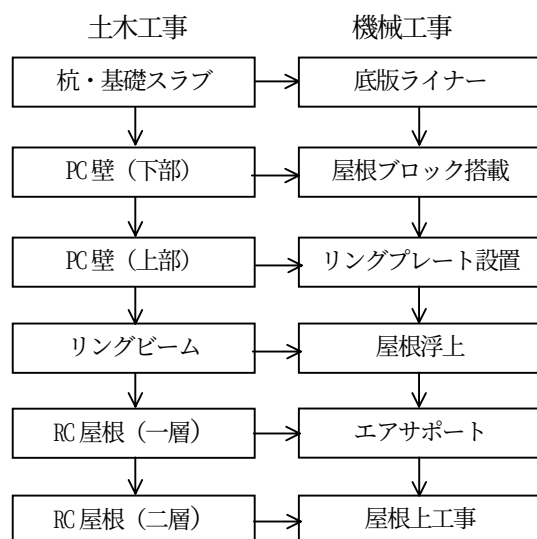


図-9 土木工事と機械工事の取り合い点

(2) 設計と施工の接点

PCLNG タンクでは、建設手法が、設計にも大きな影響をもたらす。例えば、RC 屋根のコンクリート打設は、鋼製屋根を型枠とし、空気圧をかけ行われるが、屋根コンクリートをどのように打設するかは、土木工事の施工性だけでなく、土木・機械側の設計と十分に協議して決定する必要がある。RC 屋根を 1 度に打設する事は、コンクリートの供給能力が十分な場合には可能であり、土木工事側としては作業がやりやすいが、コンクリート打設時に必要な空気圧が高くなり、機械側設計に影響を与える。2 層打ちの場合、空気圧は低く抑えることができ、機械側の設計は経済的になるが、土木工事側では、屋根 1 層目と 2 層目間の目粗しが必要となり、また土木設計側は、1 層目と 2 層目の一体化、コンクリート打設時期のずれによる乾燥収縮の相違、1 層目のコンクリートに残留する応力の取り扱いなど、慎重な検討を要する。その他にも、建設手法が設計に関係する問題は多数あり、計画段階で、品質・工期・経済性等を考慮して、建設手法を決定しなければならない。

(3) カタールにおける工事

海外工事では、材料費、労務費及び機材費の割合が地域によってまちまちであり、これらの事情により、工事計画も国内工事とは異なったものとなる。カタールでは作業員の未熟練度及び酷暑な気候条件が重なり作業効率が国内と比べ著しく低下する。また、労務単価が安く、機材が高いため、国内工事に比べ 3～4 倍の人員を配置し、労働時間も早朝や夕方など昼間の暑い時間帯を避けたシフトとした。

酷暑な気象条件は、コンクリート工事にも大きな影響を与える。外気温が 40℃～50℃にも達する条件の中、品質の良いコンクリートを、経済的かつ安全に打設することは、本工事の中で最も困難なことのひとつであった。本工事では、高強度が期待でき、密実性や耐久性に優れたシリカヒュームを用いたコンクリートを使用した。また、コンクリート打設後のひび割れ防止のため、コンクリートの打ち込み時の温度は 25℃以内とし、水養生を 2 週間行った。暑中 40 度以上の外気温の中で、打設時の温度を 25℃以内に抑えることは非常に困難で、コンクリートの製造から運搬まで、細心の注意が払われた。また、PC 壁のコンクリート打設は、鉛直目地を設けず、1 回打ちで行われ、頂部のコンクリート打設は、52m の自走式コンクリートポンプ車を 4 台使用し行った。

本工事は、2005 年 3 月時点で RC 屋根コンクリート打設が完了し、土木工事としては、開口部の閉鎖工事を残すのみとなった。水張試験時には、基礎の沈下を観測する予定となっている。

参考文献

- 1) British Standard (BS7777) : Flat Bottomed, Vertical, Cylindrical Storage Tanks for Low Temperature Service (1993.6)
- 2) EEMUA NO. 147 : Recommendation for the Design and Construction of Refrigerated Liquefied Gas Storage Tanks
- 3) British Standard (BS8110) : Structural Use of Concrete